

COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DU CHARBON ET DE L'ACIER
HAUTE AUTORITÉ

Collection d'hygiène et de médecine du travail
N° 2

AIDE-MÉMOIRE
pour la pratique de l'examen
de la fonction ventilatoire
par la spirométrie

Établi à la demande de la commission de normalisation
des épreuves respiratoires de la Haute Autorité de la C.E.C.A.

sous la direction de:

MM. W. Bolt, M. Cara (rapporteur), G. Coppée, A. Houberechts,
F. Lavenne, P. Sadoul, E. Sartorelli, O. Zorn

avec la collaboration de:

Mlle D. Jouasset



LUXEMBOURG 1961

1



COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DU CHARBON ET DE L'ACIER
HAUTE AUTORITÉ

Collection d'hygiène et de médecine du travail
N° 2

AIDE-MÉMOIRE
pour la pratique de l'examen
de la fonction ventilatoire
par la spirographie

Établi à la demande de la commission de normalisation
des épreuves respiratoires de la Haute Autorité de la C.E.C.A.

sous la direction de:

MM. W. Bolt, M. Cara (rapporteur), G. Coppée, A. Houberechts,
F. Lavenne, P. Sadoul, E. Sartorelli, O. Zorn

avec la collaboration de:

Mlle D. Jouasset



LUXEMBOURG 1961

Rédigé essentiellement à l'intention des services de *médecine du travail*, cet aide-mémoire réunit des conseils pratiques et des documents théoriques. Il est mis à la disposition des utilisateurs de la *méthode spirométrique* pour concourir à la simplification des épreuves et des calculs qui en découlent et à l'unification des procédés d'expertise faisant appel à cette méthode.

PRÉFACE

Dès 1955, le comité de recherches pour l'hygiène et la médecine du travail a, sous les auspices de la Haute Autorité de la C.E.C.A., entrepris la tâche de délimiter les champs d'étude à encourager dans le vaste domaine de la médecine du travail.

Parmi les différents champs d'étude il en est un qui devait prendre la première place dans le programme des études et des recherches à promouvoir: les pneumoconioses et l'emphysème.

Ces affections respiratoires frappent un certain nombre d'ouvriers des industries de la C.E.C.A., ce qui justifie l'importance qui est attachée à la promotion scientifique des divers problèmes en rapport avec ces maladies.

Au cours de l'échange d'expériences auquel se livrèrent les experts des différents pays, il fut constaté que les problèmes qui s'offraient à l'étude méritaient un effort communautaire de normalisation. Les experts tombèrent d'accord pour donner à une commission de normalisation le soin de reprendre cette étude, en s'engageant à lui fournir toute la documentation et toutes les données utiles. Cette commission s'est mise aussitôt à l'ouvrage. Elle pria M. Cara, directeur du laboratoire expérimental de physique à Paris, d'élaborer un projet codifiant les règles de la pratique spirométrique sur la base de l'échange d'expériences au sein de la commission.

M. Cara fut chargé en outre d'étudier les principes d'un appareil-étalon pour la détermination des caractéristiques physiques et spirométriques.

La fixation des normes ventilatoires a pu être menée à bien, grâce à un effort communautaire d'un grand nombre de centres spécialisés dans l'exploration fonctionnelle. Nous sommes heureux de remercier ici Mlle D. Jouasset, MM. W. Bolt, G. Coppée, A. Houberechts, F. Lavenne, A. Mey, L. Ruysen, P. Sadoul, E. Sartorelli, G. Worth et O. Zorn pour l'aide particulière qu'ils ont apportée à cet effort.

Plusieurs milliers de comptes rendus d'exploration comprenant des indications chiffrées sur les grandeurs ventilatoires, les caractéristiques biologiques des sujets normaux examinés, leur âge, profession, etc. ont pu être centralisés à Luxembourg.

Un soin particulièrement attentif a été apporté à éliminer les personnes malades ou atteintes de séquelles d'affection.

Le travail mécanographique de cette énorme documentation biométrique a été réalisé par les services de la Haute Autorité après centralisation des documents dans la direction générale problèmes du travail, assainissement et reconversion et son exploitation scientifique a été assurée par M. Cara qui a pu établir ainsi des formules rationnelles pour la détermination des valeurs de référence des diverses grandeurs ventilatoires.

Nous sommes heureux de permettre la publication de cet aide-mémoire qui concrétise ces années d'efforts et donnera sous une forme très maniable un instrument de travail qui, nous en sommes persuadés, sera de très grande utilité notamment pour tous les praticiens de la médecine du travail et les experts des pneumoconioses.

PAUL FINET
Membre de la Haute Autorité

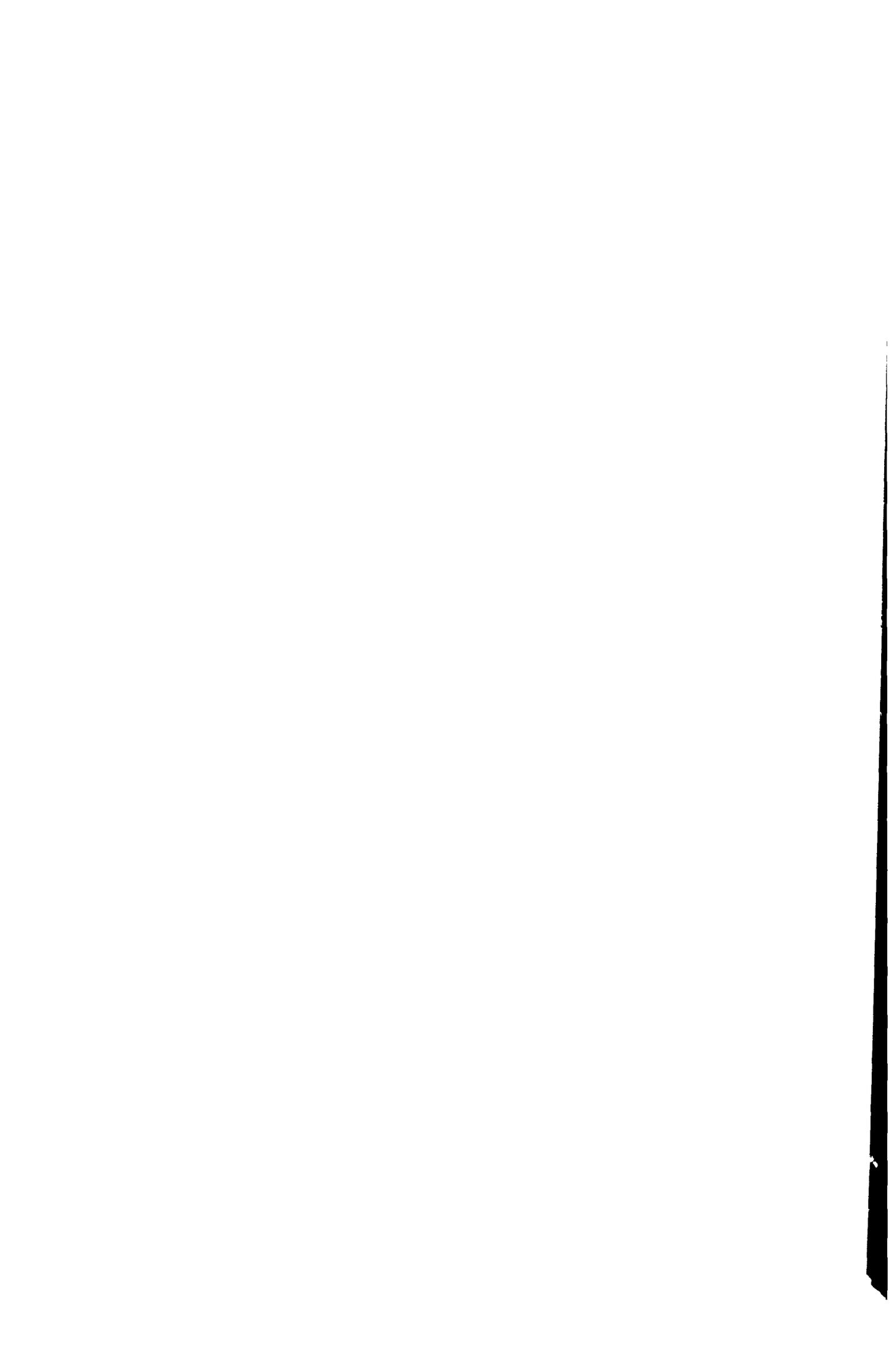


TABLE DES MATIÈRES

	Page
Introduction	9
I – Appareillage	11
II – Principes généraux des mesures	13
A – Mesure des volumes	13
B – Mesure des temps	13
C – Mesure des débits	14
D – Lecture des spiogrammes et mesure des longueurs	14
E – Correction de température et de pression	15
F – Expression des résultats	17
III – Examen spiographique au repos	19
A – Conditions générales des examens au repos	19
B – Conditions techniques des examens au repos	19
C – Critères de correction des examens au repos	19
D – Mesure de la ventilation et de la consommation d'oxygène au repos	20
E – Calcul de l'équivalent respiratoire à l'oxygène et du quotient respiratoire au repos	23
F – Valeurs normales de la consommation d'oxygène au repos	24
IV – Les épreuves spiographiques	27
A – Épreuve de la capacité vitale	27
B – Épreuve d'expiration forcée	29
C – Épreuve de la ventilation maximale	30
D – Première étude des résultats	32
Conclusion	41
Graphiques et abaques	43

INTRODUCTION

Les altérations de la fonction cardio-respiratoire ont été considérées comme dignes d'un effort particulier sur le plan des recherches physiopathologiques et cliniques.

Pour des raisons à la fois théoriques et pratiques, la fonction ventilatoire fut inscrite en priorité au plan d'études. Nombreux sont en effet les centres de recherches, les services hospitaliers et les instituts de médecine du travail qui se penchent sur l'étude de la fonction ventilatoire, fréquemment altérée dans les affections respiratoires.

Il a paru indispensable à la commission de normalisation de faire porter les efforts sur les points suivants:

- aboutir à une définition commune des grandeurs ventilatoires et à une terminologie précise et homologue des épreuves dans les diverses langues de la Communauté;
- fixer les règles de la pratique spirométrique;
- fixer les normes ventilatoires pour les diverses classes d'âge.

Ces trois points furent considérés par la commission de normalisation comme les conditions préalables pour permettre une interprétation correcte des examens ventilatoires couramment utilisés dans un but de diagnostic, de contrôle thérapeutique et d'expertise.

Certes, il y avait eu de nombreuses tentatives entreprises dans le passé pour donner des valeurs de référence aux diverses épreuves. Mais les experts s'étaient rendu compte que les diverses formules proposées donnaient lieu à de grandes divergences.

Le premier point donna lieu, en décembre 1955, à une mise au point rapide de la terminologie allemande, française, italienne et néerlandaise des nomenclatures utilisées en spirométrie, après confrontation avec la terminologie anglo-américaine. On tomba également d'accord sur l'expression des résultats de mesure, en respectant certaines conditions de référence.

Le deuxième point concernant la pratique spirométrique retint la commission plus longtemps; elle se livra à une étude critique des diverses manières dont les épreuves ventilatoires étaient conduites à l'aide des spiromètres.

L'un de nous fut chargé de rapporter la question et c'est ainsi que nous avons abouti à la codification que représente cet aide-mémoire.

Le projet, révisé une première fois par la commission de normalisation, fut porté à la connaissance des laboratoires d'exploration fonctionnelle pour recueillir de leur part toutes suggestions utiles. Il fut définitivement approuvé par le groupe des experts de la fonction respiratoire qui devait se réunir à Nancy, le 23 septembre 1958. Cet aide-mémoire est la partie substantielle du présent ouvrage.

Parallèlement, grâce à un effort communautaire sans précédent, nous avons pu entreprendre l'étude du troisième point en dépouillant des milliers de valeurs fonctionnelles et biométriques d'où l'on a pu tirer des normes ventilatoires. Ces valeurs de référence ont été communiquées aux laboratoires pour être éprouvées dans la pratique et, dans la séance déjà citée du 23 septembre 1958, les conclusions de cette étude ont été à nouveau discutées par la commission plénière des experts. Il fut décidé d'utiliser ces valeurs au cours d'une période d'essai de deux ans; elles ont donné satisfaction.

Au cours de cette mise en pratique, il est apparu nécessaire de soumettre les données portant sur les sujets âgés de 55 à 65 ans à un complément d'information. La commission a désigné deux laboratoires de deux pays différents pour recueillir de nouvelles données qui ont été incorporées dans l'enquête.

Si nous nous sommes appesantis sur le déroulement chronologique des travaux, c'est pour montrer la somme d'efforts qu'il a fallu déployer dans un secteur pourtant limité et dont le comité de recherches pour l'hygiène et la médecine du travail a suivi pas à pas le développement.

Personnellement, en notre qualité de rapporteurs du champ d'étude cardio-respiratoire, nous avons pu apprécier la volonté de coopération qui a animé tous les chefs de laboratoire d'Europe à la recherche d'une solution commune.

L'aide-mémoire ne met certes pas un terme aux travaux de normalisation. Les études sur les caractéristiques physiques des spiromètres ne sont pas terminées et d'autres études devront fixer les valeurs de la ventilation pour diverses épreuves d'effort, les techniques de mesure, comme par exemple celles utilisées pour la détermination du volume résiduel.

Mais, dans sa présentation actuelle, l'aide-mémoire n'en affirmera pas moins un intérêt pratique pour les cliniciens, experts et médecins du travail appelés à se prononcer sur les répercussions fonctionnelles d'états pathologiques respiratoires. Les conclusions relatives aux normes ventilatoires ont une signification d'autant plus grande qu'elles reposent sur les données d'une ampleur exceptionnelle qu'il n'aurait pas été possible de recueillir sans une coopération active des grands laboratoires d'exploration fonctionnelle.

M. CARA

Rapporteur de la commission
de normalisation

G. COPPÉE, A. HOUBERECHTS, O. ZORN

Délégués-rapporteurs pour le champ d'étude
de la fonction cardio-respiratoire

I – APPAREILLAGE

L'appareil principal nécessaire à l'expertise de la fonction ventilatoire est le *spirographe* qui permet de mesurer le volume d'air contenu dans une enceinte et d'enregistrer les variations de ce volume en fonction du temps. Il existe de nombreux dispositifs adaptés à des emplois un peu différents: spiropgraphie dynamique, spiropgraphie au cours de l'effort, étude spiropgraphique des échanges gazeux pulmonaires au repos ou à l'effort; certains modèles sont spécialisés au point qu'ils ne conviennent plus qu'à un seul emploi: c'est le cas, par exemple, de certains spiropgraphes destinés à la mesure du volume résiduel. Par mesure de simplification, l'utilisation de ces appareils ne sera pas examinée dans cet aide-mémoire.

D'une façon générale, un spiropgraphe doit posséder les qualités suivantes:

étanchéité:

l'ensemble formé par les poumons et les voies aériennes du sujet, d'une part, et par le spiropgraphe, d'autre part, doit réaliser une enceinte close: de la sorte, s'il n'y a pas de variation de température, toute augmentation du volume de l'enceinte spiropgraphique traduit une réduction du volume pulmonaire et inversement;

exactitude:

l'appareil doit être correctement étalonné, tant pour les mesures de temps que pour les mesures de volume: la précision de cet étalonnage doit atteindre le centième (un pour cent) de l'unité de mesure utilisée (litre, minute ou seconde);

sensibilité aux variations de volume:

l'admission dans le circuit d'un volume de dix millilitres (à l'aide d'une seringue par exemple) doit déterminer un déplacement appréciable du style inscripteur;

sensibilité aux variations de pression:

l'enregistreur doit subir un déplacement appréciable sous l'effet d'une pression inférieure à trois millimètres d'eau;

fidélité statique:

l'appareil doit pouvoir enregistrer plusieurs fois, lentement, le même volume sans que l'erreur dépasse dix millilitres;

fidélité dynamique:

l'enregistrement doit permettre de mesurer correctement une variation de volume brusque et rapide: 0,5 litre en un dixième de seconde, par exemple.

Lorsqu'un sujet respire dans un spiropgraphe, l'air vicié qu'il expire ne doit pas se mélanger à l'air normal qu'il va inspirer. L'appareil comporte donc, entre la cloche spiropgraphique et le sujet, deux branches de circuit, inspiratoire et expiratoire, que l'air parcourt toujours dans le même sens: la circulation de l'air dans ces deux branches de circuit est dirigée soit par une soufflerie, soit par des soupapes.

Dans les appareils à soufflerie ou *spiropgraphes ventilés*, une pompe assure une circulation rapide de l'air, indépendante de la respiration du sujet. Celui-ci est alors généralement relié à l'appareil par un *masque* et la soufflerie doit assurer un débit suffisant pour que l'air contenu dans le masque soit renouvelé en une fraction de seconde (0,1 seconde environ) et que le sujet ne risque pas de réinspirer un volume appréciable d'air vicié. Ces appareils peuvent également être utilisés avec un embout buccal.

Dans les *appareils non ventilés*, il est formellement déconseillé d'utiliser un masque et le sujet doit respirer à travers un *embout buccal*, fixé sur un tube en Y qui le relie aux branches inspiratoire et expiratoire du circuit. L'embout buccal et la branche du tube en Y où il se fixe forment un *espace mort* d'appareillage

où l'air circule alternativement dans les deux sens: le sujet réinspire donc, à chaque cycle ventilatoire, un volume d'air vicié égal au volume de cet espace mort: il est souhaitable que ce volume ne dépasse pas 25 millilitres; il doit être toujours inférieur à 50 millilitres. Des *soupapes*, placées sur les branches inspiratoire et expiratoire du circuit obligent l'air à circuler toujours dans le bon sens. Le fonctionnement de ces soupapes doit être irréprochable.

Un circuit spirographique doit *absorber très correctement le gaz carbonique* contenu dans l'air expiré; à cet effet, la branche expiratoire du circuit contient un produit absorbant (solution de potasse ou chaux sodée). Une épuration convenable doit maintenir dans la cloche spirographique un *taux de gaz carbonique inférieur à 0,3 pour cent*.

L'efficacité de cette absorption peut être appréciée de façon simple. *L'augmentation progressive de la ventilation au cours d'un enregistrement au repos est un signe excellent et très sensible qui révèle une absorption suffisante* du gaz carbonique: il commande le remplacement du produit absorbant usagé. Il est utile de classer les spirogrammes chronologiquement de façon à pouvoir les comparer au fur et à mesure du vieillissement du produit absorbant et de faire, de temps en temps, un tracé de contrôle enregistré avec le même sujet, l'opérateur par exemple. Il est surtout recommandé d'utiliser un produit de qualité stable: on peut alors prévoir la durée moyenne pendant laquelle il est utilisable et procéder à son remplacement avant que les spirogrammes soient perturbés.

Les *conditions physiques de mesure* peuvent être très différentes d'un lieu à l'autre et d'un jour à l'autre; aussi l'appareil doit-il être équipé d'un thermomètre qui permet de connaître, à un degré Celsius près (1°C) la température régnant dans l'enceinte spirographique. Il faut en outre disposer, dans la pièce où ont lieu les mesures, d'un *baromètre* indiquant la pression ambiante à moins de deux millimètres de mercure près: cette condition de précision doit faire donner la préférence aux baromètres à colonne de mercure. On trouvera ci-dessous les indications nécessaires concernant la correction des mesures spirographiques en fonction de la température et de la pression ambiante.

N. B. - La Haute Autorité de la Communauté européenne du charbon et de l'acier a étudié la possibilité de faire procéder à un étalonnage et à des vérifications des spirographes: ces contrôles pourraient être faits à la demande des centres d'examen utilisant ces appareils.

II – PRINCIPES GÉNÉRAUX DES MESURES

A – Mesure des volumes

Une *cloche spirométrique mobile* rend possibles les variations du volume d'air contenu dans le circuit. Les mouvements de la cloche sont transmis à un style inscripteur qui se déplace sur le papier enregistreur, parallèlement à un *axe des volumes*, généralement vertical. Il est souhaitable de tracer cet axe des volumes sur le papier, au début de chaque enregistrement: il suffit pour cela d'admettre de l'air dans l'appareil que l'on aura préalablement ramené à sa capacité minimale, le papier enregistreur restant immobile pendant cette manœuvre.

La *précision des mesures de volume* dépend de la valeur du *coefficient d'appareillage* qui fixe le rapport de proportionnalité entre les variations du volume de l'enceinte spirométrique et les déplacements correspondants du style inscripteur.

En effet, on mesure sur le tracé la longueur du déplacement du style, parallèlement à l'axe des volumes et dans les conditions de travail habituelles, on exprime le résultat en *millimètres*, c'est-à-dire avec une erreur de lecture égale à plus ou moins 0,5 millimètre: le volume correspondant à cette erreur absolue et par conséquent l'erreur relative dépendent de la valeur du coefficient d'appareillage. Par exemple:

Si la mesure de 1 litre est enregistrée par un déplacement de 50 millimètres, l'erreur absolue de 0,5 mm correspond à 10 millilitres et l'erreur relative est égale à 1 pour cent sur une mesure de 1 litre et à 2 pour cent sur une mesure de 0,5 litre.

Si la mesure de 1 litre n'est enregistrée que par un déplacement de 25 millimètres, l'erreur absolue est deux fois plus grande puisque 0,5 mm correspondent alors à 20 millilitres et il en va de même de 1 litre et à 4 pour cent sur une mesure de 0,5 litre.

La valeur du coefficient d'appareillage doit être connue avec une bonne précision (au millilitre près); elle doit être exactement contrôlée lors des étalonnages périodiques.

B – Mesure des temps

La mesure des temps est assurée par le déroulement, à *vitesse constante*, du papier enregistreur. Lorsque la cloche est immobile, le déroulement du papier permet de tracer l'*axe des temps*, qui est généralement horizontal: il est recommandé de faire cet enregistrement au début de chaque examen.

Le spiromètre doit permettre d'enregistrer des phénomènes de rapidité très différente, aussi doit-il disposer de *plusieurs vitesses de déroulement*. Trois vitesses, au moins, sont nécessaires à l'enregistrement des épreuves spirométriques usuelles.

Pour chacune des vitesses de déroulement, la précision des mesures de temps dépend encore de la précision de lecture. Si l'on admet que la lecture des tracés puisse être faite à 0,5 millimètre près, on peut donner, à titre indicatif, les échelles de temps suivantes, correspondant à une précision égale à un pour cent:

25 mm = 1 minute (enregistrements durant 2 minutes au moins),

100 mm = 1 minute (épreuves durant environ 0,5 minute),

50 mm = 1 seconde (épreuves durant une seconde environ).

Il est possible d'utiliser une troisième vitesse un peu moins rapide que 50 mm par seconde, mais les vitesses inférieures à 25 mm par seconde ne permettent plus d'enregistrer correctement les épreuves d'expiration forcée.

L'exactitude des étalonnages de temps doit être vérifiée périodiquement.

Il est souhaitable que le passage d'une vitesse de déroulement à une autre se fasse de façon quasi-instantanée, c'est-à-dire que le déroulement du papier ait repris une vitesse constante après un délai de l'ordre d'un dixième de seconde qui est pratiquement négligeable en spiropgraphie. Lorsque cette condition n'est pas réalisée, il faut étudier l'appareil dont on dispose et déterminer exactement le délai au bout duquel le déroulement du papier devient constant et par conséquent utilisable pour l'enregistrement (ce temps peut atteindre dans certains cas une ou plusieurs secondes).

C – Mesure des débits

Le déplacement simultané du papier enregistreur en fonction du temps et du style inscripteur en fonction du volume du circuit réalise des *courbes spiropgraphiques* sur lesquelles on peut faire non seulement des mesures de volumes et de temps, mais aussi des mesures de débits.

