

A9104

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
C.E.C.A.

Collection d'hygiène et de médecine du travail
N° 8

Physiopathologie cardio-respiratoire

Étude synthétique sur la base
des travaux menés au cours du 2e programme
de médecine du travail

Professeur P. SADOUL

LIBRARY
EUROPEAN COMMUNITY
INFORMATION SERVICE
WASHINGTON, D. C.

Luxembourg, 1968

CECA 764

456.723

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
C.E.C.A.

Collection d'hygiène et de médecine du travail
N° 8

Physiopathologie cardio-respiratoire

**Étude synthétique sur la base
des travaux menés au cours du 2e programme
de médecine du travail**

Professeur P. SADOUL

Luxembourg, 1968

1.2.1

CECA : 764

SOMMAIRE

Sommaire	5
Préface	7
Introduction	9

A – FONCTION VENTILATOIRE

I – Volumes et débits pulmonaires	
Étude de l'irritabilité bronchique	16
II – Mixique	20
III – Mécanique ventilatoire	24
1. Expérimentation animale	25
2. Recherches sur l'homme sain	25
3. Mesures chez le malade	28
Bibliographie	31

B – ÉTUDE DE LA CIRCULATION PULMONAIRE

I – Cathétérisme du cœur droit et de la circulation pulmonaire . . .	35
Conditions techniques	35
Valeurs normales	36
Modalités et intérêt de l'exercice au cours du cathétérisme . . .	37
II – Mesure du débit cardiaque	37
Mesure par les colorants	38
Technique de thermodilution	41
Radiocardiographie	42
Mesure du débit cardiaque par réinspiration de CO ₂	42
III – Angiopneumographie	42
IV – Données expérimentales sur le retentissement de l'hypertension artérielle pulmonaire sur le myocarde	43

V	– Résultats au cours des bronchopneumopathies chroniques	43
	Résultats chez les pneumoconiotiques	43
	Résultats observés dans les bronchites chroniques et l'emphysème	44
	Séquelles fonctionnelles de la chirurgie pour tuberculose pulmonaire	
	au cours de la silicose	45
VI	– Discussion	45
	Corrélation des données hémodynamiques et des autres résultats	
	fonctionnels	45
	Bibliographie	51

C – ÉTUDE DES ÉCHANGES RESPIRATOIRES

	Gaz du sang artériel	53
	Les analyses rapides de mélange gazeux	55
	Test de transfert du CO	58
	Bibliographie	63

D – ERGOSPIROMÉTRIE

I	– Appareillage – Variables étudiées	67
	1. Ergomètres	67
	2. Circuits spirométriques	69
	– fermés ventilés	69
	– ouverts	70
	3. Paramètres	71
	– cardiovasculaires	71
	– sanguins	72
	– autres variables considérées	73
II	– Modalités des divers tests ergospirométriques	73
	Résultats	74
	1. Réponses normales	75
	– données respiratoires sanguines	75
	– évolution des paramètres cardiocirculatoires	76
	2. Résultats chez les malades	78
III	– Normalisation des épreuves d'effort	83
	Bibliographie	85

PRÉFACE

La recherche médicale couvre un domaine vaste et complexe qui fait appel à des disciplines multiples: la biologie, la physique, la chimie, l'électronique, etc.

De ce fait elle n'est plus concevable sans une collaboration étroite et permanente entre les chercheurs œuvrant dans ces disciplines.

L'aide financière de la C.E.C.A. aux recherches fondamentales et appliquées en matière de pathologie professionnelle, outre la promotion de la recherche elle-même, a largement contribué à l'essor de cette collaboration qui s'amplifie d'année en année.

La physiopathologie respiratoire dont l'étude est menée activement dans les six pays de la Communauté enregistre des progrès technologiques considérables, à la fois en ce qui concerne la connaissance du développement des troubles fonctionnels de la respiration et celle des techniques d'investigation.

C'est grâce aux progrès de ces connaissances que le dépistage et la surveillance des insuffisances respiratoires et, de même, l'évaluation de l'incapacité de travail des sujets atteints d'affections broncho-pulmonaires s'effectuent avec une précision accrue et une méthodologie concertée.

Si le présent ouvrage est un rapport synthétique des travaux menés au cours du deuxième programme de recherches de médecine du travail de la C.E.C.A. en physiopathologie des affections respiratoires, il n'a pas négligé de tenir compte d'acquisitions plus récentes qu'on doit aux premiers développements du troisième programme des recherches en cours.

Je tiens à rendre hommage au rapporteur, le professeur Sadoul, de Nancy, qui a bien voulu se charger de ce travail important qui permet ainsi aux milieux scientifiques et professionnels d'apprécier l'ampleur et la valeur des investigations effectuées et les résultats obtenus.

Il en résultera certainement un double avantage, celui de tirer des remarquables travaux des chercheurs de la C.E.C.A. une leçon pratique au profit des travailleurs, de contribuer au déroulement efficace du programme actuel et des recherches qui prendront la relève à l'avenir.

Le Directeur général
F. VINCK

INTRODUCTION

Dès son premier programme de recherches biologiques et médicales, la Haute Autorité a considéré que la physiopathologie respiratoire devait avoir une place importante. Il apparaît indispensable, en effet, de connaître les perturbations des fonctions pulmonaires et cardiaques que peuvent entraîner les maladies frappant les travailleurs du charbon et de l'acier.

Cette connaissance est nécessaire non seulement pour aboutir à une juste indemnisation des ouvriers mais aussi pour permettre le reclassement des diminués physiques, de même que le dépistage des anomalies minimales qui signent soit une moindre résistance de l'ouvrier, soit le début d'une affection qui, à un stade plus avancé, serait difficilement curable.

Les procédés d'investigation employés par les physiologistes chez l'animal ou chez l'homme sain, parfaitement coopérant, ne sont pas toujours utilisables chez le malade. Quelle que soit leur perfection, ils reposent parfois sur des postulats que la maladie rend sans aucune valeur, comme ceux d'une distribution gazeuse intrapulmonaire parfaitement homogène, d'une différence artério-veineuse en oxygène de 5 volumes ou de l'absence de gradient alvéolo-capillaire pour le CO_2 . D'autre part, les procédés d'investigation mis en œuvre dans les grands instituts de médecine du travail ou dans les cliniques universitaires ne sont pas toujours utilisables pour les enquêtes de masse, pour les dépistages ou pour les examens d'embauche. La complexité de l'appareillage, l'obligation de gestes considérés par l'ouvrier comme traumatisants (prise de sang artériel, exercices physiques épuisants, etc.), nécessité d'une coopération intelligente et dépourvue d'anxiété sont quelques-uns des facteurs qui rendent certains examens impossibles en pratique quotidienne au centre de médecine du travail. Enfin, les résultats de ces divers examens doivent être interprétés par comparaison à des normes. Lorsqu'elles existent, les normes fournies par les physiologistes sont souvent incomplètes ou même erronées. Elles ne comprennent pas toujours des valeurs de référence pour les sujets âgés ou pour les travailleurs de force. Elles sont parfois sans valeur pour des techniques légèrement différentes de celles ayant servi aux mesures.

Pour toutes ces raisons, la Haute Autorité de la C.E.C.A. a encouragé durant ces dernières années des recherches sur les procédés d'exploration fonctionnelle respiratoire et cardiaque.

Durant le premier programme de recherches, les études ventilatoires avaient été particulièrement nombreuses et avaient surtout consisté en mesures spirométriques. Durant ces dernières années, les recherches se sont surtout développées dans le domaine des échanges respiratoires, de la circulation pulmonaire et des épreuves d'exercice. Les différents groupes de recherches ont acquis des résultats intéressants

non seulement au point de vue technologique mais aussi en ce qui concerne les anomalies observées chez les divers groupes de travailleurs de la Communauté et en particulier chez les silicotiques. Les résultats des différents centres doivent être confrontés, il faut sélectionner les tests simples pour entreprendre des études prospectives permettant de dégager les éléments d'un diagnostic précoce des affections chroniques.

Les pages qui suivent ne peuvent prétendre à résumer la totalité des diverses recherches. Nous souhaitons simplement qu'elles montrent au lecteur l'importance du travail fait et qu'elles constituent comme une sorte d'introduction aux références bibliographiques fort nombreuses qui suivent chacun des chapitres et qui montrent l'importance des recherches faites. De plus, on ne saurait oublier que grâce aux subventions de la Haute Autorité, il s'est développé un véritable corps de chercheurs européens. Chacune des équipes de travail connaît les travaux des autres. De nombreux chercheurs ont effectué des stages de perfectionnement dans des laboratoires qui leur étaient inconnus. Souvent les liens établis grâce à la C.E.C.A. sont plus étroits que ceux existant entre diverses équipes universitaires d'un même pays. Il faut souhaiter que de tels efforts puissent être poursuivis.

A - FONCTION VENTILATOIRE

I - Volumes et débits pulmonaires

La spirométrie est maintenant une méthode habituelle d'étude de la fonction ventilatoire. En France, elle fait partie des épreuves exigibles par la loi dans l'expertise des pneumoconiotiques. Les exigences techniques, la valeur et les limites de la spirométrie sont actuellement bien connues. Un effort d'unification entrepris dans les différents centres de la C.E.C.A. a abouti à la standardisation des épreuves spirométriques et à la normalisation des résultats consignés dans un aide-mémoire édité dans les 4 langues de la Communauté.

Si l'accord s'est fait sur les volumes à mesurer, il n'en est pas de même pour les débits : le VEMS est généralement retenu, mais certains auteurs préfèrent le volume expiré en 3/4 de seconde, valeur utile chez l'enfant, et d'autres paramètres, dont le débit expiratoire de pointe, ont été utilisés, en particulier outre-Atlantique. Dans les pays de la Communauté, c'est toutefois le VEMS qui prévaut.

Examen non traumatisant, ne nécessitant pas un appareillage trop compliqué, il est facilement accepté par le malade, mais il est difficile à mettre en œuvre correctement, et requiert la coopération du sujet. Son interprétation ne met pas en jeu les échanges, ses conclusions sont donc très partielles quant à la fonction pulmonaire. Les renseignements qu'il apporte sont cependant précieux, et cet examen peut être facilement répété.

A. Minette et M. Bruninx ont étudié les limites des variations physiologiques du VEMS et la reproductibilité de la mesure. La reproductibilité dépend de la valeur de base et elle est statistiquement moins bonne chez les sujets à VEMS amputé que chez les sujets normaux. L'étude porte sur 94 mineurs soumis à 4 séances réparties dans la journée. Chaque séance comporte 3 mesures du VEMS et seule la valeur maximale est retenue. La dispersion de la mesure augmente au cours de la journée et la réduction moyenne du VEMS se situe à 13 h. (Tableau 1).

TABLEAU 1

VEMS initial à 9 h		9 h 10	13 h	17 h
> 2500 ml (31 cas)	M	- 0,67	- 5	- 3,1
	σ	5,75	11,04	10,19
< 2500 ml (63 cas)	M	- 0,20	- 9,94	- 3,87
	σ	10,25	14,10	16,10

Variations moyennes (%) du VEMS au cours de la journée (94 houilleurs hospitalisés pour raisons diverses) selon Minette.

Le VEMS est aussi influencé par un effort intercurrent. Une étude du VEMS chez 660 mineurs montre que la valeur moyenne du VEMS augmente après un effort de 100 watts d'une durée de 10 minutes chez les sujets à VEMS très altéré. Mais la dispersion des valeurs augmente avec l'effort. (Écart type = 18 % du VEMS initial). (Tableau 2).

Tableau 2

VEMS initial après 10 h	Variations moyennes après effort	
	M	σ
> 2500 ml (378 cas)	0	8,67
< 2500 ml (234 cas) > 1500 ml	+ 2,5	14,66
< 1500 ml (48 cas)	+ 11	18,62

Variations moyennes (%) du VEMS sous l'influence d'un effort de 100 watts d'une durée de 10 minutes (660 cas).

Les mêmes auteurs, en comparant chez 50 malades la reproductibilité du VEMS au cours de la journée et celle des autres critères de débits : VEM 0,75 seconde, débits calculés en des points variables de la courbe d'expiration forcée, peak flow rate, trouvent une dispersion plus importante avec les critères autres que le VEMS et le VEM 0,75 seconde selon Carpenter. Les résultats des diverses comparaisons sont favorables au maintien du VEMS comme critère d'évaluation du débit expiratoire.

A côté des spiromètres d'enregistrement à eau, le plus couramment utilisés, d'autres appareils ont été proposés pour la mesure des volumes et débits pulmonaires. E. Gaffuri et A. Reggiani, de Padoue, emploient le spiromètre de Wedge, constitué d'un soufflet de grandes dimensions pour mesurer les volumes et débits ventilatoires, sans résistances appréciables. Les variations de volume et de débit sont transformées en signaux électriques, traduites sur un oscillographe en coordonnées orthogonales. Les auteurs obtiennent ainsi un tracé qui combine spirogramme et pneumothachogramme, sous forme d'une boucle pour un mouvement respiratoire donné. Les valeurs spirométriques habituelles sont facilement déterminées sur ce graphique, dont la morphologie par ailleurs est différente chez le normal et chez le sujet ayant des troubles ventilatoires obstructifs. De même cette méthode permet une étude plus précise des modifications de débit expiratoire après agent broncho-modificateur.

Les pays anglo-saxons utilisent volontiers le peak flow meter de Wright. La reproductibilité du débit expiratoire de pointe a été étudiée par Billiet et collaborateurs à Louvain (coefficient de variation de 4,6 %).

Les volumes pulmonaires varient de façon marquée chez les sujets sains, en particulier en fonction de l'âge, de la taille et de la morphologie, du sexe. Aussi se pose

la question des valeurs théoriques à adopter. Il est évident que celles-ci doivent être établies sur un très grand nombre de sujets, étant donné le nombre de sous-groupes à constituer.

Une telle enquête a été faite dans le cadre de la C.E.C.A., dont le début remonte à 1955; elle a permis à M. Cara et D. Jouasset d'établir des normes en fonction de l'âge et du cube de la taille, à partir de résultats obtenus dans les différents laboratoires de la Communauté. Cependant B.F. Visser, dans le cadre de recherches sur la médecine du travail de l'Organisation T.N.O. met en doute la valeur de l'exposant 3 adopté par Cara. Il se base sur les valeurs spirométriques de 1076 ouvriers d'aciérie, sujets normaux. Le traitement statistique de ces données conduit l'auteur à proposer un nomogramme permettant de déterminer facilement CV et VEMS à partir de l'âge et de la taille. Les valeurs ainsi obtenues sont assez comparables aux « théoriques C.E.C.A. ». L'auteur remarque qu'il serait souhaitable de réduire la dispersion existant dans chaque sous-groupe, en utilisant des caractères supplémentaires, comme des dimensions thoraciques. P.E. Joosting et J.P. de Kroon, se basant sur la même étude, évoquent la possibilité de facteurs typologiques outre les facteurs biométriques.

Les membres du Pneumoconiosis Research Unit étudiant spirométriquement 275 hommes affectés à des travaux sans poussière et indemnes d'antécédents broncho-pulmonaires ne trouvent aucune différence significative entre sujets fumeurs et non fumeurs. Une formule de régression linéaire du VEMS en fonction de l'âge et de la taille est établie et les coefficients de régression trouvés sont peu différents de ceux trouvés par les équipes de recherche de la C.E.C.A. et d'autres centres européens ou américains. Cotes propose une formule générale combinant diverses relations pour la prévision normale de VEMS et pour comparer les résultats des différents centres.

Pour les sujets de sexe féminin, Sartorelli et collaborateurs ont établi deux nomogrammes de la capacité vitale et du VEMS à partir des résultats obtenus chez 165 ouvrières normales.

L'École de Nancy a dressé un tableau des valeurs moyennes (CV et VEMS) de l'enfant à partir des mesures effectuées chez 101 filles et 122 garçons en âge scolaire. Les résultats montrent une assez bonne corrélation entre la taille du sujet et les paramètres ventilatoires. La CV s'élève en moyenne de 200 ml lorsque l'enfant grandit de 5 cm.

Les recherches de normalisation du volume résiduel ont été poursuivies. La technique de mesure du VR en circuit fermé, largement utilisée maintenant, suppose en dehors des exigences techniques liées à l'appareillage, une bonne coopération du sujet qui doit maintenir un niveau respiratoire constant.

Oelbrandt et Lavenne ont étudié la reproductibilité des mesures en circuit fermé (hélium) et en circuit ouvert. Dans cette dernière méthode, l'azote alvéolaire lavé par une inhalation d'oxygène, est analysé par le nitrogenmeter mis au point par Lundin et Akesson. Cet appareil dose spécifiquement l'azote dans l'air à l'aide d'une cellule photo-électrique sensible aux rayons émis lors de la décharge en atmosphère raréfiée. Cet analyseur sensible et à temps de réponse suffisamment court permet l'enregistrement du rejet azoté cycle par cycle.

