

RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE



Première édition
2026-08

Appareils de protection respiratoire — Facteurs humains —

Échelle XRS™ :

Classification du confort respiratoire d'un masque à partir de la résistance respiratoire

Respiratory protective devices — Human factors —

XRS scale: Breathing comfort classification of a mask from breathing resistance

Numéro de référence
XRS 001:2026(F)

© XALPES LLC 2026

CONDITIONS DE DIFFUSION

© XALPES LLC 2026. Publié sous licence Creative Commons Attribution – Pas de Modification 4.0 International (CC BY-ND 4.0).

Chacun est libre de consulter, de citer, de reproduire et de redistribuer le présent document, intégralement et sans altération, sur tout support et pour tout usage, y compris commercial, à la condition d'en attribuer la paternité à XALPES LLC et d'en mentionner le numéro de référence et l'édition. La diffusion d'une version modifiée, abrégée, augmentée ou traduite n'est pas autorisée sans accord écrit : l'intégrité du référentiel conditionne la signification des niveaux qu'il définit. Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.fr.

XALPES™ et XRS™ sont des marques de XALPES LLC, revendiquées au titre de l'usage dans le commerce. Elles s'emploient exclusivement comme qualificatifs accompagnant un nom générique, selon les formes énoncées en 16.3. Leur usage pour désigner, qualifier, étiqueter ou commercialiser un produit est subordonné à une autorisation écrite de XALPES LLC. La citation du présent référentiel à des fins d'étude, d'enseignement ou de recherche est libre, sous réserve d'une attribution complète mentionnant le numéro de référence et l'édition.

Le présent document cite, à des fins de contrôle d'ingénierie et de comparaison, un nombre restreint de valeurs limites établies par des normes internationales. Ces valeurs sont des données factuelles, reprises avec l'indication systématique de leur source, converties dans une autre grandeur et exploitées à une fin distincte de celle du texte dont elles proviennent. Le présent document ne reproduit ni le texte, ni les tableaux, ni les figures de ces normes, ne s'y substitue en aucune manière et n'en dispense pas l'acquisition : les textes normatifs cités demeurent les seuls documents faisant foi, et le lecteur est invité à s'y reporter.

Le présent document est mis à disposition en l'état, sans garantie d'aucune sorte, expresse ou implicite. Il n'a pas de valeur réglementaire, n'atteste d'aucune conformité et ne dispense d'aucune obligation légale ou normative applicable aux équipements de protection respiratoire. Les durées respiratoires qu'il énonce sont des indications de conception issues d'une modélisation, non des prescriptions médicales ni des consignes de sécurité au travail. XALPES LLC ne saurait être tenue pour responsable des conséquences d'une décision prise sur le seul fondement du présent document.

XALPES LLC

Division Laboratoire d'Essais

File Number (Texas) : 0806424732

Siège : 5900 Balcones Drive, STE 100 — Austin, TX 79731, U.S.A.

Correspondance : 7710 N FM 620 BLDG 13-D — Austin, TX 78726, United States

Courriel : contact@xalpes.com · Site : xalpes.com · Échelle XRS : scalexrs.com

Publié aux États-Unis d'Amérique

Sommaire

	Avant-propos.....	iv
	Introduction.....	v
1	Domaine d'application.....	1
2	Références normatives et documents de référence.....	1
3	Termes et définitions.....	1
4	Symboles et abréviations.....	3
5	Nature et statut de l'échelle XRS.....	4
6	État de l'art : absence de référentiel de confort.....	6
7	Fondement physique : la résistance spécifique.....	8
8	Influence de la géométrie du masque.....	10
9	Construction de l'échelle à six niveaux.....	12
10	Tableaux d'usage par profil.....	14
11	Échelle physiologique dérivée : le travail respiratoire.....	16
12	Vérification de la cohérence interne.....	17
13	Conformité aux limites physiologiques normalisées.....	19
14	Protocole de validation expérimentale.....	22
15	Limites déclarées et conditions de réfutation.....	24
16	Gouvernance, révision, marques et diffusion.....	26
	Bibliographie.....	29

Avant-propos

XALPES LLC est une structure indépendante de recherche appliquée, de développement produit et de validation technique, établie à Austin, Texas. Le présent document a été élaboré par sa Division Laboratoire d'Essais, qui conduit les travaux de caractérisation de performance et de qualification des médias et assemblages filtrants.

L'attention est attirée sur le fait que le présent document n'est pas une norme. Il n'émane d'aucun organisme national ou international de normalisation, ne relève d'aucun processus de consensus formel et n'a aucune valeur réglementaire. Il constitue un référentiel technique propriétaire, publié sous la seule responsabilité de XALPES LLC, et adoptant les conventions de présentation des normes internationales dans le seul but d'en faciliter la lecture, la citation et la confrontation par des tiers.

Le présent document ne se substitue à aucune norme existante et n'en modifie l'application en rien. Il traite d'une grandeur — le confort respiratoire — que les référentiels normatifs actuels ne graduent pas, et il le fait en s'appuyant explicitement sur les valeurs que ces référentiels établissent. L'article 6 expose en détail le rapport du présent document à l'état de l'art normatif.

L'attention est également attirée sur le fait que certains éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle. XALPES LLC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

Cette première édition constitue la version d'établissement du référentiel. Elle est complète quant à la construction de l'échelle, à son fondement physique et à sa vérification documentaire, mais la validation expérimentale sur panel humain décrite à l'article 14 reste à conduire. Les critères de réussite et les conditions de réfutation de cette validation sont énoncés à l'avance, respectivement aux articles 14 et 15.

Une liste des documents cités figure dans la Bibliographie.

La présente édition est publiée ouvertement et appelle explicitement la critique. XALPES LLC sollicite les commentaires de toute personne compétente sur la position des seuils, sur les hypothèses du modèle, sur les valeurs estimées signalées comme telles et sur le protocole de validation. Un référentiel dont les critères de réfutation sont énoncés à l'avance n'a rien à gagner à la discrétion : il gagne à être examiné.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information, toute contestation d'un seuil ou toute proposition de donnée nouvelle à XALPES LLC, à l'adresse contact@xalpes.com.

Introduction

Un masque de protection respiratoire est conçu pour arrêter des particules ou des gaz. Cette fonction impose nécessairement une résistance au passage de l'air, que le porteur doit vaincre à chaque inspiration et à chaque expiration. La conception d'un masque est donc, dans son principe même, un arbitrage entre une performance de filtration et une contrainte imposée à la respiration.

Les référentiels normatifs internationaux encadrent rigoureusement le premier terme de cet arbitrage. Ils classent les masques par leur efficacité de filtration, et ils bornent la résistance respiratoire par des plafonds attachés à chaque classe. Ces plafonds sont des garde-fous : ils délimitent ce qui est physiologiquement tolérable, non ce qui est confortable.

Le second terme de l'arbitrage n'est donc pas gradué. Aucun référentiel ne permet aujourd'hui de dire qu'un masque est plus confortable qu'un autre, ni pendant combien de temps il peut être porté sans gêne. Cette absence a deux conséquences. Pour le concepteur, elle prive l'arbitrage de tout critère chiffré du côté du confort. Pour l'utilisateur final, elle laisse sans réponse la question qu'il se pose réellement, qui n'est pas celle de la classe de filtration mais celle de la durée de port supportable.

Le présent document comble cet écart. Il établit une échelle à six niveaux, dite échelle XRS™, qui traduit une grandeur physique mesurable sur banc — la résistance spécifique, définie en 3.1 — en une qualification de confort et en une endurance respiratoire. Chacun des six seuils est ancré sur un repère extérieur mesuré ou publié ; aucun n'est fixé par convention.

L'échelle XRS ne classe pas la protection et ne présume d'aucune performance de filtration. Les deux dimensions sont indépendantes et doivent être déclarées séparément.

1 Domaine d'application

Le présent document établit une échelle de classification du confort respiratoire d'un masque de protection respiratoire, fondée sur la résistance que celui-ci oppose au passage de l'air. Il définit six niveaux, notés X1 à X6, associant chacun un intervalle de résistance spécifique, une qualification du confort et une endurance respiratoire exprimée en durée et en contexte de port.

Le présent document décrit la grandeur retenue, établit sa stabilité vis-à-vis du débit, expose l'influence de la géométrie du masque sur cette grandeur, justifie chacun des six seuils, fournit les tableaux d'application correspondant à quatre profils d'usage, et rend compte du contrôle de conformité de l'échelle aux limites physiologiques normalisées.

Le présent document est applicable aux masques et demi-masques filtrants à ventilation libre, sans assistance motorisée. Il s'applique à l'appareil seul, dans l'état de référence défini en 3.10, tel que caractérisé sur banc à débit contrôlé.

Le présent document ne s'applique pas aux appareils de protection respiratoire isolants, aux appareils à ventilation assistée, aux appareils à circuit fermé ni aux appareils de plongée.

NOTE Le présent document ne classe pas l'efficacité de filtration, ne se substitue à aucune norme de protection respiratoire et n'autorise aucun usage réglementé. Un masque conforme à une classe de filtration donnée le reste indépendamment de son niveau XRS ; inversement, un niveau XRS favorable ne présume d'aucune performance de filtration.

2 Références normatives et documents de référence

Le présent document ne comporte aucune référence normative au sens strict, en ce qu'aucune disposition d'un autre document n'y est rendue obligatoire par renvoi. Les documents énumérés ci-après sont cités dans le texte comme sources de valeurs mesurées, de méthodes d'essai ou de limites physiologiques ; leur édition complète figure dans la Bibliographie.