Le cas le plus simple est celui d'un *débit constant*: l'appareil enregistre une droite oblique par rapport aux axes et dont la pente est proportionnelle au débit. C'est ainsi que la consommation d'oxygène d'un sujet au repos se traduit, sur de nombreux appareils, par une ascension régulière du tracé ventilatoire (figure 1): le sujet prélève alors, dans les gaz de l'enceinte, un débit constant d'oxygène mesuré par l'ascension moyenne du spirogramme.

Mais il s'agit souvent de débits variables dans le temps: le courant gazeux peut alors soit conserver toujours la même direction (débit variable unidirectionnel), soit inverser alternativement sa direction (débit alternatif). Un *débit variable unidirectionnel* donne lieu à une courbe dont la pente varie sans jamais s'inverser. On peut évaluer la valeur instantanée du débit en un point donné, en construisant par ce point la tangente à la courbe et en mesurant la pente de cette tangente: en fait, il est rarement possible de faire cette mesure avec une bonne précision.

Pratiquement, on détermine le *débit moyen* dans un intervalle de temps donné: c'est ainsi que l'on procède, lors de l'épreuve d'expiration forcée, pour mesurer le volume expiré au maximum en une seconde (figure 9).

La courbe inscrite par un *débit alternatif* (voir par exemple la ventilation au repos, figures 1, 2 et 3) dessine une série d'oscillations dont chacune correspond à l'entrée et à la sortie d'un certain volume de gaz ou *volume courant*, qui représente l'amplitude des oscillations. La *ventilation* est alors exprimée, conventionnellement, par la somme des volumes courants comptés une fois pour chaque oscillation, dans un intervalle de temps égal à l'unité ⁽¹⁾. Pour calculer simplement une ventilation, on détermine sur le tracé spiropgraphique les *valeurs moyennes du volume courant et de la fréquence* des oscillations. La fréquence ventilatoire est obtenue par simple comptage dans un intervalle connu mesuré parallèlement à l'axe des temps. Le volume courant moyen peut être déterminé graphiquement, avec une bonne approximation, quand la ventilation est assez régulière: on trace, dans l'intervalle de temps choisi pour la mesure de fréquence, les deux droites parallèles qui figurent les niveaux moyens des pointes de fin d'expiration et de fin d'inspiration; puis on mesure, parallèlement à l'axe des volumes, la distance qui sépare ces deux droites.

Cependant, sur certains appareils, la ventilation est mesurée directement par un *dispositif totalisateur automatique* qui doit être étalonné avec précision ⁽²⁾. Si le réglage de ce totalisateur ne peut pas être modifié en fonction des conditions physiques de mesure, il faut corriger ses indications, comme on fait pour les résultats obtenus à partir des courbes spiropgraphiques (voir paragraphe E, ci-dessous).

D – Lecture des spirogrammes et mesure des longueurs

Les mesures de longueurs interviennent constamment dans la lecture des spirogrammes. Elles portent rarement sur l'enregistrement lui-même mais sur un ensemble de droites construites après coup par l'opérateur. Les droites qui serviront à des mesures de volume doivent être rigoureusement parallèles à l'axe des volumes,

(1) En fait, les volumes inspiré et expiré lors de chaque cycle ventilatoire ne sont pas exactement égaux. Pour des raisons théoriques, il est préférable de prendre pour définition exacte de la ventilation la somme des volumes courants expirés pendant l'unité de temps.

(2) Ces totalisateurs automatiques ne tiennent pas compte de la consommation d'oxygène. Par conséquent, lorsque celle-ci n'est pas compensée par une admission continue équivalente d'oxygène pur dans l'enceinte de mesure, leurs indications sont faussées: l'ordre de grandeur de l'erreur sur la ventilation lue au compteur, dans ces conditions, est voisin de la moitié de la consommation d'oxygène pendant le temps de la mesure.

celles qui serviront à des mesures de temps, parallèles à l'axe des temps. Dans ce but, les axes des temps et des volumes ont été tracés au début de chaque examen. Cette précaution est utile même si le papier enregistreur porte un réseau de lignes dont l'espacement est proportionnel aux unités de temps et de volume: elle permet de vérifier que le papier est correctement placé sur l'appareil et que les axes tracés avec l'inscripteur sont bien parallèles au quadrillage du papier. Lorsque le papier n'est pas quadrillé, il peut être utile de tracer avec l'inscripteur, à la fin de l'examen, des segments parallèles aux axes et passant par les points remarquables du spirogramme (le début de l'expiration forcée, par exemple).

Comme on construit plus facilement des perpendiculaires à un axe de référence que des parallèles, il est souhaitable que les axes de temps et de volumes soient *exactement rectangulaires entre eux*, par construction; il faut vérifier périodiquement la direction de ces axes qui peut être modifiée par l'usure de l'appareillage (notamment l'axe des cylindres enregistreurs peut s'incliner et les guides de l'inscripteur peuvent jouer sur leur support).

Fait avec soin à l'aide d'une équerre, le tracé d'une perpendiculaire n'expose qu'à des erreurs négligeables en spiropgraphie; il est cependant de bonne précaution de vérifier, par la méthode classique de retournement, l'exactitude de l'équerre utilisée.

C'est par une approximation à vue, qui atteint une bonne précision lorsque l'opérateur est entraîné, que l'on trace la *ligne de base* du spirogramme (position moyenne des pointes de fin d'expiration). On fait de même pour tracer des segments parallèles à cette ligne de base (il est bon parfois de contrôler cette dernière construction en mesurant la distance qui sépare les extrémités des parallèles).

Les *mesures de longueur* sont faites avec des règles plates, transparentes de préférence, graduées en millimètres ou, mieux, en *demi-millimètres*. Les règles doivent être parfaitement droites, ce qu'on vérifie aisément par la méthode de retournement. L'erreur de construction sur la graduation doit être négligeable devant l'erreur de lecture, donc inférieure à 0,5 millimètre pour une règle de 50 centimètres de longueur.

Il est conseillé de noter sur les tracés les longueurs mesurées, distinctement des valeurs correspondantes en litres ou en minutes, cela facilite le dépistage des erreurs accidentelles de lecture ou de calcul.

E – Correction de température et de pression

Le volume occupé par une masse donnée de gaz sec dépend de la température et de la pression de ce gaz. En spiropgraphie, il faut en outre considérer le volume et la pression partielle de la vapeur d'eau qui se mélange aux gaz, tant dans les circuits de mesure que dans les voies aériennes et les poumons, et qui définissent l'état hygrométrique du mélange. Cet état hygrométrique peut être déduit de la température puisqu'il est toujours très voisin de la saturation complète (degré hygrométrique quasi-égal à 100 pour cent).

La température doit être mesurée dans la cloche spiropgraphique ou, à défaut, dans l'air qui en sort; elle ne doit pas varier sensiblement au cours d'un examen.

Il est souhaitable de connaître la *pression barométrique* régnant dans la pièce même où sont faites les mesures (la pression dans le spiropgraphe doit être égale à la pression atmosphérique). Cependant, pour les examens spiropgraphiques de routine, les variations locales de la pression atmosphérique n'entraînent que des erreurs assez faibles et l'on peut se contenter de connaître l'*altitude* du lieu, altitude à laquelle correspond une valeur moyenne de la pression atmosphérique. On trouvera, sur le tableau 1 suivant, les valeurs des pressions barométriques moyennes correspondant aux dénivellations, comptées de part et d'autre du niveau de la mer (si les mesures sont faites dans le sous-sol, il faut bien entendu calculer l'altitude réelle à partir de la profondeur de la mine et de l'altitude de la surface du sol au-dessus de la mer et tenir compte éventuellement des conditions d'aéragé).

Pour obtenir des *valeurs universellement comparables*, il faut éliminer l'influence de la température et de la pression locales, ce qu'il est aisé de faire en appliquant les lois physiques des gaz: le volume mesuré dans des *conditions locales* connues est « corrigé » grâce à un *coefficient de correction*: la valeur corrigée exprime le volume

T A B L E A U 1

Pression barométrique moyenne en fonction de la dénivellation de 2000 mètres au-dessous du niveau de la mer à 4000 mètres au-dessus

(d'après M. Cara - Le poumon et le cœur, 11-9-1955, 843-864)

Altitude	Pression moyenne	Altitude	Pression moyenne
— 2 000 m	958,3 mm Hg	+ 1 000 m	674,0 mm Hg
— 1 900	947,5	+ 1 100	665,9
— 1 800	936,8	+ 1 200	657,8
— 1 700	926,2	+ 1 300	649,8
— 1 600	915,7	+ 1 400	641,9
— 1 500	905,3	+ 1 500	634,2
— 1 400	895,0	+ 1 600	626,4
— 1 300	884,7	+ 1 700	620,2
— 1 200	874,5	+ 1 800	611,2
— 1 100	864,5	+ 1 900	603,6
— 1 000	854,6	+ 2 000	596,2
— 900	844,7	+ 2 100	588,8
— 800	834,9	+ 2 200	581,5
— 700	825,3	+ 2 300	574,3
— 600	815,7	+ 2 400	567,1
— 500	806,1	+ 2 500	560,0
— 400	796,7	+ 2 600	553,0
— 300	787,4	+ 2 700	546,1
— 200	778,4	+ 2 800	539,3
— 100	769,0	+ 2 900	532,5
0	760,0	+ 3 000	525,9
+ 100	751,0	+ 3 100	519,2
+ 200	742,1	+ 3 200	512,6
+ 300	733,3	+ 3 300	506,1
+ 400	724,5	+ 3 400	499,5
+ 500	716,0	+ 3 500	493,2
+ 600	707,4	+ 3 600	486,8
+ 700	699,0	+ 3 700	480,5
+ 800	690,7	+ 3 800	474,2
+ 900	682,4	+ 3 900	468,2
		+ 4 000	464,0

qu'aurait occupé la même quantité de gaz dans des conditions conventionnelles de température et de pression. Le calcul se fait simplement, selon l'égalité générale:

$$\begin{array}{l} \text{valeur mesurée} \quad \times \quad \text{coefficient de correction} \quad = \quad \text{valeur corrigée} \\ \text{(température, état} \\ \text{hygrométrique et} \\ \text{pression locaux)} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{(température, état hygro-} \\ \text{métrique et pression} \\ \text{conventionnels)} \end{array}$$

Ces corrections doivent être faites de façon différente selon le cas.

a) Dans le cas des valeurs ventilatoires (capacité vitale, volume courant, ventilation, etc.), l'intérêt s'attache à la connaissance du volume réellement occupé dans les poumons et les voies aériennes par la quantité de

gaz dont on a mesuré le volume dans le spiropgraphe. On exprime alors les résultats dans les *conditions alvéolaires conventionnelles (A)*, c'est-à-dire:

- température égale à 37° C,
- pression barométrique ambiante au moment de la mesure,
- saturation complète en vapeur d'eau (soit une pression partielle de vapeur d'eau égale à 47 mm de mercure) ⁽¹⁾

Le calcul du coefficient de correction c_A aux conditions alvéolaires peut être fait rapidement grâce à l'abaque I.

b) Dans le cas des *valeurs métaboliques* (consommation d'oxygène et dégagement de gaz carbonique), l'intérêt s'attache au contraire à connaître la *quantité de gaz* correspondant au volume mesuré. On exprime alors traditionnellement les résultats dans les *conditions normales des physiiciens (N)*, c'est-à-dire:

- température égale à 0° C,
- pression barométrique égale à 760 mm de mercure,
- absence complète de vapeur d'eau ⁽²⁾.

Dans ce cas cependant, il est plus correct d'exprimer les quantités de gaz en *molécules-grammes* ou moles; l'unité usuelle est le *millimole* ou millième de molécule-gramme, égal à 22,414 millilitres (N).

Le calcul des coefficients se fait sur l'abaque II pour la correction aux conditions normales et sur l'abaque III pour la conversion en millimoles.

c) A titre d'exemple, voici les corrections qu'il faut appliquer aux valeurs spiropgraphiques suivantes, mesurées dans les conditions ambiantes (*amb*), soit à 20° C, sous une pression de 750 mm de mercure et à saturation complète en vapeur d'eau:

- volume courant 0,50 litre (*amb*)
- ventilation 8,00 litres/minute (*amb*)
- consommation d'oxygène 0,30 litre/minute (*amb*)

pour le volume courant et la ventilation, le coefficient de correction aux conditions alvéolaires, c_A , est donné Par l'abaque I sur lequel on lit, à l'intersection des lignes 20° C et 750 mm de mercure, la valeur 1,102; les valeurs corrigées sont donc:

$$\text{volume courant} = 0,50 \times 1,102 = 0,551, \text{ soit } 0,55 \text{ litre (A)}$$

$$\text{ventilation} = 8,00 \times 1,102 = 8,816, \text{ soit } 8,82 \text{ l/min (A)}$$

Pour la consommation d'oxygène, les coefficients sont donnés, à l'intersection des lignes 20° C et 750 mm de mercure, sur l'abaque II où on lit la valeur 0,897 de c_n , coefficient de correction aux conditions normales, et sur l'abaque III où on lit la valeur 40,1 de c_m , coefficient de conversion en millimoles. On a donc:

$$\text{consommation d'oxygène} = 0,30 \times 0,897 = 0,269, \text{ soit } 0,27 \text{ l/min (N)}$$
 ou

$$\text{consommation d'oxygène} = 0,30 \times 40,1 = 12,0 \text{ millimoles/minute}$$

Ces résultats sont résumés ci-dessous:

volume courant	0,50 litre (<i>amb</i>)	0,55 litre (A)
ventilation	8,00 l/min (<i>amb</i>)	8,82 l/min (A)
consommation d'oxygène	0,30 l/min (<i>amb</i>)	} 0,27 l/min (N) 12,0 mM/min

F – Expression des résultats

Pour être conforme aux règles de la métrologie, toute mesure spiropgraphique devrait être complétée par un calcul d'erreur et son résultat exprimé par un nombre suivi de l'indication de l'erreur absolue (par exemple: 1,356 litre ± 0,012). Mais de telles règles ne sauraient s'appliquer à des mesures biologiques auxquelles s'attache obligatoirement une incertitude.

⁽¹⁾ « Body Temperature and Pressure, Saturated » (B.T.P.S.) des auteurs anglo-saxons.
⁽²⁾ « Standard Temperature and Pressure, Dry » (S.T.P.D.) des auteurs anglo-saxons.

La précision physique des mesures est indispensable pour que les erreurs liées à l'appareillage et à l'intervention de l'opérateur restent petites sinon négligeables devant les fluctuations biologiques.

Pour tenir compte de ces fluctuations et éviter la fausse précision, il faut en général arrondir les nombres qui expriment les résultats de chaque mesure spirométrique. Les observations physiologiques et les calculs théoriques d'erreur permettent de donner des indications pratiques suivant lesquelles on procédera.

- a) Les mesures de *volumes maximaux* dont l'ordre de grandeur est 5 litres, c'est-à-dire pratiquement les *valeurs supérieures à 2 litres*, seront arrondies à la *cinquantaine de millilitres supérieure*; par exemple:
 - capacité vitale = 4,863 litres, soit 4,90 litres
 - capacité vitale = 3,736 litres, soit 3,75 litres
 - VEMS = 2,635 litres, soit 2,65 litres
- b) Les mesures de *volumes maximaux* dont l'ordre de grandeur est un litre, c'est-à-dire pratiquement les *valeurs inférieures à 2 litres*, seront arrondies à la *dizaine de millilitres supérieure*; par exemple:
 - capacité vitale = 1,863 litre, soit 1,87 litre
 - VEMS = 0,784 litre, soit 0,79 litre
- c) Les mesures de *volumes courants*, lors de l'enregistrement de la ventilation au repos ou à l'effort, seront arrondies à la *dizaine de millilitres supérieure ou inférieure la plus proche*; par exemple:
 - volume courant = 0,362 litre, soit 0,36 litre
 - volume courant = 1,137 litre, soit 1,14 litre
- d) Les mesures de *ventilations maximales* seront arrondies au *litre supérieur*; par exemple:
 - ventilation maximale = 131,685 l/min, soit 132 l/min
 - ventilation maximale = 34,375 l/min, soit 35 l/min
- e) Les mesures de *ventilation au repos* ou à l'effort seront arrondies à la *dizaine de millilitres supérieure ou inférieure la plus proche*.
- f) Les mesures de *consommation d'oxygène* ou de *dégagement de gaz carbonique* seront arrondies aux *cinq millilitres supérieurs ou inférieurs*, si la précision de l'appareillage et les conditions de l'examen le permettent; si non elles seront arrondies à la *dizaine de millilitres supérieure ou inférieure la plus proche*. Les expressions en molécules-grammes seront arrondies au *dixième de millimole supérieur ou inférieur le plus proche*.
- g) Les mesures de *fréquence ventilatoire* seront arrondies au *demi-cycle supérieur ou inférieur le plus proche*.

Il est conseillé de n'arrondir les résultats qu'après avoir procédé aux corrections de température et de pression.

III – EXAMEN SPIROGRAPHIQUE AU REPOS

La méthode spirographique permet l'étude du *comportement respiratoire spontané* des sujets soumis à l'observation. On n'envisagera, dans cet aide-mémoire, que le cas des *examens au repos*. Ces examens ne peuvent être menés à bien qu'en respectant rigoureusement certaines règles.

A – Conditions générales des examens au repos

Le sujet doit être, de préférence, à jeun depuis plus de dix heures. Il doit observer un repos préalable de 20 à 30 minutes, en position allongée ou demi-assise, parfaitement confortable, dans une ambiance de température optimale.

Il doit être averti précisément de ce qu'on attend de lui et de ce que l'examen n'est ni nocif ni douloureux, ceci avant le début de la période de repos.

La pièce où se passent le repos préliminaire et l'examen doit être parfaitement calme et suffisamment silencieuse.

B – Conditions techniques des examens au repos

Un examen au repos peut être fait, de façon plus ou moins complète mais correcte, avec tout spirographe qui réponde aux normes énumérées aux chapitres I et II.

Il faut cependant insister sur une donnée technique essentielle: la composition du mélange gazeux respiré. L'appareil doit permettre de faire inhaler au sujet de l'*air atmosphérique* normal. Pour cela, on doit aérer soigneusement le circuit avant chaque examen et il faut disposer d'une *admission continue d'oxygène pur* pour compenser exactement la consommation d'oxygène du sujet. Quel que soit le dispositif adopté pour réaliser cette admission, son contrôle est souvent assuré par un réglage manuel: la qualité de la compensation dépend dans ce cas du soin et de la précision apportés par l'opérateur.

Enfin, il faut pouvoir éventuellement faire respirer de l'oxygène pur ou de l'air largement enrichi en oxygène (40 pour cent et plus).

C – Critères de correction des examens au repos

Les tracés doivent être l'objet d'une première critique au fur et à mesure de leur enregistrement. Dans les cas où ils paraissent perturbés (il s'agit généralement d'hyperventilation ou d'irrégularités ventilatoires), on peut soit prolonger l'examen jusqu'à ce que le spirogramme prenne un aspect satisfaisant, soit interrompre l'enregistrement pour rassurer le sujet et lui expliquer à nouveau qu'il doit laisser libre cours à ses automatismes respiratoires. Plusieurs essais sont parfois nécessaires mais, dans la grande majorité des cas, on obtient finalement un *enregistrement correct de la ventilation au repos*. Le tracé est alors caractérisé par:

- une bonne régularité de la fréquence ventilatoire et de l'amplitude ou volume courant;
- une bonne stabilité des pointes de fin d'expiration qui ne s'écartent pas sensiblement de la ligne de base;
- enfin, un aspect constant pendant plusieurs minutes (1).

(1) Ces règles souffrent des exceptions. En dehors du rythme bien connu de Cheyne-Stokes, on peut observer des variations de la fréquence et de l'amplitude ventilatoires, affectant une allure plus ou moins régulièrement périodique. Un observateur entraîné identifie aisément de tels tracés dont les caractères sont indépendants des circonstances de l'examen et qui peuvent rendre difficile, dans quelques rares cas, le calcul de la ventilation au repos.

On évitera de prolonger excessivement l'examen sous peine de voir apparaître de nouvelles irrégularités, dues à l'ennui ou à l'impatience.

Lorsque le tracé ventilatoire est bien stabilisé, il devient possible de faire sur l'enregistrement une mesure correcte de *consommation d'oxygène*. Certains appareils permettent d'enregistrer le débit de ce gaz apporté par le dispositif de compensation: on obtient alors un tracé qui permet de contrôler la régularité de l'admission et dont la pente mesure la consommation d'oxygène (figure 2). Sur d'autres appareils, on ne peut mesurer la consommation d'oxygène qu'en supprimant la compensation dont le débit n'est pas enregistré: il faut alors enrichir l'air d'une quantité suffisante d'oxygène pur pour préserver le sujet de l'hypoxie au cours des 4 ou 5 minutes nécessaires à la mesure (figure 3). Cette méthode n'est acceptable que si l'introduction de 1 ou 2 litres d'oxygène n'élève que peu la concentration de ce gaz dans le spiropgraphe (de 21 à 23 pour cent par exemple). Il est préférable de répéter la mesure.

Si l'appareillage le permet, on procède simultanément à la mesure *du dégagement de gaz carbonique*. Il faut insister sur le fait que, lors de cette mesure, il est absolument indispensable que le tracé ventilatoire soit correct puisque le dégagement de gaz carbonique est directement lié à la grandeur de la ventilation, quel que soit l'état métabolique du sujet. Si le dégagement de gaz carbonique est mesuré de façon discontinue – par absorption sur solution de potasse pendant un temps donné et libération secondaire du gaz fixé, sous l'action d'un acide fort –, il importe d'identifier sur le tracé la période correspondant à cette mesure pour contrôler la régularité de la ventilation avant et pendant la mesure; de toute façon, il est bon de répéter la mesure.

L'enregistrement de la ventilation, de la consommation d'oxygène et du dégagement de gaz carbonique ne peut cependant être sûrement authentifié que lorsqu'on connaît la valeur, dans le même intervalle de temps, de l'équivalent respiratoire à l'oxygène et du quotient respiratoire. La constance de ces deux grandeurs est un bon signe de validité de l'enregistrement mais leurs valeurs, comme leurs variations éventuelles au cours de l'examen, doivent être soumises à une critique physiopathologique serrée.

Sur certains appareils, équivalent respiratoire ou quotient respiratoire sont indiqués à intervalles de temps définis, au cours même de l'enregistrement, et peuvent être lus sur le tracé. Dans la plupart des cas, ces valeurs ne sont connues qu'après la fin de l'examen, comme conclusion des mesures faites sur le spiropgramme: dans ce cas, il sera prudent de laisser le sujet au repos pendant la durée des calculs, de façon à pouvoir reprendre l'examen si les résultats du premier enregistrement sont contestables.

Ces conditions d'examen doivent être rigoureusement respectées si l'on veut obtenir des enregistrements au repos qui soient significatifs et interprétables. C'est dire que de tels examens ne peuvent pratiquement pas entrer dans la routine de la médecine du travail: ils doivent être réservés à certains sujets, choisis d'après les données de la clinique. On peut ainsi consacrer tout le soin et tout le temps nécessaires à la réalisation d'examens de repos, peu nombreux mais bien faits.