Deux groupes comportant respectivement 79 et 76 mineurs ont été étudiés. Chez chacun des sujets explorés, la CRF a été mesurée à double reprise par chacune des deux méthodes et l'épreuve est terminée par la mesure du volume de réserve expiratoire. La reproductibilité de chacune des deux méthodes a été étudiée en comparant les rapport VR/CT exprimés en pourcentage. L'écart moyen entre les 2 mesures est faible dans la première série (0,5 % pour la méthode en circuit ouvert). Dans la deuxième série de malades, l'écart moyen est pratiquement nul pour la méthode à l'hélium et faible (0,3 %) pour la méthode à l'azote. La limite de confiance de 2 écarts types est pour l'hélium de 5,2 % et de 5,8 % pour l'azote. En comparant les résultats des 2 méthodes, on trouve un rapport VR/CT supérieur de 0,70 % en moyenne par la technique au nitrogenmeter, différence non significative. La seule raison de choisir l'une ou l'autre méthode est la commodité de l'appareillage; à cet égard les circuits fermés nécessitent peu d'entretien alors que l'appareillage pour la mesure à l'azote présente certains inconvénients, la nécessité d'un étalonnage journalier des mélanges gazeux et la fragilité du dispositif de mesure de Lundin.

La silicose entraîne-t-elle par elle-même une réduction des volumes pulmonaires, ou celle-ci est-elle secondaire à une affection associée, comme la bronchite chronique? Cette question a été très débattue, en partie à cause de la sélection des malades examinés, qui sont souvent des sujets d'expertise. Il était nécessaire de faire une enquête systématique; encore ses conclusions sont-elles difficiles à étendre à l'ensemble des pneumoconioses, si diverses dans leur forme radiologique et leur évolution.

Lavenne et L. Brasseur ont examiné 120 travailleurs au fond, exposé depuis 10 ans au moins, et sans pathologie pulmonaire, comparés à 22 ouvriers de surface, de même âge. Les mineurs présentent une image radiologique de pneumoconiose à tous les stades, bien qu'ils soient encore au travail. Ils se répartissent en 9 Z, 80 m, ou p, et 40 pseudo-tumoraux. Si chez les ouvriers de surface le rapport CV/CV théorique est de 98,5 %, il s'abaisse chez les mineurs, de façon significative à partir du stade 3, pour n'être que de 85 % chez les pseudo-tumoraux. La même remarque s'applique au VEMS dont la diminution est encore plus marquée, puisque le rapport VEMS/VEMS théorique est de 78,2 et 72,4 chez les pseudo-tumoraux. Chez ceux-ci apparaît un syndrome obstructif, avec rapport VEMS/CV à 65 % pour les stades B et C.

Le volume résiduel a également été mesuré chez ces ouvriers, et le rapport VR/CT s'élève légèrement avec le degré de la silicose, mais cette différence n'est significative que pour le groupe B + C.

Selon ces auteurs on peut donc attribuer à la pneumoconiose une réduction, discrète mais significative de la CV et du VEMS, à partir du stade 3 (micro-nodulaire, p ou n), et dans les silicoses pseudo-tumorales étendues une tendance au syndrome obstructif, en l'absence de signes de bronchite chronique.

Worth étudie de même l'influence de la silicose sur les fonctions ventilatoires chez 285 mineurs atteints de silicose précoce, âgés de 20 à 39 ans. Les résultats des valeurs spirométriques sont comparés à ceux d'un groupe témoin de 25 sujets sains non exposés et de même classe d'âge. On voit sur le *tableau 3* que la CV et le VEMS sont en moyenne inférieurs chez les silicotiques que chez les ouvriers sains. Le volume résiduel évalué en pourcentage de la capacité totale ne montre pas de diffé-

rence statistiquement significative entre les deux groupes. Au sein des groupes de mineurs n'apparaissent pas de différences significatives entre les valeurs spiropographiques en fonction de l'image radiologique (ombres fines ou étendues).

Tableau 3

Variations des volumes pulmonaires chez 285 mineurs âgés de 20 à 39 ans, selon Worth

Stades de la silicose	CV	VEMS/CV	VR/CT
z	4220	62,9	20,7
p	4180	62,0	25,0
pm	4150	59,0	26,4
ml	4350	55,2	24,5
m2	4340	59,6	26,4
m3	4250	60,5	20,4
mn	4000	64,7	26,8
n	3930	58,5	22,5
Ouvriers non exposés	4910	74,9	20,9

Le même groupe de Moers étudie l'influence de l'exposition prolongée au risque sur la fonction ventilatoire chez 1195 mineurs avec ou sans silicose, âgés de 20 à 60 ans. Les résultats sont comparés à ceux obtenus chez un groupe de 570 ouvriers, d'âge semblable, effectuant un travail lourd mais non exposé aux poussières.

La CV est légèrement inférieure chez les mineurs en activité depuis au moins 6 ans, par rapport à celle des ouvriers de même âge mais non exposés. La CV diminue avec la durée d'exposition au risque pour être inférieure de 15% en moyenne après 30 ans d'exposition, à la valeur du groupe témoin. La différence est encore plus marquée pour le VEMS (respectivement 6,6 et 19,6% après 6 ans et après 30 ans). Les valeurs moyennes du volume résiduel sont augmentées de 15 à 25% chez les mineurs.

E. Sartorelli et P. Scotti à Milan recherchent une relation entre la spiropgraphie et l'aspect radiologique de la silicose en confrontant les valeurs obtenues chez 1470 silicotiques et 520 sujets indemnes mais travaillant dans les mêmes conditions d'em-poussiérage. La diminution de la capacité vitale et de la ventilation maximale minute est statistiquement significative à tous les stades de la maladie, par rapport aux valeurs normales, mais la dispersion est moins importante pour la ventilation maximale minute. Mais les auteurs ne tiennent pas compte de facteurs bronchitiques susceptibles d'expliquer ces modifications spiropgraphiques.

Étude de l'irritabilité bronchique

J. Patigny et A. Minette ont fait une analyse statistique des tests broncho-dilatateurs. Après un exposé technique des méthodes statistiques utilisées, ils recherchent le mode d'expression des résultats le plus satisfaisant. En effet, l'augmentation du VEMS après bronchodilatateur dépend à la fois de la valeur absolue du VEMS avant la médication, de l'efficacité du produit administré, et du bronchospasme préexistant; de plus, il faut tenir compte des variations du VEMS en dehors de tout bronchodilatateur. La variation absolue du VEMS ne dépend pas uniquement de la valeur de départ, la relation n'étant pas linéaire, et la dispersion importante. Il est plus utile, au point de vue statistique, de répéter l'épreuve chez un même sujet, que de multiplier le nombre d'individus examinés. Pour déterminer le seuil statistique de signification pour la variation du VEMS après bronchodilatateur et pour comparer l'activité de diverses préparations, 2 groupes de drogues ont été utilisés : les sympathicomimétiques et des médicaments à action anticholinergique (thiozinanium injecté à la dose de 50 mg et le méthylnitrate d'atropine en aérosol). L'ordre de succession d'administration des diverses solutions doit être varié pour parer à la diminution de l'effet bronchodilatateur au fur et à mesure que le syndrome obstructif régresse. Les effets moyens de 4 drogues sympathicomimétiques (adrénaline, orciprénaline en aérosol et en flacon doseur, isoprénaline aérosol) sont comparés à ceux obtenus avec le thiozinanium chez 41 sujets. Les résultats portés sur la figure 1 montrent que les sympathicomimétiques ont une action moins intense et moins prolongée sur le bronchospasme latent que celle délivrée par le thiozinanium. L'orciprénaline en flacon doseur, quand elle est correctement inhalée (2 bouffées de 750 grammes chacune), donne des effets d'installation assez rapides et une zone d'activité étale pendant la deuxième demi-heure, donnant une sécurité plus grande pour la reproductibilité du test que celle obtenue par l'isoprénaline dont l'effet est rapide, mais fugace et qui s'accompagne fréquemment de troubles secondaires (tremblements, palpitation, oppression thoracique). Comparant l'activité du thiozinanium et d'un aérosol ordinaire d'atropine sous forme de méthyl nitrate (1 inhalation de 3,2 mgcc) chez 27 sujets, les auteurs montrent que l'effet bronchodilatateur par le dernier produit est comparable à la reponse donnée par le thiozinanium (Fig. 2).

Compte tenu des variations spontanées observées au cours de la journée, une modification de plus de 20% du VEMS doit être obtenue dans un cas particulier avant de conclure à la positivité du test. Les mêmes auteurs ont étudié la signification des tests de provocation à l'acétylcholine chez 325 mineurs hospitalisés pour bronchite ou pour pneumoconiose et dans un autre groupe composé de 197 sujets appartenant à l'industrie chimique ou en activité dans l'industrie du transport. Il existe une sensibilité nettement plus grande et plus fréquente chez les sujets atteints de bronchite.

La même équipe de l'Institut d'hygiène des mines de Hasselt a étudié les réactions bronchiques à la poussière, pendant et après effort, dans le but de reproduire les conditions de travail des mineurs. Un effort de 80 w à puissance constante a été exécuté par 44 sujets, dont 41 mineurs; 33 avaient un test à l'acétylcholine positif, et les 8 autres mineurs présentaient des signes cliniques, ou d'auscultation, de bronchite.

Cet effort a été parfaitement toléré, les paramètres ventilatoires et circulatoires sont identiques aux valeurs enregistrées lors d'un exercice en atmosphère normale ; la saturation artérielle estimée à la pince d'oreille, par oxymétrie transcutanée, n'a pas

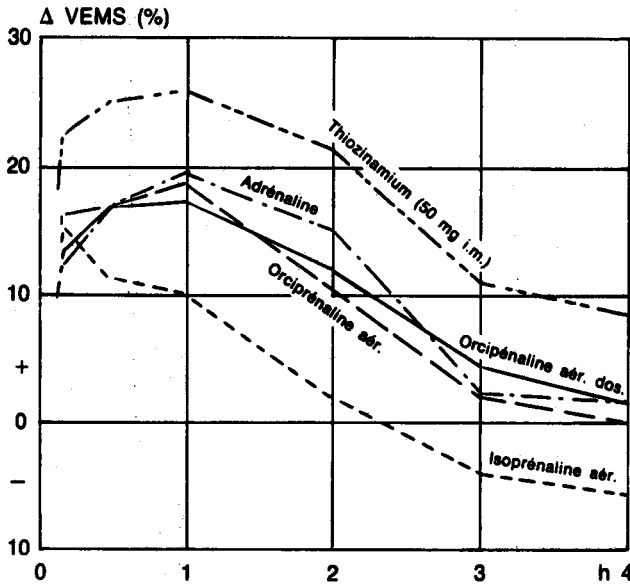


Fig. 1 — Effets sur le VEMS des bronchodilatateurs communément utilisés dans les pays de la C.E.C.A., en vue du dépistage des bronchospasmes latents (résultats préliminaires).

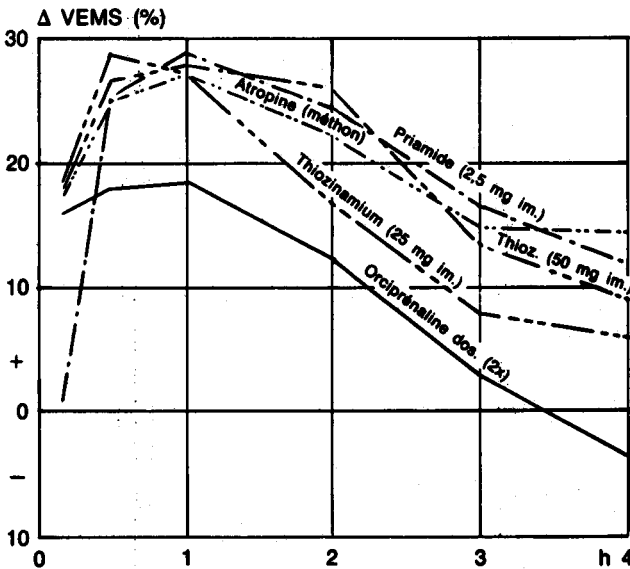


Fig. 2 — Effets sur le VEMS de diverses substances à l'action mixte anticholinergique et anti-histaminique, d'une part, et d'une préparation sympathicomimétique caractéristique, d'autre part (27 cas), d'après Minette.

varié. Les valeurs spirométriques n'ont pas varié, en moyenne. Mais l'examen des résultats individuels montre chez 8 sujets une diminution du VEMS de plus de 10% : tous ont également une sensibilité bronchique à l'acétylcholine et 7 d'entre eux déclarent être dyspnéiques sur les chantiers empoussiérés.

L'épreuve en chambre à poussière n'est donc que rarement positive, même dans un groupe de sujets sélectionnés chez lesquels on pouvait s'attendre à une réaction bronchoconstrictrice. On peut objecter que l'empoussiérage était de courte durée comparativement aux conditions de travail, mais il était cependant suffisamment intense pour entraîner une réaction bronchique, comme ce fut d'ailleurs le cas chez un petit nombre de sujets.

K. de Vries, dans le laboratoire de N. Orie, a cherché à déterminer dans quelle mesure une réaction bronchique à l'acétylcholine ou à l'histamine traduit une hyper-réactivité aux agents non spécifiques, physiques ou chimiques. La broncho-spasticité est recherchée par des examens répétés avec des solutions de concentrations croissantes d'histamine ou d'acétylcholine jusqu'à obtention d'une réduction du VEMS supérieure à 10% de la valeur de base. La valeur seuil d'irritabilité bronchique semble constante chez un même sujet à la même heure du jour. L'auteur en comparant les actions bronchoconstrictives de l'histamine et de l'acide citrique chez 30 sujets trouve une corrélation significative entre les 2 réactions. Un groupe de 36 malades, sensibles à l'histamine, a été soumis à l'inhalation de SO_2 , et 24 malades à la respiration d'air froid (-40°). Les résultats de ces tests sont en bonne corrélation avec ceux des bronchoconstricteurs.

L'étude de l'action de certaines substances irritantes (acide formique, acide acétique, ammoniacque et méthylamine) sur la réponse bronchique a montré que seule la méthylamine produit une broncho-contraction alors que les autres substances se sont montrées légèrement broncho-dilatatrices. L'effet broncho-obstructif des agents étudiés ne semble donc pas parallèle à leur pouvoir irritant.

Le mécanisme de la réaction bronchique aux agents non spécifiques est inconnu, elle semble siéger au niveau du muscle lisse de l'arbre bronchique. Les antihistaminiques ou anticholinergiques n'ont pas d'action nette sur l'effet de SO_2 , et l'action bronchoconstrictrice de SO_2 et de l'acétylcholine semble emprunter des voies différentes.

Le centre de physiopathologie respiratoire de Nancy a montré que les perturbations spirométriques des mineurs de fer (248 ouvriers) sont modérées, et sans caractère spécifique. La sensibilité bronchique aux agents bronchoconstricteurs est assez fréquente. La simple spirométrie est dans la majorité des cas insuffisante pour authentifier la dyspnée accusée par ces malades.

La même équipe de Nancy insiste sur les difficultés d'interprétation des tests de provocation dans l'asthme. L'effet des aérosols bronchomodificateurs étudiés selon une technique à « l'aveugle » a été étudié chez 51 asthmatiques et dans d'autres groupes de malades (39 tuberculeux, 80 bronchiteux, 45 silicotiques et 30 diagnostics divers). Les solutions présentées au technicien spirométriste sont simplement numérotées, et contiennent 1 ou 2 placebos (sérum physiologique), l'ordre de numérotation étant modifié chaque jour.

L'effet « chute » du VEMS apparaît plus fréquent en général que l'effet augmentation pour les placebos (Fig. 3).