Document	Rôle dans le présent référentiel
EN 149	Plafonds de résistance inspiratoire et expiratoire par classe de filtration. Source des repères de conversion de 7.2 et de la justification des seuils supérieurs en 9.3.
ASTM F3502	Deux paliers de respirabilité, convertis en résistance spécifique en 12.1.
NIOSH 42 CFR Part 84	Plafonds d'homologation en inspiration et en expiration, convertis en résistance spécifique en 12.1.
ISO 16900-12	Méthode de détermination du travail respiratoire moyenné en volume et des pressions de crête. Définition de la grandeur employée à l'article 11.
ISO 16976-1	Régimes de travail et ventilations minute de référence. Rattachement des profils d'usage en 13.3.
ISO 16976-4	Limites physiologiques de travail respiratoire, de pression de pointe et d'élastance. Source du contrôle de conformité de l'article 13.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

résistance spécifique

R_s

rapport de la perte de charge mesurée à travers un masque au débit d'air qui la produit

Note 1 à l'article : La résistance spécifique est exprimée en pascals par litre-seconde, $\text{Pa}/(\text{Ls}^{-1})$.

Note 2 à l'article : Cette grandeur est l'unique variable d'entrée de l'échelle XRS. Sa quasi-invariance vis-à-vis du débit est établie en 7.3.

3.2

perte de charge

Δp

différence de pression entre les deux faces d'un masque traversé par un débit d'air donné

Note 1 à l'article : La perte de charge est exprimée en pascals. Elle n'a pas de signification hors de la mention du débit auquel elle a été mesurée.

3.3

débit de banc

$\dot{Q}$

débit d'air constant appliqué à l'échantillon lors de l'essai de perte de charge

Note 1 à l'article : Le débit de banc est exprimé en litres par minute lors de la déclaration et en litres par seconde dans les calculs.

Note 2 à l'article : La correspondance entre débit de banc et ventilation minute physiologique est établie en 7.4.

3.4

niveau XRS

classe de confort attribuée à un masque en fonction de l'intervalle de résistance spécifique dans lequel se situe sa valeur mesurée

Note 1 à l'article : Les niveaux sont notés X1 à X6, du plus confortable au plus contraignant. Ils sont définis en 9.2.

3.5

seuil de détection de la résistance inspiratoire

valeur de résistance spécifique en deçà de laquelle une résistance ajoutée n'est pas perçue par le porteur

Note 1 à l'article : Ce seuil constitue l'ancrage psychophysique de l'échelle. Il est établi par la littérature entre 58,8 et 74,5 $\text{Pa}/(\text{Ls}^{-1})$; voir 9.1.

3.6

facteur de forme

φ

rapport d'une surface filtrante de référence à la surface filtrante développée du masque considéré

Note 1 à l'article : Le facteur de forme est sans dimension. Il exprime l'effet de la géométrie du masque sur sa résistance spécifique ; voir 8.2.

3.7

profil d'usage

situation physiologique de référence, caractérisée par un débit de banc et la ventilation minute correspondante, à laquelle est rapportée la lecture de l'échelle

Note 1 à l'article : Quatre profils sont définis, notés P1 à P4 ; voir l'article 10.

3.8

travail respiratoire par volume courant

W_{oB}/V_T

travail respiratoire d'un cycle complet rapporté au volume courant

Note 1 à l'article : Le travail respiratoire par volume courant est exprimé en joules par litre, unité identique au kilopascal : $1 \text{ J/L} = 1 \text{ kPa}$.

Note 2 à l'article : Cette grandeur constitue l'échelle physiologique dérivée de l'article 11.

3.9

vitesse de passage

u

rapport du débit d'air à la surface filtrante utile traversée

Note 1 à l'article : La vitesse de passage est exprimée en centimètres par seconde. Elle gouverne la perte de charge du média ; voir 8.1.

3.10

état de référence

état d'un appareil de protection respiratoire neuf, non porté, extrait de son emballage d'origine pour les besoins de l'essai et conditionné conformément à la procédure d'essai

Note 1 à l'article : La résistance spécifique, et le niveau XRS qui en découle, sont déterminés exclusivement dans cet état. Le niveau caractérise l'appareil tel qu'il est mis sur le marché, et non tel qu'il se comporte après une durée d'emploi quelconque ; voir 15.1.

Note 2 à l'article : Un appareil déballé de longue date, porté même brièvement, ou dont l'emballage a été rompu avant l'essai, ne se trouve plus dans l'état de référence et ne peut fonder l'attribution d'un niveau.

3.11

endurance respiratoire

durée de port, exprimée par classe d'amplitude, que la seule résistance respiratoire de l'appareil permet d'envisager, dans l'état de référence et indépendamment de tout autre facteur limitant

Note 1 à l'article : L'endurance respiratoire est l'une des trois données associées à chaque niveau XRS au Tableau 7. Elle énonce ce que la résistance permet, non ce que le produit autorise : la durée de port effective est le minimum de plusieurs plafonds indépendants, au premier rang desquels les instructions du fabricant ; voir 15.1.

4 Symboles et abréviations

Symbole	Désignation	Unité
Rs	Résistance spécifique	$\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$
Δp	Perte de charge	Pa
$\dot{Q}$	Débit de banc, débit inspiratoire	L/min ou L/s
$\dot{Q}_{\text{crête}}$	Débit inspiratoire de pointe	L/s
$\dot{V}_E$	Ventilation minute	L/min
V_T	Volume courant	L
A	Surface filtrante développée	cm^2
A_{réf}	Surface filtrante de référence, 236 cm^2	cm^2
u	Vitesse de passage	cm/s
φ	Facteur de forme	sans dimension

Symbole	Désignation	Unité
WoB	Travail respiratoire	J
WoB/VT	Travail respiratoire par volume courant	J/L, soit kPa
X1 à X6	Niveaux de l'échelle XRS	sans dimension
P1 à P4	Profils d'usage	sans dimension

5 Nature et statut de l'échelle XRS

5.1 Nature heuristique

L'échelle XRS est une heuristique, c'est-à-dire une règle de décision délibérément simplifiée, qui accepte de perdre en exhaustivité ce qu'elle gagne en utilisabilité. Elle prend un phénomène complexe et multifactoriel, en isole la variable qui explique l'essentiel de la variance observée, et produit à partir d'elle un verdict immédiatement exploitable.

En ingénierie, une heuristique se juge sur un seul critère : produit-elle, dans son domaine de validité déclaré, des décisions équivalentes à celles qu'aurait produites l'analyse complète, pour une fraction du coût ? Si oui, elle est bonne ; si non, elle est fausse ou son domaine est mal borné.

Une heuristique n'est pas une loi physique : elle n'est pas censée être vraie partout et toujours. Elle n'est pas une norme : elle n'a pas d'autorité réglementaire et n'engage aucune conformité. Elle n'est pas non plus une opinion : elle est chiffrée, reproductible et vérifiable par un tiers. Elle se situe exactement entre les deux, et c'est cette position intermédiaire qui en fait un outil de conception.

5.2 Niveau de preuve revendiqué

Une heuristique ne peut pas être démontrée parfaite, et une heuristique qui prétendrait l'être cesserait par là même d'être une heuristique : si elle était exacte en toute circonstance, elle serait une loi et n'aurait plus besoin d'être simplifiée. Revendiquer la perfection n'ajouterait rien à la solidité du présent référentiel et l'exposerait à une réfutation immédiate par le premier contre-exemple venu.

Le niveau de preuve le plus élevé qu'une heuristique puisse atteindre repose sur les cinq propriétés énoncées au Tableau 1, vérifiables une à une par un tiers. Le présent document les établit et indique où.

Tableau 1 — Propriétés établissant le niveau de preuve de l'échelle XRS

Propriété	Exigence	Article où elle est établie
Traçabilité	Chaque seuil renvoie à un repère extérieur mesuré ou publié, et non à un choix d'auteur.	Articles 7 et 9 ; vérification à l'article 12.
Reproductibilité	Un tiers disposant du même banc d'essai retrouve le même classement, sans interprétation.	Article 7 pour la grandeur et la méthode ; article 11.
Cohérence interne	Les repères extérieurs, replacés dans l'échelle, s'y ordonnent sans inversion ni chevauchement.	Article 12 — quinze repères indépendants.
Conformité externe	L'échelle, confrontée à des limites physiologiques établies	Article 13 — contrôle et convergence indépendante.

Propriété	Exigence	Article où elle est établie
	indépendamment d'elle, s'y révèle compatible.	
Falsifiabilité	Le document énonce à l'avance ce qui, mesuré, invaliderait l'échelle.	Articles 14 et 15.

Position de XALPES LLC

L'échelle XRS est présentée comme entièrement traçable, reproductible, cohérente, conforme aux limites physiologiques normalisées et falsifiable — le maximum démontrable pour un outil de cette nature. Elle n'est pas présentée comme parfaite, et l'article 15 énonce explicitement les conditions dans lesquelles elle devra être corrigée. C'est cette réfutabilité assumée qui rend le référentiel défendable devant un expert, et non l'inverse.

6 État de l'art : absence de référentiel de confort

La question de l'existence d'un référentiel antérieur a été instruite avant toute construction. Il existe une base solide pour mesurer la résistance respiratoire, et aucune pour en déduire un niveau de confort. C'est cet écart qui justifie l'existence du présent document.

6.1 Ce qui est normalisé : la mesure, au service de la protection

Plusieurs référentiels internationaux fixent des valeurs de résistance respiratoire. Tous, sans exception, les utilisent comme garde-fous physiologiques attachés à une classe de protection : la résistance y est un plafond à ne pas dépasser, jamais une grandeur graduée.

Tableau 2 — Traitement de la résistance respiratoire dans les référentiels existants

Référentiel	Valeurs fixées	Débit d'essai	Finalité déclarée
EN 149	Inspiration : 60 / 70 / 100 Pa selon la classe. À débit élevé : 210 / 240 / 300 Pa. Expiration : 300 Pa.	30 L/min et 95 L/min ; 160 L/min en expiration	Plafonds attachés aux trois classes de filtration
ASTM F3502	Niveau 1 : ≤ 15 mm H ₂ O (147 Pa). Niveau 2 : ≤ 5 mm H ₂ O (49 Pa).	85 L/min	Deux paliers de respirabilité, couplés à la filtration
NIOSH 42 CFR 84	Inspiration ≤ 35 mm H ₂ O (343 Pa). Expiration ≤ 25 mm H ₂ O (245 Pa).	85 L/min, débit constant	Plafond unique d'homologation
ISO 16900-12	Méthode de détermination du travail respiratoire moyenné en volume et des pressions de crête.	Huit classes de ventilation minute, de 10 à 135 L/min	Méthode d'essai, sans seuil de confort
ISO 16976-4	WoB/VT $\leq 0,9$ kPa à l'inspiration comme à l'expiration et pression de pointe $\leq 1,2$ kPa jusqu'à 105 L/min ; 1,6 et 2,0 kPa à 135 L/min. Élastance $\leq 1,0$ kPa/L.	Les huit classes de ventilation minute	Limites de tolérance physiologique

ASTM F3502 est le texte qui s'approche le plus d'une graduation, avec ses deux niveaux de respirabilité. Mais ces deux niveaux restent solidaires d'exigences de filtration, ne se prononcent pas sur la durée de port supportable, et deux paliers ne constituent pas une échelle exploitable en conception.