D – Mesure de la ventilation et de la consommation d'oxygène au repos

La mesure, sur le tracé, de la ventilation et de la consommation d'oxygène ne présente pas de difficulté si l'examen a été bien fait. Il est alors facile de déterminer graphiquement:

- le niveau et éventuellement la pente de la ligne de base;
- la droite parallèle à la ligne de base qui représente le niveau moyen des pointes de fin d'inspiration: la distance entre ces deux droites, mesurée parallèlement à l'axe des volumes, est proportionnelle au volume courant;
- enfin, la fréquence ventilatoire et la consommation d'oxygène mesurées dans le même intervalle de temps que le volume courant moyen.

Le lecteur trouvera des exemples de construction de ces droites sur les figures 1, 2 et 3. Rappelons seulement:

- que parfois la fréquence ventilatoire ne reste pas stable pendant plusieurs minutes d'affilée; il faut alors s'attacher à reconnaître la fréquence fondamentale qui apparaît pendant plusieurs périodes d'une ou deux minutes, le volume courant prenant pendant chacune de ces périodes une valeur identique (figure 1);

- qu'il est préférable de déterminer le volume d'oxygène consommé dans un intervalle de temps de plusieurs minutes: on traduit ensuite la valeur trouvée en consommation d'oxygène par minute; le résultat ainsi obtenu atteint une bien meilleure précision.

Lorsque la construction des droites nécessaires est faite, des calculs simples restent à faire dont on trouvera ci-dessous des exemples, illustrés par les figures 1, 2 et 3.

Pour fixer les choses, les calculs seront faits en utilisant les caractéristiques d'étalonnage qui ont servi à l'établissement des figures, soit:

- 1 litre = 50 mm, d'où 1 mm = 0,02 litre
- constante d'appareillage: 0,02 litre/millimètre
- 1 minute = 30 mm (première vitesse de déroulement)
- 1 minute = 100 mm (deuxième vitesse de déroulement)
- 1 seconde = 40 mm (troisième vitesse de déroulement)

Exemple 1 (figure 1)

Sur la figure 1, on a représenté un spirogramme obtenu après enrichissement modéré de l'air du circuit en oxygène: il n'y a donc pas de compensation de la consommation d'oxygène du sujet au cours de l'enregistrement et le tracé est ascendant.

La position des pointes de fin d'expiration est tout à fait stable, il est donc facile de tracer la ligne de base. Le niveau moyen des pointes de fin d'inspiration est représenté par des droites, tracées parallèlement à la ligne de base, pendant trois périodes où la ventilation affecte un aspect identique: les valeurs du volume courant et de la fréquence ventilatoire sont les mêmes au cours de ces trois périodes.

La fréquence ventilatoire, comptée sur les mêmes régions du tracé, est égale à 18 par minute.

Pour déterminer la valeur moyenne du volume courant pendant ces trois périodes, on trace parallèlement à l'axe des volumes une droite qui coupe la ligne de base et sa parallèle: la longueur H du segment ainsi défini est proportionnelle au volume courant, selon l'égalité:

$$\begin{aligned} \text{volume courant} &= H \times Cte \\ &= 15,5 \text{ mm} \times 0,02 \text{ l/mm} = 0,31 \text{ litre} \end{aligned}$$

La ventilation est obtenue par multiplication:

$$\begin{aligned} \text{ventilation} &= \text{volume courant} \times \text{fréquence ventilatoire} \\ &= 0,31 \text{ litre} \times 18 \text{ par minute} \\ &= 5,58 \text{ litres/minute} \end{aligned}$$

Pour mesurer la consommation d'oxygène, on porte d'abord, parallèlement à l'axe des temps, une droite qui coupe la ligne de base près de son origine; sur cette droite, on porte une longueur correspondant à 5 minutes, soit 150 mm avec l'étalonnage utilisé; de là, on élève une perpendiculaire qui coupe la ligne de base du spirogramme: la longueur h_5 du segment ainsi déterminé est proportionnelle au volume d'oxygène consommé par le sujet pendant 5 minutes, soit:

$$\begin{aligned} \text{volume d'O}_2 \text{ consommé en 5 minutes} &= h_5 \times Cte \\ &= 57,5 \text{ mm} \times 0,02 \text{ l/mm} \\ &= 1,15 \text{ litre} \end{aligned}$$

On obtient par division la consommation d'oxygène par minute:

$$\begin{aligned} \text{consommation d'oxygène} &= 1,15 \text{ litre/5 minutes} \\ &= 0,230 \text{ litre/minute} \end{aligned}$$

On possède alors les résultats suivants, exprimés dans les conditions ambiantes de température et de pression:

fréquence ventilatoire	= 18 par minute	}	(amb)
volume courant	= 0,31 litre		
ventilation	= 5,58 litres/minute		
consommation d'oxygène	= 0,230 litre/minute		

La correction de ces résultats aux conditions alvéolaires, aux conditions normales ou en millimoles peut être faite rapidement, grâce aux abaques qui fournissent aussitôt la valeur des coefficients, soit pour 21,5° C et 765 mm de mercure:

- coefficient de correction aux conditions alvéolaires: 1,093 (abaque I)
- coefficient de correction aux conditions normales: 0,910 (abaque II)
- coefficient de conversion en millimoles: 40,4 (abaque III)

Exprimés dans les conditions alvéolaires, le volume courant et la ventilation deviennent:

$$\begin{aligned} \text{volume courant (A)} &= 0,31 \text{ litre (amb)} \times 1,093 \\ &= 0,338 \text{ litre, soit } 0,34 \text{ litre (A)} \\ \text{ventilation (A)} &= 5,58 \text{ litres/minute (amb)} \times 1,093 \\ &= 6,098 \text{ l/min, soit } 6,10 \text{ litres/minute (A)} \end{aligned}$$

La consommation d'oxygène sera exprimée dans les conditions normales (N) ou en millimoles (mM):

$$\begin{aligned} \text{consommation d'oxygène (N)} &= 0,230 \text{ litre/minute (amb)} \times 0,910 \\ &= 0,214, \text{ soit } 0,215 \text{ litre/minute (N)} \\ \text{ou} \\ \text{consommation d'oxygène} &= 0,230 \text{ litre/minute (amb)} \times 40,4 \\ &= 9,29, \text{ soit } 9,3 \text{ millimoles/minute} \end{aligned}$$

Résumons ces résultats:

fréquence ventilatoire	18 par minute	
volume courant	0,31 litre (amb) . . .	0,34 litre (A)
ventilation	5,58 l/min (amb) . . .	6,10 l/min (A)
consommation d'oxygène . . .	0,230 l/min (amb) . . .	} 0,215 l/min (N) 9,3 mM/min

Exemple 2 (figure 2)

Cette figure a été établie avec l'étalonnage original de l'appareil, soit 25 mm = 1 minute, pour la première vitesse de déroulement et 30 mm = 1 litre; la constante d'appareillage est égale à 0,0333 litre par millimètre.

Sur la figure 2, on a représenté un spirogramme obtenu en compensant la consommation d'oxygène du sujet, l'admission d'oxygène s'inscrivant au-dessous du tracé ventilatoire: le spirogramme est horizontal, la courbe qui figure l'admission d'oxygène est ascendante (elle inscrit en fait la diminution du volume de la réserve destinée à la compensation).

La mesure de la ventilation se fait, après construction graphique des droites nécessaires, toujours de la même façon. Dans le cas de cette figure, on a un tracé régulier, pendant 5 minutes environ, au milieu de l'enregistrement.

La mesure de la consommation d'oxygène se fait sur la courbe d'admission continue de ce gaz: elle est aisée sur ce spirogramme où la ventilation et la compensation sont bien stables. On a mesuré le volume d'oxygène consommé pendant 5 minutes.

Les calculs sont indiqués ci-dessous:

$$\begin{aligned} \text{fréquence ventilatoire} &= 15 \text{ par minute} \\ \text{volume courant} &= H \times \text{Cte} \\ &= 10,5 \text{ mm} \times 0,033 \text{ l/mm} = 0,35 \text{ litre (amb)} \\ \text{ventilation} &= \text{volume courant} \times \text{fréquence ventilatoire} \\ &= 0,35 \times 15 \text{ par minute} = 5,25 \text{ l/min (amb)} \\ \text{consommation d'oxygène} &= (\text{volume d'O}_2 \text{ consommé en 5 minutes})/5 \\ &= h_s \times \text{Cte} \\ &= (33 \text{ mm} \times 0,033 \text{ l/mm})/5 \\ &= 1,10 \text{ litre}/5 \text{ minutes} = 0,220 \text{ l/min (amb)} \end{aligned}$$

Ces résultats, obtenus dans les conditions ambiantes, seront corrigés et exprimés soit dans les conditions alvéolaires, soit dans les conditions normales ou en millimoles. La température étant égale à 23° C et la pression barométrique à 758 mm de mercure, les coefficients de correction donnés par les abaques sont les suivants:

- coefficient de correction aux conditions alvéolaires: 1,086
- coefficient de correction aux conditions normales: 0,895
- coefficient de conversion en millimoles: 40,0

On aura finalement:

fréquence ventilatoire	15 par minute	
volume courant	0,35 litre (amb)	0,380 ou 0,38 litre (A)
ventilation	5,25 l/min (amb)	5,701 ou 5,70 l/min (A)
consommation d'oxygène	0,220 l/min (amb)	} 0,197 ou 0,195 l/min (A) 8,80 ou 8,8 mM/min

Exemple 3 (figure 3)

La figure 3 représente un spirogramme obtenu avec une compensation de la consommation d'oxygène du sujet mais, dans ce cas, il n'existe pas de dispositif enregistrant l'admission continue d'oxygène: seul l'opérateur sait (et doit noter) le moment à partir duquel il a admis un débit constant de ce gaz (les cinq dernières minutes du tracé horizontal).

Pour mesurer la consommation d'oxygène, il est nécessaire d'admettre rapidement un certain volume de ce gaz (1 litre sur la figure), de former l'admission continue et de laisser le sujet respirer dans l'appareil pendant un temps qui ne l'expose pas à l'hypoxie.

Les résultats correspondant à la figure 3 sont indiqués brièvement ci-dessous:

fréquence ventilatoire	12 par minute	
volume courant	0,40 litre (amb)	0,448 ou 0,45 litre (A)
ventilation	4,80 l/min (amb)	5,366 ou 5,37 l/min (A)
consommation d'oxygène	0,250 l/min (amb)	} 0,224 ou 0,225 l/min (N) 10,02 ou 10,0 mM/min

La mesure éventuelle de *dégagement de gaz carbonique* est faite de façon très différente selon l'appareillage utilisé, aussi ne sera-t-elle pas envisagée dans cet aide-mémoire. On trouvera cependant sur la figure 4 l'aspect du tracé obtenu avec un appareil destiné particulièrement à l'étude des échanges respiratoires. Le spirogramme proprement dit est horizontal, l'échelle de volumes correspondante est très petite (10 mm pour un litre), mais ce tracé ne sert qu'à contrôler la régularité de la ventilation et sa fréquence. En effet, c'est par l'intermédiaire de totalisateurs que sont enregistrés la ventilation (en litres/minute A), la consommation d'oxygène et le dégagement de gaz carbonique (en litres/minute N). Enfin, on peut enregistrer directement, sur un quatrième canal, soit l'équivalent respiratoire à l'oxygène, soit le quotient respiratoire.

E – Calcul de l'équivalent respiratoire à l'oxygène et du quotient respiratoire au repos

L'*équivalent respiratoire* est mesuré par le rapport de la ventilation à la consommation d'oxygène, il représente le nombre de litres d'air ventilés par le sujet chaque fois qu'il consomme un litre d'oxygène. Lorsque l'examen de repos a été conduit dans de bonnes conditions, l'équivalent respiratoire prend une valeur stable au cours de l'enregistrement et son calcul apporte des renseignements physiopathologiques précieux.

Pour faire ce calcul, il suffit de connaître la grandeur de la ventilation exprimée dans les conditions alvéolaires et de la consommation d'oxygène exprimée dans les conditions normales:

$$\text{équivalent respiratoire} = \text{ventilation (l/min A)} / \text{consommation d'oxygène (l/min N)}$$

Les valeurs normales sont comprises entre 20 et 32 litres d'air (A) ventilés par litre d'oxygène (N) consommé.

Si l'on exprime la consommation d'oxygène en millimoles par minute, ce qui est théoriquement préférable, le calcul de l'équivalent respiratoire se fait de façon analogue: les résultats sont alors exprimés en litres d'air (A) ventilés par millimole d'oxygène consommé; les valeurs normales sont comprises entre 0,45 et 0,7.

A titre d'exemple, les valeurs de l'équivalent respiratoire correspondant aux spirogrammes des figures 1, 2 et 3 sont les suivantes:

Exemple 1 (figure 1)

ventilation	6,10 litres/minute (A)	
consommation d'oxygène	} 0,215 litre/minute (N) 9,3 millimoles/minute	
équivalent respiratoire =		6,10/0,215
	= 29 litres d'air (A) ventilés par litre d'oxygène (N) consommé	
	= 6,10/9,3	
	= 0,65 litre d'air (A) ventilé par millimole d'oxygène consommé	

Exemple 2 (figure 2)

$$\begin{aligned} \text{ventilation} & \dots\dots\dots 5,70 \text{ litres/minute (A)} \\ \text{consommation d'oxygène} & \dots\dots\dots \left. \begin{array}{l} 0,195 \text{ litre/minute (N)} \\ 8,8 \text{ millimoles/minute} \end{array} \right\} \\ \text{équivalent respiratoire} & = 5,70/0,195 \\ & = 29 \text{ litres d'air (A) ventilés par litre} \\ & \quad \text{d'oxygène (N) consommé} \\ & = 5,70/8,8 \\ & = 0,65 \text{ litre d'air (A) ventilé par millimole} \\ & \quad \text{d'oxygène consommé} \end{aligned}$$

Exemple 3 (figure 3)

$$\begin{aligned} \text{ventilation} & \dots\dots\dots 5,37 \text{ litres/minute (A)} \\ \text{consommation d'oxygène} & \dots\dots\dots \left. \begin{array}{l} 0,225 \text{ litre/minute (N)} \\ 10,0 \text{ millimoles/minute} \end{array} \right\} \\ \text{équivalent respiratoire} & = 5,37/0,225 \\ & = 24 \text{ litres d'air (A) ventilés par litre} \\ & \quad \text{d'oxygène (N) consommé} \\ & = 5,37/10,0 \\ & = 0,55 \text{ litre d'air (A) ventilé par millimole} \\ & \quad \text{d'oxygène consommé} \end{aligned}$$

Dans l'exemple de la figure 4, l'équivalent respiratoire peut être lu directement sur l'enregistrement: il est égal à 24 litres d'air (A) ventilés par litre d'oxygène (N) consommé.

Le *quotient respiratoire* ne peut évidemment être calculé que si l'on dispose d'un appareil qui mesure le dégagement de gaz carbonique. Sa valeur est alors donnée par le rapport:

$$\text{quotient respiratoire} = \text{dégagement de gaz carbonique/consommation d'oxygène,}$$

les deux termes du rapport étant exprimés dans les mêmes unités.

Dans le cas de la figure 4, le quotient respiratoire peut être calculé; on a en effet:

$$\begin{aligned} \text{dégagement de gaz carbonique} & \dots\dots\dots 0,200 \text{ l/min (N)} \\ \text{consommation d'oxygène} & \dots\dots\dots 0,240 \text{ l/min (N)} \text{ (1)} \\ \text{quotient respiratoire} & = 0,20/0,24 \\ & = 0,833, \text{ soit } 0,83 \text{ litre de gaz carbonique dégagé} \\ & \quad \text{par litre d'oxygène consommé} \end{aligned}$$

Au cours d'un examen de repos bien conduit, le quotient respiratoire prend toujours une valeur inférieure à l'unité et normalement proche de 0,8.

Pour le calcul du quotient respiratoire, on évitera d'utiliser les valeurs arrondies de la consommation d'oxygène et du dégagement de gaz carbonique. Cependant, la valeur trouvée du quotient sera toujours arrondie à la deuxième décimale supérieure ou inférieure la plus proche: les conditions biologiques et techniques de mesure ne permettent pas de tenir compte de la troisième décimale qui serait, du reste, dénuée d'intérêt clinique.

F – Valeurs normales de la consommation d'oxygène au repos

Lorsque la consommation d'oxygène est mesurée chez un sujet à jeun, parfaitement au repos depuis une demi-heure, dans une pièce où la température est proche de 18° C, les résultats de cette mesure peuvent être comparés à des valeurs normales de la consommation d'oxygène, établies dans les conditions basales. Ces valeurs normales sont rapportées à la surface corporelle du sujet que l'on peut calculer rapidement, connaissant sa taille et son poids, sur l'abaque IV.

(1) Dans le cas de cet exemple, la précision des mesures de dégagement de gaz carbonique et de consommation d'oxygène dépend, d'une part, de la régularité de la ventilation et de la justesse des manœuvres de l'opérateur (qui règlent la dispersion des hauteurs de chaque sommet), d'autre part, de la durée de l'enregistrement. En effet, si l'erreur faite sur la mesure de hauteur d'un sommet est égale à dx, l'erreur sur le résultat final ne sera que dx/\sqrt{n} si on fait la *moyenne arithmétique* des résultats de n mesures. Si on fait une seule mesure sur la *moyenne graphique* des hauteurs pendant n minutes d'enregistrement, l'erreur est comprise entre dx/\sqrt{n} et dx sans qu'il soit possible de la mieux préciser.

TABLEAU 2

Valeurs normales de la consommation d'oxygène dans les conditions basales

(d'après M. Cara, *ibid.*)

Age	Consommation d'oxygène normale par minute et par mètre carré de surface corporelle			
	Sexe masculin		Sexe féminin	
	millimoles	litre (N)	millimoles	litre (N)
6 ans	9,28 env.	0,208 env.	9,05 env.	0,202 env.
9 ans	8,39 env.	0,188 env.	7,90 env.	0,177 env.
10 ans	8,21	0,184	7,72	0,173
11 ans	8,03	0,180	7,58	0,170
12 ans	7,72	0,173	7,27	0,163
13 ans	7,41	0,166	6,96	0,156
de 14 à 16 ans	7,14	0,160	6,65	0,149
de 16 à 18 ans	6,65	0,149	6,25	0,140
de 18 à 20 ans	6,33	0,142	5,89	0,132
de 20 à 40 ans	6,11	0,137	5,71	0,128
de 40 à 50 ans	5,98	0,134	5,57	0,125
de 50 à 60 ans	5,80	0,130	5,44	0,122
de 60 à 70 ans	5,71	0,128	5,26	0,118
de 70 à 80 ans	5,49	0,123	5,13	0,115



IV – LES ÉPREUVES SPIROGRAPHIQUES

Une bonne étude de la fonction ventilatoire peut être faite avec *trois épreuves spirographiques simples*, couramment utilisables en médecine du travail.

La *capacité vitale* est définie comme le plus grand volume d'air qu'un sujet peut mobiliser entre une inspiration forcée et une expiration forcée, ou inversement. Elle représente donc la limite supérieure des valeurs que peut prendre le volume courant, au cours de la ventilation. C'est un critère statique de la fonction ventilatoire: en effet, le temps nécessaire à l'exécution de l'épreuve n'est pas pris en considération. Aussi la connaissance de la capacité vitale ne permet-elle pas de préjuger les possibilités ventilatoires d'un sujet, au cours d'un effort par exemple: mais cette connaissance est indispensable à l'interprétation des autres épreuves spirographiques.

L'*expiration forcée* est définie comme une expiration aussi rapide et aussi ample que possible: elle doit donc être exécutée après une inspiration maximale, son amplitude doit être égale à la capacité vitale. La fonction ventilatoire d'un sujet dépend essentiellement du temps expiratoire parce que les possibilités inspiratoires sont très généralement supérieures aux possibilités expiratoires. De là vient l'importance de l'expiration forcée comme épreuve dynamique.

La *ventilation maximale* est définie comme la plus grande ventilation qu'un sujet peut réaliser; elle représente donc la limite supérieure des valeurs que peut prendre la ventilation. C'est encore une épreuve dynamique et la fréquence à laquelle est exécutée l'épreuve joue un rôle très important. Elle explore directement les possibilités ventilatoires des sujets.

Chacune de ces épreuves donne une image partielle mais complémentaire de la fonction ventilatoire: leurs résultats sont étroitement liés entre eux, ce qui permet de reconnaître si les mesures faites correspondent bien à un *maximum* pour le sujet examiné. Toute la difficulté des épreuves spirographiques vient de cette nécessité d'obtenir des réponses maximales en faisant exécuter au sujet des mouvements ventilatoires forcés qui ne lui sont pas habituels. Il n'y a par contre guère de difficulté technique proprement dite.

Il est préférable que le sujet soit assis pour exécuter ces épreuves.

L'opérateur doit lui expliquer très précisément ce qu'il devra faire: de bonnes explications évitent les répétitions, fastidieuses et parfois fatigantes, de chaque épreuve.

Puis on laisse le sujet respirer normalement dans le spiromètre pendant une minute environ, en utilisant la première vitesse de déroulement, de façon à repérer la ligne de base du spirogramme. L'opérateur commande alors le début de l'épreuve et la dirige au fur et à mesure de son exécution.

Si un sujet donne des signes de fatigue (fonction ventilatoire très médiocre ou examen difficile et long, faute de coopération), on le laissera se reposer et se distraire pour ne reprendre l'examen qu'au bout d'un quart d'heure. Un examen spirométrique ne doit pas être fatigant.

A – Épreuve de la capacité vitale

a) Technique d'exécution

Inspiration et expiration seront faites sans hâte mais d'un seul mouvement qui ne doit être interrompu ni par des arrêts ni par des reprises. Ces mouvements font appel à toute la musculature ventilatoire: ils doivent donc être à la fois thoraciques et abdominaux; en outre, l'inspiration sera aidée d'une extension dorsale, l'expiration d'une flexion en avant.

Chaque mouvement sera poursuivi aussi loin que possible: c'est l'opérateur et non le sujet qui doit reconnaître si inspiration et expiration ont réellement atteint leur maximum. Pour cela, il doit observer continuellement le sujet et le spirogramme. Le sujet doit accomplir effectivement les mouvements qu'on lui indique et l'opérateur contrôle cette exécution (il peut être utile d'examiner les sujets le torse nu); la fin de l'expiration forcée est la plus facile à reconnaître: il se produit à ce moment une certaine gêne au retour veineux qui entraîne une rougeur du visage chez la plupart des sujets. L'enregistrement apporte aussi des renseignements précieux: l'opérateur ne doit pas interrompre l'effort d'un sujet de bonne volonté tant que cet effort produit une variation de volume visible sur le spirogramme et le mouvement doit être poursuivi tant qu'il n'a pas atteint une amplitude au moins égale à celle des essais précédents.

Tant que l'épreuve n'est pas terminée, l'opérateur doit à la fois guider le sujet et l'encourager à poursuivre son effort.

Cependant, quel que soit le soin apporté à la direction de l'épreuve, il est bien rare qu'un sujet donne véritablement sa capacité vitale dès le premier essai. Aussi l'épreuve sera-t-elle toujours répétée; il est indispensable de faire au moins trois enregistrements de capacité vitale, d'aspect satisfaisant (figure 5). Il arrive parfois que l'incompréhension ou la mauvaise volonté du sujet obligent l'opérateur à dépasser largement le chiffre des 3, 4 ou 5 essais qui suffisent habituellement. Il est alors utile de varier le mode d'exécution et de commencer tantôt par le mouvement inspiratoire, tantôt par le mouvement expiratoire. Chez les malades atteints d'emphysème pulmonaire grave, la capacité vitale réelle ne peut généralement être enregistrée qu'en commençant l'épreuve par l'expiration complète qui sera exécutée lentement, en évitant l'apparition de fortes pressions intra-pulmonaires, gênantes dans ces cas (figure 13).

b) Calcul de la capacité vitale

Il s'agit d'une simple mesure de volume que l'on fera donc parallèlement à l'axe des volumes. Mais l'enregistrement de la capacité vitale n'est pas instantané: on doit donc tenir compte de la consommation d'oxygène si elle n'est pas régulièrement compensée. Pour cela, on trace parallèlement à la ligne de base du tracé ventilatoire deux segments de droite passant par les pointes supérieure et inférieure du tracé; c'est entre ces deux segments obliques que l'on mesure le déplacement d qui représente la capacité vitale (figure 6).