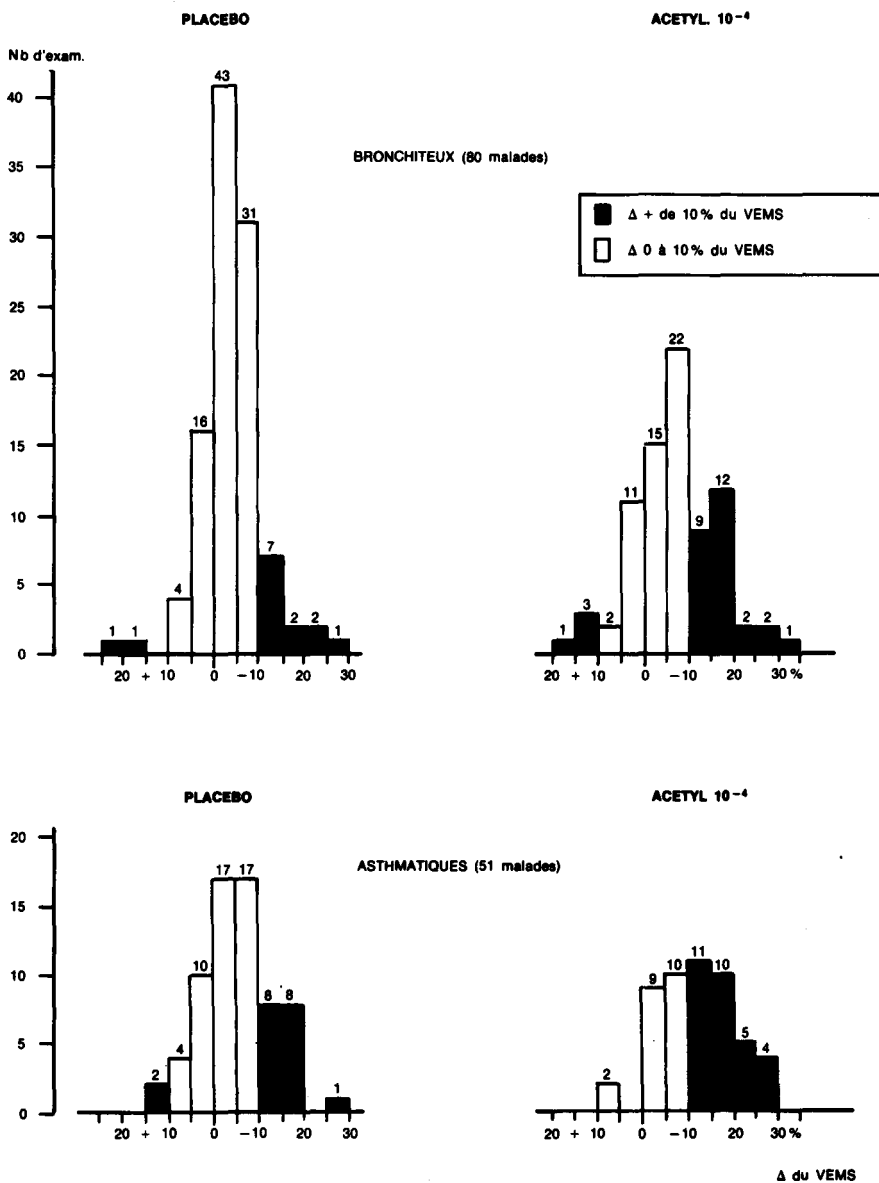


Fig. 3 — Variations du VEMS après aérosols d'acétylcholine 10⁻⁴ et Placebos dans le groupe de malades asthmatiques et bronchiteux.

Le pourcentage de réactions positives (seuil 10 %) à l'acétylcholine est nettement plus important chez les asthmatiques que chez les autres malades. Chez les asthmatiques, il existe une différence statistiquement significative entre l'effet acétylcholine 10^{-4} et l'effet placebo ($p < 0,001$). L'observation par contre d'un certain nombre de réactions aberrantes (bronchodilatation avec acétylcholine) ou de réactions positives aux placebos doit rendre prudente et critique l'interprétation de chaque cas pris isolément.

II – Mixique

La mesure des volumes et débits pulmonaires peut être complétée par l'étude du mélange intrapulmonaire, ou mixique. La mesure du volume résiduel en circuit fermé, à l'aide d'un gaz inerte, suppose que la détermination de la concentration finale du gaz est faite après homogénéisation totale de l'air du spiromètre avec l'air contenu dans les poumons. On a donc ainsi une mesure du « temps de mélange » qui peut être utilisée couramment. Malheureusement, ce temps dépend de multiples facteurs, fonction de la mixique propre du sujet, mais aussi de la ventilation et de la fréquence pendant la mesure, de la capacité résiduelle fonctionnelle, du volume du circuit de mesure, de sa ventilation et de la concentration initiale du gaz de référence. Pour pouvoir comparer les résultats obtenus dans différents laboratoires, une normalisation des conditions techniques est nécessaire. Dans ce but M. Cara a construit un modèle mécanique d'alvéoles, qui permettra un étalonnage des techniques utilisées.

L. Oelbrandt, à Hasselt, développe la technique de dosage de l'azote expiré pendant le rinçage de l'azote alvéolaire par inhalation d'oxygène pur. Le circuit spirométrique a été construit d'après le système de Donald et Christie, il comporte en outre un sac de Douglas pour le recueil de l'air expiré. En effet dans la méthode décrite, la capacité résiduelle fonctionnelle est mesurée en même temps que les indices de mixique.

La méthode utilisée est celle de Cournaud, par élimination et recueil de l'azote alvéolaire au cours de l'inhalation d'oxygène pur. Le calcul est théoriquement simple, et peut être fait par la formule :

$$\text{C.R.F.} \times (\text{N}_2 \text{ alv.}_0) = V_E \times (\text{N}_2\text{E}),$$

où $\text{N}_2 \text{ alv.}_0$ représente la concentration d'azote dans les alvéoles avant le début de la mesure, et N_2E sa concentration dans le volume expiré (V_E). En fait, de nombreuses corrections sont nécessaires, en particulier parce que le rinçage de l'azote n'est pas total, et que d'autre part, une partie de l'azote expiré provient des tissus. L. Oelbrandt retient la formule suivante pour déterminer la CRF. :

$$\text{CRF} = \frac{V_E (\text{FN}_2\text{E} - \text{FN}_2\text{b}) - (V\text{N}_2 \text{ tissu} + 0,8 V_D)}{(\text{FN}_2\text{A,0} - \text{FN}_2\text{A,n})} \times f \text{ correction}$$

CRF en litres BTB

V_E le volume total de gaz expiré, en litres ATPS

V_{N_2} tissu, le volume d'azote tissulaire expiré pendant la respiration d'oxygène exprimé en litres ATPS.

VD, le volume en litres de l'espace mort de l'appareillage.

$FN_{2,E}$, la concentration en azote du volume total du gaz expiré considéré à l'état sec.

$FN_{2,b}$, la concentration en azote du gaz contenu dans les bonbonnes d'oxygène (environ 0,05).

$FN_{2,A,O}$, la concentration en azote du gaz alvéolaire considéré à l'état sec avant la respiration d'oxygène (soit 0,80).

$FN_{2,A,n}$, la concentration en azote de l'air alvéolaire considéré à l'état sec, à la fin de la respiration d'oxygène (soit approximativement 0,02).

fc, le facteur de correction pour ramener le volume de gaz des conditions ATPS aux conditions BTPS.

Les auteurs admettent pour V_{N_2} tissu les valeurs adoptées par Lundin. Ces calculs reposent en partie sur des données assez théoriques, qui limitent la précision de cette méthode en dépit de l'utilisation d'un bon analyseur.

La détermination des indices de mixique est faite selon Fowler, qui distingue les nombres de respiration moyens réel et idéal pendant lesquels l'azote initial reste dans les alvéoles au cours du lavage à l'oxygène, à partir desquels il calcule l'indice de retard de « clearance » pulmonaire. L'espace mort et la ventilation alvéolaire peuvent également être déterminés, mais la signification de ces paramètres est différente de la ventilation alvéolaire selon Rossier, et de l'espace mort anatomique ou « fonctionnel » tels qu'on peut les obtenir par la voie sanglante, ou sur la courbe d'un gaz expiré en respiration unique.

Cette étude faite chez des sujets normaux et des pneumoconiotiques a montré des troubles du mélange intrapulmonaire dans un grand nombre de silicoses aux premiers stades, et bien plus encore dans les stades avancés, pseudo-tumoral surtout. Il semble que l'indice de Fowler permette de détecter ces troubles même lorsqu'ils sont discrets. En effet, dans une étude portant sur 227 sujets dont 181 mineurs de charbon, l'indice de Fowler n'a été trouvé pathologique ($> 100\%$) que chez moins de 4% des sujets normaux de 35 à 45 ans, mais le pourcentage s'élève à 37,5% chez des silicotiques de même âge dès le stade z et 1 pour atteindre 62,5% aux stades de condensations. *Tableau 4*).

Les auteurs trouvent une certaine corrélation entre l'indice de Fowler et l'indice de Becklake modifié, défini par le nombre de litres d' O_2 nécessaires pour laver un litre de volume pulmonaire total en abaissant la concentration alvéolaire d'azote à 2%. Comme pour l'indice de Fowler, l'indice de Becklake augmente dès les premiers stades et s'accroît encore au stade de condensations. Chez les silicotiques d'un âge voisin de 45 ans, cet indice ne doit être considéré comme anormal que lorsque la valeur dépasse 12. Ces résultats rejoignent ceux rapportés par Gilson et Hugh-Jones qui ont également mis en évidence des troubles de la mixique dès les stades initiaux de la pneumoconiose des houilleurs.

Le groupe de Moers a fait de très nombreuses mesures de mixique en rinçage à l'argon. L'effet de l'âge dans les différents groupes (ouvriers non exposés aux poussières, mineurs non silicotiques, et silicotiques aux différents stades), a été particulièrement étudié. Avec l'âge, le temps de mélange, la ventilation et le nombre de respirations

Tableau 4

Comparaison entre l'indice de Fowler et l'image radiologique chez des houilleurs pneumocotiques, d'après Oelbrandt.

Catégories d'ouvriers et Images radiologiques	Nombre total de cas	INDICES DE FOWLER					
		Normal		Paranormal		Anormal	
		Nombre de cas	%	Nombre de cas	%	Nombre de cas	%
Images Z et 1	16	2	(12,5)	8	(50,0)	6	(37,5)
Images 2 (m,n)	10	3	(30,0)	2	(20,0)	5	(50,0)
Images 3 (p, m, n)	22	6	(27,0)	5	(23,0)	11	(50,0)
Images A, B, C	40	4	(10,0)	11	(27,5)	25	(62,5)
Ensemble des volontaires	88	15	(18,0)	26	(29,0)	47	(53,0)
Images Z et 1	36	19	(53,0)	4	(11,0)	13	(36,0)
Images 2 (m,n)	20	11	(55,0)	3	(15,0)	6	(30,0)
Images 3 (p, m, n)	17	9	(53,0)	3	(18,0)	5	(29,0)
Images A, B, C	20	5	(25,0)	6	(30,0)	9	(45,0)
Ensemble des non-volontaires	93	44	(47,5)	16	(17,0)	33	(35,5)
Images Z et 1	52	21	(40,5)	12	(23,0)	19	(36,5)
Images 2 (m, n)	30	14	(46,5)	5	(16,5)	11	(37,0)
Images 3 (p, m, n)	39	15	(38,5)	8	(20,5)	16	(41,0)
Images A, B, C	60	9	(15,0)	17	(28,0)	34	(57,0)
Ensemble des deux groupes	181	59	(32,5)	42	(23,0)	80	(44,5)

nécessaires au rinçage augmentent dans tous les groupes, toutefois cette élévation n'est significative que chez les mineurs. D'autre part, chez les mineurs avec et sans silicose, dans les tranches d'âge de 40 à 49 et de 50 à 59 ans, ces paramètres sont significativement plus élevés que chez les travailleurs non exposés ; chez les silicotiques, ils augmentent avec le degré de la maladie.

L'argon est mesuré de façon continue au spectrographe de masse, le sujet étant branché sur un circuit fermé contenant 6 % d'argon. La mesure est arrêtée lorsque la différence de concentration du gaz entre l'air inspiré et l'air expiré est tombée à 0,2 %. Il s'agit donc ici d'un « wash-in », dont les résultats dépendent des facteurs que nous avons indiqués précédemment.

Le nitrogenmeter est également utilisé par Sartorelli à Milan, qui détermine le temps de mélange intrapulmonaire (en circuit ouvert, à l'azote), et les compartiments dif-

féremment ventilés. En effet, lorsqu'on reporte en coordonnées semi-logarithmiques la courbe de rinçage de l'azote, ou peut la décomposer en plusieurs exponentielles, deux ou trois chez le sujet sain, toujours trois chez le malade. Chez 7 sujets normaux jeunes, le temps de mélange est de 2'20", il est légèrement plus long chez le sujet normal âgé (2'40"); chez 12 emphysémateux de degré léger ou moyen il est de 4'50", et de 10'45" chez 13 emphysémateux graves; chez les silicotiques il varie de 2'30" à 8'30", et est le plus allongé dans les silicoses A et B.

De ce test, on peut conclure que les malades aux stades 2p-3p et 2m-3m ont dans l'ensemble un mélange intrapulmonaire normal, alors qu'aux stades 2n-3n et A-B on constate des inégalités ventilatoires, traduites par un temps de mixique allongé et une proportion supérieure de zones mal ventilées. Il est possible qu'il faille rattacher ces troubles à l'emphysème associé à la silicose, mais ils pourraient également résulter de différences d'élasticité du tissu pulmonaire dues à la fibrose silicotique.

L.H. Greve, à Utrecht, enregistre au cataphéromètre (analyseur basé sur la thermoconductivité) la concentration d'hélium dans l'air expiré, au cours du « wash-out » : le sujet a préalablement respiré dans un circuit contenant une certaine proportion d'hélium, jusqu'à équilibration des concentrations dans le spiromètre et dans les alvéoles. Ensuite, il est branché sur un circuit ouvert, et la concentration d'hélium est mesurée cycle par cycle, tandis qu'il respire de l'air ambiant. La teneur en hélium diminue alors avec le temps, mais pendant une expiration donnée on observe un plateau horizontal si la distribution est uniforme. Lorsqu'il existe un trouble obstructif, les zones mal ventilées, donc mal rincées par l'air, expirent les dernières, provoquant une ascension du plateau expiratoire. Ce plateau peut également avoir une pente descendante, phénomène que les auteurs rapportent à un trouble de distribution restrictif. L'angle formé par le plateau avec l'horizontale est calculé en pour cent de la déflexion initiale; normalement il n'atteint pas 5% par seconde.

1442 ouvriers en fonderie ont été ainsi examinés. Le nombre le plus élevé de troubles obstructifs, d'après ce critère, se trouve dans la catégorie d'ouvriers le plus exposés aux poussières, dans tous les groupes d'âge. Ce test ne recouvre pas le rapport VEMS/CV qui lui aussi reflète un trouble de distribution. Certains sujets sans pathologie pulmonaire actuelle ou dans les antécédents ont des courbes d'hélium expiré pathologiques.

De la même manière la courbe de l'argon expiré renseigne sur les troubles de distribution aérienne (F. Siehoff); pour l'oxygène et le CO₂ elle est plus complexe, car ici intervient également la perfusion. Enregistré simultanément, les courbes de l'argon et du CO₂ expirés sont comparables, chez le sujet normal; toutes deux ont un plateau ascendant nettement délimité. Lorsqu'il existe des troubles de distribution aérienne, le début du plateau se confond avec la portion initiale, rapidement ascendante, de la courbe. Ce phénomène avait été décrit pour le CO₂, en particulier par J. Lacoste aux entretiens de physiopathologie respiratoire de Nancy (1960).

Lorsque la courbe de l'argon seule présente des irrégularités, il est probable que le trouble de distribution affecte une zone non perfusée, donc n'intervient pas dans l'expiration du CO₂. Ceci prouve qu'il peut y avoir, chez le malade, défaut d'ajustement entre ventilation et perfusion, et qu'il est possible de les dissocier.

Muysers étudie les courbes expiratoires de trois gaz : argon, CO₂ et oxygène, et interprète les différentes combinaisons possibles. Lorsque seule l'expiration de l'oxygène est perturbée, on peut évoquer un trouble de diffusion.

Mais le dosage des différents gaz expirés n'est pas encore à la portée de l'ensemble des laboratoires d'exploration fonctionnelle pulmonaire. Cependant ces études sont intéressantes du point de vue pratique, car elles sont rapides, peu pénibles pour le sujet examiné, et n'exigent qu'un minimum de coopération. Les études de mixique à l'hélium (ou un autre gaz inerte) sont par contre très répandues, dans des conditions techniques variables, et il serait souhaitable de pouvoir ramener les résultats à une valeur commune, ce que permettrait l'étalon à l'étude par M. Cara.

III – Mécanique ventilatoire

Les mêmes remarques peuvent s'appliquer, dans l'ensemble, aux mesures de mécanique ventilatoire, encore que certaines méthodes soient désagréables ou exigent la collaboration du sujet. Ces études sont très spécialisées, seul un petit nombre de laboratoires les utilisent sur une grande échelle, et les techniques sont, ici aussi, très différentes. Le plus grand nombre d'études sur le sujet sain a été mené à Liège par J.M. Petit, chez les mineurs à Moers (G. Worth).