ISO 16976-4 mérite une mention particulière, car c'est le seul référentiel dont les limites soient explicitement physiologiques et non attachées à une classe de protection. Il ne gradue pourtant pas davantage : ses limites sont construites sur trois critères, qui sont la réduction insuffisante de la ventilation minute, la réduction insuffisante de l'endurance à l'effort et l'évitement de la détresse respiratoire chez quatre-vingts à quatre-vingt-dix pour cent des sujets étudiés. La norme délimite donc le point de rupture, non la gradation du confort qui y mène. Elle constitue en revanche un instrument de contrôle de premier ordre, auquel l'article 13 est consacré.

6.2 Ce qui est publié : un lien réel mais non gradué

La littérature expérimentale confirme l'existence du lien entre résistance et ressenti, et fournit des repères chiffrés d'une grande valeur. Elle ne va jamais jusqu'au barème.

- Une étude en laboratoire a comparé trois prototypes de résistances respectives 29,4 Pa, 58,8 Pa et 88,2 Pa mesurées à 85 L/min, portés une heure sur tapis roulant par dix sujets. Aucune différence significative n'a été relevée, ni sur l'échelle de Borg, ni sur le confort thermique, ni sur l'effort inspiratoire ou expiratoire

perçu. Les auteurs concluent qu'abaisser la résistance en dessous de 88,2 Pa n'apporte plus de bénéfice mesurable au porteur [8][9].

- Les mêmes auteurs rapportent le résultat le plus utile de la littérature consultée : le seuil de détection de la résistance inspiratoire ajoutée se situe entre 58,8 et 74,5 Pa par litre-seconde. En deçà, une résistance supplémentaire n'est pas perçue ; au-delà, elle le devient [8].
- Une campagne de mesures sur les masques les plus vendus donne l'ordre de grandeur du parc réel : 6,1 mm H₂O pour un N95, une plage de 3,7 à 10,3 mm H₂O pour les équivalents KN95, et de 2,3 à 9,8 mm H₂O pour les masques en tissu, dont la filtration comprise entre 11 % et 33 % les disqualifie par ailleurs. Les auteurs relèvent que confort et protection y varient en sens inverse [12].
- Une comparaison méthodologique entre le travail respiratoire au sens ISO et la résistance au sens NIOSH établit un coefficient de corrélation de 0,7 à 0,9 au régime de travail le plus bas, correspondant à une allure de marche courante. Ce résultat autorise à construire une échelle sur la perte de charge, plus simple à mesurer, sans perdre le contenu physiologique du travail respiratoire [11].

6.3 Ce qui manque

Aucune norme et aucune publication ne propose une échelle graduée de confort dérivée de la résistance respiratoire, ni une correspondance entre un niveau de résistance et une durée de port supportable. Les normes plafonnent, la littérature corrèle, mais personne ne gradue.

Trois manques précis peuvent être formulés. Il n'existe pas de grandeur invariante permettant de comparer entre eux des masques mesurés à des débits différents. Il n'existe pas de barème reliant un niveau de résistance à un usage. Et la géométrie du masque, dont l'article 8 montre qu'elle détermine largement la résistance, n'est prise en compte dans aucun de ces référentiels.

L'échelle XRS ne procède donc pas ex nihilo : chacun de ses six seuils est ancré sur un repère mesuré ou publié, l'article 12 vérifie que quinze repères extérieurs indépendants s'ordonnent correctement dans l'échelle obtenue, et l'article 13 la confronte aux limites physiologiques normalisées.

7 Fondement physique : la résistance spécifique

7.1 Insuffisance de la perte de charge seule

Une perte de charge exprimée en pascals n'a aucune signification isolée : elle dépend entièrement du débit auquel elle a été mesurée. Un masque à 70 Pa mesuré au repos et un masque à 70 Pa mesuré à l'effort n'ont pas la même respirabilité. C'est la raison pour laquelle les référentiels existants, qui fixent chacun leur propre débit d'essai, ne sont pas directement comparables entre eux.

7.2 Grandeur retenue

L'échelle XRS n'est pas construite sur la perte de charge, mais sur la résistance spécifique définie en 3.1, obtenue en divisant la perte de charge par le débit qui l'a produite.

Grandeur de référence de l'échelle XRS

$$R_s = \Delta p / \dot{Q}$$

où Δp est la perte de charge mesurée en pascals et $\dot{Q}$ le débit d'essai exprimé en litres par seconde. Le résultat s'exprime en pascals par litre-seconde, $\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$. Cette grandeur est l'unique variable d'entrée de l'échelle.

Ce choix a une conséquence décisive : puisque R_s ne dépend pas du débit, une seule échelle à six niveaux suffit à engendrer les quatre tableaux d'usage de l'article 10. Ces tableaux ne sont pas quatre échelles distinctes, mais quatre lectures de la même échelle à quatre débits différents.

7.3 Démonstration de la quasi-invariance

La physique prédit la stabilité de R_s : dans un média fibreux traversé à faible vitesse, l'écoulement est visqueux et la perte de charge croît proportionnellement à la vitesse ; la proportionnalité rend R_s constant.

Cette prédiction se vérifie sur les valeurs normatives elles-mêmes, qui fournissent, pour trois classes de filtration, la perte de charge admissible à deux débits distincts.

Tableau 3 — Vérification de la quasi-invariance de R_s sur les valeurs normatives

Classe	Δp à 30 L/min	R_s correspondante	Δp à 95 L/min	R_s correspondante
Classe 1	60 Pa	120,0 $\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	210 Pa	132,6 $\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$
Classe 2	70 Pa	140,0 $\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	240 Pa	151,6 $\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$
Classe 3	100 Pa	200,0 $\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	300 Pa	189,5 $\text{Pa}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$

Le débit est multiplié par 3,17 entre les deux colonnes. La résistance spécifique ne varie que de +10,5 %, +8,3 % et -5,3 % selon la classe. L'invariance est donc vérifiée à mieux que ± 11 % sur toute la plage d'usage, ce qui est largement suffisant pour une échelle dont les paliers sont espacés de 30 à 60 unités.

Incertitude déclarée

Le présent référentiel retient une bande d'incertitude de ± 12 % sur R_s pour tenir compte de la légère non-linéarité de l'écoulement à haut débit. Une mesure tombant à moins de 12 % d'une frontière de niveau est consignée comme située dans la bande de chevauchement des deux niveaux ; ce chevauchement est rapporté dans le rapport d'essai, où il exprime honnêtement la résolution de l'échelle. Le niveau attribué à l'appareil est alors le plus élevé des deux en valeur de R_s , c'est-à-dire le moins favorable en confort. Un appareil ne porte qu'un

seul niveau, et cette règle ne peut jamais conduire à annoncer un confort supérieur à celui qui a été mesuré. Elle fait partie intégrante de l'échelle : elle en borne la résolution sans la dissimuler.

7.4 Correspondance entre débit de banc et ventilation minute

Un banc d'essai mesure à débit constant, alors qu'une respiration réelle est cyclique. Pour un débit sinusoïdal, le débit de crête vaut π fois la ventilation minute. Appliquée aux quatre débits retenus, cette relation produit la correspondance du Tableau 4.

Tableau 4 — Correspondance entre débit de banc et situation physiologique

Débit de banc	Ventilation minute équivalente	Situation physiologique	Profil
30 L/min	≈ 10 L/min	Repos, position assise	P1
60 L/min	≈ 19 L/min	Activité légère à modérée	P2
95 L/min	≈ 30 L/min	Effort professionnel soutenu	P3
140 L/min	≈ 45 L/min	Effort intense, sportif	P4

Les deux débits d'essai normatifs les plus répandus, 30 et 95 L/min, correspondent ainsi exactement au repos et à l'effort soutenu. Les profils d'usage du présent référentiel prolongent donc, vers le bas et vers le haut, une grille implicite déjà présente dans les référentiels existants.

8 Influence de la géométrie du masque

8.1 Vitesse de passage

La forme du masque n'est pas un paramètre d'ergonomie secondaire : c'est un déterminant de premier ordre de la résistance respiratoire. Ce qui traverse le média filtrant n'est pas un débit mais une vitesse — la vitesse de passage définie en 3.9, obtenue en divisant le débit par la surface filtrante offerte à l'air.

Relation fondamentale

$$u = \dot{Q} / A$$

où u est la vitesse de passage à travers le média, $\dot{Q}$ le débit inspiratoire et A la surface filtrante utile. Comme la perte de charge d'un média fibreux croît proportionnellement à la vitesse de passage, doubler la surface filtrante divise la résistance par deux, à média strictement identique.

Deux masques taillés dans le même média, dotés de la même efficacité de filtration, peuvent donc présenter des résistances dans un rapport de un à trois selon leur seule géométrie. Un masque plat trois plis, dont la surface développée est contrainte par la découpe, offre une surface bien plus faible qu'un bec de canard, lequel exploite son volume pour déployer davantage de média. Une forme dite bateau, ou fish type, se situe entre les deux, tandis qu'une construction plissée à grande surface les dépasse toutes.

La littérature fournit une mesure directe de cet effet : à 85 L/min, un masque bec de canard du commerce de 236 cm² de surface filtrante impose une vitesse de passage de 6,0 cm/s, alors qu'une conception plissée de 415 cm² — soit 76 % de surface supplémentaire — la ramène à 3,4 cm/s, à performance de filtration comparable [14].