On a alors, dans le cas par exemple de la figure 6:

$$\begin{aligned}\text{capacité vitale} &= d \times \text{Cte} \\ &= 160 \text{ mm} \times 0,02 \text{ l/mm} \\ &= 3,20 \text{ litres (amb)}\end{aligned}$$

La figure 6 met en évidence l'erreur de 0,15 litre qui serait faite en négligeant la consommation d'oxygène.

Le résultat obtenu dans les conditions ambiantes est corrigé aux conditions alvéolaires conventionnelles (A), soit pour 22° C et 750 mm de mercure un coefficient de correction donné par l'abaque I égal à 1,092:

$$\begin{aligned}\text{capacité vitale} &= 3,20 \text{ l} \times 1,092 \\ &= 3,494, \text{ soit } 3,50 \text{ litres (A)}.\end{aligned}$$

Pratiquement, on mesure le déplacement en millimètres pour chacune des épreuves d'aspect correct; le calcul et les corrections ne portent que sur l'épreuve qui a donné la plus grande valeur.

c) Critique des enregistrements de capacité vitale

Les tracés des épreuves de capacité vitale doivent être critiqués au fur et à mesure de leur enregistrement.

Un tracé correct présente en général les caractères suivants: il s'arrondit progressivement à la fin de chaque inspiration et expiration; l'écart observé entre les amplitudes données au cours des trois bonnes épreuves est nettement inférieur à 0,5 litre; l'exécution des trois épreuves est régulière et demande chaque fois un temps à peu près égal (figure 5).

Au contraire, un examen incorrect est remarquable par les arrêts et les reprises dans l'exécution, l'inégalité des temps nécessaires à la réalisation des épreuves; les fins d'inspiration et d'expiration sont marquées par un arrêt complet ou au contraire par des pointes très fines qui traduisent un mouvement hâtivement interrompu (figure 7).

Cependant, il faut aussi tenir compte du comportement des sujets. Certains, peu compréhensifs, exécutent difficilement les épreuves, ce qui donne lieu à des tracés « suspects » que la confrontation avec les autres épreuves peut révéler pourtant tout à fait corrects (par exemple, le cinquième essai sur la figure 7). Aussi les indications ci-dessus ne peuvent-elles servir qu'à la critique immédiate, au cours de l'enregistrement. Il peut y avoir intérêt parfois à se contenter momentanément d'un tracé suspect et à poursuivre l'examen: lorsque le sujet sera mieux en confiance et mieux entraîné à l'exécution des mouvements ventilatoires forcés, à la fin de l'examen, il accomplira de bonnes épreuves de capacité vitale ayant un aspect plus satisfaisant.

B – Épreuve d'expiration forcée

a) Technique d'exécution

Le sujet qui vient d'exécuter plusieurs épreuves de capacité vitale est en général entraîné à faire des expirations complètes: on lui demande maintenant de donner *une expiration aussi ample, aussi rapide et aussi complète que possible*.

L'inspiration préalable doit être réellement maximale; l'opérateur doit vérifier que son amplitude est bien voisine de celle qui a été donnée pour la meilleure épreuve de capacité vitale.

Le sujet est alors invité à s'immobiliser pendant quelques secondes: l'opérateur change aussitôt la vitesse d'enregistrement pour que le papier se déplace rapidement (troisième vitesse, qui doit être de l'ordre de 50 millimètres par seconde).

L'opérateur commande tout de suite, *par un seul mot bref*, le début de l'expiration forcée. *Ce début doit être brusque*, sans période initiale de « mise en train », le débit expiratoire atteignant d'emblée sa plus grande valeur.

Le sujet doit maintenir une contraction maximale de ses muscles expirateurs *pendant plusieurs secondes* (cinq ou sept secondes, au minimum, chez les sujets normaux). Des questions de cadrage rendent parfois difficile l'enregistrement à grande vitesse de la totalité de l'expiration; on peut alors revenir à une vitesse de déroulement plus faible à partir de la troisième seconde environ de l'expiration (figure 8). Mais l'opérateur continuera de guider et d'encourager le sujet pour obtenir de lui une *expiration complète*.

Ici encore, il est rare que la première épreuve soit maximale. D'après l'aspect du tracé, l'opérateur indique au sujet la partie de l'épreuve dont il doit améliorer particulièrement l'exécution: le début de l'expiration ou sa partie moyenne, l'inspiration préalable ou la fin de l'expiration. De toute façon, on enregistre *au moins trois épreuves d'aspect correct* en encourageant chaque fois le sujet à faire mieux.

b) Calculs portant sur les enregistrements d'expiration forcée

En premier lieu, on mesurera *l'amplitude totale de l'expiration*. On trace d'abord une parallèle à l'axe des temps passant par la pointe de fin d'expiration, puis une parallèle à l'axe des volumes qui coupe la précédente et passe par le point de début d'expiration: la longueur de cette droite mesure l'amplitude de l'expiration (figure 9) qui doit normalement être égale à la capacité vitale. On observe parfois que l'amplitude donnée au cours de l'expiration forcée est supérieure à celle que l'on a enregistrée lors de l'épreuve de capacité vitale: c'est bien entendu cette valeur la plus grande qui sera retenue comme mesure de la capacité vitale du sujet.

On procède ensuite à la détermination du *volume expiré au maximum en une seconde* (VEMS). Il est possible de le faire de deux façons (figure 9):

- placer la règle graduée horizontalement (parallèle à l'axe des temps) en faisant coïncider le zéro de la règle avec la verticale passant par le début de l'expiration; chercher le niveau où il faut placer cette règle pour que la courbe d'expiration forcée la rencontre au point correspondant à la fin de la première seconde; tracer le segment de droite correspondant à la durée de cette seconde et lire la longueur L proportionnelle au VEMS sur la verticale passant vers le début de l'expiration;
- tracer une parallèle à l'axe des temps passant par le début de l'expiration et marquer le point correspondant à la fin de la première seconde; abaisser par ce point une perpendiculaire qui coupe la courbe d'expiration forcée; la longueur L de cette perpendiculaire est proportionnelle au VEMS.

Multipliée par la constante d'appareillage, la longueur L donne la valeur du VEMS. On corrigera aux conditions alvéolaires les résultats de la meilleure épreuve; par exemple (figure 9):

$$\begin{aligned} \text{VEMS} &= L \times \text{Cte} \\ &= 102,5 \text{ mm} \times 0,02 \text{ l/mm} = 2,05 \text{ litres (amb)} \\ &= 2,05 \times 1,091 = 2,24, \text{ soit } 2,25 \text{ litres (A)} \end{aligned}$$

c) Critique des enregistrements d'expiration forcée

Les caractères d'un tracé correct sont les suivants:

- l'amplitude totale est très proche de la capacité vitale;
- le temps d'arrêt en inspiration forcée dessine une droite, la durée de cet arrêt ne dépasse pas sensiblement une seconde;
- la courbe d'expiration est régulière, il n'y a pas d'arrêt ni de « bosse », la variation de la courbure est régulièrement progressive, ce qu'un œil entraîné apprécie très bien.

Lorsqu'il s'agit d'un malade atteint d'emphysème pulmonaire, l'aspect du tracé est sensiblement modifié: on observe, après un dixième de seconde environ, un ressaut ⁽¹⁾ après lequel la courbe change franchement de direction, sa courbure est très faible mais varie toujours de façon régulière (figure 13). Un tel aspect ne résulte jamais d'un artefact, mais il ne donne qu'un renseignement qualitatif, il ne dispense pas de la recherche de valeurs réellement maximales.

Quant aux courbes d'expiration forcée inacceptables, elles réalisent des aspects si variés qu'il serait fastidieux de les énumérer: on en trouvera quelques exemples sur la figure 10.

Il faut insister particulièrement sur l'importance de l'inspiration préalable dans cette épreuve. En effet, la valeur du VEMS mesurée sur la courbe est proportionnelle à cette inspiration préalable (figure 13). Il existe deux moyens de vérifier que cette inspiration a bien été maximale. Le plus simple a été décrit ci-dessus: il consiste à faire donner une expiration complète pour retrouver une amplitude égale à la capacité vitale, c'est ce qu'on fait chez les sujets normaux ou dont la fonction ventilatoire est peu perturbée. Chez les malades emphysemateux, on utilisera une méthode détournée qui consiste à demander d'abord une expiration complète faite lentement, puis une inspiration égale à la capacité vitale, enfin l'expiration forcée rapide qu'il ne sera plus nécessaire de poursuivre au delà de 3 ou 4 secondes, ce qui évite de fatiguer le sujet (figure 13). Cette méthode peut être utile aussi chez des sujets normaux peu coopérants.

C – Épreuve de la ventilation maximale

a) Technique d'exécution

L'épreuve consiste à réaliser la ventilation la plus grande possible. Comme toute ventilation, la ventilation maximale est caractérisée par une amplitude ou volume courant et par une fréquence ventilatoire. Pour faciliter l'exécution de l'épreuve et obtenir des résultats significatifs, il est important d'imposer au sujet une fréquence ventilatoire constante; le sujet peut alors ne faire porter son attention et son effort que sur l'amplitude du volume courant, qu'il doit donner la plus grande possible.

La fréquence ventilatoire est généralement réglée par un métronome. Le sujet cherche la plus grande amplitude possible, par tâtonnements, mais l'opérateur qui surveille au fur et à mesure l'enregistrement lui indique dans quel sens, inspiratoire ou expiratoire, faire porter son effort et l'encourage par des ordres brefs et rythmés à poursuivre l'épreuve pendant les 20 secondes environ nécessaires.

Pour faciliter son exécution, la première épreuve sera faite à une fréquence modérée: 30 à 40 par minute; on évitera de commencer par une fréquence plus faible qui rendrait l'épreuve plus difficile. On utilisera la deuxième vitesse de déroulement du papier, proche de 100 mm par minute.

Entraîné par les deux premières épreuves spirométriques, le sujet réalise généralement la ventilation maximale de façon correcte d'emblée, s'il est bien dirigé par l'opérateur. Il peut cependant être nécessaire de refaire une première épreuve manifestement incorrecte (figure 12).

(1) Un tel ressaut peut apparaître en même temps sur les courbes des sujets normaux mais, dans ces cas, il n'est que très légèrement indiqué.

De toute façon, on procédera à l'enregistrement d'au moins trois épreuves de ventilation maximale, exécutées à des fréquences croissantes. A titre indicatif, on peut donner comme chiffres de fréquence: 30, 50 et 70 par minute pour les sujets dont l'épreuve d'expiration forcée a montré que leur fonction ventilatoire était normale ou peu perturbée; 30, 40 et 50 par minute chez les sujets dont la fonction ventilatoire est gravement perturbée.

b) Calcul de la ventilation maximale

On utilise le même procédé que dans le cas de la ventilation de repos; on trace donc tout d'abord les droites qui passent par les niveaux moyens des pointes de fin d'inspiration et de fin d'expiration; on mesure parallèlement à l'axe des volumes l'amplitude v limitée par ces deux droites. La fréquence ventilatoire effective sera toujours contrôlée sur le graphique par comptage dans un intervalle de temps égal à 0,25 ou 0,5 minute, selon la durée de l'épreuve, le résultat étant ramené à la minute (figure 12). Les résultats des ventilations maximales seront toujours suivis de l'indication des fréquences auxquelles les épreuves ont été accomplies.

On prendra pour exemple de calcul de la ventilation maximale l'épreuve correctement exécutée de la figure 12 (à droite); le coefficient de correction aux conditions alvéolaires est égal dans ce cas à 1,107:

$$\begin{aligned} \text{fréquence ventilatoire} &= 7,5 \times 4 = 30 \text{ par minute} \\ \text{volume courant} &= v \times \text{Cte} \\ &= 155 \text{ mm} \times 0,02 \text{ l/mm} = 3,10 \text{ litres (amb)} \\ \text{ventilation maximale} &= \text{volume courant} \times \text{fréquence ventilatoire} \\ &= 3,101 \times 30 \text{ par minute} = 93 \text{ l/min (amb)} \\ &= 93 \times 1,107 = 102,95 \\ &\text{soit } 103 \text{ litres/minute (A) à la fréquence de 30 par minute} \end{aligned}$$

c) Critique des enregistrements de ventilation maximale

Lorsque la ventilation maximale est bien exécutée, la fréquence imposée est exactement suivie, les volumes courants sont pratiquement égaux entre eux: une ventilation maximale bien faite donne un tracé régulier aussi bien chez les malades que chez les sujets sains. Il est donc facile de reconnaître un bon enregistrement.

La figure 12 donne l'exemple de deux épreuves exécutées par le même sujet. La première est inacceptable: la fréquence ventilatoire est irrégulière; les volumes courants, très inégaux entre eux, se placent à des niveaux très variables, le tracé a un aspect général désarticulé; les trois derniers cycles ventilatoires, beaucoup plus amples que les précédents, indiquent que le sujet n'a pas donné son maximum au cours de l'épreuve. Le second enregistrement est parfaitement correct. L'écart entre les deux résultats atteint 23 litres par minute (A).

Il faut savoir que les valeurs de la ventilation maximale varient avec la fréquence à laquelle l'épreuve est exécutée. Chez les sujets dont la dynamique ventilatoire est normale, on obtient des résultats croissant avec la fréquence, jusqu'à 80 ou 90 par minute; au delà de cette fréquence, les résultats s'abaissent au contraire; c'est pourquoi il est inutile, en clinique, de faire des épreuves de ventilation maximale à des fréquences supérieures à 70 ou 80 par minute qui sont souvent pénibles pour les sujets.

Il faut tenir compte de cette loi dans la critique des tracés: les trois épreuves de ventilation maximale, faites à des fréquences croissantes, doivent donner des résultats croissants, sinon les dernières épreuves ont été mal exécutées.

On a vu que les enregistrements des épreuves spirographiques doivent toujours être précédés immédiatement d'un tracé de ventilation normale, pendant une minute environ. Cela est particulièrement important dans le cas de la ventilation maximale, étant donné l'intérêt qui s'attache à la position du volume courant, au cours de cette épreuve, par rapport à la ventilation de repos. Chez les sujets dont la dynamique ventilatoire est normale, le volume courant de la ventilation maximale déborde le volume courant au repos très largement vers l'inspiration mais aussi dans le sens de l'expiration (figure 12). Chez les malades emphysemateux au contraire, le volume courant donné au cours de la ventilation maximale se place franchement au-dessus du spirogramme de repos et le niveau moyen des pointes inspiratoires rejoint presque celui de l'inspiration forcée donnée pour la capacité vitale (figure 13): la succession d'un tracé de repos, d'une ventilation maxi-

male et d'un second tracé de repos donne donc un aspect général en créneau (1) très caractéristique. Cette notion est utile à la critique des tracés de ventilation maximale puisque cette épreuve est généralement enregistrée après l'expiration forcée qui permet de reconnaître l'existence d'un emphysème pulmonaire.

D – Première étude des résultats

a) Rapport entre le volume expiré au maximum en une seconde et la capacité vitale

Ce rapport, qui n'a pas reçu de dénomination propre en français, est calculé comme un pourcentage:

$$\frac{\text{volume expiré au maximum en une seconde}}{\text{capacité vitale}} \times 100$$

on l'écrit généralement: (VEMS/CV)100. Ses valeurs normales sont de l'ordre de 85 à 60, selon l'âge.

Chez l'adulte, les valeurs supérieures à 90 traduisent le plus souvent une sous-estimation de la capacité vitale: les exceptions à cette règle s'observent chez des patients atteints ou ayant souffert de tuberculose pulmonaire grave. Au contraire, chez le jeune enfant, de telles valeurs sont normales.

La réduction de (VEMS/CV)100 peut être le résultat d'une mauvaise mesure, donnant une sous-estimation du VEMS. Mais il s'agit là d'une altération pathologique fréquente: l'abaissement de (VEMS/CV)100 accompagne tous les états emphysémateux et asthmatiques, dont il traduit le ralentissement expiratoire. Dans les cas graves, ce rapport peut s'abaisser jusqu'à 20 et même 15.

b) Relation entre le volume expiré au maximum en une seconde et la ventilation maximale

Si un sujet est capable d'expirer en une seconde le volume d'air défini par le VEMS, on peut admettre qu'il lui est possible d'inspirer un volume égal au cours de la seconde suivante, et qu'il pourrait ensuite répéter ces deux mouvements respiratoires, à une fréquence qui serait évidemment de 30 par minute. Cette hypothèse permet de calculer une valeur approchée de la ventilation maximale, selon la formule:

$$\text{ventilation maximale déduite de l'expiration forcée} = (\text{VEMS})30$$

L'expérience montre que cette estimation donne un résultat voisin de celui de la ventilation maximale proprement dite, lorsque cette épreuve est effectuée à une fréquence proche de 30 par minute. Mais cette estimation ne dispense pas de la mesure directe de la ventilation maximale car l'écart de la mesure directe à l'estimation indirecte concourt au dépistage des fautes de technique et peut avoir, de plus, une signification physiopathologique.

c) Le volume résiduel et la capacité pulmonaire totale

On désigne par *volume résiduel* (VR) le volume d'air qui reste captif dans les poumons et les voies aériennes à la fin d'une expiration forcée. Il est impossible de le mesurer par spirométrie: on le détermine par des méthodes indirectes, dont la méthode de dilution est celle qui donne la meilleure précision en routine. Elle consiste à étudier, par analyse continue au cours de la ventilation calme, la dilution d'un gaz témoin dans l'air intra-pulmonaire. On détermine ainsi non pas le volume résiduel lui-même mais le volume d'air contenu dans les poumons à la fin des expirations normales, c'est-à-dire la capacité pulmonaire correspondant à la ligne de base du spirogramme ou *capacité résiduelle fonctionnelle* (CRF) au repos. Il faut donc, après la période de dilution du gaz témoin, terminer l'examen par une expiration forcée: on mesure alors le *volume de réserve expiratoire* (VRE) au repos, c'est-à-dire le volume d'air qui peut être encore expiré après une expiration normale (partie expiratoire de la capacité vitale). Le volume résiduel est calculé en faisant la différence entre la capacité résiduelle fonctionnelle, calculée à partir des analyses de gaz, et le volume de réserve expiratoire mesuré spirométriquement. Il est donc extrêmement important d'obtenir une expiration forcée, réellement maximale.

(1) Un signe du créneau s'observe également chez les sujets normaux, mais seulement lorsque la fréquence à laquelle est exécutée l'épreuve de ventilation maximale dépasse nettement 80 par minute: le signe du créneau est très net à partir de 120 par minute.

Rappelons encore que l'on désigne par *volume de réserve inspiratoire* le volume d'air qui peut être encore inspiré à la fin d'une inspiration normale: la capacité vitale apparaît alors comme la somme du volume courant et des volumes de réserve inspiratoire et expiratoire.

La capacité pulmonaire totale ou plus simplement *capacité totale* (CT) correspond au volume d'air contenu dans les poumons à la fin d'une inspiration forcée: elle est mesurée par la somme de la capacité vitale et du volume résiduel.

Le *rapport du volume résiduel à la capacité totale* n'a pas reçu de dénomination particulière; on le calcule comme un pourcentage:

$$\frac{\text{volume résiduel}}{\text{capacité totale}} \times 100$$

et on l'écrit généralement (VR/CT)100. Ce rapport est normalement compris entre 20 et 35. Son élévation traduit dans la plupart des cas une altération fonctionnelle de nature emphysémateuse ou asthmatique, son étude est donc complémentaire de celle de (VEMS/CV)100.

d) *Volumes ventilatoires normaux*

Il est indispensable de pouvoir comparer les résultats spirométriques enregistrés dans chaque cas avec les valeurs ventilatoires qui seraient théoriquement normales pour le sujet examiné. Aussi la Communauté européenne du charbon et de l'acier a-t-elle fait procéder à une enquête statistique parmi les travailleurs des mines et de la sidérurgie des six pays, de façon à établir des *normes ventilatoires* pour la médecine du travail.

Cette enquête a porté sur les résultats de mesures de la capacité vitale, du volume expiré au maximum en une seconde et du volume résiduel. Elle a permis de confirmer que des hommes en bonne santé, de même âge et de même taille, ont des volumes ventilatoires peu différents les uns des autres. On a donc établi dans un premier temps les *valeurs moyennes normales* de la capacité vitale, du VEMS et du volume résiduel, ainsi que de (VEMS/CV)100 et (VR/CT)100, en fonction de l'âge et de la taille (tableaux 3, 4 et 5).

Cependant, même les gens en parfaite santé montrent des variations individuelles, dont l'importance a été évaluée par une étude statistique de tous les résultats recueillis. Il a été possible ainsi de préciser les limites au-dessous ou au-dessus desquelles des résultats spirométriques techniquement corrects peuvent être tenus pour anormaux (limites correspondant à deux fois l'écart standard par rapport à la moyenne, soit une probabilité de 98 pour 100 – tableaux 6, 7 et 8).