En mars 1962 s'est tenue à Luxembourg une commission « ad hoc », groupant des spécialistes représentant divers laboratoires de la Communauté travaillant ces questions. Cette réunion était rendue indispensable par les divergences existant entre les résultats observés. L'accent fut mis sur l'importance de la détermination exacte du moment de débit nul sur l'enregistrement, et de la précision des mesures de pression, volumes et débits. Les appareils, spiromètres et pneumotachographes, doivent être étalonnés avec soin, dans des conditions statiques mais aussi dynamiques, à l'aide d'une pompe volumétrique pouvant fonctionner de manière sinusoïdale ; d'autre part, la position du corps doit être mentionnée, car elle influence largement les résultats.

Comme les mesures de débit et de volume, les mesures de pression doivent faire l'objet d'un soin particulier ; les exigences techniques propres à certaines méthodes impliquent que l'appareillage utilisé permette de traduire sans déformation notable des variations de pression sinusoïdales de fréquence relativement élevée (20 cycles/seconde dans certains cas) ; l'étude dynamique des équipements manométriques (R. Peslin 1966) en régime sinusoïdal, et pour certains propos en régime rectangulaire, est donc indispensable. La symétrie statique et dynamique des manomètres devra également être vérifiée pour les mesures de pressions différentielles.

Les propriétés élastiques du poumon sont reflétées par l'élastance et son inverse, la compliance. Lorsqu'on veut éliminer la composante dynamique des résistances pulmonaires au débit aérien, il faut que les mesures soient faites dans des conditions statiques, de débit nul. Ceci peut être obtenu soit par interruption volontaire, par le sujet, du mouvement respiratoire, glotte ouverte, ou par interruption mécanique du courant aérien. Le laboratoire de physiologie de Milan a mis au point un dispositif magnétique, d'encombrement réduit, et permettant de produire des interruptions de durée variable.

Les recherches sur la mécanique ventilatoire faites dans le cadre de la C.E.C.A. ont été groupées en trois chapitres : expérimentation animale, recherches sur l'homme sain, et recherches sur le malade.

1. Expérimentation animale

W. Biebricher à Bochum a étudié l'influence de l'empoussiérage sur les résistances pulmonaires. Des travaux antérieurs ont montré que l'inhalation par voie endotrachéale, supprimant donc le rôle des voies aériennes supérieures, d'air empoussiéré n'entraîne pas de bronchoconstriction ; l'élévation des résistances semble donc le résultat d'une action mécanique des poussières et d'une hypersécrétion bronchique.

14 chats ont été soumis à l'inhalation d'air contenant des particules de dimensions très variées, de 0,1 à 60 μ , par projection directe d'air contenant les poussières, ou par une pompe synchronisée avec la respiration. L'inhalation étant faite par les voies aériennes supérieures, il n'a jamais été observé d'élévation des résistances pulmonaires pouvant évoquer une irritation particulière à ce niveau. Les résistances ont été mesurées par prise directe de la pression pleurale et enregistrement simultané du pneumotachogramme.

W. Weller et E. Reif, à Bochum, enregistrent simultanément la pression œsophagienne et la pression pleurale dans différentes conditions ventilatoires. L'expérimentation porte sur 8 chiens anesthésiés et l'étude des courbes pression/volume de la sonde à ballonnet dans l'air et dans l'œsophage montre que les pressions œsophagienne et pleurale sont égales en valeur absolue et en amplitude lors de la ventilation normale ou sous sténose pour un volume donné du ballonnet.

J.M. Petit et F. Hagemeyer à Liège étudient le diagramme pression/volume de segments trachéo-bronchiques de cobaye. Les segments sont isolés et placés dans une solution nutritive à 37° et oxygénée. La préparation est connectée par l'extrémité trachéale à une seringue finement graduée capable de modifications volumétriques de 0,01 à 1 ml à la fréquence de 2 à 150 cycles/mn. Une bronche souche est reliée à un électromanomètre, l'autre étant ligaturée. La préparation est soumise à des conditions mécaniques proches des conditions naturelles. Les diagrammes pression/volume permettent l'étude pharmacodynamique de substances bronchomodificatrices. Ainsi après addition d'acétylcholine dans le bain, on note une réduction de la compliance bronchique. Lorsque les variations de volume du système sont régulières et suffisamment rapides, la compliance reste constante, contrairement aux mesures par méthode statique. Les préparations montrent une adaptation à la distension et ce phénomène est susceptible d'intervenir dans la plasticité pulmonaire.

2. Recherches sur l'homme sain

Elles sont surtout le fait de l'Institut de physiologie de Liège (J.M. Petit). Tout d'abord la signification des paramètres de mécanique ventilatoire, chez le sujet sain au repos, est discutée, à la lumière des valeurs obtenues chez 8 adultes normaux. En effet, la variabilité individuelle est grande, et rend l'interprétation statistique hasardeuse ; celle-ci est encore compliquée par l'usage de divers modes d'expression des résultats. Ainsi, les résistances pulmonaires sont exprimées sous forme de compliance ou

de son inverse l'élastance. La variabilité dépend de la position du corps, des mouvements respiratoires faits aussitôt avant la mesure, de la morphologie du sujet et des méthodes de mesure.

Les mesures de mécanique ventilatoire permettent la détermination de la compli-
ance, qui est le rapport de la variation de volume pulmonaire à la variation des pressions
thoracique correspondantes ; cette valeur est également exprimée en terme d'élas-
tance, variation de pression nécessaire pour mobiliser un litre d'air. L'enregistrement
simultané du barogramme (œsophagien) et du pneumogramme permet de construire
un diagramme pression-volume dont la surface est proportionnelle au travail dyna-
mique ventilatoire. Les valeurs moyennes de la compli-
ance, pour les 8 sujets exa-
minés, sont de 112 ml/cm H₂O pour l'ensemble thorax-poumons, de 205 pour la com-
pliance pulmonaire, et de 254 pour le thorax. Le travail mécanique total est pour
une ventilation de 8,3 litres en moyenne, de 29 l.cm H₂O/mn, le travail dynamique
atteint 21 l.cm H₂O/mn. Toutes ces valeurs sont en bonne concordance avec celles
de la littérature. J.M. Petit étudie la variabilité de la compli-
ance en déterminant chez
48 sujets sains, âgés de 20 à 25 ans, la compli-
ance spécifique en rapportant la com-
pliance pulmonaire mesurée à la capacité pulmonaire correspondante (Tableau 5).
La dispersion est moindre lorsque le volume de référence est représenté par la capa-
cité vitale (coefficient de variation 19%), alors qu'elle est plus élevée si on rapporte
la compli-
ance à la capacité résiduelle fonctionnelle (coefficient de variation 27%).

Tableau 5

Compliance pulmonaire du groupe de 48 sujets examinés

Valeur	Compliance pulmonaire ml BTPS	Compliance spécifique de CV ‰	Compliance spécifique de CRF ‰	Compliance spécifique de CT ‰
	cm H ₂ O	cm H ₂ O	cm H ₂ O	cm H ₂ O
Moyenne	187	37	66	28
Extrêmes	97-301	22-53	39-136	18-43
Déviations standard	53	7	18	6
Coefficient de variation	28	19	27	20

R. Peslin, à Nancy, fait une étude critique de la méthode de mesure au ballonnet œsophagien, pour la construction du diagramme pression-volume. Les mesures de pression et de volume doivent, en effet, être parfaitement synchrones, or certains appareils donnent un déphasage dans les phénomènes dynamiques. De même la traduction, sur l'enregistrement, des battements cardiaques rend l'interprétation des tracés difficile.

Pour ces raisons, la méthode d'interruption est préférable, et elle n'exige pas la collaboration du malade. Cependant la lecture des tracés par deux techniciens différents donne des résultats assez peu reproductibles ; la moyenne des différences entre les deux lectures est de 7,5 %, avec des extrêmes de -20 à 45 %. La précision de cette technique doit donc être améliorée.

H. Symanski a observé à l'aide de pneumotachographes des vitesses d'inspiration différentes, chez des sujets travaillant en milieu empoussiéré, en relation avec le poids des poussières expirées. Il a étudié la ventilation en fonction de la concentration de poussières au cours du travail. Les résultats d'une étude pratiquée sur 10 sujets porteurs de masques filtrants, ont montré qu'il n'existe dans ces conditions que des résistances minimales.

L'enregistrement de diagrammes pression-volume au cours d'une manœuvre de capacité vitale par exemple montre que pour un même volume la pression est différente suivant qu'il s'agit de l'inspiration ou de l'expiration. Ce phénomène est appelé effet-hystérésis. Cet effet est moins marqué si le débit aérien est très rapide ou très lent, des artefacts sont produits par les mouvements de la glotte et de l'œsophage, et il faut également tenir compte des résistances dynamiques et élastiques pulmonaires, pour isoler ce qui revient aux propriétés plastiques des poumons.

G. Cavagna, à Milan, a pu montrer que pour un débit moyen de 0,3 l/s, soit une ventilation de repos, la pression nécessaire pour vaincre l'hystérésis pulmonaire est du même ordre de grandeur que la pression nécessaire pour vaincre les résistances dynamiques.

J.M. Petit a étudié ce phénomène dans des conditions où il est plus évident qu'en respiration de repos : après inspiration et expiration forcées. En effet, sur 52 sujets examinés, 26 ne récupèrent que progressivement leur position initiale du volume courant, 22 la récupèrent immédiatement, et 4 la dépassent. Si l'inspiration ou l'expiration forcée est maintenue quelques secondes, la récupération est immédiate ou excessive dans tous les cas. Ces variations de la position du volume courant dans la capacité vitale sont en rapport avec les propriétés plastiques du poumon ; la rétraction élastique pulmonaire est diminuée aussitôt après une distension, augmentée après une compression. La mesure de l'activité électrique des muscles respiratoires, à l'aide d'électrodes placées au niveau de l'orifice œsophagien du diaphragme, montre des variations suivant le type de récupération. Cependant le plus grand rôle dans la récupération semble devoir être attribué aux propriétés plastiques pulmonaires.

Le muscle dont l'action domine dans les mouvements respiratoires est le diaphragme. Il est intéressant de pouvoir étudier ses contractions dans des conditions définies. C'est ce que permet l'électromyographie du diaphragme, par l'intermédiaire de deux électrodes convenablement placées dans l'œsophage. J.P. Petit a utilisé cette technique conjointement avec des mesures de pression intrathoracique au moyen d'un ballonnet œsophagien et de pression abdominale par un ballonnet gastrique, chez 4 adultes sains. La ventilation et le pneumotachogramme sont également enregistrés simultanément.

En respiration calme, l'activité électrique du diaphragme commence en même temps que l'inspiration, elle diminue ensuite mais se poursuit après le début de l'expiration. Au cours de l'hyperventilation, elle commence avant le début de l'inspiration.

Lorsque la ventilation augmente, l'activité des muscles inspiratoires, s'opposant aux forces élastiques expiratoires, diminue en valeur relative, et ceci entraîne une variation du rendement des muscles ventilatoires.

Les valeurs de ce rendement sont d'ailleurs très variables dans la littérature : elles vont de 1 à 25 %. Ce rendement peut se définir comme le rapport entre le travail mécanique de la ventilation et l'énergie dépensée pour effectuer ce travail. Les erreurs de mesure sur ces deux facteurs, bien que non négligeables, ne suffisent pas à expliquer ces discordances. En fait le régime ventilatoire est différent suivant les individus, et lorsque la fréquence diminue le rendement s'abaisse par suite de l'importance croissante de l'activité antagoniste musculaire.

L'effet de la fréquence sur le travail respiratoire mécanique a également été étudié pendant l'exercice musculaire, chez des sujets plus ou moins entraînés à l'effort. Lorsque la respiration se fait suivant un rythme libre (spontané), le travail respiratoire augmente avec la ventilation, si le volume courant empiète sur l'air de réserve expiratoire ; l'augmentation de la ventilation à l'effort se fait spontanément en adoptant le volume courant et la fréquence pour lesquels le travail respiratoire est minimal.

Par ailleurs, l'entraînement à l'effort a été l'objet d'un travail portant sur 7 sujets non entraînés et 7 sujets habitués à l'effort. Pour une ventilation de même valeur, le travail mécanique respiratoire est identique dans les deux groupes. Par contre, pour une consommation d'oxygène donnée, la ventilation, et donc le travail ventilatoire, est plus élevée dans le groupe des sujets non entraînés. Cette différence de ventilation avait déjà été observée, en particulier par D. Durand au cours de la détermination de la puissance maximale supportée.

Une comparaison entre sujets sains et âgés a été faite sur 8 sujets normaux d'âge moyen de 27 ans, et 8 d'âge moyen de 77 ans. La compliance thoracique chez les sujets âgés est abaissée, tandis que la compliance pulmonaire ne varie pas de manière significative. Le travail respiratoire, par contre, est nettement plus élevé dans le deuxième groupe, par augmentation du travail élastique inspiratoire, qui peut traduire un « enraidissement » de la cage thoracique. La diminution importante de la capacité vitale des vieillards (57 % des valeurs théoriques à 25 ans) semble donc provenir de facteurs squelettiques limitant l'ampliation de la cage thoracique et non pas de troubles mécaniques proprement pulmonaires.

Enfin, des travaux sont en cours, à l'institut de physiologie de Liège sur les variations des paramètres mécaniques respiratoires au cours de l'inhalation de mélanges gazeux de diverse viscosité, mesurés en particulier par pléthysmographie.

3. Les mesures chez le malade

Des mesures chez le malade, comparé au sujet normal, ont été poursuivies à Nancy par R. Peslin. Le travail ventilatoire a été mesuré à différents niveaux de ventilation : chez 13 sujets sains, le travail est de 0,04 kgm/l d'air ventilé, lorsque la ventilation est de 10 à 20 litres ; il augmente avec celle-ci, pour atteindre 0,15 kgm/l pour une ventilation en 70 et 80 litres. Cette élévation est significative au point de vue statistique, bien que les coefficients de variation soient de 11 à 28 %.

Chez 30 mineurs de fer, ne présentant aucun signe de bronchite chronique, le travail ventilatoire est de 0,058 kgm/l pour une ventilation de 10 à 20 litres, mais le coefficient de variation est ici très élevé, à 50 %. La valeur du travail est en relation avec le rapport volume résiduel/capacité totale : lorsque celui-ci est inférieur à 30 %, le travail est de 0,043 kgm/l en moyenne, il passe à 0,06 kgm/l lorsque ce rapport est supérieur à 30 %. Ces malades présentent donc une augmentation des résistances dynamiques, qui pourrait expliquer la dyspnée qu'ils ressentent.

Le travail dynamique ventilatoire est beaucoup plus élevé chez les bronchiteux chroniques comme le montrent les résultats observés par cet auteur chez 39 malades : en moyenne de 0,093 kgm/l pour une ventilation inférieure à 10 l/mn, le travail dynamique est de 0,112 kgm/l lorsque la ventilation est comprise entre 10 et 20 l/mn.

Si la corrélation entre les valeurs spirométriques et les paramètres mécaniques est assez médiocre, les troubles mécaniques paraissent plus fréquents et plus marqués chez les sujets qui présentent des anomalies spirométriques ; en particulier l'élastance et le travail dynamique ne sont jamais normaux lorsqu'il existe un syndrome obstructif grave ; l'augmentation de l'élastance et du travail dynamique est particulièrement constante lorsqu'il existe un syndrome restrictif ou un syndrome spirométrique mixte. Dans certains cas enfin, l'étude des propriétés élastiques et dynamiques pulmonaires permet de mettre en évidence des altérations mécaniques sans traduction spirométrique.

L'élastance pulmonaire est en moyenne statistiquement plus élevée chez 73 empoussiérés (fer, charbon et risques divers) que chez l'homme sain : sensiblement normal chez 31 sujets, le paramètre est franchement pathologique dans 29 cas ; l'élévation de l'élastance avec la fréquence, témoin d'une inhomogénéité des propriétés mécaniques locales, est très modérée dans ce groupe. Comme le montre le *tableau 6*, il n'apparaît pas de différences suivant la nature du risque professionnel encouru ; les troubles mécaniques ne semblent pas davantage en relation étroite avec la durée de l'exposition et les lésions radiologiques. Le tableau est tout autre chez 39 bronchiteux puisque l'on observe beaucoup plus fréquemment une élévation pathologique de l'élastance (27 cas) et que l'élévation de ce paramètre avec la fréquence est particulièrement marquée, traduisant un asynchronisme ventilatoire.