8.2 Facteur de forme

Le présent référentiel intègre cet effet sous la forme d'un coefficient multiplicatif appliqué à la résistance du média seul, ce qui permet d'estimer la résistance d'un masque fini dès la conception, avant tout prototypage.

Facteur de forme

$$\phi = A_{\text{réf}} / A$$

avec $A_{\text{réf}} = 236 \text{ cm}^2$, surface du bec de canard de référence mesurée dans la littérature, et A la surface développée du masque considéré. La résistance du masque fini s'estime alors par $R_s \approx \phi \times R_{s\text{-référence}}$: un ϕ supérieur à 1 dégrade la respirabilité, un ϕ inférieur à 1 l'améliore.

Tableau 5 — Facteur de forme par géométrie

Géométrie	Surface A	Facteur ϕ	Statut de la valeur
Plat trois plis	$\approx 150 \text{ cm}^2$	1,57	Estimation XALPES, à confirmer par mesure
Coque moulée rigide	$\approx 180 \text{ cm}^2$	1,31	Estimation XALPES, à confirmer par mesure
Bec de canard (duckbill)	236 cm ²	1,00	Valeur mesurée publiée — référence de l'échelle
Fish type / bateau plié	$\approx 300 \text{ cm}^2$	0,79	Estimation XALPES, à confirmer par mesure
Plissé grande surface	415 cm ²	0,57	Valeur mesurée publiée

NOTE La distinction entre valeurs mesurées et estimations est portée explicitement au Tableau 5. Les trois estimations constituent la première tâche du programme de mesure décrit en 14.2 : elles doivent être remplacées par des surfaces développées relevées sur pièces réelles avant que le facteur de forme soit utilisé en spécification contractuelle.

8.3 Vitesse de passage par géométrie et par profil

Le Tableau 6 donne la vitesse de passage en centimètres par seconde pour chaque combinaison de géométrie et de profil d'usage. Il permet de repérer les configurations problématiques : au-delà d'environ 10 cm/s, la perte de charge cesse d'être linéaire et la respirabilité se dégrade plus vite que ne le prévoit le modèle.

Tableau 6 — Vitesse de passage u , en cm/s

Géométrie	P1 · 30 L/min	P2 · 60 L/min	P3 · 95 L/min	P4 · 140 L/min
Plat trois plis (150 cm ²)	3,33	6,67	10,56	15,56
Coque moulée (180 cm ²)	2,78	5,56	8,80	12,96
Bec de canard (236 cm ²)	2,12	4,24	6,71	9,89
Fish type (300 cm ²)	1,67	3,33	5,28	7,78
Plissé grande surface (415 cm ²)	1,20	2,41	3,82	5,62

La lecture est sans ambiguïté. Un masque plat trois plis franchit la limite de linéarité dès l'effort soutenu et devient franchement pénalisant à l'effort maximal. Un bec de canard tient jusqu'à l'effort soutenu. Seules les géométries à grande surface développée restent dans le domaine favorable sur l'ensemble de la plage d'usage. Cette conclusion oriente directement la conception : pour viser un niveau XRS élevé à l'effort, l'augmentation de la surface développée est un levier plus puissant que le choix du média.

9 Construction de l'échelle à six niveaux

9.1 Ancrage psychophysique

Le point d'appui central de l'échelle est le seuil de détection défini en 3.5, situé par la littérature entre 58,8 et 74,5 Pa par litre-seconde [8]. Ce seuil présente une propriété décisive : il est déjà exprimé en résistance spécifique, donc directement dans l'unité de l'échelle, sans aucune conversion.

Il fournit la frontière la plus importante de toute l'échelle, celle qui sépare ce qui n'est pas perçu de ce qui commence à l'être. Le présent référentiel place cette frontière à 60 Pa/(L.s⁻¹), c'est-à-dire à la borne basse de la bande mesurée, par prudence : mieux vaut annoncer une résistance comme perceptible un peu trop tôt que trop tard.

Un second ancrage borde l'échelle par le bas. La même littérature établit qu'en dessous de 88,2 Pa mesurés à 85 L/min — soit 62 Pa/(L.s⁻¹) — la réduction supplémentaire de résistance n'apporte plus de bénéfice subjectif ou physiologique mesurable. Ce résultat confirme la position de la frontière et signale qu'un effort de conception visant à descendre sous X2 relève de l'optimisation sans contrepartie perçue.

9.2 Échelle de référence

L'échelle complète est donnée au Tableau 7. Elle constitue le cœur du présent référentiel ; les quatre tableaux de l'article 10 en découlent intégralement par multiplication par le débit du profil considéré.

Tableau 7 — Échelle XRS : seuils, qualifications et endurance respiratoire

Niv.	Rs Pa/(L.s ⁻¹)	Qualification du confort	Endurance respiratoire
X1	≤ 30	Confort neutre — résistance non perceptible	SANS LIMITE — Port continu sans limite de durée, y compris pour les publics sensibles (enfants, personnes âgées, personnes à capacité respiratoire réduite) et pendant le sommeil.
X2	30 – 60	Confort élevé — à la limite de la perception	TOUTE LA JOURNÉE — Port continu sur une journée entière sans pause imposée : bureau, école, commerce, transports, déplacements urbains.
X3	60 – 100	Confort courant — perceptible, sans gêne	PLUSIEURS HEURES — Port de plusieurs heures entrecoupé de pauses naturelles : travail actif debout, manutention légère, marche soutenue.
X4	100 – 140	Confort dégradé — effort respiratoire net	1 À 2 HEURES — Port par séquences de une à deux heures, suivies d'une pause de récupération. Réservé aux adultes en bonne santé.
X5	140 – 200	Confort contraint — gêne respiratoire installée	MOINS D'1 HEURE — Port par séquences courtes, inférieures à une heure, avec pauses obligatoires. Sujet entraîné, tâche encadrée.
X6	> 200	Confort critique — contrainte respiratoire majeure	20 À 30 MINUTES — Port bref et exceptionnel, de l'ordre de vingt à trente minutes. Aptitude médicale vérifiée et supervision requise. Inadapté au port prolongé et aux publics sensibles.

NOTE 1 La colonne d'endurance respiratoire est volontairement dépourvue de toute référence à une classe de protection. C'est une exigence de construction : le confort et la filtration sont deux dimensions indépendantes, et les mêler dans une même colonne reproduirait la confusion que le présent référentiel entend lever. Un masque peut être X2 et très filtrant, ou X5 et peu filtrant.

NOTE 2 La mention en capitales qui ouvre chaque ligne de la colonne d'endurance respiratoire est la forme courte normative de cette donnée. Elle est reprise mot pour mot, sans paraphrase, arrondi ni conversion, par tout document ou marquage qui fait état d'un niveau XRS, et toujours sous l'intitulé « endurance respiratoire » ; les conditions de cet emploi sont fixées en 16.3.4. Les mentions des niveaux X4 à X6 énoncent un plafond et ne peuvent que restreindre l'emploi. Celles des niveaux X1 à X3 énoncent une amplitude : elles n'ont de sens exact que sous leur intitulé, lequel énonce ce que la résistance permet et non ce que le produit autorise, et dans la limite d'emploi fixée par le fabricant ; voir 15.1.

9.3 Justification de chaque frontière

Tableau 8 — Origine de chaque frontière de l'échelle

Frontière	Valeur	Justification
X1 / X2	30	Moitié de la borne basse de détection. Marge de sécurité pour les publics dont le seuil de perception est abaissé : enfants, personnes âgées, capacité respiratoire réduite.
X2 / X3	60	Borne basse du seuil de détection mesuré (58,8 Pa/(Ls ⁻¹)), arrondie par prudence. Frontière entre l'imperceptible et le perceptible. C'est la frontière la mieux étayée de l'échelle.
X3 / X4	100	Sortie de la bande de détection (74,5 Pa/(Ls ⁻¹)) majorée de la marge d'incertitude, et voisinage du plafond de respirabilité le plus exigeant publié (103,8 Pa/(Ls ⁻¹)). Au-delà, la résistance n'est plus seulement perçue, elle est subie.
X4 / X5	140	Plafond de résistance admis pour la classe de filtration intermédiaire la plus répandue. Un masque à ce niveau est à la limite haute de ce que les référentiels tolèrent en usage courant.
X5 / X6	200	Plafond de la classe de filtration la plus élevée. Cette frontière reçoit une seconde justification, entièrement indépendante : traduites en résistance spécifique, les limites physiologiques normalisées imposent $R_s \leq 218$ par la pression de pointe et $R_s \leq 208$ par le travail respiratoire, au régime de travail soutenu le plus élevé. Voir l'article 13.
Au-delà de X6	242	Plafond absolu d'homologation le plus permissif recensé. Sert de borne de sécurité : au-delà, aucun usage n'est envisageable.

10 Tableaux d'usage par profil

Les quatre tableaux du présent article sont les instruments d'application de l'échelle. Chacun correspond à un profil d'usage caractérisé par son débit de banc et sa ventilation minute équivalente. Ils sont tous engendrés par l'échelle de référence du Tableau 7, multipliée par le débit du profil ; aucune valeur n'y est ajustée.

Mode d'emploi : choisir le profil correspondant à l'usage visé ; mesurer la perte de charge au débit indiqué ; lire le niveau, la qualification et l'endurance respiratoire. Si la mesure tombe à moins de 12 % d'une frontière, consigner le chevauchement et retenir le niveau le moins favorable, conformément à 7.3.