TABLEAU 3

Capacité vitale, en litres dans les conditions alvéolaires, en fonction de l'âge et de la taille: valeurs moyennes normales déterminées lors de l'enquête statistique sur les volumes ventilatoires normaux, conduite par la C.E.C.A. en 1955-1960

Taille (mètres)	18-19 ans	20-29 ans	30-34 ans	35-39 ans	40-44 ans	45-49 ans	50-54 ans	55-59 ans	60-64 ans
1,50	3,34	3,46	3,44	3,41	3,38	3,34	3,27	3,21	3,14
1,51	3,41	3,53	3,51	3,47	3,44	3,41	3,34	3,27	3,20
1,52	3,48	3,60	3,58	3,54	3,51	3,48	3,41	3,34	3,27
1,53	3,55	3,67	3,65	3,61	3,58	3,55	3,47	3,40	3,33
1,54	3,62	3,74	3,72	3,68	3,65	3,62	3,54	3,47	3,40
1,55	3,69	3,82	3,80	3,76	3,72	3,69	3,61	3,54	3,46
1,56	3,76	3,90	3,88	3,84	3,80	3,76	3,68	3,61	3,53
1,57	3,83	3,97	3,95	3,91	3,87	3,83	3,75	3,68	3,60
1,58	3,90	4,04	4,02	3,98	3,94	3,90	3,82	3,75	3,67
1,59	3,98	4,12	4,10	4,06	4,02	3,98	3,90	3,82	3,74
1,60	4,06	4,20	4,18	4,14	4,10	4,05	3,97	3,89	3,81
1,61	4,13	4,28	4,26	4,22	4,18	4,13	4,04	3,96	3,88
1,62	4,21	4,36	4,34	4,30	4,26	4,21	4,12	4,04	3,95
1,63	4,29	4,44	4,42	4,38	4,34	4,29	4,20	4,11	4,03
1,64	4,37	4,52	4,50	4,46	4,42	4,37	4,28	4,19	4,10
1,65	4,45	4,60	4,58	4,54	4,50	4,45	4,36	4,27	4,18
1,66	4,53	4,69	4,67	4,63	4,58	5,53	4,44	4,35	4,25
1,67	4,61	4,77	4,75	4,71	4,66	4,61	4,52	4,43	4,33
1,68	4,69	4,86	4,83	4,79	4,74	4,69	4,60	4,51	4,41
1,69	4,77	4,95	4,92	4,87	4,82	4,77	4,68	4,59	4,49
1,70	4,86	5,04	5,01	4,96	4,91	4,86	4,77	4,67	4,57
1,71	4,95	5,13	5,10	5,05	5,00	4,95	4,85	4,75	4,65
1,72	5,04	5,22	5,19	5,14	5,09	5,04	4,94	4,83	4,73
1,73	5,13	5,31	5,28	5,23	5,18	5,13	5,02	4,92	4,82
1,74	5,22	5,40	5,37	5,32	5,27	5,22	5,11	5,00	4,90
1,75	5,31	5,49	5,46	5,41	5,36	5,31	5,20	5,09	4,98
1,76	5,40	5,59	5,56	5,51	5,45	5,40	5,29	5,18	5,07
1,77	5,49	5,68	5,65	5,60	5,54	5,49	5,38	5,27	5,16
1,78	5,58	5,78	5,75	5,69	5,63	5,58	5,47	5,36	5,24
1,79	5,67	5,88	5,85	5,79	5,73	5,67	5,56	5,45	5,33
1,80	5,77	5,98	5,95	5,89	5,83	5,77	5,66	5,54	5,42
1,81	5,87	6,08	6,05	5,99	5,93	5,87	5,75	5,63	5,51
1,82	5,97	6,18	6,15	6,09	6,03	5,97	5,85	5,73	5,60
1,83	6,07	6,28	6,25	6,19	6,13	6,07	5,94	5,82	5,69
1,84	6,17	6,39	6,35	6,29	6,23	6,17	6,04	5,92	5,78
1,85	6,27	6,49	6,45	6,39	6,33	6,27	6,14	6,01	5,88
1,86	6,37	6,60	6,56	6,50	6,44	6,37	6,24	6,11	5,98
1,87	6,47	6,70	6,67	6,60	6,54	6,47	6,34	6,21	6,08
1,88	6,58	6,81	6,78	6,71	6,65	6,58	6,44	6,31	6,18
1,89	6,68	6,92	6,89	6,82	6,75	6,68	6,54	6,41	6,28
1,90	6,79	7,03	7,00	6,93	6,86	6,79	6,65	6,52	6,38
1,91	6,90	7,14	7,11	7,04	6,97	6,90	6,76	6,62	6,48
1,92	7,01	7,25	7,22	7,15	7,08	7,01	6,87	6,72	6,58
1,93	7,12	7,36	7,33	7,26	7,19	7,12	6,98	6,83	6,68
1,94	7,23	7,48	7,45	7,37	7,30	7,23	7,08	6,94	6,79
1,95	7,34	7,60	7,55	7,49	7,42	7,34	7,19	7,04	6,90

TABLEAU 4

Volume expiré au maximum en une seconde, en litres dans les conditions alvéolaires, et (VEMS/CV)100, en fonction de l'âge et de la taille: valeurs moyennes normales déterminées lors de l'enquête statistique sur les volumes ventilatoires normaux, conduite par la C.E.C.A. en 1955-1960

Taille (mètres)	18-19 ans	20-29 ans	30-34 ans	35-39 ans	40-44 ans	45-49 ans	50-54 ans	55-59 ans	60-64 ans
1,50	2,74	2,76	2,68	2,63	2,56	2,49	2,41	2,31	2,20
1,51	2,79	2,81	2,73	2,68	2,61	2,54	2,45	2,35	2,23
1,52	2,85	2,87	2,79	2,73	2,66	2,59	2,50	2,40	2,28
1,53	2,91	2,93	2,85	2,79	2,71	2,64	2,55	2,45	2,33
1,54	2,96	2,99	2,90	2,84	2,76	2,69	2,60	2,50	2,38
1,55	3,02	3,05	2,96	2,89	2,81	2,74	2,65	2,55	2,42
1,56	3,08	3,11	3,02	2,95	2,87	2,79	2,70	2,60	2,47
1,57	3,14	3,17	3,08	3,01	2,93	2,85	2,75	2,65	2,52
1,58	3,20	3,23	3,15	3,07	2,99	2,91	2,81	2,71	2,57
1,59	3,26	3,29	3,20	3,12	3,04	2,96	2,86	2,76	2,62
1,60	3,32	3,35	3,26	3,18	3,10	3,02	2,92	2,81	2,67
1,61	3,39	3,41	3,32	3,24	3,16	3,07	2,97	2,86	2,72
1,62	3,45	3,48	3,39	3,31	3,22	3,13	3,03	2,91	2,77
1,63	3,51	3,54	3,45	3,37	3,28	3,19	3,09	2,96	2,82
1,64	3,58	3,61	3,51	3,43	3,34	3,25	3,15	3,02	2,87
1,65	3,64	3,67	3,57	3,49	3,40	3,31	3,20	3,07	2,92
1,66	3,71	3,74	3,64	3,56	3,46	3,37	3,26	3,13	2,98
1,67	3,78	3,81	3,70	3,62	3,52	3,43	3,32	3,18	3,03
1,68	3,85	3,88	3,77	3,69	3,59	3,49	3,38	3,24	3,09
1,69	3,92	3,95	3,84	3,75	3,65	3,55	3,44	3,30	3,14
1,70	3,99	4,02	3,91	3,82	3,72	3,62	3,50	3,36	3,20
1,71	4,06	4,09	3,97	3,88	3,78	3,68	3,56	3,42	3,25
1,72	4,13	4,16	4,04	3,95	3,85	3,75	3,63	3,48	3,31
1,73	4,20	4,23	4,11	4,02	3,92	3,81	3,69	3,54	3,37
1,74	4,28	4,31	4,19	4,10	3,99	3,88	3,76	3,60	3,43
1,75	4,35	4,38	4,26	4,17	4,06	3,95	3,82	3,66	3,49
1,76	4,43	4,46	4,33	4,24	4,13	4,02	3,89	3,73	3,55
1,77	4,50	4,53	4,40	4,31	4,20	4,09	3,95	3,79	3,61
1,78	4,58	4,61	4,48	4,39	4,28	4,16	4,02	3,86	3,67
1,79	4,66	4,69	4,56	4,46	4,35	4,23	4,09	3,92	3,73
1,80	4,74	4,77	4,64	4,54	4,42	4,30	4,16	3,99	3,80
1,81	4,82	4,85	4,71	4,61	4,49	4,37	4,23	4,05	3,86
1,82	4,90	4,93	4,79	4,69	4,57	4,44	4,30	4,12	3,92
1,83	4,98	5,01	4,87	4,77	4,64	4,51	4,37	4,19	3,99
1,84	5,06	5,10	4,95	4,85	4,72	4,59	4,44	4,26	4,06
1,85	5,14	5,18	5,03	4,93	4,80	4,66	4,51	4,33	4,12
1,86	5,22	5,26	5,12	5,01	4,88	4,74	4,59	4,40	4,19
1,87	5,31	5,35	5,20	5,09	4,96	4,82	4,66	4,47	4,26
1,88	5,40	5,44	5,28	5,17	5,04	4,90	4,74	4,55	4,33
1,89	5,48	5,52	5,36	5,25	5,12	4,98	4,81	4,62	4,40
1,90	5,57	5,61	5,45	5,34	5,21	5,06	4,89	4,69	4,47
1,91	5,66	5,70	5,54	5,42	5,29	5,14	4,97	4,76	4,54
1,92	5,75	5,79	5,63	5,51	5,37	5,22	5,05	4,84	4,61
1,93	5,84	5,88	5,71	5,59	5,45	5,30	5,13	4,91	4,68
1,94	5,93	5,97	5,80	5,68	5,54	5,38	5,21	4,99	4,75
1,95	6,02	6,07	5,89	5,77	5,62	5,46	5,29	5,07	4,83
(VEMS/CV) × 100	82	80	78	77	75,5	74,5	73,5	72	70

TABLEAU 5

Volume résiduel, en litres dans les conditions alvéolaires, et (VR/CT)100, en fonction de l'âge et de la taille: valeurs moyennes normales déterminées lors de l'enquête statistique sur les volumes ventilatoires normaux, conduite par la C.E.C.A. en 1955-1960

Taille (mètres)	18-19 ans	20-29 ans	30-34 ans	35-39 ans	40-44 ans	45-49 ans	50-54 ans	55-59 ans	60-64 ans
1,50	0,81	0,93	1,01	1,04	1,08	1,11	1,18	1,25	1,32
1,51	0,83	0,95	1,03	1,06	1,10	1,14	1,20	1,27	1,34
1,52	0,84	0,97	1,05	1,08	1,12	1,16	1,23	1,30	1,37
1,53	0,86	0,99	1,07	1,10	1,14	1,18	1,25	1,32	1,40
1,54	0,88	1,00	1,10	1,13	1,17	1,21	1,28	1,35	1,42
1,55	0,89	1,02	1,12	1,15	1,19	1,23	1,30	1,38	1,45
1,56	0,91	1,04	1,14	1,17	1,21	1,25	1,33	1,40	1,48
1,57	0,92	1,06	1,16	1,19	1,23	1,27	1,35	1,43	1,51
1,58	0,94	1,08	1,18	1,21	1,25	1,29	1,37	1,46	1,54
1,59	0,96	1,10	1,20	1,24	1,28	1,32	1,40	1,49	1,57
1,60	0,98	1,13	1,23	1,27	1,31	1,35	1,43	1,52	1,60
1,61	1,00	1,15	1,25	1,29	1,33	1,37	1,45	1,54	1,63
1,62	1,02	1,17	1,27	1,31	1,36	1,39	1,48	1,57	1,66
1,63	1,04	1,19	1,30	1,34	1,39	1,42	1,51	1,60	1,69
1,64	1,06	1,21	1,33	1,37	1,41	1,45	1,54	1,63	1,72
1,65	1,08	1,24	1,35	1,39	1,44	1,48	1,57	1,66	1,75
1,66	1,10	1,26	1,38	1,42	1,47	1,51	1,60	1,69	1,78
1,67	1,12	1,28	1,40	1,44	1,49	1,53	1,63	1,72	1,81
1,68	1,14	1,30	1,42	1,46	1,51	1,56	1,66	1,75	1,84
1,69	1,16	1,32	1,45	1,49	1,54	1,59	1,69	1,78	1,88
1,70	1,18	1,35	1,47	1,52	1,57	1,62	1,72	1,82	1,92
1,71	1,20	1,37	1,49	1,54	1,59	1,65	1,75	1,85	1,95
1,72	1,22	1,40	1,52	1,57	1,62	1,68	1,78	1,88	1,98
1,73	1,24	1,42	1,55	1,60	1,65	1,71	1,81	1,91	2,01
1,74	1,26	1,45	1,58	1,63	1,68	1,74	1,84	1,94	2,05
1,75	1,29	1,47	1,61	1,66	1,71	1,77	1,87	1,98	2,09
1,76	1,31	1,49	1,64	1,69	1,74	1,80	1,91	2,01	2,12
1,77	1,33	1,52	1,66	1,71	1,77	1,83	1,94	2,04	2,15
1,78	1,35	1,54	1,69	1,74	1,80	1,86	1,97	2,08	2,19
1,79	1,37	1,57	1,72	1,77	1,83	1,89	2,00	2,12	2,23
1,80	1,40	1,60	1,75	1,80	1,86	1,92	2,04	2,16	2,27
1,81	1,42	1,62	1,78	1,83	1,89	1,95	2,07	2,19	2,31
1,82	1,45	1,65	1,81	1,86	1,92	1,98	2,10	2,22	2,35
1,83	1,47	1,68	1,84	1,89	1,95	2,01	2,14	2,26	2,39
1,84	1,50	1,71	1,87	1,93	1,99	2,05	2,18	2,30	2,43
1,85	1,52	1,74	1,90	1,96	2,02	2,09	2,22	2,34	2,47
1,86	1,54	1,77	1,93	1,99	2,05	2,12	2,25	2,38	2,51
1,87	1,57	1,80	1,96	2,02	2,08	2,15	2,28	2,42	2,55
1,88	1,59	1,83	1,99	2,05	2,11	2,18	2,32	2,46	2,59
1,89	1,62	1,86	2,02	2,08	2,15	2,22	2,36	2,50	2,63
1,90	1,65	1,89	2,06	2,12	2,19	2,26	2,40	2,54	2,68
1,91	1,67	1,92	2,09	2,16	2,23	2,30	2,44	2,58	2,72
1,92	1,70	1,95	2,12	2,19	2,26	2,34	2,48	2,62	2,76
1,93	1,73	1,98	2,16	2,23	2,30	2,37	2,52	2,66	2,80
1,94	1,75	2,01	2,19	2,26	2,33	2,41	2,56	2,70	2,85
1,95	1,78	2,04	2,22	2,29	2,37	2,45	2,60	2,74	2,89
(VR/CT)100	19,5	21	22,5	23,5	24,2	25	26,5	28	29,5

TABLEAU 6

Limites inférieures des valeurs normales de la capacité vitale, en litres dans les conditions alvéolaires, en fonction de l'âge et de la taille, déterminées lors de l'enquête statistique conduite par la C.E.C.A. en 1955-1960

Taille (mètres)	18-19 ans	20-29 ans	30-34 ans	35-39 ans	40-44 ans	45-49 ans	50-54 ans	55-59 ans	60-64 ans
1,50	2,77	2,87	2,85	2,83	2,81	2,76	2,71	2,66	2,61
1,51	2,83	2,93	2,91	2,89	2,86	2,83	2,77	2,71	2,66
1,52	2,89	2,99	2,97	2,95	2,91	2,89	2,83	2,77	2,71
1,53	2,95	3,04	3,03	3,00	2,97	2,95	2,88	2,82	2,76
1,54	3,00	3,10	3,09	3,06	3,03	3,00	2,94	2,88	2,82
1,55	3,06	3,16	3,15	3,12	3,09	3,06	2,99	2,94	2,87
1,56	3,12	3,23	3,21	3,18	3,15	3,12	3,05	2,99	2,93
1,57	3,18	3,29	3,27	3,24	3,21	3,18	3,12	3,05	2,99
1,58	3,24	3,35	3,33	3,30	3,27	3,24	3,18	3,11	3,04
1,59	3,30	3,42	3,40	3,37	3,34	3,30	3,24	3,17	3,10
1,60	3,37	3,49	3,47	3,44	3,40	3,36	3,30	3,23	3,16
1,61	3,43	3,55	3,53	3,50	3,46	3,42	3,36	3,29	3,22
1,62	3,49	3,62	3,60	3,57	3,53	3,49	3,42	3,35	3,28
1,63	3,55	3,68	3,66	3,63	3,59	3,55	3,48	3,41	3,34
1,64	3,62	3,75	3,73	3,70	3,66	3,62	3,55	3,48	3,40
1,65	3,69	3,82	3,80	3,77	3,73	3,69	3,62	3,54	3,46
1,66	3,76	3,89	3,87	3,84	3,80	3,76	3,69	3,61	3,53
1,67	3,83	3,96	3,94	3,91	3,87	3,83	3,75	3,67	3,59
1,68	3,90	4,03	4,01	3,98	3,94	3,90	3,82	3,74	3,66
1,69	3,97	4,10	4,08	4,05	4,01	3,97	3,89	3,81	3,72
1,70	4,04	4,18	4,16	4,13	4,08	4,04	3,96	3,88	3,79
1,71	4,11	4,25	4,23	4,20	4,15	4,11	4,03	3,95	3,86
1,72	4,18	4,33	4,31	4,27	4,22	4,18	4,10	4,02	3,93
1,73	4,25	4,40	4,38	4,34	4,29	4,25	4,17	4,09	4,00
1,74	4,33	4,48	4,46	4,42	4,37	4,33	4,24	4,16	4,07
1,75	4,40	4,56	4,53	4,49	4,44	4,40	4,31	4,23	4,14
1,76	4,48	4,64	4,61	4,57	4,52	4,48	4,39	4,30	4,21
1,77	4,55	4,72	4,69	4,65	4,60	4,55	4,46	4,37	4,28
1,78	4,63	4,80	4,77	4,73	4,68	4,63	4,54	4,45	4,35
1,79	4,71	4,88	4,85	4,81	4,76	4,71	4,62	4,52	4,42
1,80	4,79	4,96	4,93	4,89	4,84	4,79	4,70	4,60	4,50
1,81	4,87	5,04	5,01	4,97	4,92	4,87	4,77	4,67	4,57
1,82	4,96	5,13	5,10	5,05	5,00	4,95	4,85	4,75	4,65
1,83	5,04	5,21	5,18	5,13	5,08	5,03	4,93	4,83	4,72
1,84	5,12	5,30	5,27	5,22	5,17	5,12	5,01	4,91	4,80
1,85	5,20	5,39	5,36	5,31	5,26	5,20	5,10	4,99	4,88
1,86	5,29	5,48	5,45	5,40	5,35	5,29	5,18	5,07	4,96
1,87	5,37	5,56	5,53	5,48	5,43	5,37	5,26	5,15	5,04
1,88	5,46	5,65	5,62	5,57	5,52	5,46	5,35	5,24	5,13
1,89	5,55	5,74	5,71	5,66	5,60	5,54	5,43	5,32	5,21
1,90	5,64	5,83	5,80	5,75	5,69	5,63	5,52	5,41	5,30
1,91	5,73	5,92	5,88	5,84	5,78	5,72	5,61	5,50	5,38
1,92	5,82	6,02	5,98	5,93	5,87	5,81	5,70	5,58	5,46
1,93	5,91	6,11	6,08	6,03	5,97	5,91	5,79	5,67	5,54
1,94	6,00	6,20	6,17	6,12	6,06	6,00	5,88	5,76	5,64
1,95	6,09	6,30	6,27	6,22	6,16	6,09	5,97	5,85	5,73

TABLEAU 7

Limites inférieures des valeurs normales du volume expiré au maximum en une seconde, en litres dans les conditions alvéolaires, et de (VEMS/CV)100, en fonction de l'âge et de la taille, déterminées lors de l'enquête statistique conduite par la C.E.C.A. en 1955-1960

Taille (mètres)	18-19 ans	20-29 ans	30-34 ans	35-39 ans	40-44 ans	45-49 ans	50-54 ans	55-59 ans	60-64 ans
1,50	2,22	2,24	2,17	2,12	2,07	2,02	1,96	1,87	1,78
1,51	2,26	2,28	2,21	2,16	2,11	2,05	1,98	1,90	1,81
1,52	2,30	2,32	2,26	2,21	2,16	2,10	2,03	1,94	1,85
1,53	2,35	2,37	2,31	2,26	2,20	2,14	2,07	1,98	1,89
1,54	2,40	2,42	2,35	2,30	2,24	2,18	2,11	2,03	1,93
1,55	2,45	2,47	2,40	2,34	2,28	2,22	2,15	2,07	1,96
1,56	2,50	2,52	2,45	2,39	2,33	2,26	2,19	2,11	2,00
1,57	2,55	2,57	2,50	2,44	2,38	2,31	2,23	2,15	2,04
1,58	2,60	2,62	2,55	2,49	2,43	2,36	2,28	2,20	2,08
1,59	2,64	2,66	2,59	2,53	2,47	2,40	2,32	2,24	2,12
1,60	2,69	2,71	2,64	2,58	2,52	2,45	2,37	2,28	2,16
1,61	2,74	2,76	2,69	2,63	2,56	2,49	2,41	2,32	2,20
1,62	2,79	2,81	2,74	2,68	2,61	2,54	2,45	2,36	2,24
1,63	2,85	2,87	2,79	2,73	2,66	2,59	2,50	2,40	2,28
1,64	2,90	2,92	2,84	2,78	2,71	2,64	2,55	2,44	2,32
1,65	2,95	2,97	2,89	2,83	2,75	2,68	2,59	2,48	2,36
1,66	3,01	3,03	2,95	2,88	2,80	2,73	2,64	2,53	2,41
1,67	3,06	3,08	3,00	2,93	2,85	2,78	2,68	2,57	2,45
1,68	3,12	3,14	3,05	2,99	2,91	2,83	2,73	2,62	2,50
1,69	3,17	3,20	3,11	3,04	2,96	2,88	2,78	2,66	2,54
1,70	3,23	3,26	3,17	3,09	3,01	2,93	2,83	2,71	2,59
1,71	3,29	3,31	3,22	3,14	3,06	2,98	2,88	2,76	2,63
1,72	3,35	3,37	3,28	3,20	3,12	3,04	2,94	2,82	2,68
1,73	3,41	3,43	3,34	3,26	3,18	3,09	2,99	2,87	2,73
1,74	3,47	3,49	3,39	3,31	3,23	3,14	3,04	2,92	2,78
1,75	3,53	3,55	3,45	3,37	3,29	3,20	3,10	2,97	2,83
1,76	3,59	3,61	3,51	3,43	3,35	3,26	3,15	3,02	2,88
1,77	3,65	3,67	3,57	3,49	3,40	3,31	3,20	3,07	2,93
1,78	3,71	3,73	3,63	3,55	3,46	3,37	3,26	3,13	2,98
1,79	3,77	3,79	3,69	3,61	3,52	3,42	3,31	3,18	3,03
1,80	3,84	3,86	3,76	3,68	3,58	3,48	3,37	3,23	3,08
1,81	3,90	3,92	3,82	3,74	3,64	3,54	3,42	3,28	3,13
1,82	3,97	3,99	3,88	3,80	3,70	3,60	3,48	3,34	3,18
1,83	4,03	4,06	3,95	3,86	3,76	3,66	3,54	3,39	3,23
1,84	4,10	4,13	4,01	3,92	3,82	3,72	3,60	3,45	3,29
1,85	4,16	4,19	4,08	3,99	3,89	3,78	3,66	3,50	3,34
1,86	4,23	4,26	4,15	4,06	3,95	3,84	3,72	3,56	3,39
1,87	4,30	4,33	4,21	4,12	4,01	3,90	3,78	3,62	3,45
1,88	4,37	4,41	4,28	4,19	4,08	3,97	3,84	3,68	3,51
1,89	4,44	4,47	4,34	4,25	4,14	4,03	3,90	3,74	3,56
1,90	4,51	4,54	4,41	4,32	4,21	4,10	3,96	3,80	3,62
1,91	4,58	4,61	4,48	4,39	4,28	4,16	4,02	3,86	3,67
1,92	4,66	4,69	4,56	4,46	4,35	4,23	4,09	3,92	3,73
1,93	4,73	4,76	4,63	4,53	4,41	4,29	4,15	3,98	3,78
1,94	4,80	4,84	4,70	4,60	4,48	4,36	4,22	4,05	3,85
1,95	4,88	4,92	4,77	4,66	4,54	4,42	4,28	4,11	3,91
(VEMS/CV) × 100	71	69,5	68	67	66	65	64	62,5	61

TABLEAU 8

Limites supérieures des valeurs normales du volume résiduel, en litres dans les conditions alvéolaires, et de (VR/CT)100, en fonction de l'âge et de la taille, déterminées lors de l'enquête statistique conduite par la C.E.C.A. en 1955-1960