Tableau 6

Mécanique ventilatoire et nature du risque professionnel chez 73 empoussiérés

Risque	Nombre de sujets	Élastance			Travail dynamique		
		normale	sub-normale	pathol.	normal	sub-normal	pathol.
Fer	36	16	8	12	20	3	13
Charbon	17	8	2	7	8	2	7
Mixte et divers	20	7	3	10	3	6	11

W. Ulmer, à Bochum, s'est attaché à la mise en évidence de l'irritabilité du système bronchique des travailleurs, exposés ou non aux poussières. Les variations des résistances bronchiques sont mesurées par l'intermédiaire du travail respiratoire visqueux, déterminé sur le diagramme pression-volume obtenu à partir de la mesure de la pression endo-œsophagienne et du pneumogramme enregistrés simultanément. 41 mineurs et 32 travailleurs non exposés ont été ainsi examinés, avant et après inhalation de poussières pendant 5 minutes. Les dimensions des poussières étaient de 0,1 à 28 μ . Si les valeurs sont ramenées à une ventilation de 10 litres, la limite de la normale pour les auteurs est de 2,0 g cm/ml ; la réaction est dite positive lorsque le travail dépasse 5,0 g cm/ml. Une telle réaction s'observe avec une égale fréquence chez les travailleurs non exposés et chez les mineurs ; elle est plus fréquente chez les sujets présentant des troubles obstructifs.

La même méthode a été utilisée pour la recherche de l'irritabilité bronchique au froid (inhalation d'air à -17 et 40°C) et au SO_2 . Les sujets sensibles à ces agents sont les mêmes que ceux qui réagissent aux poussières. Il s'agit donc d'une irritabilité globale, non spécifique ; elle entraîne une dyspnée, alors que les sujets qui réagissent peu ne présentent pas de signe subjectif.

Le même auteur envisage, par ailleurs, les possibilités d'utilisation de la pléthysmographie corporelle. La détermination du volume résiduel serait plus précise par cette technique que par la méthode de dilution à l'hélium pour les volumes intrapulmonaires supérieurs à 4 litres.

D. Nolte, dans le même laboratoire, mesure la résistance des voies nasales par pléthysmographie corporelle en comparant les résistances obtenues après respiration buccale et lors de la respiration par le nez. Les résultats portent sur 72 sujets dont 29 présentent un syndrome obstructif. La résistance nasale est légèrement plus augmentée en moyenne chez les malades que chez les sujets sains, mais la dispersion est importante et une valeur allant jusqu'à 5 cm d' $\text{H}_2\text{O}/\text{l/s}$ pour la résistance nasale doit être considérée comme normale. Chez les sujets non bronchiteux, la fraction de la résistance nasale par rapport à la résistance aérienne totale est relativement constante (62 %).

Des travailleurs, non exposés et mineurs, silicotiques et non silicotiques, ont eu une étude de la mécanique ventilatoire en grand nombre à Moers. La compliance statique et dynamique a été trouvée sans relation avec l'âge, bien que la baisse chez les sujets âgés soit plus marquée dans le groupe des mineurs ; elle ne dépend pas non plus du degré de silicose ni (statistiquement) de la durée de l'exposition. De même le travail visqueux inspiratoire augmente, mais de manière non statistiquement significative, avec l'âge, le degré de silicose et la durée d'exposition aux poussières. La même remarque s'applique au travail expiratoire et aux résistances.

La dyspnée des pulmonaires chroniques est un signe subjectif qu'il est difficile de tester. Les examens s'appliquant à la mécanique ventilatoire devraient permettre de mettre en évidence les perturbations de manière plus précoce et plus objective que la spirométrie. Mais ici aussi, les techniques sont diverses et doivent être mieux étalonnées. Il semble que la méthode des interruptions soit appelée à se développer.

BIBLIOGRAPHIE

- Biebricher W., Reif E., Ulmer W.T.**
Untersuchungen der Lungenresistance bei isolierter Staubreizung der oberen Luftwege (Versuche an Katzen).
Med. thorac., 1963, 20, pp. 163-179.
- Cavagna G., Brandi G., Saibene F., Torelli G.**
Pulmonary hysteresis.
J. appl. Physiol., 1962, 17, pp. 51-53.
- Detry J.M., Delgrange R., de Meester L., Billiet L., Prignot J.**
Signification du « Peak Flow Rate », possibilités d'application de sa mesure.
J. Franç. Méd. Chir., 1966, 20, pp. 739-755.
- Gaffuri E., Berra A.**
Incidenza della bronchite cronica e del broncospasmo nella silicosi.
Med. Lavoro, 1965, 56, pp. 331-336.
- Greve L.H., Visser B.F., de Kroon J.P.M., Joosting P.E., Hertogensis F., Jongh J.**
Ventilatorische Verteilungsstörungen in Beziehung zur Staubbelastung in *Fortschritte der Staublungenforschung*, 1963, pp. 335-339.
- De Kroon J.P.M., Joosting P.E., Visser B.F.**
Les valeurs normales de la capacité vitale et du VEMS — Recherche chez les ouvriers d'une aciérie aux Pays-Bas.
Arch. Mal. Profes., 1964, 25, pp. 17-30.
- Lavenne F., Brasseur L., Oelbrandt L., Belayew D.**
Volumes pulmonaires et volume expiratoire maximum par seconde des pneumoconiotiques encore au travail.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1961, 16, pp. 3-12.
- Minette A.**
Comparaison de médicaments bronchodilatateurs chez les houilleurs. Étude de divers flacons doseurs utilisés dans les pays de la C.E.C.A.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1965, 20, pp. 170-182.
- Minette A., Bruninx M.**
Contribution à la standardisation des tests pharmacodynamiques bronchodilatateurs.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1966, 21, pp. 171-193.
- Minette A., Patigny J.**
Comparaison de divers bronchodilatateurs. Intérêt de l'orciprénaline en aérosol et en flacon doseur.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1964, 19, pp. 67-88.

- Minette A., Van Wymeersch L., Gielen E., Degueudre G., Belayew D.**
Étude expérimentale de la fonction respiratoire au cours d'efforts en présence de poussières de mines de charbon. Comparaison de la sensibilité bronchique aux poussières et à l'acétylcholine.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1961, 16, pp. 21-33.
- Muysers K., Smidt U.**
Alveolar gasanalyse.
Beiträge zur Klinik u. Erforschung der Tuberkulose u. der Lungenkrankheiten, 1966, 133, pp. 270-277.
- Muysers K., Worth G., Siehoff F.**
Expiratorische Argon, Kohlensäure u. Sauerstoffdruckkurven.
Med. thorac., 1964, 21, pp. 12-26.
- Oelbrandt L., Lavenne F.**
Comparaison de la mesure du V.R. par une méthode en circuit fermé et une méthode en circuit ouvert.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1964, 19, pp. 223-230 et 230-244.
- Oelbrandt L., Patigny J., Lavenne F.**
Étude de la mixique pulmonaire au moyen du nitrogenmeter. Analyse des méthodes utilisées.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1960, 15, pp. 59-78.
- Nolte D., Ulmer W.T.**
Messung der Nasen-resistance mittels Ganzkörperplethysmographie.
Med. thorac., 1966, 23, pp. 349-357.
- Patigny J., Minette A.**
L'analyse de variance appliquée à l'interprétation statistique de tests bronchodilatateurs répétés.
Rev. Institut Hyg. Mines, 1964, 19, pp. 102-117.
- Peslin R.**
Les propriétés mécaniques pulmonaires. Leur étude par enregistrement de la pression endo-oesophagienne.
Thèse Méd. Nancy, 1964, dactyl., 142 p.
- Peslin R.**
Étude dynamique d'un équipement manométrique.
Bull. Physio-Pathol. Resp., 1966, 2, pp. 155-172.
- Petit J.M., Delhez L., Mutsers A., Troquet J.**
Mécanique ventilatoire chez l'homme normal âgé comparativement à l'adulte jeune.
Arch. Inter. de Physiologie et de Bioch., 1962, 70, pp. 303-306.
- Petit J.M., Hagemeijer F., Vanwijck A.**
Diagrammes pression/volume dynamique des bronches.
Int. Arch. Allergy, 1964, 20, pp. 228-234.

- Pham Q.T., Campan L., Broussard G., Lacoste J., Sadoul P.**
 Difficultés des tests de provocation dans l'asthme.
Les Bronches, 1966, 16, pp. 288-294.
- Sadoul P., Pham Q.T., Uffholtz H.**
 La bronchite chronique.
Bull. INSERM, 1967, 22, pp. 451-466.
- Sartorelli E., Grieco A., Zedda S.**
 Valori spirometrici medio-normali nei soggetti di sesso femminile.
Med. Lavoro, 1961, 11, p. 684.
- Sartorelli E., Scotti P.**
 Rapporti tra funzionalità polmonare e tipo radiologico delle silicosi.
Med. Lavoro, 1961, 52, pp. 569-577.
- Petit J.M., Senterre J., Boccar M., Delhez M., Damoiseau J., Lagneaux D., Namur M.**
 Variabilité de la compliance pulmonaire pendant la ventilation de repos chez l'adulte normal.
Pathol. & Biol., 1962, 10, pp. 1179-1185.
- Ulmer W.T., Biebricher W.**
 Überempfindlichkeit des Bronchialsystems.
Beitr. Silikose Forsch., 1965, 6, pp. 415-424.
- Weller W., Reif E.**
 Methode zur Messung absoluter Intrapleuraldrucke mit dem Ösophagus-Ballonkatheter.
Med. thorac., 1965, 22, pp. 574-589.
- Worth G.**
 Lungenfunktionsprüfungen an Kohlenbergarbeitern in den ersten Berufsjahren.
Beitr. Silikose Forsch., 1965, 6, pp. 403-405.
- Worth G.**
 Lungenfunktionsprüfungen bei Bergleuten mit und ohne Silikose unter Berücksichtigung von Bronchitis und Emphysem in *Fortschritte der Staublungenforschung*, 1963, pp. 291-299.
 Beruf und Bronchitis.
Med. thorac., 1967, 24, pp. 63-73.
- De Vries K., Booij-Noord H., Goei J.T., Orie N.G.M.**
 Reaction of the bronchial tree on chemical or physical stimuli.
 5e Congrès européen d'Allergie, Bâle, 1962.

B —ÉTUDE DE LA CIRCULATION PULMONAIRE

Les précédentes recherches subventionnées par la Haute Autorité avaient montré que les investigations ventilatoires ou même les études des échanges alvéolaires ne permettaient pas toujours d'expliquer les diverses anomalies fonctionnelles, ni l'évolution de certains pneumoconiotiques. D'autre part, la fréquence des signes anatomiques de surcharge cardiaque observés à l'autopsie des pneumoconiotiques du charbon contraste avec la rareté des anomalies électrocardiographiques constatées du vivant de ces ouvriers. Ainsi Lavenne dépouillant les dossiers anatomo-pathologiques de Gough à Cardiff dénombrait, sur 358 autopsies de mineurs, 85 morts par insuffisance cardiaque droite, soit près d'un ouvrier sur quatre (1951). A l'opposé, le même auteur ne trouvait, par le diagnostic électrocardiographique, que 4,5 % de surcharge cardiaque droite chez 400 silicotiques et 10,5 % chez 200 anthracosilicotiques. En expertise, Aubertin et collaborateurs (1956) notaient moins de 6 % de « Cœur pulmonaire chronique » incipiens ou confirmés sur 375 pneumoconiotiques. L'insuffisance cardiaque droite n'était pas plus fréquente chez des silicotiques porteurs de lésions pseudo-tumorales (Laurens 1956).

Si au stade d'insuffisance cardiaque droite de nombreux bronchiteux chroniques présentent un syndrome spirographique de type obstructif, celui-ci peut être discret (Sadoul et collaborateurs, 1959), et cependant l'hypertension artérielle pulmonaire peut exister chez ces malades dont les échanges respiratoires, comme la spirographie, ne sont que très peu perturbés.

Devant de telles discordances, il devenait essentiel de préciser l'état de la circulation pulmonaire au cours des bronchopneumopathies chroniques les plus fréquemment observées chez les travailleurs du charbon et de l'acier. Ces études circulatoires étaient indispensables pour aboutir à des mesures thérapeutiques et surtout prophylactiques mieux adaptées.

Le cathétérisme cardiaque droit permet d'étudier le débit cardiaque, de prélever du sang mêlé et au besoin, grâce à l'angiographie sélective de préciser la morphologie des vaisseaux pulmonaires. Il apporte donc des éléments d'information très divers et irremplaçables pour connaître la physiopathologie des affections pulmonaires et en particulier celle des pneumoconioses. Le cathétérisme ne pouvant être fait chez tous les dyspnéiques, ni répété plus de deux ou trois fois chez un même malade, il paraissait nécessaire de confronter les données qu'il fournit avec celles obtenues grâce à des examens cardio-circulatoires plus faciles à mettre en œuvre : mesure du débit cardiaque par les indicateurs thermiques, colorés, volume cardiaque mesuré grâce aux radiographies, pression veineuse périphérique, angiographie, etc., ou même aux données fournies par des examens non exclusivement cardio-circulatoires tels que les tests de transfert du CO, l'ergospirométrie ou l'étude des échanges alvéolo-capillaires. Ces divers points seront successivement envisagés.

I — Cathétérisme du cœur droit et de la circulation pulmonaire

Pour de multiples raisons, les résultats recueillis au cours du cathétérisme de la petite circulation chez les pulmonaires chroniques doivent présenter les plus grandes garanties d'exactitude. L'hypertension artérielle pulmonaire est, en effet, souvent peu accusée chez ces malades ; si la marge d'erreur n'est pas aussi réduite que possible, certaines anomalies risqueront d'être masquées. D'autre part, puisque l'on voudrait obtenir par des investigations faciles à mettre en œuvre des éléments d'information aussi précieux que ceux fournis par le cathétérisme, il est évident que ces corrélations doivent être recherchées en partant d'examen très rigoureux. Enfin, compte tenu de la rareté des cathétérismes chez les pneumoconiotiques, un profil hémodynamique précis des diverses formes anatomo-pathologiques de la maladie ne peut être établi qu'à partir de renseignements recueillis dans de multiples centres ; une standardisation rigoureuse est donc nécessaire.

Conditions techniques

La circulation pulmonaire est un système à basse pression, la position exacte de la tête manométrique est importante à considérer. La fixation de celle-ci à 10 cm au-dessus du plan de la table a d'abord été proposée. Cornand choisit un plan horizontal passant à 3 cm sous l'angle de Louis, tandis que Lagerlof propose 6 cm et Berck comme Swan et leurs collaborateurs respectifs la mi-hauteur du thorax. Ces différences peuvent expliquer les discordances entre les résultats, car comme le souligne Toussaint, une erreur de 5 cm entraîne une augmentation de pression de 3,5 mmHg. Cet auteur a mesuré sur des clichés de profil pris en téléradiographie le niveau du tronc de l'artère pulmonaire et a vérifié que celui-ci correspondait bien à la moitié de la distance sternum-plan postérieur. Kremer dans le service du professeur Lavenne préfère placer la tête manométrique à l'union du 1/3 supérieur et des 2/3 inférieurs du diamètre antéro-postérieur du thorax.

L'accord semble fait pour renoncer à la préparation médicamenteuse des malades. En effet, l'administration de barbituriques ou de dérivés de la phénothiazine risque de perturber les pressions artérielles pulmonaires, en particulier par la dépression ventilatoire qu'entraînent ces médicaments.

La préparation psychologique de l'ouvrier pose de véritables problèmes. En effet, en lui détaillant d'une façon trop complexe la nature des investigations qui vont être pratiquées, ou en évoquant les incidents et les rarissimes accidents mortels qui peuvent survenir au cours du cathétérisme, le médecin risque de créer une hypertension artérielle émotive. Si le médecin légiste rappelle volontiers que le « consentement éclairé » du malade doit être obtenu, on peut rétorquer que le médecin n'est tenu « d'avertir ses malades que des risques normalement prévisibles » et conclure, comme l'ont fait certains magistrats que « s'il en était autrement, cela aboutirait à inquiéter inutilement les malades ». D'ailleurs, le cathétérisme n'est pratiqué chez les ouvriers que dans des conditions très particulières : d'une part, cet examen est rendu nécessaire par l'état de santé de l'ouvrier ; d'autre part, les conditions techniques garantissent que le risque encouru par le patient est quasi négligeable. En effet, entre des mains expérimentées, le cathétérisme cardiaque droit ne présente pas beaucoup plus de danger que la simple bronchoscopie, s'il a été précédé par des examens cliniques, radiologiques et électrocardiographiques très attentifs.