10.1 Profil P1 — Repos / sédentaire

Débit d'essai : 30 L/min · Ventilation minute équivalente : ≈ 10 L/min

Tableau 9 — Échelle XRS appliquée au profil P1

Niv.	R_s Pa/(L·s ⁻¹)	Δp mesurée (Pa)	WoB/VT (J/L)	Qualification du confort
X1	≤ 30	0 – 15	0,00 – 0,02	Confort neutre — résistance non perceptible
X2	30 – 60	15 – 30	0,02 – 0,05	Confort élevé — à la limite de la perception
X3	60 – 100	30 – 50	0,05 – 0,08	Confort courant — perceptible, sans gêne
X4	100 – 140	50 – 70	0,08 – 0,11	Confort dégradé — effort respiratoire net
X5	140 – 200	70 – 100	0,11 – 0,16	Confort contraint — gêne respiratoire installée
X6	> 200	> 100	$> 0,16$	Confort critique — contrainte respiratoire majeure

10.2 Profil P2 — Activité modérée

Débit d'essai : 60 L/min · Ventilation minute équivalente : ≈ 19 L/min

Tableau 10 — Échelle XRS appliquée au profil P2

Niv.	R_s Pa/(L·s ⁻¹)	Δp mesurée (Pa)	WoB/VT (J/L)	Qualification du confort
X1	≤ 30	0 – 30	0,00 – 0,05	Confort neutre — résistance non perceptible
X2	30 – 60	30 – 60	0,05 – 0,09	Confort élevé — à la limite de la perception
X3	60 – 100	60 – 100	0,09 – 0,16	Confort courant — perceptible, sans gêne
X4	100 – 140	100 – 140	0,16 – 0,22	Confort dégradé — effort respiratoire net
X5	140 – 200	140 – 200	0,22 – 0,31	Confort contraint — gêne respiratoire installée
X6	> 200	> 200	$> 0,31$	Confort critique — contrainte respiratoire majeure

10.3 Profil P3 — Effort soutenu

Débit d'essai : 95 L/min · Ventilation minute équivalente : ≈ 30 L/min

Tableau 11 — Échelle XRS appliquée au profil P3

Niv.	R_s Pa/(L·s ⁻¹)	Δp mesurée (Pa)	WoB/VT (J/L)	Qualification du confort
X1	≤ 30	0 – 48	0,00 – 0,07	Confort neutre — résistance non perceptible
X2	30 – 60	48 – 95	0,07 – 0,15	Confort élevé — à la limite de la perception
X3	60 – 100	95 – 158	0,15 – 0,25	Confort courant — perceptible, sans gêne
X4	100 – 140	158 – 222	0,25 – 0,35	Confort dégradé — effort respiratoire net
X5	140 – 200	222 – 317	0,35 – 0,50	Confort contraint — gêne respiratoire installée
X6	> 200	> 317	> 0,50	Confort critique — contrainte respiratoire majeure

10.4 Profil P4 — Effort maximal / sportif

Débit d'essai : 140 L/min · Ventilation minute équivalente : ≈ 45 L/min

Tableau 12 — Échelle XRS appliquée au profil P4

Niv.	R_s Pa/(L·s ⁻¹)	Δp mesurée (Pa)	WoB/VT (J/L)	Qualification du confort
X1	≤ 30	0 – 70	0,00 – 0,11	Confort neutre — résistance non perceptible
X2	30 – 60	70 – 140	0,11 – 0,22	Confort élevé — à la limite de la perception
X3	60 – 100	140 – 233	0,22 – 0,37	Confort courant — perceptible, sans gêne
X4	100 – 140	233 – 327	0,37 – 0,51	Confort dégradé — effort respiratoire net
X5	140 – 200	327 – 467	0,51 – 0,73	Confort contraint — gêne respiratoire installée
X6	> 200	> 467	> 0,73	Confort critique — contrainte respiratoire majeure

NOTE Un même masque conserve son niveau XRS quel que soit le profil, puisque R_s est invariante. Les colonnes Δp et WoB/VT changent d'un tableau à l'autre parce qu'elles décrivent ce que le porteur subit réellement dans la situation considérée, ce qui explique qu'un masque confortable au repos devienne pénible en marche rapide sans avoir changé de nature.

11 Échelle physiologique dérivée : le travail respiratoire

11.1 Justification de la seconde échelle

La perte de charge décrit une contrainte instantanée. Le travail respiratoire décrit une dépense énergétique cumulée, et c'est cette dépense, plus que la pression de pointe, qui détermine la fatigue au bout d'une heure de port. C'est donc la grandeur la plus proche du ressenti réel.

Le travail respiratoire par volume courant, défini en 3.8, est l'aire du cycle pression-volume divisée par le volume courant. Il s'exprime en kilopascals dans la méthode normalisée [5], unité dimensionnellement identique au joule par litre. Le présent référentiel retient le joule par litre, plus parlant physiologiquement, et bascule en kilopascals à l'article 13 pour la comparaison directe aux limites normalisées.

11.2 Dérivation des valeurs

Les valeurs de travail respiratoire portées aux tableaux de l'article 10 ne sont pas mesurées : elles sont calculées à partir de R_s , sous trois hypothèses explicites. Le débit respiratoire est supposé sinusoïdal, la charge purement résistive, et la résistance identique à l'inspiration et à l'expiration.

Relation retenue

$$\text{WoB}/V_T = R_s \times \dot{Q}_{\text{crête}} \times \pi / 2$$

pour un cycle complet, avec $\dot{Q}_{\text{crête}}$ le débit inspiratoire de pointe du profil considéré. Le résultat, obtenu en pascals, est divisé par mille pour être exprimé en joules par litre.

NOTE L'hypothèse de symétrie inspiration-expiration est vérifiée pour un masque sans soupape et fautive pour un masque à soupape, dont la résistance expiratoire est très abaissée. Pour ces derniers, la valeur calculée surestime le travail réel et doit être considérée comme un majorant.

11.3 Portée et limites

Cette seconde échelle rend visible un phénomène que la perte de charge seule masque. Un masque classé X3 impose 0,05 à 0,08 J/L au repos, mais 0,22 à 0,37 J/L à l'effort maximal, soit un travail respiratoire multiplié par plus de quatre pour une résistance rigoureusement identique. La dégradation du confort avec l'effort n'est donc pas linéaire, elle est quadratique en débit : c'est l'explication physique du fait qu'un masque acceptable au repos devienne rapidement pénible à l'effort.

Ces valeurs restent des estimations analytiques. Elles ne se substituent pas à une mesure au simulateur respiratoire, qui seule permet de tenir compte de la forme réelle du cycle, du volume mort et de l'asymétrie inspiration-expiration. Le programme de validation de 14.2 prévoit leur confrontation à la mesure.

Rôle de la seconde échelle dans le dispositif de preuve

C'est elle qui rend l'échelle contrôlable de l'extérieur. Les limites physiologiques normalisées sont exprimées en travail respiratoire par volume courant et en pression de pointe, non en résistance. Sans la conversion établie au présent article, aucune confrontation de l'échelle XRS à ces limites ne serait possible. L'article 13 en tire l'un des résultats les plus importants du présent document.

12 Vérification de la cohérence interne

Une échelle construite sur quelques ancrages pourrait n'être cohérente qu'avec ceux-là. Le test décisif consiste à y replacer l'ensemble des repères disponibles — y compris ceux qui n'ont servi à fixer aucune frontière — et à vérifier qu'ils s'y ordonnent correctement.

12.1 Classement des repères disponibles

Quinze repères indépendants, issus de cinq sources distinctes, ont été convertis en résistance spécifique et classés. Aucun ajustement n'a été appliqué.

Tableau 13 — Repères extérieurs replacés dans l'échelle XRS

Rs calculée	Niveau	Repère
15,9	X1	Masque en tissu le plus respirant mesuré sur le marché
20,8	X1	Prototype de laboratoire le moins résistant (29,4 Pa à 85 L/min)
34,6	X2	Plafond du niveau de respirabilité le plus exigeant publié
41,5	X2	Prototype de laboratoire intermédiaire (58,8 Pa à 85 L/min)
42,2	X2	N95 du commerce, valeur mesurée (6,1 mm H ₂ O)
58,8	X2 / X3	Borne basse du seuil de détection psychophysique
62,3	X3	Plafond « aucun bénéfice supplémentaire au-delà » (88,2 Pa à 85 L/min)
71,3	X3	KN95 le moins respirant mesuré sur le marché (10,3 mm H ₂ O)
74,5	X3	Borne haute du seuil de détection psychophysique
103,8	X4	Plafond du niveau de respirabilité le moins exigeant publié
120,0	X4	Plafond de résistance de la classe de filtration la plus basse
140,0	X4 / X5	Plafond de résistance de la classe de filtration intermédiaire
173,1	X5	Plafond d'homologation en expiration
200,0	X5 / X6	Plafond de résistance de la classe de filtration la plus élevée
242,3	X6	Plafond d'homologation en inspiration — borne absolue

12.2 Résultat

Les quinze repères s'ordonnent sans aucune inversion : aucun masque du commerce ne se retrouve classé plus sévèrement qu'un plafond réglementaire, aucun plafond réglementaire ne se retrouve classé plus favorablement qu'un prototype de laboratoire optimisé.

La bande de détection psychophysique, comprise entre 58,8 et 74,5, encadre exactement la frontière X2 / X3 fixée à 60. Cette bande n'a servi qu'à poser cette unique frontière ; le fait qu'elle s'y superpose sur toute sa largeur, sans déborder sur X1 ni sur X4, n'est donc pas une conséquence mécanique de la construction.

Les masques réellement disponibles sur le marché se répartissent entre X1 et X3, tandis que les plafonds réglementaires occupent X4 à X6. Cette séparation a un sens physique fort : les référentiels existants sont des garde-fous de sécurité, calibrés bien au-dessus de ce que les produits atteignent réellement. Elle confirme qu'une échelle de confort ne pouvait pas être dérivée directement de ces plafonds, et justifie a posteriori la démarche du présent document.

Enfin, les trois prototypes de l'étude en tapis roulant se classent en X1, X2 et X3, et l'absence de différence subjective significative constatée entre eux est cohérente avec le fait que les trois se situent au niveau ou en dessous du seuil de détection, c'est-à-dire précisément dans la zone où l'échelle prédit qu'aucune différence ne devrait être perçue.

NOTE Cette cohérence établit que l'échelle est bien construite et compatible avec l'ensemble des données publiées disponibles. Elle n'établit pas que les qualifications de confort et les durées respiratoires correspondent au ressenti réel des porteurs : cela relève de la validation expérimentale de l'article 14, qui reste à conduire.