Taille (mètres)	18-19 ans	20-29 ans	30-34 ans	35-39 ans	40-44 ans	45-49 ans	50-54 ans	55-59 ans	60-64 ans
1,50	1,06	1,22	1,32	1,36	1,41	1,46	1,55	1,64	1,73
1,51	1,08	1,24	1,34	1,39	1,44	1,49	1,58	1,67	1,76
1,52	1,10	1,27	1,37	1,42	1,47	1,52	1,61	1,70	1,79
1,53	1,13	1,29	1,40	1,45	1,50	1,55	1,64	1,73	1,83
1,54	1,15	1,31	1,43	1,48	1,53	1,58	1,67	1,77	1,86
1,55	1,17	1,33	1,46	1,51	1,56	1,61	1,70	1,80	1,90
1,56	1,19	1,36	1,49	1,54	1,59	1,64	1,73	1,83	1,94
1,57	1,21	1,38	1,52	1,57	1,62	1,66	1,76	1,87	1,98
1,58	1,23	1,41	1,55	1,60	1,65	1,69	1,79	1,90	2,02
1,59	1,25	1,44	1,58	1,63	1,68	1,73	1,83	1,94	2,06
1,60	1,28	1,48	1,61	1,66	1,71	1,77	1,87	1,98	2,10
1,61	1,30	1,50	1,64	1,69	1,74	1,80	1,90	2,02	2,13
1,62	1,33	1,53	1,67	1,72	1,77	1,83	1,94	2,06	2,17
1,63	1,36	1,56	1,70	1,75	1,80	1,86	1,97	2,09	2,22
1,64	1,39	1,59	1,74	1,79	1,84	1,90	2,01	2,13	2,25
1,65	1,41	1,62	1,77	1,82	1,88	1,94	2,05	2,17	2,29
1,66	1,44	1,65	1,81	1,86	1,92	1,98	2,09	2,21	2,33
1,67	1,46	1,67	1,83	1,89	1,95	2,01	2,13	2,25	2,37
1,68	1,49	1,70	1,86	1,92	1,98	2,04	2,16	2,29	2,41
1,69	1,52	1,73	1,89	1,96	2,02	2,08	2,20	2,33	2,46
1,70	1,55	1,77	1,93	1,99	2,05	2,12	2,25	2,38	2,52
1,71	1,57	1,80	1,96	2,02	2,09	2,16	2,29	2,42	2,56
1,72	1,60	1,83	1,99	2,05	2,12	2,20	2,33	2,46	2,60
1,73	1,62	1,86	2,03	2,09	2,16	2,24	2,37	2,50	2,64
1,74	1,65	1,89	2,07	2,13	2,20	2,28	2,41	2,54	2,69
1,75	1,68	1,92	2,10	2,17	2,24	2,32	2,45	2,58	2,73
1,76	1,72	1,95	2,14	2,21	2,28	2,36	2,49	2,63	2,78
1,77	1,74	1,98	2,17	2,25	2,32	2,40	2,53	2,67	2,82
1,78	1,77	2,02	2,21	2,29	2,36	2,44	2,58	2,72	2,87
1,79	1,80	2,06	2,25	2,32	2,40	2,48	2,62	2,77	2,92
1,80	1,83	2,10	2,29	2,36	2,44	2,52	2,67	2,82	2,97
1,81	1,86	2,13	2,33	2,40	2,48	2,56	2,71	2,86	3,02
1,82	1,90	2,16	2,37	2,44	2,52	2,60	2,75	2,91	3,08
1,83	1,93	2,20	2,41	2,48	2,56	2,64	2,80	2,96	3,13
1,84	1,96	2,24	2,45	2,52	2,60	2,69	2,85	3,01	3,18
1,85	1,99	2,28	2,49	2,56	2,64	2,73	2,89	3,06	3,23
1,86	2,02	2,32	2,53	2,60	2,69	2,77	2,94	3,11	3,29
1,87	2,05	2,36	2,57	2,64	2,73	2,82	2,99	3,16	3,34
1,88	2,08	2,40	2,61	2,69	2,77	2,87	3,04	3,21	3,39
1,89	2,12	2,44	2,65	2,73	2,82	2,91	3,09	3,27	3,45
1,90	2,16	2,48	2,70	2,78	2,87	2,96	3,14	3,32	3,51
1,91	2,19	2,51	2,74	2,82	2,91	3,01	3,19	3,37	3,56
1,92	2,22	2,55	2,78	2,87	2,96	3,07	3,25	3,43	3,62
1,93	2,25	2,59	2,82	2,91	3,00	3,12	3,30	3,49	3,68
1,94	2,29	2,63	2,87	2,96	3,05	3,16	3,35	3,54	3,73
1,95	2,33	2,67	2,91	3,00	3,10	3,21	3,40	3,59	3,79
(VR/CT) 100	21,5	23	24,5	25,5	26,5	27,5	29	30,5	32,5

CONCLUSION

Cet exposé pratique de spiropgraphie a été rédigé à la demande des experts de la Haute Autorité de la Communauté européenne du charbon et de l'acier, à partir de l'expérience acquise dans les centres de médecine du travail. Les trois épreuves spiropgraphiques choisies (capacité vitale, expiration forcée et ventilation maximale) sont les mieux connues et les plus significatives parmi les examens couramment utilisables. Elles ont été décrites en détail pour que les différents centres d'examen puissent unifier leurs techniques d'enregistrement et l'expression de leurs résultats.

Le rôle très important de l'opération a été souligné. Son travail doit être soumis au contrôle d'un médecin qui interprète les résultats des examens et qui pourra aisément acquérir les connaissances nécessaires de physiopathologie respiratoire, grâce à quelques-uns des nombreux traités et publications consacrés à ce sujet.

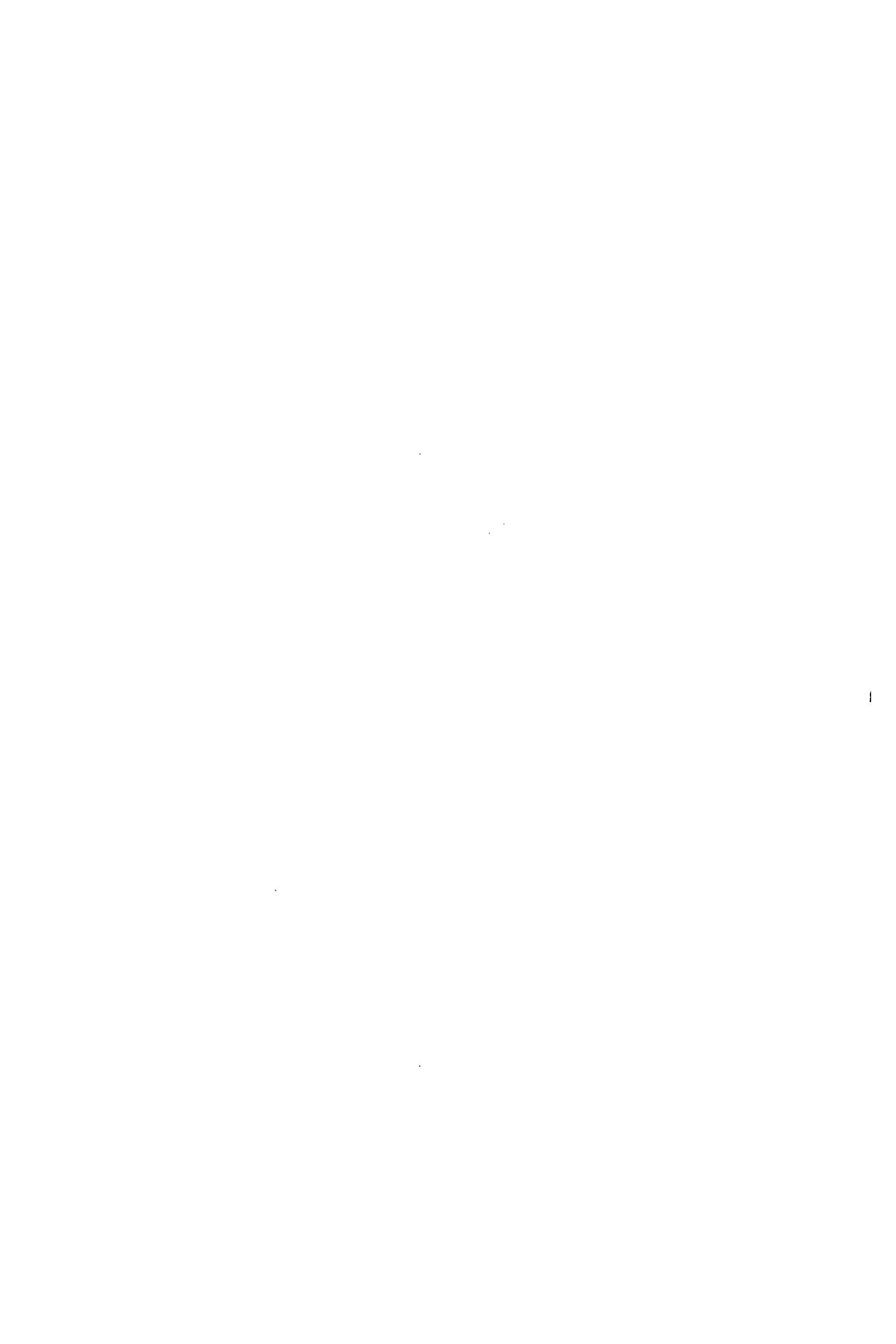
La durée de l'enregistrement des trois épreuves reste normalement inférieure à dix minutes, en médecine du travail. Au cours des expertises, pourtant, cette durée doit être prolongée si l'on veut obtenir des résultats significatifs, malgré le manque de coopération des sujets. Au contraire, l'examen peut être réduit à l'enregistrement des deux premières épreuves spiropgraphiques, ce qui ne demande plus que cinq minutes environ, pour les visites d'embauche par exemple. Les calculs, faits après coup, ne prennent également que cinq à dix minutes, pour peu que l'opérateur utilise la règle à calcul.

Les résultats de ces examens mettent à la disposition du médecin des renseignements indispensables sur les possibilités ventilatoires des sujets. Un examen spiropgraphique bien dirigé donne en effet des résultats sûrs, à peu près infalsifiables et qui fournissent donc une base solide à l'expertise: ils permettent de vérifier et de préciser l'intégrité ou l'atteinte de la fonction ventilatoire. Le lecteur peut en juger en comparant le tracé de la figure 14, donné par un jeune travailleur de force de bonne santé, et le spiropgramme de la figure 13, enregistré dans un cas d'emphysème pulmonaire grave.

Les *tables des valeurs normales* ont été établies à partir des données de l'enquête de la commission de normalisation de la C.E.C.A. Elles concernent les valeurs normales du *travailleur des mines ou de la sidérurgie*; elles sont donc un peu fortes pour des sujets sédentaires ou des femmes.

La commission a estimé qu'il convenait essentiellement de fixer des normes qui ne sous-estiment pas les valeurs fonctionnelles des travailleurs et permettent donc une plus juste estimation d'une réduction pathologique éventuelle.