Une commission réunie par la Haute Autorité en 1961 a fait les recommandations suivantes : les cathétérismes doivent être pratiqués sous amplificateurs de luminance et si possible avec un dispositif de télévision, le diamètre du champ d'observation étant environ égal à 20 cm. Grâce à ces dispositions, avec un matériel de bonne qualité, l'introduction du cathéter au niveau du tronc artériel est beaucoup plus aisée qu'avec la radioscopie. La possibilité d'opérer à la lumière du jour permet un travail plus rapide et plus silencieux de l'équipe médicale collaborant au cathétérisme. L'ensemble des appareils est soigneusement vérifié avant le début du cathétérisme : étanchéité parfaite du circuit spirographique permettant la mesure de la consommation d'oxygène et de la ventilation, stérilité des sondes et rinçage préalable de celles-ci au sérum physiologique, vérification de l'ensemble du dispositif manométrique, etc. Les mesures de pression sont faites non seulement à l'aide d'un manomètre électrique mais toujours vérifiées à l'aide d'un manomètre à l'eau. La pression moyenne sera enregistrée pendant au moins 10 cycles cardiaques et l'étalonnage vérifié avant et après les prises de pression.

Valeurs normales

Les valeurs pouvant être considérées comme normales pour les pressions pulmonaires au repos comme à l'effort ont fait l'objet de plusieurs discussions tant au cours de séances de commissions ad hoc à Luxembourg que dans les publications faites par les chercheurs ayant bénéficié de subventions de la Haute Autorité. En effet, on relève dans la littérature des valeurs assez différentes et aucun accord international n'avait jusqu'ici été réalisé dans ce domaine. Pour ne citer que quelques auteurs, on peut rappeler que Cournand admet comme valeur moyenne de la pression artérielle pulmonaire moyenne 13 mmHg, tandis que Lagerloff donne 15 mmHg, Rossier 14,7 et K.W. Donald 15 à 23 mmHg. En ce qui concerne les variations de la pression systolique et de la pression diastolique, les dispersions sont plus grandes encore. Ces pressions diastoliques et systoliques ou si l'on préfère maximales et minimales varient assez largement chez les silicotiques au cours du cycle ventilatoire. Pour cette raison la commission ad hoc a préféré retenir avant tout la pression artérielle pulmonaire moyenne.

Les travaux des membres de cette commission et des différents chercheurs de la Communauté permettent de conclure qu'au-dessous de 15 mmHg, la pression artérielle pulmonaire moyenne est normale, qu'entre 15 et 20 mmHg les pressions sont situées dans une zone douteuse, que certains considèrent déjà comme légèrement pathologique et qu'enfin, au delà de 20 mmHg, la pression artérielle pulmonaire moyenne est indiscutablement anormale. Pour certains chercheurs la pression artérielle pulmonaire moyenne tend à s'élever légèrement avec l'âge. Les mesures faites chez les sujets de plus de 50 ans montreraient selon eux une pression pulmonaire artérielle moyenne assez souvent comprise entre 15 et 20 mmHg. Cependant il est impossible à l'heure actuelle de décrire valablement cette évolution de la pression artérielle pulmonaire moyenne chez le sujet sain en fonction de l'âge.

Quoique les autres valeurs de pression n'aient pas fait l'objet de discussion, ni de décision, on peut retenir à titre indicatif comme pression ventriculaire droite, 25 pour la systolique, 0 à 3 mmHg pour la diastolique. Au niveau des « capillaires » la pression est de 5 à 6 mmHg et peut atteindre chez certains sujets sains 10 mmHg environ.

Au cours de l'exercice la PAP moyenne s'élève peu, tout au moins lorsque l'intensité de départ ne dépasse pas 100 watts. Pour Fritze, la PAP moyenne reste inférieure à 20 mmHg tandis que pour Toussaint ou pour Sadoul la PAP moyenne peut s'élever jusqu'à 25 mmHg sans que l'on puisse conclure à une réaction anormale. Pour Lavenne, la pression doit être considérée comme anormalement élevée au cours de l'exercice, dans les seuls cas où elle dépasse 30 mmHg. Cet auteur examinant des sujets normaux âgés de 45 à 52 ans a trouvé des PAP moyennes comprises entre 25 et 30 mmHg au cours d'un effort de 100 watts chez 3 sujets sur 12.

Le débit cardiaque au repos est généralement considéré comme compris entre 2,5 l et 4,5 l/min et par m² de surface corporelle, les valeurs moyennes étant de 3,2 l ou 3,5 l/min/m² suivant les auteurs. Au cours de l'exercice, le débit cardiaque augmente de façon linéaire, mais les variations sont assez larges d'un sujet à l'autre. Le débit cardiaque augmente de 500 à 900 cm³ pour chaque centaine de cm³ d'oxygène consommé en plus de la valeur basale. Ces normes de débit n'ont pas été discutées par les différents groupes de recherches.

Modalité et intérêt de l'exercice au cours du cathétérisme

La commission a conseillé l'exercice en position couchée en recommandant que les membres inférieurs ne fassent pas un angle de plus de 30° par rapport à l'axe du pédalier. Il est généralement souhaité que le sujet examiné ait subi un entraînement préalable qui lui aura permis de se familiariser avec la table d'examen, le cycloergomètre, le masque et les différents dispositifs d'enregistrement. Cet entraînement réduit notablement les variations liées aux facteurs émotifs.

La puissance demandée varie d'un centre de recherche à l'autre. Certains adoptent la même puissance pour tous les examens et restent fidèles soit à une puissance faible de 40 watts (Nancy), soit à une puissance un peu plus élevée de 75 watts (Fritze, Bochum) et même de 100 watts (Toussaint). Le groupe de Louvain utilise chez un même sujet plusieurs niveaux de puissance successifs. Finalement, l'unanimité a été faite pour recommander un niveau minimal de 40 watts et il a semblé inutile de réaliser des efforts dépassant 100 watts. Pour étudier valablement les différents paramètres circulatoires et respiratoires, 4 minutes d'état stable semble une durée minimale.

L'interprétation valable des pressions au cours de l'exercice exige leur confrontation avec le débit cardiaque et non pas seulement avec le niveau de puissance, comme le précise Lavenne. On sait que chez le sujet normal, le débit cardiaque peut augmenter de 5 à 6 fois sans que les pressions s'élèvent notablement. Au cours de l'exercice, il y a donc chez le sujet sain une diminution de la résistance pulmonaire totale. Au contraire, chez certains pulmonaires chroniques, l'élévation du débit de 6 à 10 l/min. par exemple peut entraîner une augmentation des pressions de 15 à 30 ou même 45 mmHg.

II — Mesure du débit cardiaque

Compte tenu des difficultés du cathétérisme cardiaque et de l'intérêt des études circulatoires au cours des broncho-pneumopathies chroniques, diverses techniques permettant la mesure du débit cardiaque par des procédés peu traumatisants ont

été étudiées par plusieurs groupes de recherche ayant bénéficié de subventions de la Haute Autorité. Parmi ces techniques figurent les méthodes de dilution par les colorants, les techniques de radiocardiographie, l'estimation du débit cardiaque par thermo-dilution et enfin des tentatives de mesures du débit cardiaque basées sur le principe de Fick en cherchant à connaître le CO_2 du sang veineux mêlé par réinspiration. Les techniques de dilution au colorant servant soit de base aux diverses modalités de technique, soit de mesures de références, seront envisagées en premier lieu et d'une façon plus détaillée.

L'introduction d'une substance indicatrice dans le courant circulatoire pour étudier les caractéristiques de ce liquide est employée depuis fort longtemps. L'étude de la dilution de cet indicateur permet non seulement de déterminer différents temps circulatoires et le débit cardiaque, mais aussi le volume sanguin central et total ainsi que les courts-circuits entre la circulation systémique et pulmonaire. La méthode a été déjà appliquée chez le cheval par Haller dès la fin du XVIII^e siècle puis par Hering chez le même animal avec du ferrocyanure de potassium afin de calculer la vitesse du courant sanguin. Les recherches sur l'animal puis sur modèle aboutirent à l'application de cette méthode chez l'homme. C'est Stewart qui, utilisant des solutions salines hypertoniques chez le chien et suivant les variations de conductibilité du sérum prélevé par ponction artérielle, entame une série de recherches qui conduiront à des techniques applicables à l'homme. Ensuite, Hamilton, aux environs de 1930, étudie un modèle circulatoire constitué par une pompe reliée par un circuit fermé à un réservoir. Ensuite, il utilise chez l'homme la tétra-iodo-phénol-phtaléine, précise ainsi la courbe de dilution des colorants. Il montre qu'une recirculation vient interrompre la pente descendante de la courbe de dilution et propose la transcription des valeurs obtenues en coordonnées semi-logarithmiques. En 1936, Matthes préconise l'emploi d'une cellule photo-électrique pour suivre plus aisément les différences de concentration du colorant. Puis, la mise au point de traceurs radio-actifs par Lilling, grâce à des hématies marquées, donne un nouveau développement à ces méthodes de dilution. L'emploi d'albumine marquée à l'iode radio-actif donnant une émission de rayonnements gamma permet une étude à l'aide de compteurs placés à l'extérieur du corps, ou radio-cardiographie.

Mesure par les colorants

Si l'on porte en coordonnées semi-logarithmiques une courbe de dilution du colorant on peut décrire plusieurs parties dans cette courbe de dilution, tout d'abord, le temps d'apparition ou TA qui représente le temps minimum que met la tête de l'embol coloré pour parvenir au lieu d'enregistrement, ensuite TC ou temps de concentration appelé parfois temps de construction. Il correspond à la durée mise par l'indicateur pour atteindre sa concentration maximale (CM). TA + TC sont parfois appelés temps de concentration maximale. Après que la concentration maximale ait été atteinte, apparaît le temps de dilution ou le temps de disparition TD. Celui-ci correspond à l'intervalle qui sépare CM du point d'intersection de l'axe des abscisses et du prolongement de la partie rectiligne de la courbe. Cette courbe de dilution avant d'atteindre l'axe des abscisses remonte vers le point CR indiquant la concentration de recirculation qui correspond au premier ressaut après la concentration maximale (Fig. 4).

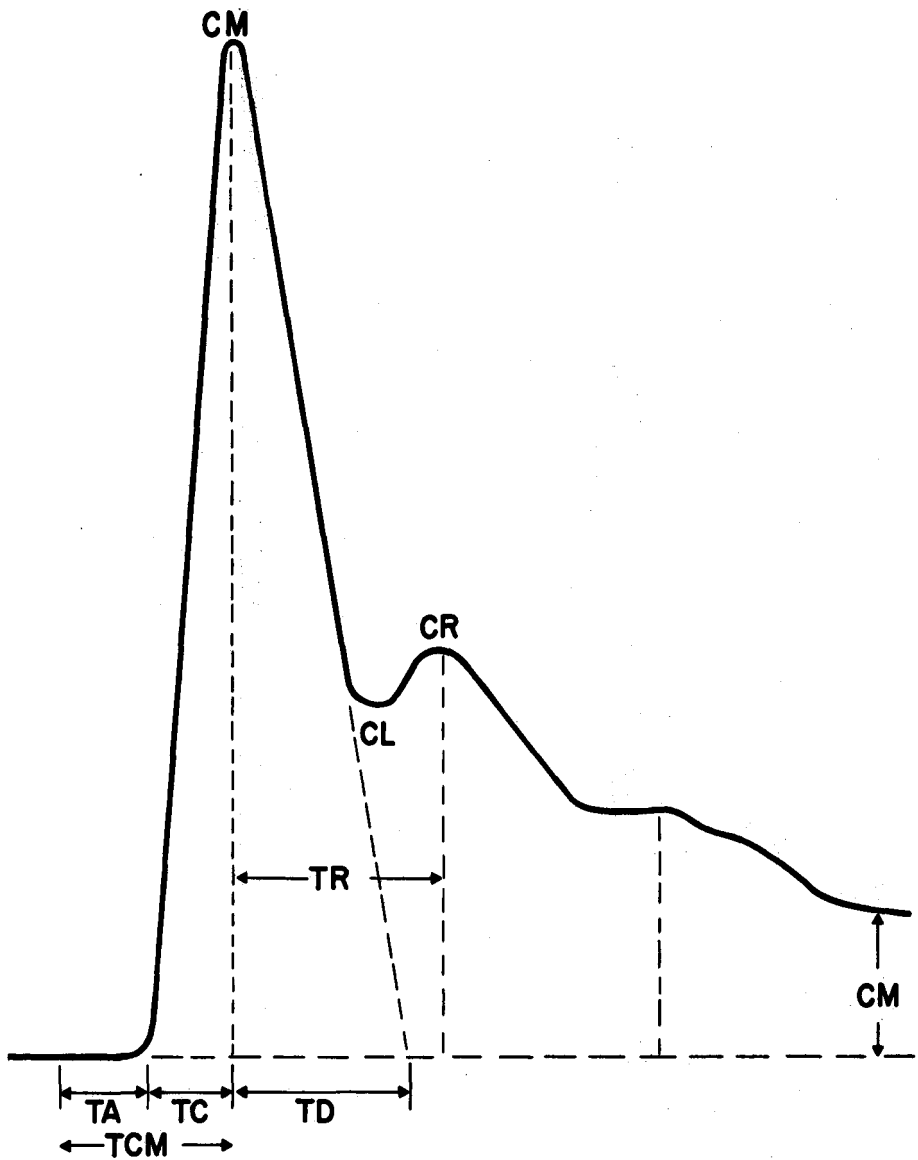


Fig. 4 - Définition des paramètres d'une courbe de dilution.

On admet comme valeurs normales de ces différents paramètres ou pour un adulte après injection intra-veineuse au pli du coude : TA 10", TC 6", TD 12", TR 15". Bien entendu, si l'on injecte le colorant dans l'artère pulmonaire et non dans le pli du coude le temps d'apparition sera de 5" seulement et si l'on injectait le produit dans la cavité gauche, il serait encore plus raccourci. On a employé successivement différents colorants, le bleu de méthylène, le rouge vital, puis le bleu evans ou bleu

de Chicago. A l'heure actuelle, c'est le vert cardiaque ou cardiaque green ou encore fox green qui est employé par tous. Grâce à lui, il n'est pas nécessaire de procéder à une extraction du colorant comme il fallait le faire avec le bleu evans par exemple. L'hématocrite ne joue aucun rôle et n'intervient pas comme facteur de correction dans le calcul du débit cardiaque, l'étalonnage se fait avec du sang total, enfin il n'y a pas d'interférence de l'hémoglobine réduite avec le vert cardiaque. La quantité de colorants doit être parfaitement déterminée ; l'équipe de Bruxelles utilise pour cela une microsiringue et introduit 1 ml d'une solution à 0,5 % c'est-à-dire 5 mgr dans un tube de polyéthylène. Ce tube est raccordé au cathéter. Au début de la mesure, le colorant est brusquement chassé par l'injection de 10 ml de sérum physiologique où plus aucun colorant n'est ainsi perdu.

L'injection au pli du coude entraîne une cause d'erreurs non négligeables non seulement en allongeant le temps d'apparition, mais en augmentant la disparition du colorant entre le point d'injection et le point d'apparition du liquide. On peut utiliser avec l'équipe de Bruxelles un cathéter de polyéthylène poussé jusqu'au niveau du creux axillaire ou bien une sonde de Courmand poussée sous contrôle radioscopique jusque dans l'oreillette droite. Pour Vanroux seules ces techniques donnent des garanties de reproductibilité de courbes qui soient vraiment absolues.

Pour l'étude du sang artériel, certains emploient un cathéter placé dans l'artère humérale, d'autres raccordent un tube de polyéthylène à une aiguille de Courmand placée dans cette même artère. Il est essentiel qu'aucun obstacle ne vienne entraver le débit sanguin artériel jusqu'au passage devant la cellule photo-électrique. Certains aspirent à une vitesse rigoureusement constante le sang artériel à travers le tube de polyéthylène, d'autres le laissent s'écouler.

Le colorimètre enregistreur doit être parfaitement satisfaisant, sa linéarité doit être parfaite sous peine de mécompte. Pour le groupe de Lavenne comme pour le groupe de Bruxelles, l'appareil de Gilford correspond parfaitement à ces caractéristiques. Pour Ulmer, l'appareil réalisé par le Max Planck Institut à Göttingen a d'excellentes propriétés. Les courbes d'étalonnage sont parfaitement constantes et la résolution est excellente. Enfin, au cours d'une séance de commission ad hoc, le Dr Cotes signale que la cuvette de Norman donne de bons résultats. Tout le monde s'accorde pour insister sur le fait que l'appareil doit être sensible à l'infra-rouge et le filtre infra-rouge du Gilford par exemple est extrêmement sélectif, le pic d'infra-rouge étant à 800μ avec une étroitesse de bande très réduite.