13 Conformité aux limites physiologiques normalisées

L'article 12 a montré que l'échelle était cohérente avec les données qui ont servi à la construire. Le présent article conduit une épreuve plus exigeante : confronter l'échelle à un jeu de limites physiologiques établi indépendamment d'elle, par un comité international, à partir d'une littérature expérimentale que le présent référentiel n'a pas utilisée.

Ces limites sont celles d'ISO 16976-4 [6]. Elles ne portent pas sur le confort mais sur la tolérance, et délimitent un plafond de sécurité à l'intérieur duquel une échelle de confort doit impérativement se situer.

13.1 Traduction des limites normalisées en résistance spécifique

Les limites normalisées sont exprimées par classe de ventilation minute, sous forme d'un travail respiratoire par volume courant et d'une pression de pointe. Leur conversion en résistance spécifique s'opère au moyen des relations établies en 7.4 et 11.2.

Un premier résultat, structurel, apparaît immédiatement : les limites normalisées sont constantes de 10 à 105 L/min de ventilation, alors que le débit y est multiplié par plus de dix. Traduites en résistance spécifique, elles se resserrent donc considérablement à mesure que l'effort augmente.

Tableau 14 — Limites physiologiques normalisées converties en résistance spécifique

Ventilation minute	Débit de pointe	Rs plafond par la pression de pointe	Rs plafond par le travail respiratoire	Plafond retenu
10 L/min	0,52 L/s	2 292	2 189	2 189
20 L/min	1,05 L/s	1 146	1 094	1 094
35 L/min	1,83 L/s	655	625	625
50 L/min	2,62 L/s	458	438	438
65 L/min	3,40 L/s	353	337	337
85 L/min	4,45 L/s	270	257	257
105 L/min	5,50 L/s	218	208	208
135 L/min	7,07 L/s	283	288	283

Le plafond le plus contraignant n'est donc pas atteint au régime le plus intense, mais à 105 L/min de ventilation, dernier palier avant que la norme ne relève ses limites. Il s'établit à 208 pascals par litre-seconde.

13.2 Résultat principal : convergence indépendante

L'échelle XRS place la frontière X5 / X6 à 200 pascals par litre-seconde. Cette valeur a été fixée en 9.3 à partir du plafond de résistance de la classe de filtration la plus élevée, c'est-à-dire par une voie purement réglementaire, sans aucune considération physiologique et sans connaissance des limites normalisées.

Le plafond physiologique le plus contraignant s'établit à 208 par le travail respiratoire et à 218 par la pression de pointe. L'écart entre la frontière de l'échelle et ces deux plafonds est respectivement de quatre et de huit pour cent, tous deux du côté prudent.

Portée de la convergence

$$200 \approx 208 \approx 218$$

Deux raisonnements sans aucun point commun — l'un partant des plafonds de résistance associés aux classes de filtration, l'autre partant de la tolérance physiologique mesurée sur des sujets humains — désignent la même frontière à moins de dix pour cent près. Une coïncidence de cette nature ne se produit pas par construction : rien dans la démarche de 9.3 ne pouvait la produire. Elle constitue la validation externe la plus forte du présent document, et donne à la frontière X5 / X6 un sens physique qu'elle n'avait pas : X6 est le niveau auquel un masque atteint le plafond de tolérance physiologique en effort soutenu prolongé.

Le détail du calcul est le suivant. Un masque situé exactement au plancher de X6, soit une résistance spécifique de 200, sollicité à 105 L/min de ventilation, produit un travail respiratoire inspiratoire de 0,864 kPa contre une limite de 0,9 kPa, un travail respiratoire total de 1,727 kPa contre une limite de 1,8 kPa, et une pression de pointe de 1,100 kPa contre une limite de 1,2 kPa. Il consomme donc 96 % de la marge physiologique disponible, sans la dépasser.

13.3 Contrôle de conformité des quatre profils

Chaque profil a d'abord été rattaché à la classe de ventilation normalisée la plus proche, en appliquant la relation de 7.4.

Tableau 15 — Rattachement des profils aux classes de ventilation normalisées

Profil	Débit de banc	Ventilation minute	Classe normalisée retenue	Écart d'assimilation
P1	30 L/min	9,5 L/min	10 L/min	-4,5 %
P2	60 L/min	19,1 L/min	20 L/min	-4,5 %
P3	95 L/min	30,2 L/min	35 L/min	-13,6 %
P4	140 L/min	44,6 L/min	50 L/min	-10,9 %

Les profils de repos et d'activité modérée coïncident presque exactement avec les deux premières classes normalisées. Les profils d'effort tombent entre deux classes et ont été rattachés à la classe supérieure, choix conservateur puisqu'il attribue au profil une sollicitation légèrement plus forte que la réalité.

Tableau 16 — Marge physiologique au plancher du niveau X6

Profil	Classe normalisée	WoB/VT au plancher de X6	Limite normalisée	Marge restante
P1	10 L/min	0,16 kPa	1,8 kPa	91 %
P2	20 L/min	0,33 kPa	1,8 kPa	82 %
P3	35 L/min	0,58 kPa	1,8 kPa	68 %
P4	50 L/min	0,82 kPa	1,8 kPa	54 %

L'intégralité de l'échelle XRS, sur ses six niveaux et ses quatre profils, se situe à l'intérieur du domaine physiologiquement acceptable. Aucune combinaison ne dépasse ni n'approche une limite normalisée.

La marge se referme régulièrement avec l'effort, de 91 % au repos à 54 % en effort maximal. Cette décroissance est la conséquence directe du constat structurel de 13.1 : puisque les limites normalisées sont constantes en travail respiratoire alors que la résistance spécifique est constante en résistance, le rapport entre les deux se dégrade mécaniquement avec le débit. C'est une propriété de l'échelle qu'il faut connaître, et non un défaut : elle signifie que le profil d'effort maximal est celui où l'échelle offre le moins de marge, donc celui qu'il faut mesurer en priorité sur un produit réel.

13.4 Cumul des charges respiratoires

ISO 16976-4 fournit un dernier élément qui dépasse le contrôle et enrichit le référentiel. La norme établit que les différentes charges respiratoires — la résistance au débit d'air, la charge statique et la charge élastique — s'additionnent lorsque chacune est exprimée en pourcentage de sa propre valeur maximale acceptable, et qu'un total approchant ou dépassant cent pour cent annonce une gêne du porteur.

Cette règle additive offre le moyen de réintégrer, à terme, une partie des facteurs que l'article 15 déclare aujourd'hui hors du modèle. Le niveau XRS devient alors la contribution de la résistance au débit d'air à une charge respiratoire totale, à laquelle s'ajoutent les contributions de la charge statique — que la norme borne à un intervalle de -1 à $+1,5$ kPa — et de la charge élastique, dont le plafond est fixé à $1,0$ kPa/L.

NOTE Cette perspective est retenue comme axe d'évolution vers la deuxième édition, sans être incorporée dès à présent : les charges statique et élastique d'un masque filtrant souple sont faibles devant celles d'un appareil à circuit fermé, et leur mesure suppose un banc dont la Division Laboratoire d'Essais ne dispose pas encore.

14 Protocole de validation expérimentale

La cohérence interne et la conformité externe étant établies, il reste à vérifier expérimentalement que les six niveaux correspondent à six ressentis effectivement distincts. C'est le maillon qu'aucune publication consultée n'a établi et que le présent référentiel se propose d'apporter.

14.1 Conception de l'étude

Élément	Spécification
Type d'étude	Essai croisé randomisé en double aveugle, chaque sujet portant successivement l'ensemble des masques dans un ordre tiré au sort.
Effectif	Soixante sujets au minimum, stratifiés par sexe, par tranche d'âge et par condition physique, afin de couvrir la variabilité des seuils de perception.
Critères d'exclusion	Pathologie respiratoire ou cardiaque connue, tabagisme actif important, incapacité à réaliser l'exercice du profil testé.
Échantillons testés	Au moins deux masques par niveau, soit douze au minimum, couvrant l'intégralité de la plage X1 à X6, et de géométries variées afin de tester également le facteur de forme.
Aveuglement	Masques présentés sans marquage, dans un ordre aléatoire propre à chaque sujet. Les opérateurs recueillant les scores ignorent le niveau du masque porté.

14.2 Mesures physiques

Chaque masque est caractérisé sur banc avant l'essai humain. La perte de charge est mesurée à débit constant aux quatre débits des profils, à savoir 30, 60, 95 et 140 L/min, et la résistance spécifique en est déduite à chacun de ces débits. Cette répétition permet de vérifier directement, sur les échantillons de l'étude, l'hypothèse d'invariance posée en 7.3.

Le travail respiratoire est mesuré séparément au simulateur respiratoire selon la méthode normalisée [5], afin de confronter les valeurs analytiques de 11.2 à la mesure. La surface filtrante développée de chaque masque est relevée, ce qui permet de valider et de corriger les facteurs de forme estimés du Tableau 5.

14.3 Mesures subjectives

Deux instruments validés sont retenus, mesurant deux dimensions distinctes. L'échelle de Borg en catégories-rapports, graduée de zéro à dix, mesure l'intensité de la gêne respiratoire ; son auteur l'a explicitement recommandée pour l'évaluation de la dyspnée [16][17]. Une échelle visuelle analogique de zéro à cent mesure en parallèle le confort global perçu, dimension plus large qui intègre la chaleur, l'humidité et la pression sur le visage.

Les relevés sont effectués à l'instant initial puis toutes les vingt minutes pendant soixante minutes de port en condition d'effort correspondant au profil testé. Cette cinétique est essentielle : elle seule permet d'objectiver les durées de port annoncées au Tableau 7.

Des mesures physiologiques d'accompagnement sont recueillies en continu — fréquence cardiaque, fréquence respiratoire, saturation en oxygène et température sous le masque — afin de distinguer une gêne d'origine respiratoire d'une gêne d'origine thermique.