GRAPHIQUES
ET
ABAQUES



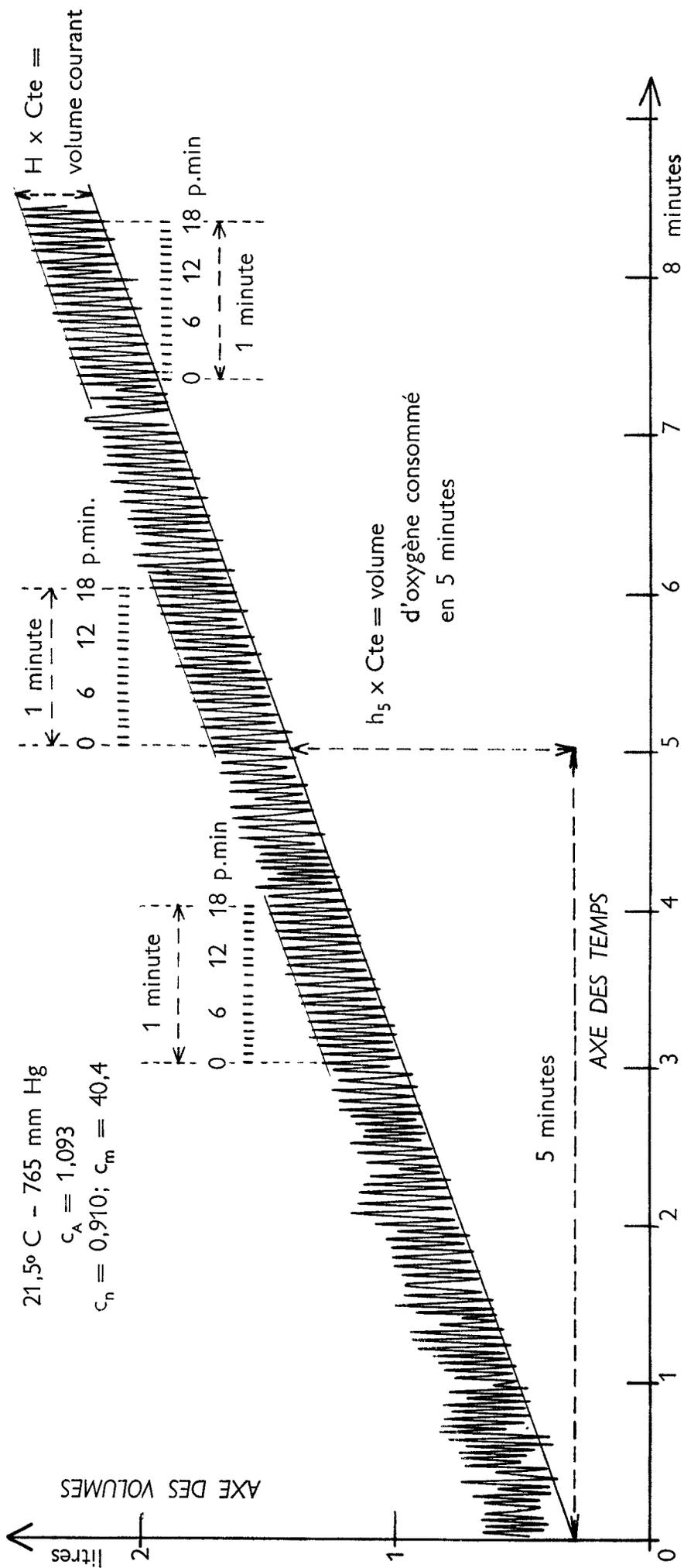


FIG. 1

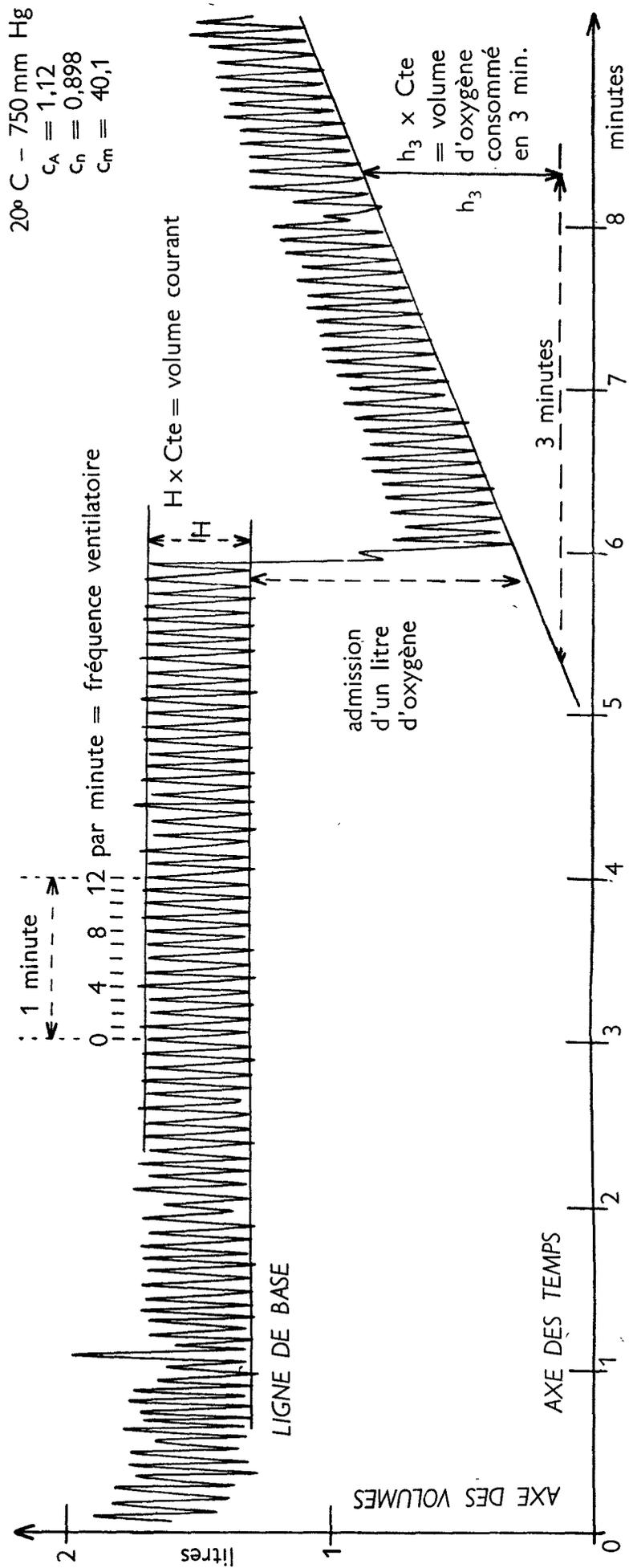


FIG. 3



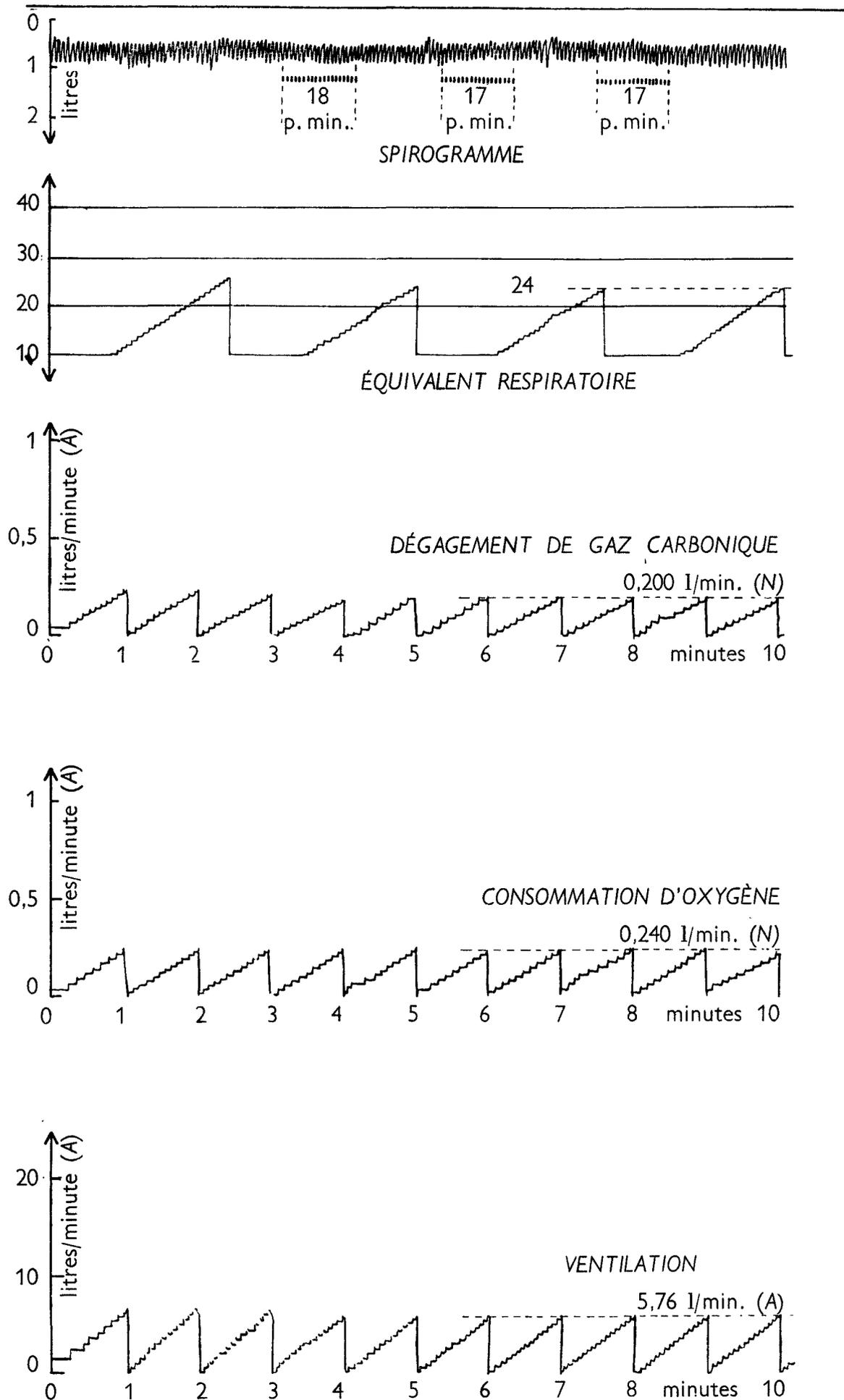


FIG. 4

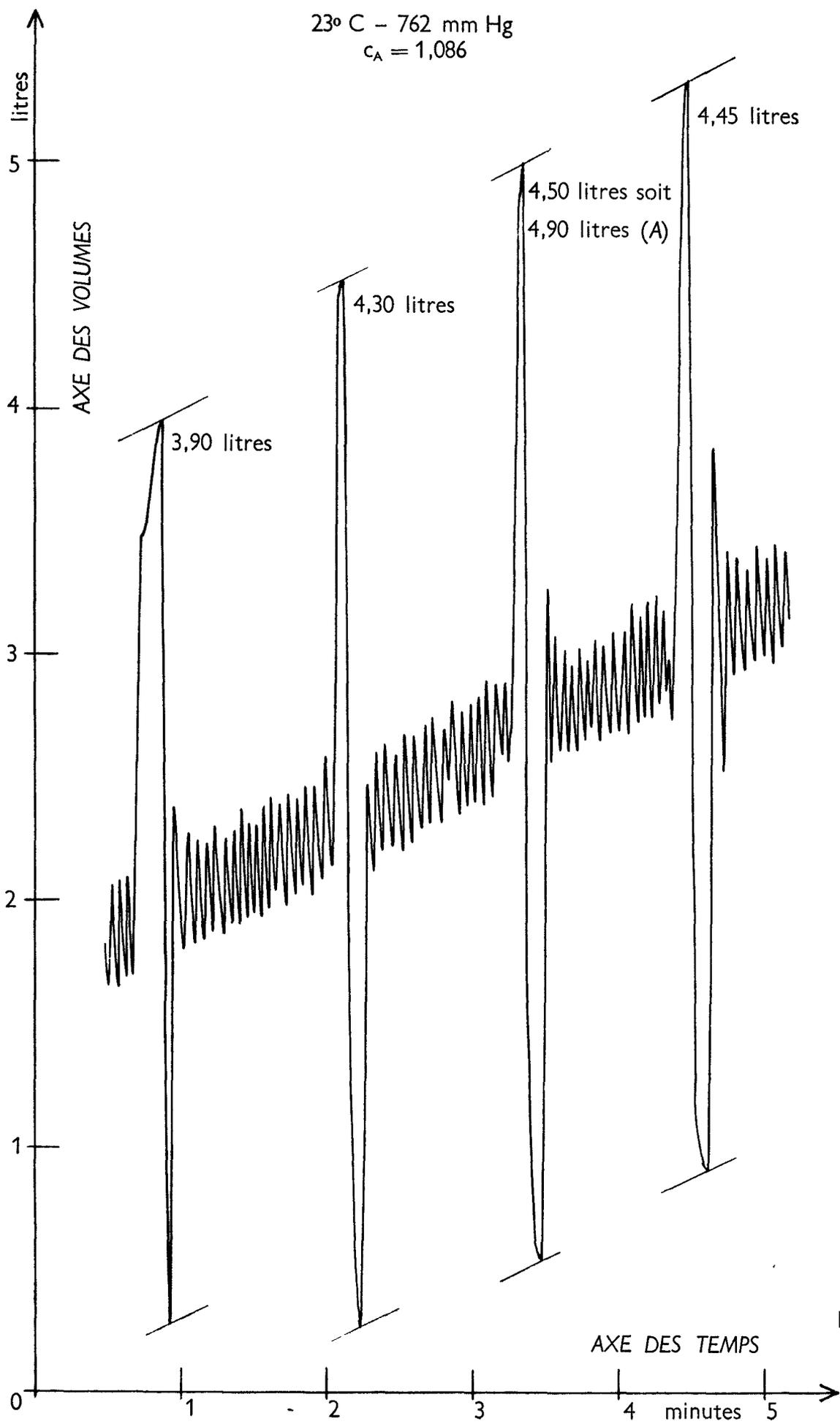


FIG. 5

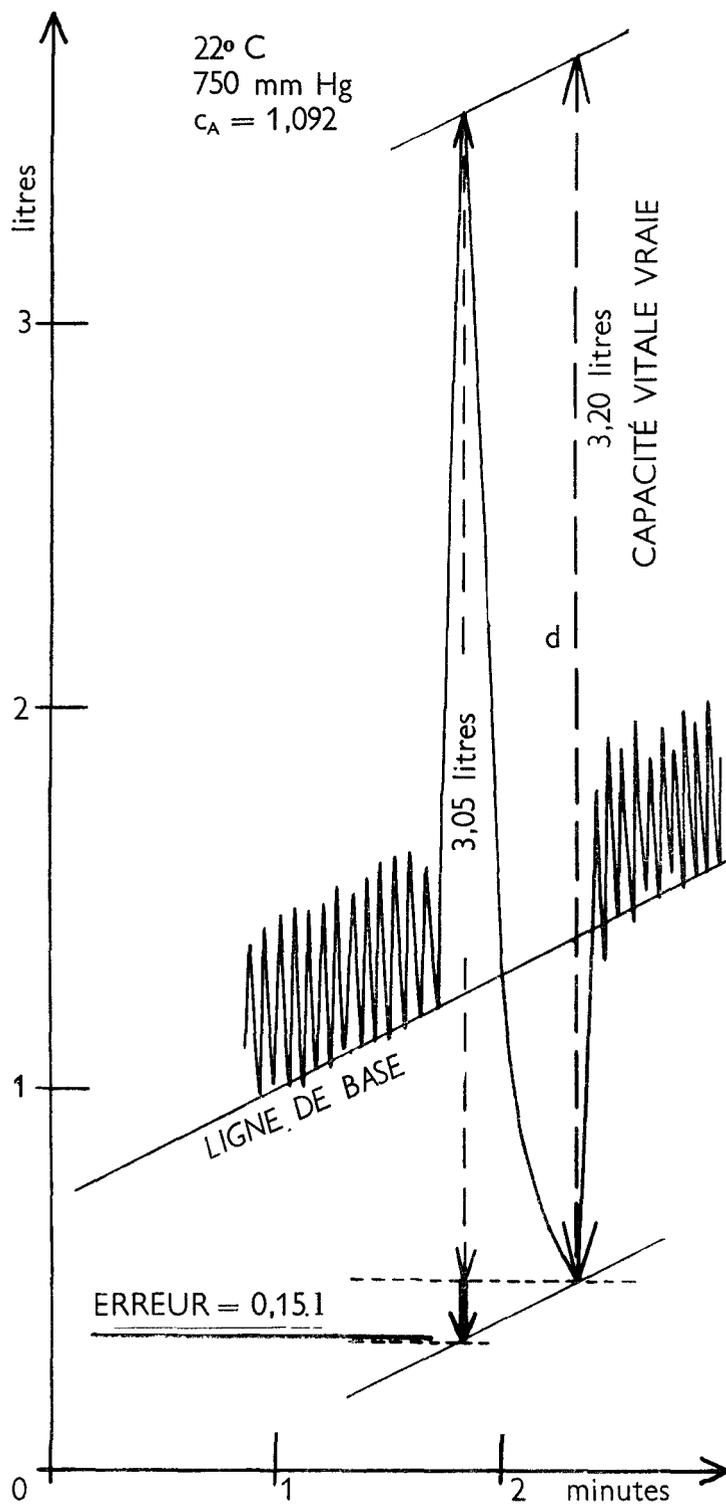
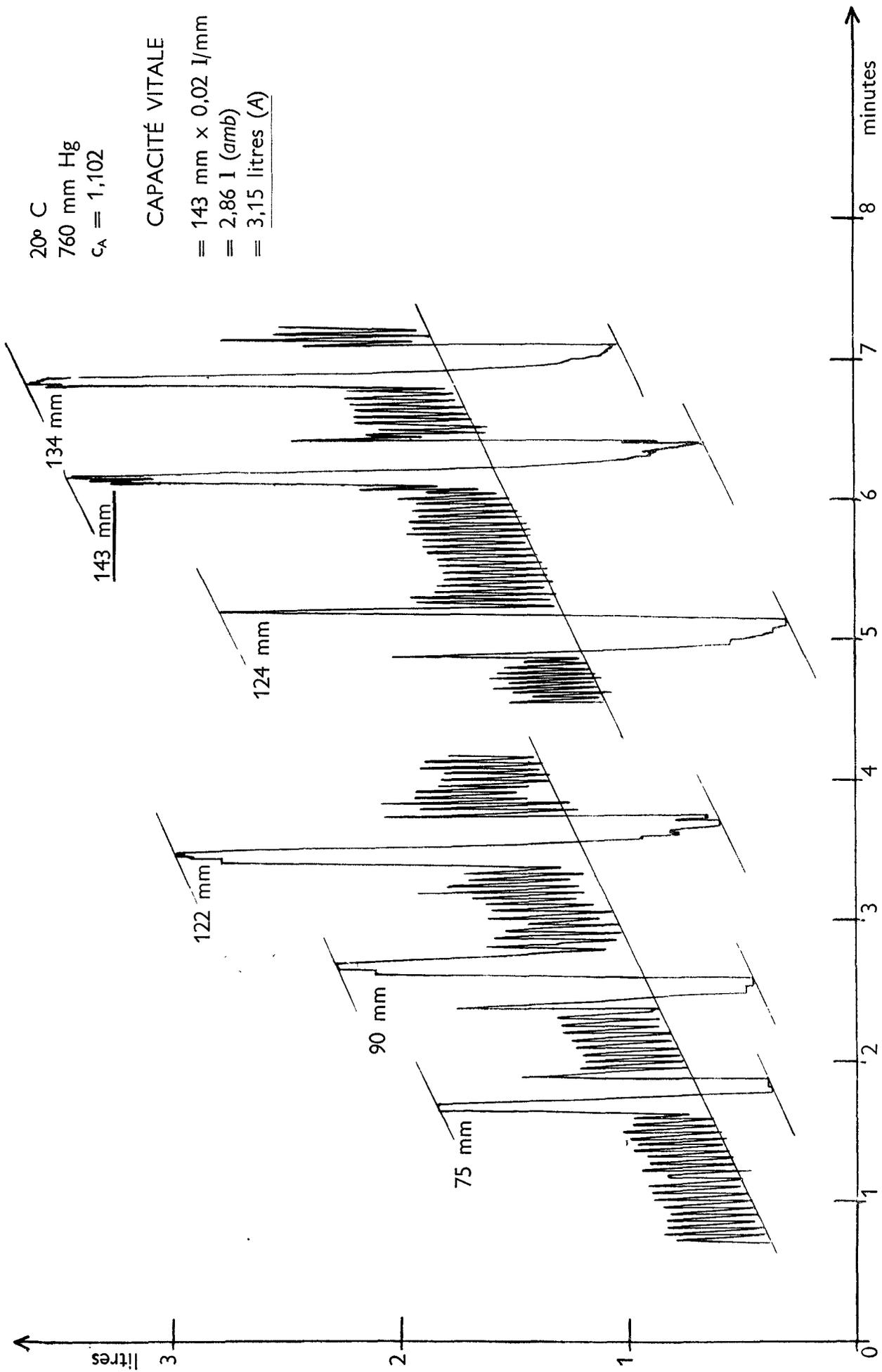


FIG. 6



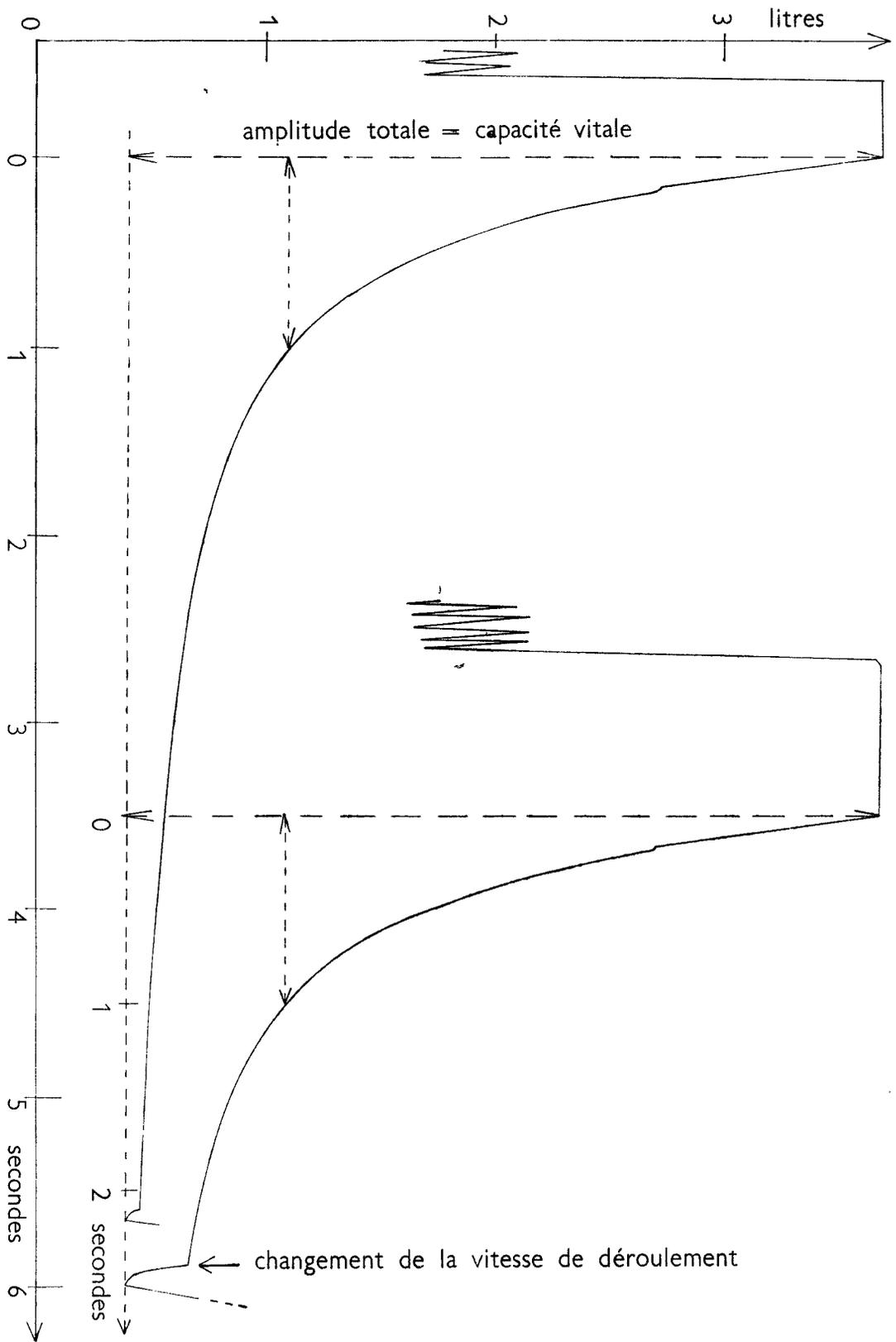
20° C
 760 mm Hg
 $c_A = 1,102$

CAPACITÉ VITALE

- = 143 mm x 0,02 l/mm
- = 2,86 l (amb)
- = 3,15 litres (A)