L'étalonnage de ces courbes se fait aisément à l'aide d'une concentration connue de colorants, réalisée dans un échantillon de sang. On fait passer cet échantillon de sang dans le colorimètre et la déflexion obtenue permet d'étalonner la courbe. Il n'est pas indispensable de procéder à une extraction du colorant. Cependant, compte tenu des variations observées d'un malade à l'autre, l'équipe de Bruxelles considère qu'il est indispensable de refaire un étalonnage pour chaque patient. Chez un malade donné les variations de l'étalonnage au cours de l'exercice ne sont pas rigoureusement négligeables sans que l'on puisse en préciser la cause exacte. Ces variations restent voisines de 5 % et toujours inférieures à 10 %. Il semble utile en cas de mesures multiples au cours de la période d'exercice ou de récupération, après l'exercice, de vérifier l'étalonnage à la fin des mesures.

Grâce au vert cardiaque, les mesures peuvent être répétées à plusieurs reprises chez un même sujet, même si la concentration résiduelle du colorant augmente dans le sang au cours d'injections successives, les appareils modernes à réponse linéaire donnent des réponses suffisamment fidèles. Pour le groupe de Denolin lorsque l'on répète les injections à intervalles très courts, la reproductibilité des résultats est très bonne, voisine de 1 à 2 % tandis que si chez un sujet on répète les injections à dix minutes d'intervalle, dans des conditions où a priori, le débit circulatoire n'a pas changé, la reproductibilité n'est plus que de l'ordre de 5 à 10 %, ce qui laisse supposer que dans le second cas, il est intervenu des fluctuations physiologiques qui viennent s'ajouter aux variations liées à la technique. Au cours d'une épreuve d'exercice de 20 ou 25 minutes, Denolin pense qu'il est possible de faire jusqu'à 12 mesures du débit cardiaque sans trop de difficulté. Pour Vanroux étudiant chez 10 sujets normaux quatre injections successives de colorants, le débit cardiaque a varié jusqu'à 15 % chez un même sujet. Le même auteur mesurant le débit cardiaque au cours de l'exercice a trouvé une augmentation du débit de 600 cm³ en moyenne par 100 cm³ d'oxygène supplémentaires consommés, résultats coïncidant assez bien avec les mesures faites par la méthode de Fick.

Technique de thermo-dilution

La technique de thermo-dilution a été employée par Fegler en Angleterre pour la première fois. L'indicateur n'est plus ici un colorant mais du sérum physiologique à basse température dans une veine proche du cœur droit et l'abaissement de la température du sang est suivie dans un autre vaisseau, à l'aide d'une thermite. La sensibilité de l'appareil de mesure des variations de température doit être importante. Cette technique a fait l'objet durant ces dernières années d'études du professeur Bretschneider à Cologne et du professeur Margaria à Turin. Cette technique avait été largement critiquée en Amérique, car on pensait que l'injection d'une solution glacée dans le cœur droit n'entraînerait pas de variations de température décelables, les échanges de chaleur au niveau du poumon étant trop importants ; en fait l'isolement thermique du poumon est suffisamment bon et la perte de température par les poumons reste inférieure à 5 % et surtout elle est constante en l'absence d'œdèmes pulmonaires.

Le calcul du débit cardiaque se fait à l'aide de la formule suivante :

$$Q' = \frac{S_1 g_1}{S_2 g_2} \times V \frac{T_{(ao)} - T_{(sol)}}{\Delta T \times \Delta t}$$

Q' = Débit cardiaque.

S_1 et g_1 = Poids spécifique et chaleur spécifique de la solution injectée.

S_2 et g_2 = Poids spécifique et chaleur spécifique du sang.

V = Volume de la solution injectée.

$T_{aorte} - T_{sol}$ = Différence de température entre celle de l'aorte et celle de la solution injectée en général égale à 0°.

$\Delta T \times \Delta t$ = Variation de température X temps pendant lequel la courbe de dilution a été enregistrée. Ce produit n'est autre chose que la surface de la courbe de dilution.

Le poids spécifique et la chaleur spécifique pour le sang et le liquide injecté sont connus, ainsi que le volume introduit. La mesure du débit est donc ramenée à celle de la variation de température du sang, traduisant le transport et la dilution du « froid » injecté.

Les variations de température décelées par des thermo-éléments sont enregistrées par l'intermédiaire d'un appareil sensible (micrographe de Kipp). Cette technique est notamment employée dans les laboratoires de Bochum, Cologne et Göttingen. D'autres préfèrent utiliser des thermistances, plus fragiles mais plus sensibles et nécessitant un amplificateur de fréquence (Träger).

Les avantages et les inconvénients des méthodes de thermodilution ont été longuement discutés par Bretschneider, lors de la réunion de 1965. Elles sont d'application facile en expérimentation animale, les mesures peuvent être répétées à bref délai et la reproductibilité est bonne. Par contre, chez l'homme, la mise en place de la sonde de mesure dans le système fémoro-iliaque pose des problèmes si on veut mesurer le débit à l'effort et l'injection doit être faite juste en amont des cavités droites.

La radiocardiographie

Le principe de la méthode est simple : une quantité connue d'un indicateur nucléaire émettant des rayons gamma est injectée par voie intraveineuse. Un détecteur à scintillation, placé en face du précordium, enregistre les variations de concentration du traceur en fonction du temps. Mais comme pour les autres méthodes de dilution, l'injection doit être suffisamment centrale, dans la veine cave supérieure ou mieux dans les cavités droites comme le précise Giuntini.

Lavenne trouve une bonne corrélation pour le débit cardiaque mesuré par radiocardiographie et par la méthode de Fick, au repos et à l'effort.

Mais l'intérêt de la radiocardiographie réside essentiellement dans l'estimation du volume sanguin pulmonaire.

Mesure de débit cardiaque par réinspiration de CO₂

Margarita à Milan, et Ulmer à Bochum ont étudié la valeur et la possibilité d'application pratique d'une méthode non sanglante de détermination du débit cardiaque en appliquant le principe de Fick au CO₂. Mais de nombreuses causes d'erreurs enlèvent beaucoup d'intérêt à cette méthode. La pression veineuse de CO₂ est estimée par équilibration du CO₂ entre l'air alvéolaire et le sang veineux mêlé après inspiration d'un mélange d'air enrichi en CO₂ et suppose l'absence de troubles de distribution. Par ailleurs, la valeur du CO₂ artériel est estimée indirectement par Margarita à partir du CO₂ expiré et par Ulmer sur un microprélèvement de sang au niveau du lobule de l'oreille hyperémié.

III — Angiopneumographie

Le bilan hémodynamique peut être complété dans certains cas par l'opacification des vaisseaux artériels pulmonaires. Les images obtenues par radiographies successives ou par radiocinématographie permettent l'étude morphologique et dynamique du transit artériel et veineux pulmonaire. Mais que cette angiopneumographie soit globale (Bollaert et Vanroux) ou sélective (Fritze), les renseignements qu'elle apporte

ne sont pratiquement que d'ordre morphologique et l'intérêt de ces méthodes est l'exploration de malades porteurs d'une pneumopathie susceptible d'être traitée chirurgicalement.

IV — Données expérimentales sur le retentissement de l'hypertension artérielle pulmonaire sur le myocarde

Le professeur Bretschneider a fait une étude expérimentale chez le chien, qui montre la complexité du retentissement de l'hypertrophie du myocarde sur sa fonction : en effet, elle aboutit à une réduction de la circulation coronarienne, mais sans altération de la diffusion de l'oxygène dans les fibres musculaires. Une teneur suffisante en oxygène du sang artériel et une bonne contraction sont des éléments décisifs de la capacité de travail du ventricule droit.

V — Résultat au cours des broncho-pneumopathies chroniques

C'est avant tout chez les ouvriers porteurs de pneumoconioses qu'ont été faits des cathétérismes cardiaques. Cependant, d'autres ouvriers, exempts de pneumoconioses, mais porteurs de bronchites chroniques, ont été aussi examinés par cathétérisme cardiaque droit et ces examens fournissent des éléments de comparaison intéressants pour étudier les pneumoconiotiques. Quoiqu'il en soit, c'est plusieurs centaines de sujets qui ont été très complètement examinés au point de vue circulation pulmonaire dans les différents laboratoires de la Communauté européenne du charbon et de l'acier. Chez tous ces ouvriers, en dehors des explorations faites pendant le cathétérisme au repos et au cours d'un exercice musculaire, il a été fait une spirométrie et diverses explorations fonctionnelles respiratoires. Les caractères du cathétérisme cardiaque droit n'ont évidemment pas permis un recrutement au hasard des ouvriers. Dans tous les cas, les sujets examinés présentaient des troubles plus ou moins accusés et pour une proportion non négligeable d'entre eux, ces troubles n'étaient pas expliqués par les examens spirométriques, ni par les examens des gaz du sang antérieurement pratiqués. Nous ne pouvons donc pas considérer les échantillons retenus comme représentatifs de l'ensemble de la population des pneumoconiotiques ou bronchitiques de l'Europe des Six.

Résultats chez les pneumoconiotiques

Lorsqu'il s'agit de pneumoconioses simples, c'est-à-dire punctiformes, micronodulaires ou nodulaires, la PAP au repos est très souvent normale. Pour Lavenne, par exemple, les 14 pneumoconiotiques porteurs de lésions m1 ou m2 avaient une PAP au repos inférieure à 20 mmHg. Les 13 pneumoconiotiques m2 ou n2 examinés par Toussaint, d'un âge moyen de 41 ans, avaient des pressions artérielles pulmonaires moyennes de 14,6 mmHg pour la moyenne du groupe. Cependant, d'autres chercheurs ont trouvé un pourcentage non négligeable de valeurs anormales chez des pneumoconiotiques de type micronodulaire. Le groupe de Lille, sur 12 micronodulaires examinés trouve 4 hypertendus au repos. Le groupe de Nancy, sur 45 pneumoconiotiques porteurs de lésions p ou m au stade 1, 2 ou 3 dénombre 24 cas où la PAP moyenne dépasse 15 mmHg et parmi eux 9 ouvriers ont une PAP moyenne supérieure à 25 mmHg au repos. Ce groupe de 45 pneumoconiotiques comprenait 19 mineurs de fer porteurs de lésions punctiformes, mais parmi eux le pourcentage et la sévérité des anomalies hémodynamiques étaient comparables à celles de l'ensemble du groupe.

Les épreuves d'exercice musculaire pratiquées sous cathétérisme montrent que les ouvriers ayant dès le repos une PAP moyenne supérieure à 20 mmHg présentent des anomalies très nettes encore au cours de l'exercice. Pour ceux ayant une PAP moyenne comprise au repos dans la zone douteuse de 15 à 19 mmHg, le comportement est variable : ou bien la pression s'élève à peine au cours de l'exercice, montrant que l'anomalie observée au repos peut être considérée comme négligeable, ou bien l'élévation tensionnelle est franche pour un effort peu intense.

Lorsqu'il s'agit de pneumoconioses pseudo-tumorales, des anomalies sont fréquemment observées et tous les centres de recherches sont en accord sur ce point. Cependant, dans quelques cas, la pneumoconiose pseudo-tumorale ne s'accompagne pas d'élévation tensionnelle ni au repos ni au cours de l'exercice.

En ce qui concerne les autres paramètres circulatoires pulmonaires, la pression dite capillaire est comprise dans les limites normales et le débit cardiaque est le plus souvent dans des limites satisfaisantes au repos. Cherrier, par exemple, sur 75 pneumoconiotiques trouve un débit cardiaque en l/min par m² de surface corporelle compris entre 2,5 l et 4 l chez 63 sujets soit dans 75 % des cas. Dans la même série, l'auteur trouve 10 fois un débit cardiaque anormalement bas et 12 fois un débit cardiaque supérieur à 4 l/min/m².

Kremer à Louvain, mesurant le débit cardiaque par radiocardiographie chez 43 houilliers pneumoconiotiques sans emphysème trouve chez les micronodulaires 1 et 2 un index cardiaque de 4,05 l en moyenne qui s'abaisse légèrement chez les micronodulaires au stade 3. Au stade pseudo-tumoral, l'index cardiaque est de 3,46 l en moyenne.

Au cours de l'exercice, la dispersion des valeurs est beaucoup plus considérable. Quoique les résultats les plus divers soient observés, on peut dire que dans les silicoses pseudo-tumorales, le débit cardiaque s'élève souvent moins au cours de l'exercice que chez les sujets normaux. Ainsi dans le groupe de pneumoconioses pseudo-tumorales examinées par Toussaint, l'index cardiaque au repos est de 4,3 l/min/m² comme chez les sujets porteurs de silicoses nodulaires et au cours d'un exercice musculaire de 100 watts, la moyenne des pseudo-tumoraux ne s'élève qu'à 6,1 l/min/m² alors que celle des silicoses nodulaires s'élève à 8,8, valeur voisine de celle observée par le même auteur chez des ouvriers exempts de pneumoconioses.

Résultats observés dans les bronchites chroniques et l'emphysème

Le groupe de Nancy a examiné 43 bronchiteux chroniques en dehors de toute poussée de surinfection ou de décompensation cardiaque droite. Ces malades répondaient tous à la définition généralement admise du syndrome : toux et expectoration durant plus de trois mois par an depuis plus de 3 ans sans maladie bronchopulmonaire causale identifiable. Dans plus de la moitié des cas, il existait une nette hypertension artérielle pulmonaire au repos puisque 26 malades sur 45 avaient une PAP moyenne au repos supérieure ou égale à 20 mmHg. Parmi ces sujets, 22 ont été soumis à un exercice musculaire de 40 watts et 13 d'entre eux ont montré une nette hypertension artérielle pulmonaire. Qu'il s'agisse des valeurs tensionnelles au repos ou de celles observées à l'effort, celles-ci n'étaient pas en étroite corrélation avec les valeurs de saturation oxyhémoglobinée. Évidemment, les valeurs tensionnelles des sujets hypoxiques étaient presque toujours supérieures aux limites normales, mais au cours de l'effort,

3 bronchitiques nettement hypertendus (55 mmHg de PAP moyenne) gardaient une saturation oxyhémoglobinée supérieure à 95 %.

Toussaint a effectué des cathétérismes chez 11 mineurs présentant un syndrome spirographique d'emphysème avec élévation considérable du VR/CT et abaissement du VEMS/CV, observe une importante élévation de la PAP chez la majorité des sujets, la valeur moyenne du PAP s'élevant à près de 34 mmHg pour un index cardiaque à peine abaissé par rapport au groupe témoin. La majorité des sujets présentait une saturation oxyhémoglobinée diminuée et une pression partielle de CO₂ augmentée, les valeurs moyennes sont respectivement de 81 % pour la SaO₂ et de 52 mmHg pour la PCO₂ artérielle.

Le débit cardiaque a été mesuré chez 37 emphysemateux par Kremer qui trouve un abaissement significatif de l'index cardiaque chez les malades non polyglobuliques. Lorsque l'emphysème se complique d'hypoxie sévère et de polyglobulie l'index cardiaque revient à des valeurs normales.

Séquelles fonctionnelles de la chirurgie pour la tuberculose au cours de la silicose

Ribet a étudié, au sanatorium d'Helfaut, 51 malades au point de vue hémodynamique, dont 16 avant et après exérèse, et 4 avant et après traitement médical. La pneumoconiose n'entraîne pas chez l'ensemble de ces malades d'hypertension artérielle pulmonaire franche, sauf dans les formes pseudo-tumorales. L'augmentation de la pression artérielle pulmonaire à l'effort est fonction de la désaturation. Après l'intervention, la moyenne des pressions artérielles pulmonaires passe de 16 à 18 mmHg, et chez deux malades apparaissent des signes de surcharge droite. Par contre, selon cet auteur, l'ablation des pseudo-tumeurs serait bénéfique sur le plan hémodynamique. Par ailleurs, il faut signaler que chez les malades traités médicalement les pressions se sont également élevées, mais ces deux groupes ne sont pas comparables quant à la gravité des lésions.

VI — DISCUSSION

Corrélation des données hémodynamiques et des autres résultats fonctionnels

La place et la signification nosologique de l'hypertension artérielle pulmonaire donne lieu à certaines discussions. Kremer de Louvain et d'autres chercheurs parlent de cœur pulmonaire chronique lorsque la pression artérielle pulmonaire moyenne dépasse la limite supérieure de la normale. Pour étayer leur conception ils soulignent que l'Organisation mondiale de la santé définit le cœur pulmonaire chronique comme « la surcharge permanente ou intermittente du cœur droit secondaire à une affection pulmonaire primitive » et ajoutent que surcharge, terme vague, gagnerait à être remplacé par l'expression « augmentation du travail ventriculaire ». D'autres avec Ulmer déclarent que le cœur pulmonaire chronique existe lorsque la surcharge cardiaque droite entraîne une modification anatomique. Enfin la loi française en matière de silicose admet les complications cardiaques de la maladie professionnelle en utilisant le terme vague d'hyposystolie droite qu'il est impossible d'assimiler à celui d'hypertension artérielle pulmonaire isolée. Finalement les chercheurs réunis en une commission ad hoc ont insisté sur la nécessité d'étudier par des enquêtes systématiques l'évolution

de l'hypertension artérielle pulmonaire des bronchopneumopathies chroniques pour parvenir à une conception plus précise du cœur pulmonaire chronique et de l'insuffisance cardiaque droite. Ces enquêtes systématiques apparaissent d'autant plus importantes que la découverte d'une hypertension artérielle pulmonaire élevée à l'effort par exemple pose la question de l'aptitude au travail. Les résultats recueillis depuis 1955 dans divers centres spécialisés ayant bénéficié de l'aide de la C.E.C.A. permettront de conduire cette enquête avec le maximum d'atouts. Les études anatomiques entreprises par Könn viendront apporter un complément d'informations essentiel.