14.4 Analyse et critères de réussite

Tableau 17 — Critères de réussite de la validation

Analyse	Méthode	Critère de réussite
Relation résistance / gêne	Corrélation de Spearman entre Rs et le score de Borg à soixante minutes	$\rho \geq 0,70$
Séparation des niveaux	Comparaisons appariées entre niveaux adjacents, correction pour tests multiples	Au moins quatre des cinq frontières séparent significativement deux populations de scores
Position de la frontière X2 / X3	Courbe ROC de la détection déclarée en fonction de Rs	Le seuil optimal tombe dans la bande 58,8 – 74,5
Monotonie de l'échelle	Vérification de l'ordre des scores médians de X1 à X6	Aucune inversion entre deux niveaux adjacents
Durées de port annoncées	Analyse de survie sur l'abandon ou le dépassement d'un score de Borg de 5	Les durées médianes observées encadrent les durées annoncées au Tableau 7
Facteur de forme	Régression de Rs sur l'inverse de la surface développée	Pente compatible avec la proportionnalité prédite, $R^2 \geq 0,8$

Ces critères sont posés avant l'étude et ne seront pas révisés après. C'est ce qui donne son sens à la démarche : ils rendent l'échelle réfutable par ses propres données.

15 Limites déclarées et conditions de réfutation

15.1 Facteurs non pris en compte

La résistance respiratoire n'explique pas la totalité du confort d'un masque. Cinq facteurs importants sont délibérément exclus du modèle, et cette exclusion doit être connue de quiconque utilise l'échelle.

- Le confort thermique et hygrométrique. L'accumulation de chaleur et d'humidité sous le masque est une cause majeure d'inconfort, indépendante de la résistance. Un masque X1 peut être insupportable par sa chaleur.
- La pression mécanique et l'ajustement. Les points d'appui sur l'arête nasale et les pommettes, la tension des brides et l'irritation cutanée sont sans relation avec la perte de charge.
- Le volume mort et la réinhalation de gaz carbonique. Ce facteur dépend du volume interne du masque, donc paradoxalement de la géométrie qui améliore la respirabilité. Un masque à grande surface développée peut améliorer son niveau XRS tout en dégradant sa réinhalation.
- Le colmatage en usage. La résistance mesurée est celle d'un masque neuf, dans l'état de référence défini en 3.10. Elle augmente avec l'empoussièrement et l'humidification, de sorte que la résistance effective en service peut relever d'un niveau moins favorable que le niveau attribué. Cette dérive dépend de l'atmosphère de travail, c'est-à-dire de conditions extérieures à l'appareil : elle n'est pas une caractéristique du produit, et le niveau XRS décrit exclusivement l'état de référence. Un appareil ne porte qu'un seul niveau ; aucun couple de niveaux, aucun intervalle et aucun niveau « en service » ou « après colmatage » ne peut lui être attribué.
- L'hygiène et la contamination de surface. La surface externe d'un masque se charge par dépôt et par manipulation, et l'humidité expirée favorise le développement microbien dans le média. Ces phénomènes bornent la durée d'emploi sans aucune relation avec la résistance respiratoire.

Ces cinq facteurs justifient que le niveau XRS soit toujours présenté comme une classification du confort respiratoire, et jamais comme une classification du confort global.

Il en résulte que la durée de port effective d'un appareil est le minimum de plusieurs plafonds indépendants — l'endurance respiratoire, seule établie par le présent document, le colmatage, l'humidité, l'hygiène, la tenue de l'ajustement — et, au premier rang, les instructions du fabricant, qui prévalent sur tout le reste. Le marquage NR de l'EN 149, qui limite l'emploi d'un demi-masque filtrant à une seule journée de travail, en est l'exemple le plus courant. Une endurance respiratoire « sans limite » signifie que la résistance n'impose aucune limite ; elle n'autorise jamais un emploi au-delà des conditions fixées par le fabricant. Le niveau XRS s'entend, en toute circonstance, pour un masque neuf et dans la limite d'emploi fixée par le fabricant.

Deux d'entre eux disposent désormais d'une voie de réintégration. La règle additive des charges respiratoires exposée en 13.4 permet de traiter la charge statique et la charge élastique comme des contributions exprimées en pourcentage de leur propre plafond, cumulables avec la contribution du niveau XRS. Cette extension est inscrite au programme de la deuxième édition. Le confort thermique, le colmatage et l'hygiène restent hors du modèle et le resteront : ils relèvent d'une autre physique, et les intégrer supposerait de pondérer entre elles des grandeurs de natures différentes, c'est-à-dire de substituer un jugement composite à une mesure unique.

15.2 Limites du modèle physique

L'invariance de la résistance spécifique n'est vérifiée qu'à $\pm 12\%$, et cette approximation se dégrade au-delà d'une vitesse de passage d'environ 10 cm/s, régime que le Tableau 6 montre atteint par les géométries plates dès l'effort soutenu. Pour ces configurations, la mesure directe au débit d'usage doit primer sur l'extrapolation.

Le facteur de forme suppose que la totalité de la surface filtrante est traversée de manière homogène, ce qui n'est jamais rigoureusement le cas : les zones de pliure et les bords sont moins sollicités. Le facteur est donc un optimum théorique, et la surface effective est inférieure à la surface développée.

Les valeurs de travail respiratoire sont analytiques et supposent la symétrie inspiration-expiration, hypothèse fautive pour tout masque à soupape.

15.3 Conditions de réfutation

Conformément au principe de falsifiabilité énoncé en 5.2, les observations du Tableau 18 constitueraient une réfutation, totale ou partielle, et déclencheraient une révision.

Tableau 18 — Conditions de réfutation de l'échelle XRS

Observation	Conséquence
Corrélation entre R_s et le score de Borg inférieure à 0,50	Réfutation du principe même de l'échelle : la résistance ne suffirait pas à prédire le confort. Refonte complète.
Seuil de détection expérimental hors de la bande 58,8 – 74,5	Déplacement de la frontière X2 / X3 et repositionnement de l'ensemble de l'échelle.
Inversion de deux niveaux adjacents dans les scores médians	Fusion des deux niveaux concernés ou redéfinition de leur frontière.
Variation de R_s supérieure à 25 % entre 30 et 140 L/min sur les échantillons testés	Abandon de l'échelle unique au profit de quatre échelles indépendantes par profil.
Durées de port observées inférieures de plus de moitié aux durées annoncées	Révision de la colonne d'endurance respiratoire, sans remise en cause des seuils.
Régression du facteur de forme avec R^2 inférieur à 0,5	Retrait du facteur de forme du modèle prédictif, maintenu à titre indicatif.
Travail respiratoire mesuré au simulateur dépassant de plus de 30 % la valeur analytique de 11.2	Remplacement de la relation analytique par une loi calée sur la mesure, et réexamen du contrôle de conformité de l'article 13.
Dépassement d'une limite physiologique normalisée par un masque classé X5 ou en deçà	Abaissement de l'ensemble des frontières hautes. Ce serait la réfutation la plus grave, car elle signifierait que l'échelle déclare confortable un masque physiologiquement inacceptable.

16 Gouvernance, révision, marques et diffusion

16.1 Statut de la présente édition

Le présent document constitue la première édition du référentiel, dite édition d'établissement, publiée ouvertement. Elle est complète quant à la construction de l'échelle, à son fondement physique, à sa vérification documentaire et à son contrôle de conformité physiologique. Elle est utilisable en conception et en spécification technique.

Sa publication ouverte procède d'un choix délibéré. Une échelle de classification ne vaut que par son adoption : un référentiel que nul ne peut lire ne classe rien. Une échelle qui énonce ses propres conditions de réfutation, comme le fait l'article 15, appelle par construction l'examen extérieur ; l'y soustraire serait contradictoire. XALPES LLC publie donc ce travail pour qu'il soit utilisé, cité et contesté.

La validation expérimentale sur panel humain décrite à l'article 14 n'a pas été conduite à la date de publication. Toute déclaration de niveau XRS établie sur la base de la présente édition doit mentionner ce statut.

16.2 Révision

Une deuxième édition sera établie à l'issue du programme de validation de l'article 14. Elle intégrera les surfaces développées mesurées sur pièces réelles, les valeurs de travail respiratoire mesurées au simulateur en remplacement des valeurs analytiques, l'extension au cumul des charges respiratoires exposée en 13.4, et les corrections de seuils que les données imposeront.

Toute modification d'un seuil, d'une qualification ou d'une endurance respiratoire donne lieu à une nouvelle édition indicée, accompagnée de la justification de la modification et de la donnée qui l'a motivée. Les éditions antérieures sont conservées et restent accessibles sur le site scalexrs.com, marquées comme remplacées, de sorte qu'un tiers puisse reconstituer l'historique des décisions. Cette exigence d'archivage participe de la traçabilité revendiquée en 5.2.

16.3 Marques et conditions d'emploi de la dénomination

16.3.1 Marques revendiquées

XALPES™ et XRS™ sont des marques de XALPES LLC. Les désignations de niveau X1 à X6, employées en relation avec la classification définie par le présent document, participent du même signe distinctif et sont couvertes par la même revendication.

La revendication s'étend aux éléments figuratifs qui accompagnent la dénomination : le logotype XRS reproduit ci-après, composé à partir des lettres du logotype XALPES, sa ligne de signature « Classification du confort respiratoire » et son équivalent anglais « Breathing comfort classification », l'écusson à coin coupé portant la désignation de niveau, le glyphe X isolé et le dessin des chiffres 1 à 6. Ces éléments sont employés dans l'encre graphite, distincte du rouge de la marque XALPES, afin que le signe se lise comme un instrument de classification apposé sur le produit d'un tiers, et non comme l'enseigne de son éditeur.



Ces marques sont revendiquées au titre de l'usage dans le commerce. La publication du présent document, à la date portée en couverture, constitue une preuve documentée de premier usage, tant de la dénomination que des éléments figuratifs qui l'accompagnent.