FIG. 7

FIG. 8



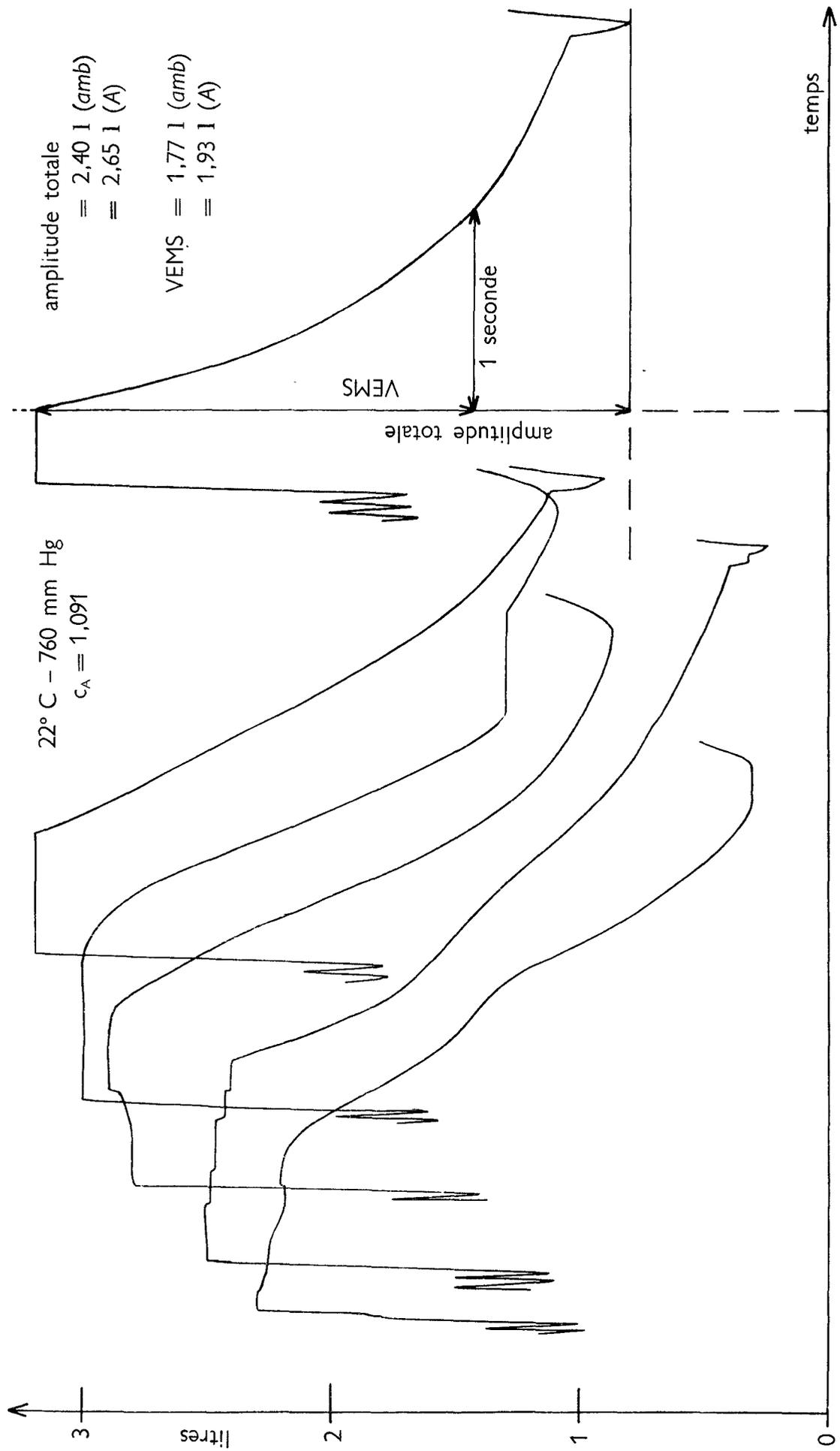


FIG. 10

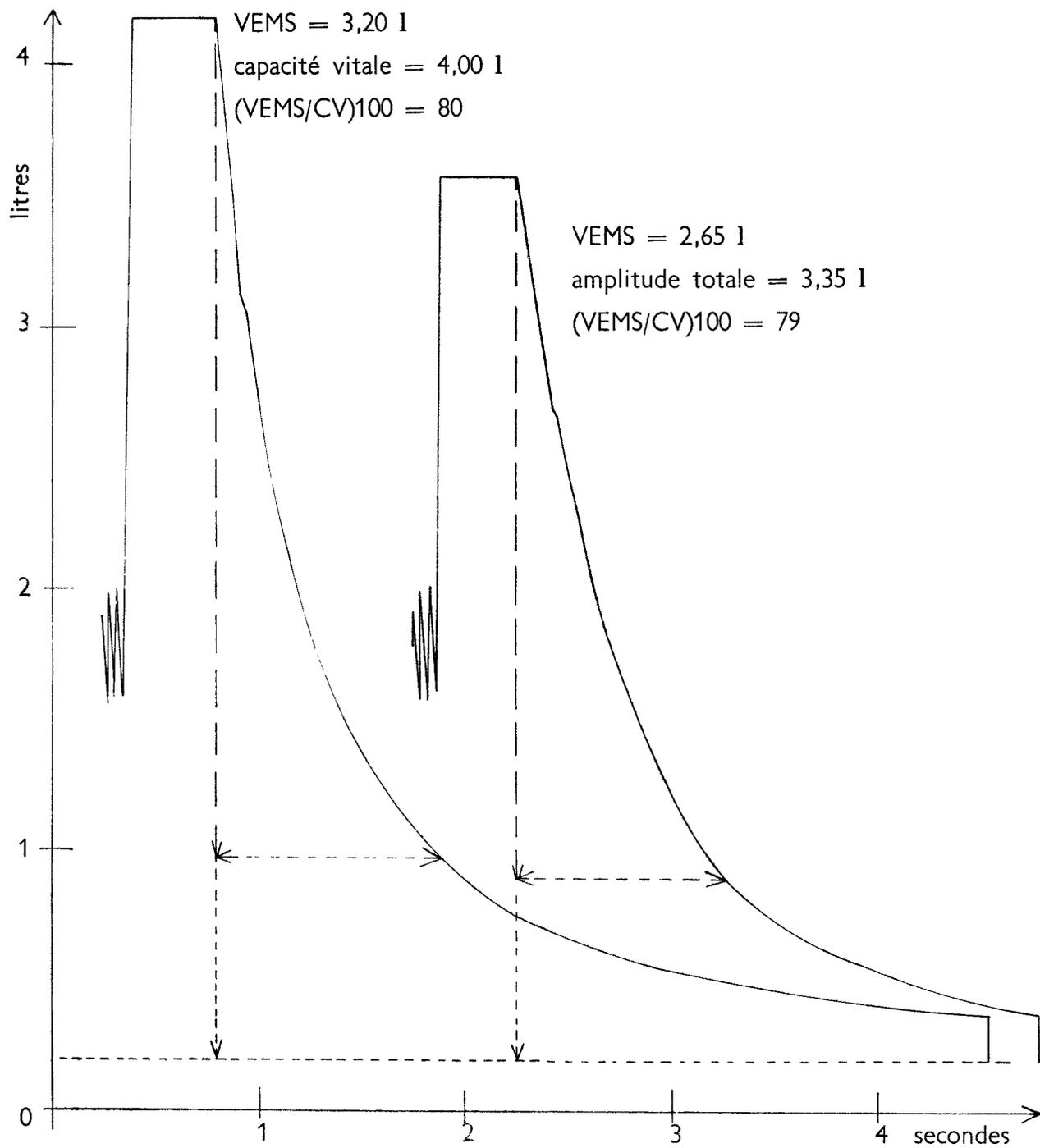


FIG. 11



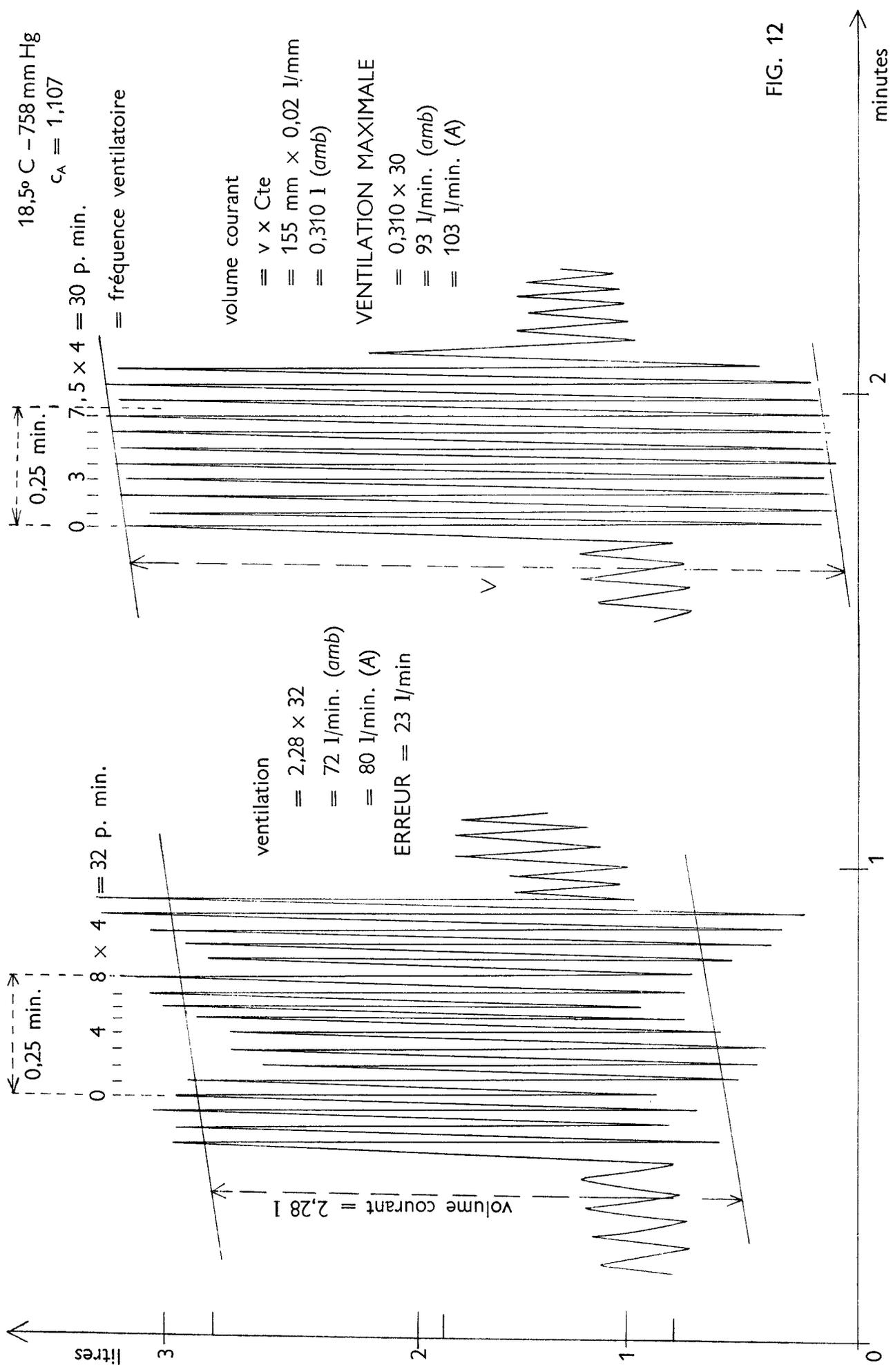


FIG. 12



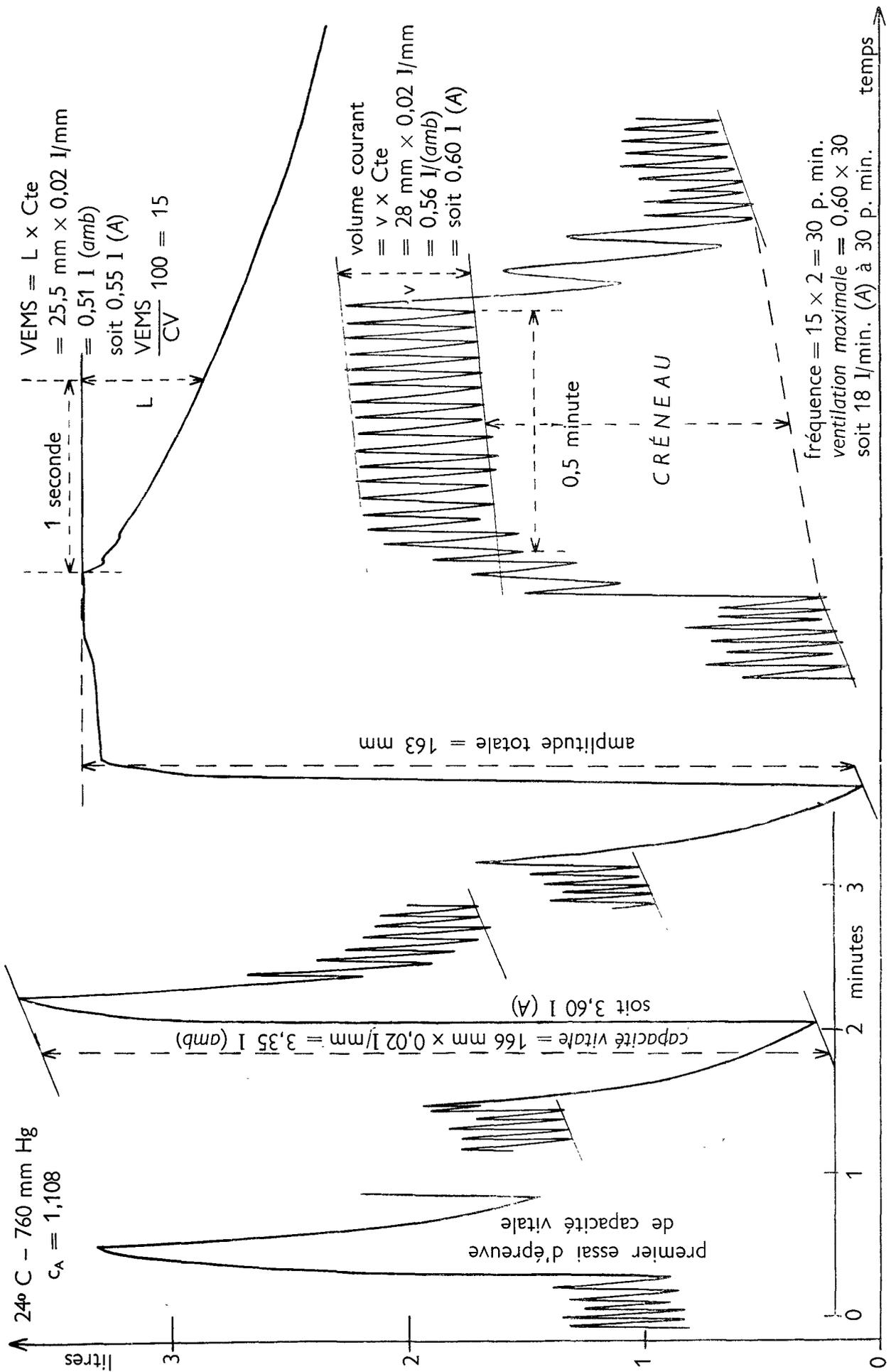


FIG. 13



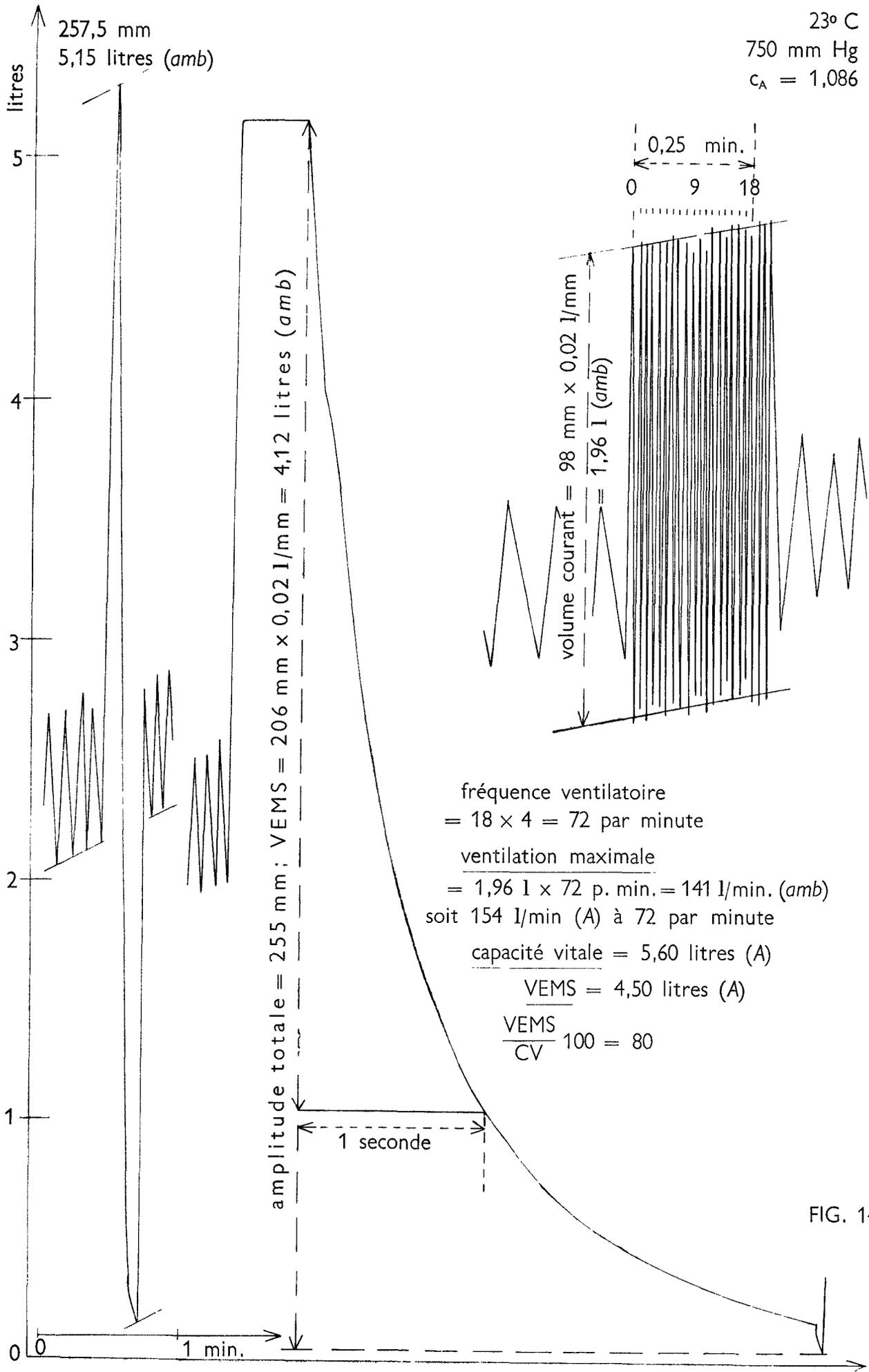
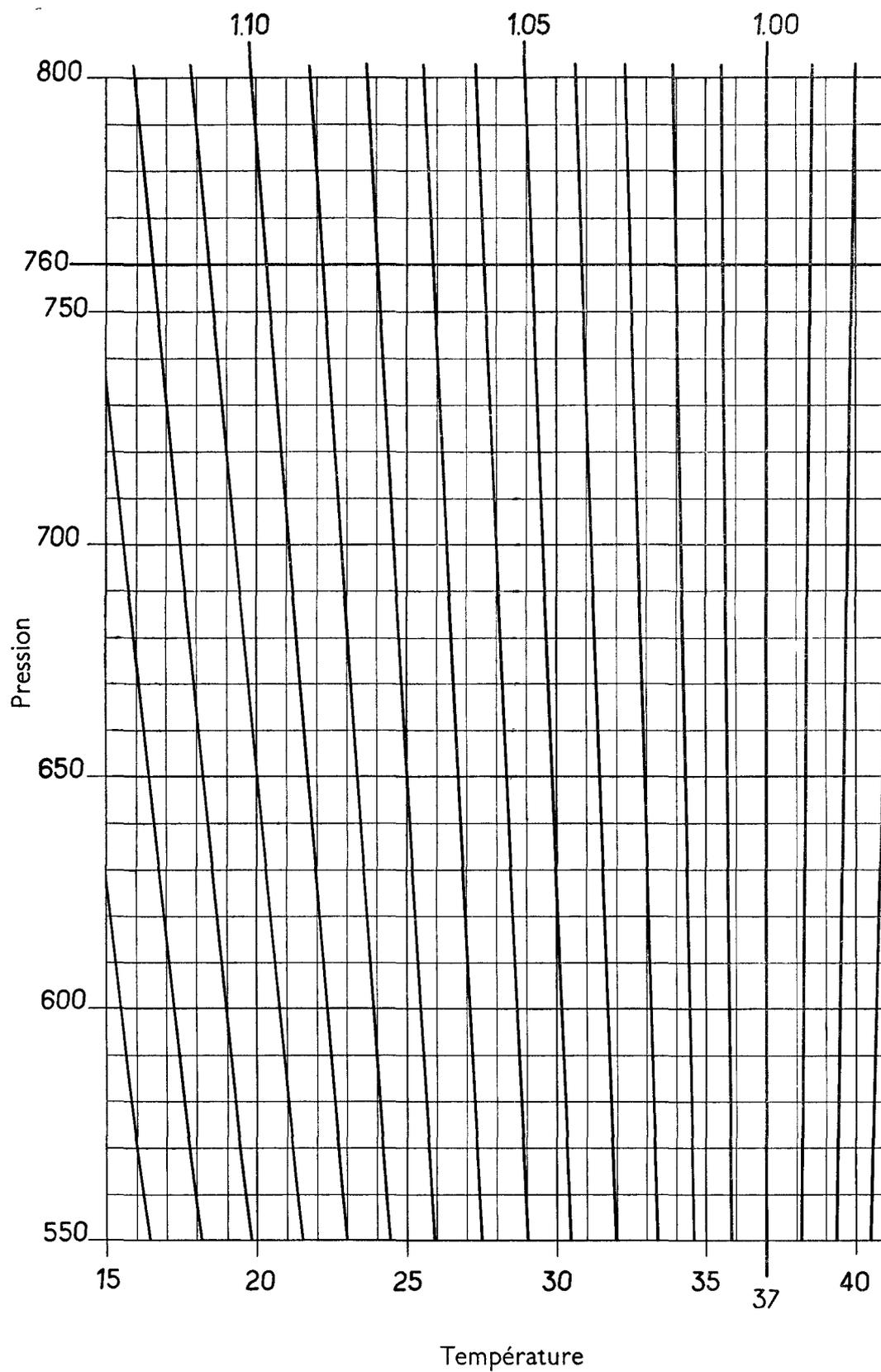


FIG. 14

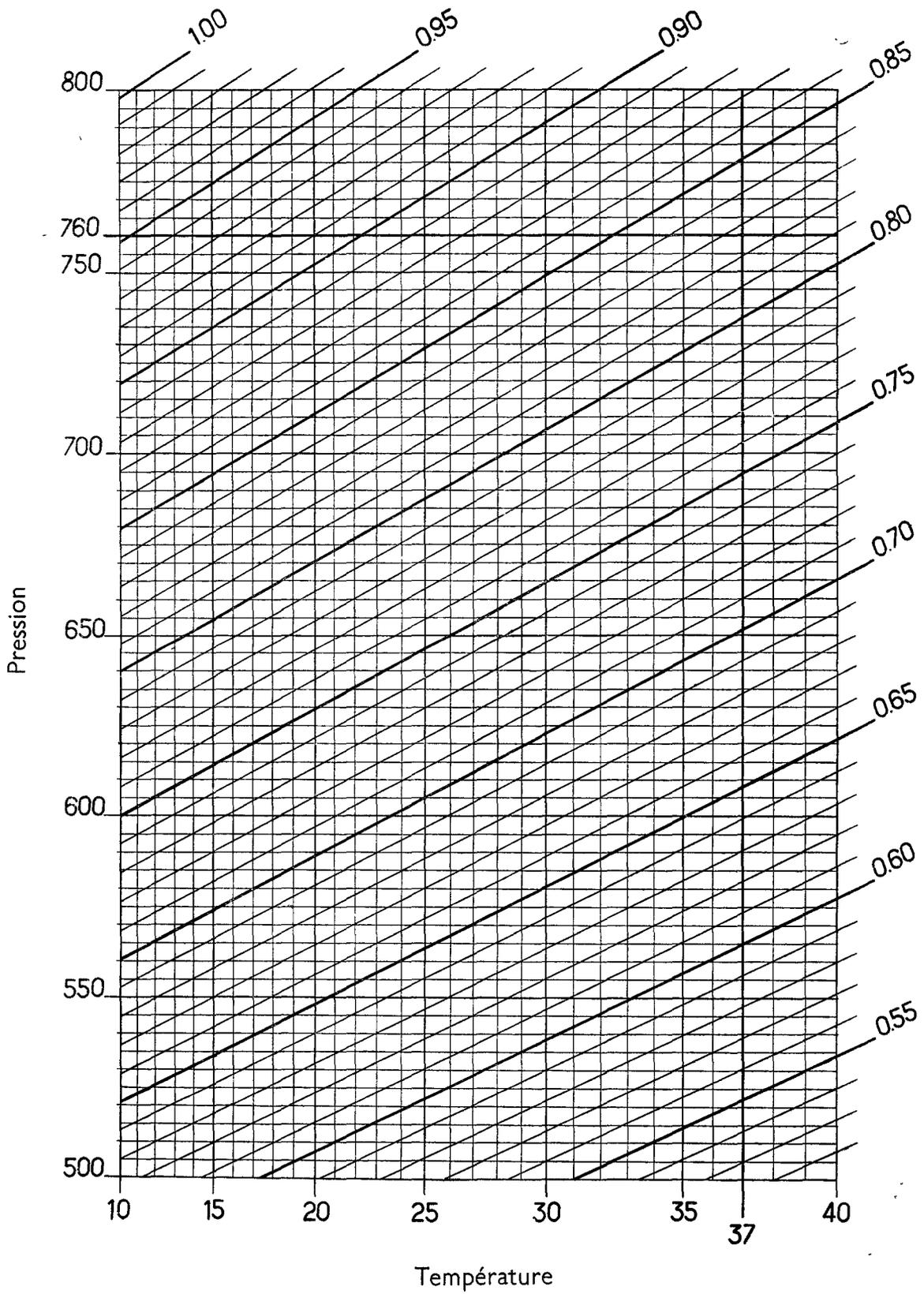
ABAQUE 1

Coefficient de conversion des mesures spirométriques aux conditions alvéolaires conventionnelles (37° C, pression ambiante, à saturation de vapeur d'eau)



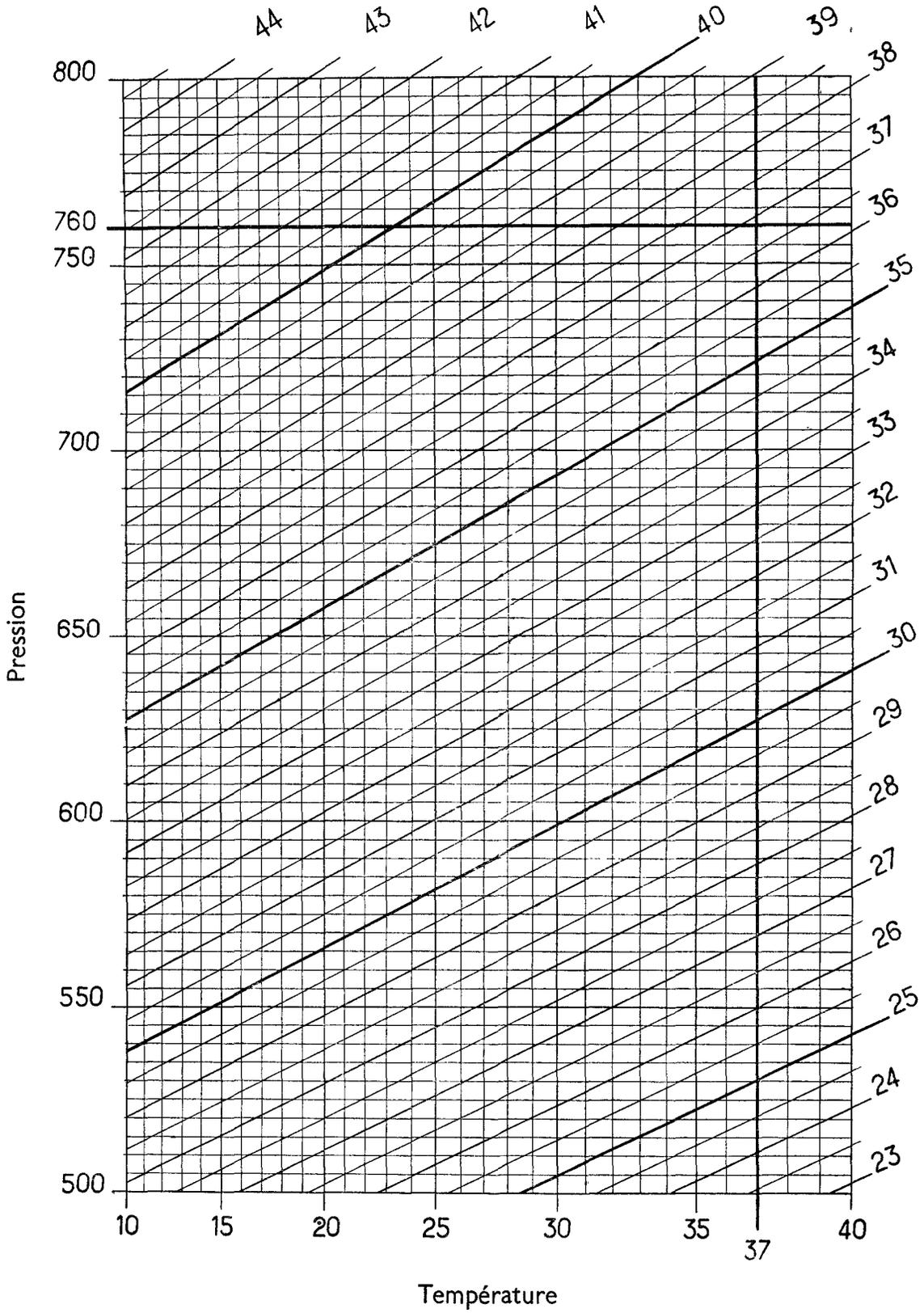
ABAQUE II

Coefficient de conversion des mesures spirométriques aux conditions «normales»
des physiiciens (0° C, 760 mm Hg et sec)



ABAQUE III

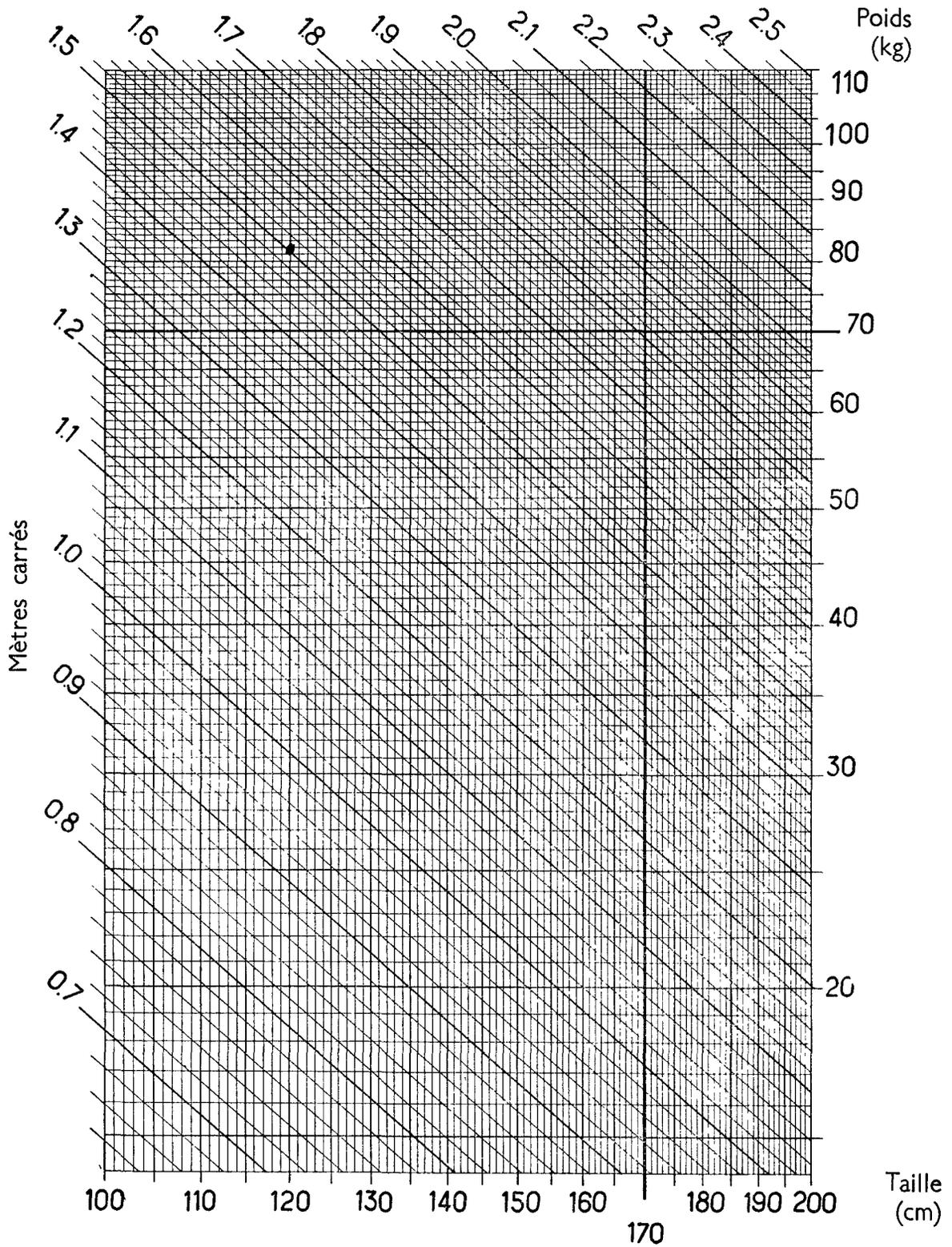
Coefficient de conversion des volumes spirographiques (litres) en millimoles de gaz



ABAUUE IV

Calcul de la surface corporelle en mètres carrés à partir de la taille en centimètres et du poids en kilogrammes selon la formule des Dubois:

$$S = 0,071 \cdot 84 P^{0,425} H^{0,725} \text{ (1)}$$



(1) S = surface corporelle; P = poids; H = taille.