NOTE Le symbole ® n'est apposé sur aucune de ces marques et ne doit l'être par aucun tiers. Il est réservé aux marques effectivement enregistrées auprès de l'office compétent ; son emploi sur une marque non enregistrée est illicite dans plusieurs juridictions, dont les États-Unis d'Amérique, et peut faire obstacle à l'exercice ultérieur des droits attachés au signe.

16.3.2 Forme correcte d'emploi

Une marque est un adjectif, non un nom. La dénomination XRS s'emploie exclusivement comme qualificatif accompagnant un nom générique, jamais seule, jamais au pluriel, jamais au possessif et jamais comme verbe. Cette exigence n'est pas de style : l'emploi nominal répété d'une marque conduit à sa dégénérescence, c'est-à-dire à la perte du caractère distinctif qui fonde la protection.

Tableau 19 — Formes d'emploi de la dénomination

Forme correcte	Forme à proscrire
l'échelle XRS	le XRS
un niveau XRS de X2	un XRS de X2
le référentiel XRS	les XRS
la résistance spécifique mesurée est de 45 Pa/(Ls ⁻¹)	le XRS du masque est de 45
masque classé au niveau XRS X2	masque XRS-é, masque XRS 45
conforme au référentiel XRS 001:2026	conforme XRS

16.3.3 Citation

La citation du présent référentiel à des fins d'étude, d'enseignement, de recherche ou de comparaison est libre, sous réserve d'une attribution complète mentionnant le numéro de référence, l'édition et l'éditeur, sous la forme : XRS 001:2026, Échelle XRS, première édition, XALPES LLC.

Le symbole [™] est apposé à la première occurrence ou à l'occurrence la plus proéminente de chaque marque dans un document. Sa répétition à chaque occurrence n'est ni exigée ni souhaitable.

16.3.4 Emploi commercial

L'emploi de la dénomination XRS ou d'une désignation de niveau X1 à X6 pour désigner, qualifier, étiqueter, promouvoir ou commercialiser un produit est subordonné à une autorisation écrite de XALPES LLC, laquelle est seule habilitée à attester qu'une mesure a été conduite conformément au présent référentiel.

Tout tiers autorisé fait figurer sur ses supports la mention suivante : « XRS[™] est une marque de XALPES LLC, employée sous licence. »

Tout marquage faisant état d'un niveau XRS reprend, sous l'intitulé « endurance respiratoire », la mention courte normative du Tableau 7 correspondant au niveau attribué, et porte en clair la mention « Masque neuf · Dans la limite d'emploi fixée par le fabricant ». Le niveau y figure seul, jamais accolé à une classe de filtration dans un même bloc graphique. Les conditions détaillées de mesure, de déclaration et de marquage relèvent de l'annexe technique de la licence, référencée XRS 002.

NOTE Lorsque la dénomination est destinée à attester qu'un produit d'un tiers satisfait au présent référentiel, le signe relève du régime des marques de certification. Ce régime emporte des obligations propres, notamment le contrôle effectif de l'usage, l'application non discriminatoire du référentiel à tout demandeur qui y satisfait, et, dans plusieurs juridictions dont les États-Unis d'Amérique, l'interdiction faite au titulaire de produire ou de commercialiser lui-même les biens portant la marque. Le choix du régime applicable est examiné en 16.4.

16.4 Protection à consolider

La présente édition revendique les marques au titre de l'usage, sans enregistrement. Trois actions sont identifiées comme préalables à toute diffusion externe du référentiel ou à toute concession de licence.

- Recherche d'antériorité et dépôt de la marque XRS auprès de l'office compétent, sous sa forme verbale et sous sa forme figurative telle que définie en 16.3.1, dans les classes correspondant aux services d'essai et de validation technique d'une part, aux produits visés d'autre part.
- Arbitrage entre marque ordinaire et marque de certification, au regard de l'activité de développement produit conduite par XALPES LLC. Les deux régimes sont, sur un même signe et un même périmètre de biens, difficilement cumulables.
- Vérification qu'aucun élément du dispositif — banc de mesure, méthode d'essai, conception dérivée de l'étude du facteur de forme — ne relève d'une protection par brevet, toute divulgation publique étant destructrice de nouveauté dans la plupart des juridictions.

NOTE Les développements du présent paragraphe ont une portée informative et ne constituent pas un avis juridique. Ils sont à soumettre à un conseil en propriété industrielle avant toute décision de dépôt ou de diffusion.

16.5 Diffusion et versions

La présente édition est diffusée sous licence Creative Commons Attribution – Pas de Modification 4.0, dans les conditions énoncées en page ii. Elle peut être librement téléchargée, imprimée, jointe à un dossier technique, déposée sur un site tiers ou transmise à un partenaire, sous réserve d'être reproduite intégralement et attribuée.

La licence porte sur le texte du référentiel. Elle n'emporte aucune concession sur les marques mentionnées en 16.3, dont l'emploi commercial demeure soumis à l'autorisation prévue en 16.3.4. Lire, citer et redistribuer le référentiel est libre ; apposer la dénomination XRS sur un produit ne l'est pas.

La version faisant foi est celle publiée par XALPES LLC sous le numéro de référence porté en couverture, sur le site scalexrs.com, qui tient également à disposition les éditions antérieures conformément à 16.2. En cas de divergence entre un exemplaire redistribué et la version publiée par XALPES LLC, cette dernière prévaut.

16.6 Contact

Toute demande d'autorisation, tout retour d'information, toute contestation d'un seuil et toute proposition de donnée nouvelle sont à adresser à XALPES LLC, Division Laboratoire d'Essais, à l'adresse contact@xalpes.com.

Bibliographie

Référentiels normatifs

- [1] EN 149 — Appareils de protection respiratoire : demi-masques filtrants contre les particules. Résistances inspiratoire et expiratoire, classes FFP1, FFP2 et FFP3. [— lien](#) Valeurs de perte de charge à 30 et 95 L/min.
- [2] Masque de protection FFP — synthèse des exigences de la norme européenne. [— lien](#) Recoupement des valeurs de [1].
- [3] ASTM F3502-21 — Standard Specification for Barrier Face Coverings. Niveaux de respirabilité. [— lien](#) Niveau 1 ≤ 15 mm H₂O ; niveau 2 ≤ 5 mm H₂O à 85 L/min.
- [4] Overview of the ASTM F3502-21 Barrier Face Covering Standard — NIOSH Science Blog, CDC. [— lien](#) Source institutionnelle de recoupement pour [3].
- [5] ISO 16900-12:2016 — Appareils de protection respiratoire : méthodes d'essai et équipement d'essai, Partie 12 : détermination du travail respiratoire en fonction du volume respiratoire et détermination des pics de pressions respiratoires. [— lien](#) Méthode de mesure du travail respiratoire, unité et paramètres d'essai.
- [6] ISO 16976-4:2023 — Appareils de protection respiratoire : facteurs humains, Partie 4 : travail de respiration et résistance respiratoire, limites physiologiques. Première édition, 2023-02. [— lien](#) Acquis sous licence individuelle. Tableau 1 et paragraphes 6.6, 7.1, 7.2 et 7.4. Source du contrôle de conformité de l'article 13.
- [7] ISO 16976-1:2022 — Appareils de protection respiratoire : facteurs humains, Partie 1 : débits métaboliques et débits respiratoires. [— lien](#) Régimes de travail et ventilations minute de référence.

Littérature expérimentale

- [8] Pressure drop of filtering facepiece respirators: how low should we go? — International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. [— lien](#) Source du seuil de détection 58,8 – 74,5 Pa/(Ls⁻¹) et du plafond de bénéfice à 88,2 Pa. Ancrage central de l'échelle.
- [9] Impact of Low Filter Resistances on Subjective and Physiological Responses to Filtering Facepiece Respirators — PLOS ONE. [— lien](#) Étude sur dix sujets, prototypes à 3, 6 et 9 mm H₂O, échelle de Borg et échelles respiratoires.
- [10] Physiologically acceptable resistance of an air purifying respirator — Ergonomics, 2011. [— lien](#) Notion de résistance physiologiquement acceptable.
- [11] Comparison of ISO work of breathing and NIOSH breathing resistance measurements for air-purifying respirators. [— lien](#) Corrélation de 0,7 à 0,9 entre les deux grandeurs. Justifie la construction de l'échelle sur la perte de charge.
- [12] Assessment of best-selling respirators and masks — American Journal of Infection Control. [— lien](#) Pertes de charge mesurées sur le parc réel et efficacités de filtration associées.
- [13] Work of Breathing for Respiratory Protective Devices: method implementation, variability and repeatability. [— lien](#) Reproductibilité inter-laboratoires de la mesure du travail respiratoire.

Géométrie et physique de la filtration

- [14] Filtration efficiency and pressure drop of nonwoven materials for respirator designs — Aerosol and Air Quality Research. [— lien](#) Source de la relation $u = Q/A$ et des surfaces mesurées de 236 cm² et 415 cm², avec les vitesses de passage de 6,0 et 3,4 cm/s à 85 L/min.
- [15] The effects of face mask specifications on work of breathing and particle filtration efficiency. [— lien](#) Effet des spécifications de masque sur le travail respiratoire.

Instruments de mesure subjective

- [16] Borg Rating of Perceived Exertion et échelle de Borg CR10. [— lien](#) *Échelle en catégories-rapports de 0 à 10, recommandée par son auteur pour l'évaluation de la dyspnée.*
- [17] Use of the modified Borg scale and numerical rating scale to measure chronic breathlessness — European Respiratory Journal. [— lien](#) *Validation de l'échelle de Borg modifiée pour la mesure de l'essoufflement.*
- [18] Detection and perception of inspiratory resistive loads in adults — Journal of Applied Physiology. [— lien](#) *Perception des charges résistives inspiratoires, variabilité inter-individuelle des seuils de détection.*

ICS 13.340.30 Appareils de protection respiratoire

Édition d'établissement, publiée ouvertement — voir les conditions de diffusion en page ii

© XALPES LLC 2026 — Licence CC BY-ND 4.0

XALPES LLC · File Number (Texas) 0806424732 · 5900 Balcones Drive, STE 100, Austin, TX 79731, U.S.A. · contact@xalpes.com · xalpes.com