Il ne peut être établi de corrélations valables entre la dyspnée et les résultats hémodynamiques. En effet, la plupart des ouvriers pneumoconiotiques ou bronchiteux qui ont été soumis à un cathétérisme cardiaque étaient dyspnéiques soit au repos, soit pour un effort peu important. Cependant, le groupe de Nancy a pratiqué un cathétérisme cardiaque droit chez 26 pneumoconiotiques qui n'accusaient pas de dyspnée avant le deuxième étage, mais chez qui des examens cliniques ou spécialisés faisaient redouter une hypertension artérielle pulmonaire. Sur ces 26 sujets, 7 présentent une hypertension artérielle pulmonaire au repos ou à l'effort.

Les anomalies électrocardiographiques ne montrent pas de corrélation étroite avec les anomalies hémodynamiques. Pour Kremer du groupe de Louvain, dans 50 % de cas, l'ECG ne permettait pas d'affirmer l'hypertension artérielle pulmonaire chez les pneumoconiotiques examinés. Pour le groupe de Nancy, la présence de signes électrocardiographiques d'hypertrophie ventriculaire droite confirmée coïncidait toujours avec une hypertension artérielle pulmonaire observée au repos ou au cours de l'effort. Par contre, lorsque l'ECG était normal, on observait dans une proportion non négligeable de cas, une hypertension artérielle pulmonaire. Enfin lorsque l'ECG montrait des signes de suspicion, la proportion d'hypertension artérielle pulmonaire était d'environ 50 % comme dans le groupe examiné par Lavenne et ses collaborateurs. Parmi les signes électriques les plus valables on retrouve l'axe de QRS au delà de 120 et le rapport R/S inférieur à 1 en V5 ou V6.

La corrélation avec les données spirométriques est le plus souvent étudiée entre le VEMS et la PAP. Lorsqu'il existe un abaissement important du VEMS, l'hypertension artérielle pulmonaire est particulièrement fréquente chez les pneumoconiotiques. Pour Lavenne (Fig. 5), les malades ayant un VEMS inférieur à 1,35 l ont toujours des pressions anormales au cours d'efforts modérés. Toussaint opposant deux groupes de pneumoconiotiques porteurs de masses pseudo-tumorales au stade BC de la classification de Genève ayant les uns un abaissement net du VEMS et les autres un VEMS normal, note des valeurs très différentes en ce qui concerne la PAP. En effet, pour ceux n'ayant pas de syndrome obstructif, la moyenne des PAP est au repos de 20 mmHg et à l'effort de 34 mmHg. Au contraire, la valeur moyenne des pressions artérielles pulmonaires s'établit à 41 mmHg dès le repos pour les pneumoconiotiques présentant un syndrome obstructif. Chez ces derniers, l'index cardiaque est à 3,5 contre 4,3 l chez les pseudo-tumorales exemptes de syndrome obstructif. Pour le groupe de Nancy, les sujets normo-tendus ont tous un bon rapport VEMS/CV mais 13 pneumoconiotiques hypertendus au repos ou à l'exercice ont un rapport VEMS/CV normal.

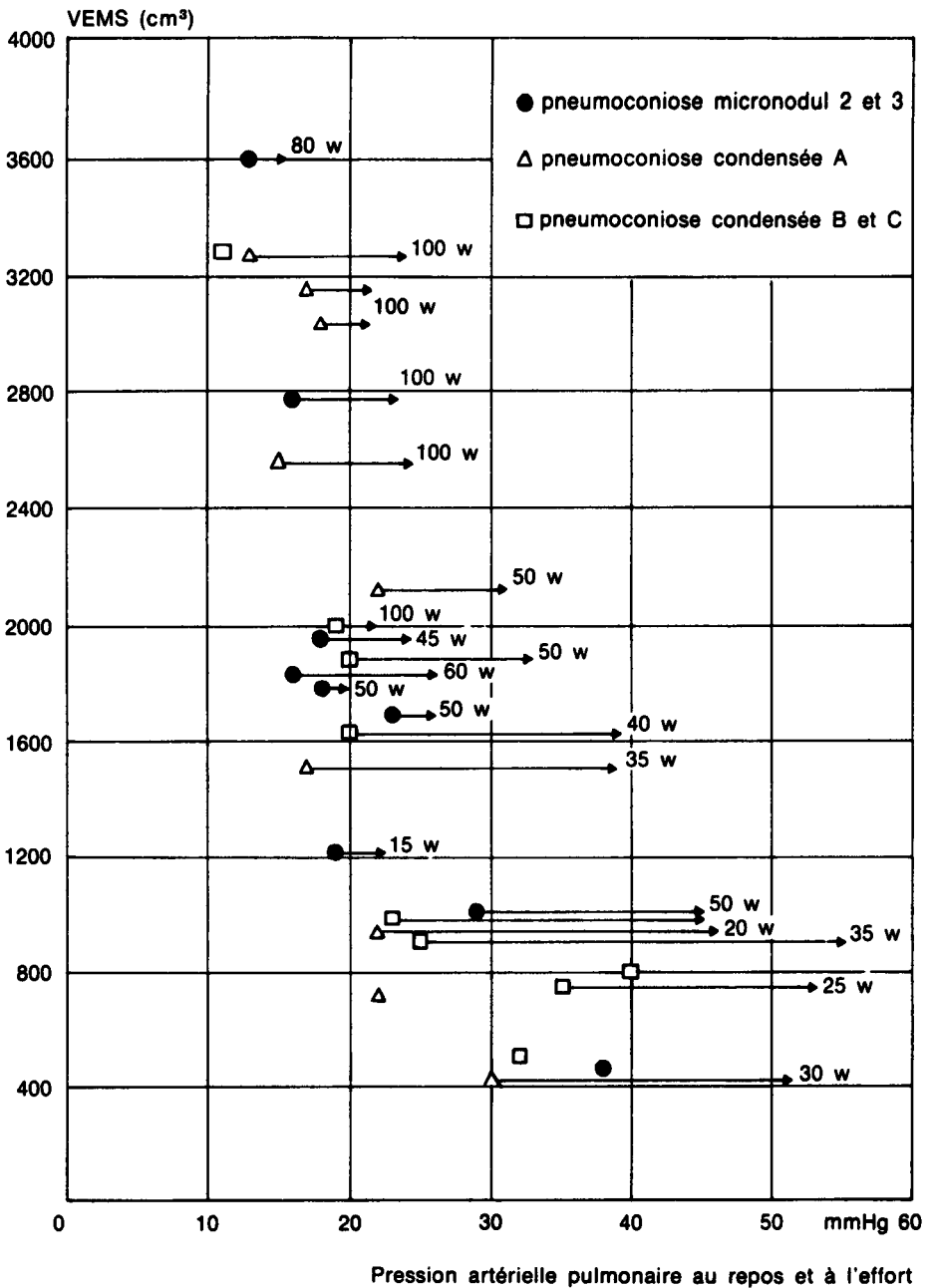


Fig. 5 – Comparaison entre la pression artérielle pulmonaire moyenne au repos et à l'effort (Y) et le VEMS, dans la pneumoconiose des houilleurs. (D'après Lavenne et coll., 1960).

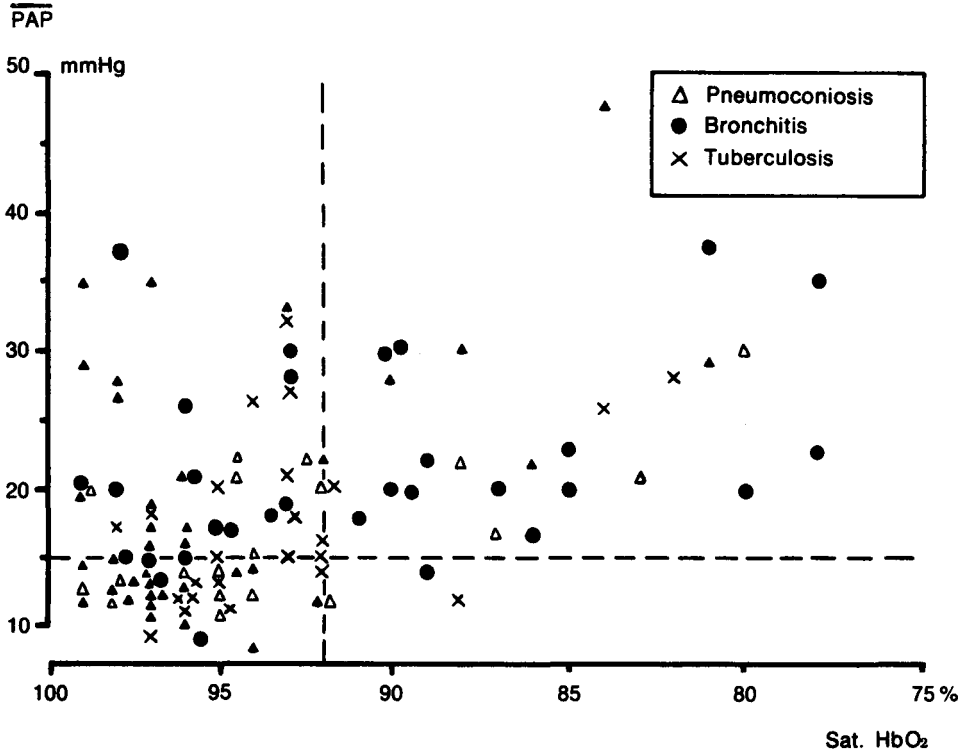


Fig. 6 — Résumé des valeurs de la pression artérielle pulmonaire observée au repos chez des pulmonaires chroniques.

Ulmer chez 16 silicotiques légers trouve rarement une élévation de la pression artérielle pulmonaire, mais dans ces cas, il constate toujours une augmentation du travail ventilatoire.

En somme, on peut conclure de cette étude sur la corrélation des tests ventilatoires et des données hémodynamiques que les pneumoconiotiques présentant un syndrome obstructif sont pratiquement toujours hypertendus mais que certains pneumoconiotiques peuvent présenter une hypertension artérielle pulmonaire alors qu'il n'existe aucun signe spirométrique péjoratif. Cette dernière éventualité est particulièrement fréquente chez les pneumoconiotiques porteurs de masses pseudo-tumorales. Cependant, on ne peut oublier que pour les autres pneumopathies chroniques et, en particulier, les bronchites chroniques anciennes, la corrélation entre tests spirométriques et variables hémodynamiques n'est pas non plus très étroite.

Il est classique de dire que tout hypoxique présente une hypertension artérielle pulmonaire. Les divers examens pratiqués chez les bronchiteux comme chez les pneumoconiotiques permettent de nuancer cette opinion en ce qui concerne les corrélations entre la PAP moyenne et la saturation oxyhémoglobinée au repos. En effet, pour des saturations de 85 à 94 %, il n'est pas exceptionnel que la PAP moyenne au repos soit inférieure à 20 mmHg. Par contre, au-dessous de 85 % de la saturation, la PAP moyenne est toujours supérieure à 20 mmHg. Au cours de l'exercice, lorsque la saturation oxyhémoglobinée est inférieure à 92 %, tous les sujets bronchiteux ou pneumoconiotiques présentent une tension artérielle pulmonaire moyenne supérieure à 25 mmHg pour un effort de 40 watts. Par contre, en l'absence d'hypoxie, il n'est pas exceptionnel chez les pneumoconiotiques et moins souvent chez les bronchiteux chroniques d'observer une hypertension artérielle pulmonaire au repos (Fig. 6). Au cours de l'exercice la même éventualité est retrouvée.

En ce qui concerne le pH et la P_{CO_2} , il n'y a pas de corrélation nette avec la pression artérielle pulmonaire observée au repos ou au cours de l'exercice. Si l'on retrouve souvent chez les hypercapniques une hypertension, c'est dans la mesure où ces malades sont également hypoxiques.

Le professeur Fritze a comparé chez des silicotiques et chez des malades en cœur pulmonaire chronique, les données de l'électrocardiogramme, du phonocardiogramme, du pouls carotidien et fémoral, du débit cardiaque au repos, déterminé d'après la méthode de Wezler et Boger, avec le débit cardiaque mesuré par thermodilution et les pressions dans la petite circulation. Au cours du cœur pulmonaire chronique, le volume du cœur déterminé radiologiquement, ainsi que l'étude dynamique de la révolution cardiaque, sont en concordance satisfaisante avec les résultats du cathétérisme du cœur droit ; ces études non sanglantes permettent une appréciation du rendement du cœur et du retentissement de la pathologie pulmonaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Bollaert A., Melot G., De Clerq F., Durieu H., De Coster A., Dumont A., Vanroux R.**
Expressions angiographiques de diverses valeurs fonctionnelles pulmonaires.
Acta Tuberculosea et Pneumol. Belg., 1961, 52, pp. 429-459.
- Bretschneider H.J.**
Arterielle Hypoxie und Coronarinsuffizienz bei Lungenerkrankungen.
Beitr. Silikose-Forsch., 1965, 6, pp. 527-556.
- Casula D., Nissardi G.P.**
Possibilità e limite dell'indagine elettrocardiografica nella diagnosi precoce del cuore polmonare cronico nei silicotici.
Congrès National de Médecine du travail, Naples, octobre 1965.
- Cerretelli P., Piiper J.**
Determinazione della gettata cardiaca col metodo della termodiluzione.
Arch. Fisiol., 1963, 62, p. 13.
- Dickmans H., Fritze E., Friehoff F.J., Drews A., Rosenkranz K.A.**
Lungenangiographie bei mittelgradiger Silikose.
Zeitsch. f. Kreislf., 1961, 50, pp. 1105-1115.
- Drews A., Rosenkranz K.A.**
Unblutige haemodynamische Untersuchungen und röntgenologische Herzvolumenbestimmung bei chronischen Cor pulmonale.
Beitr. Silikose-Forsch., 1963, 5, pp. 521-531.
- Friehoff F.J., Drews H., Rosenkranz K.A., Dickmans H., Fritze E.**
Zur Hämodynamik des kleinen Kreislaufs bei Silikose.
Zeitsch. f. Kreislf., 1961, 50, pp. 768-781.
- Kremer R., Baudrez J., Van Haelen J., Majois J.**
Mesure radiocardiographique du débit cardiaque et du volume sanguin central dans la pneumoconiose des houilleurs et dans l'emphysème.
Revue Institut Hyg. Mines, 1963, 18, pp. 3-14.
- Lavenne F.**
Silicose et autres pneumoconioses, pp. 1071-1120
dans : H. Denolin, P. Sadoul, N.G.M. Orie, *L'exploration fonctionnelle pulmonaire*. 1er vol., 1507 p., 1964, Éditions Méd. Flammarion, Paris.

- Lavenne F., Meersseman F., Kremer R., Brasseur L.**
 Le cœur pulmonaire chronique dans les pneumoconioses. Importance relative des altérations vasculaires et du déficit ventilatoire dans sa pathogénie.
Fortschr. Kardiol., 1960, 2, p. 306.
- Ribet M., Schouller A., Le Berre M., Sergeant Y., Hassoun A., Razemon P.**
 Modifications cardiorespiratoires observées chez les mineurs pneumoconiotiques opérés pour tuberculose pulmonaire.
Ann. Chir. thor. cardiovasc., 1967, 6, pp. 88-93.
- Sadoul P., Metz J., Cherrier F., Parmentier F.R.**
 Retentissement cardio-vasculaire des pneumoconioses. Études conjointes de l'hémodynamique, des échanges gazeux et des volumes pulmonaires.
Maroc. Méd., 1961, 40, pp. 429-436.
- Toussaint C., Nowak J., Geisser-Toussaint M.**
 Répercussions hémodynamiques de la pneumoconiose des houilleurs.
Rev. méd. Liège, 1964, 19, pp. 193-200.
- Warembourg H., Bertrand M.**
 Les courbes de dilution des colorants au cours des cardiopathies mitrales. Étude critique du diagnostic de l'insuffisance mitrale.
Lille Méd., 1965, 10, pp. 363-373.
- Ulmer W.T., Berta G., Berkel H.A.**
 Bestimmung des Herzzeitvolumens mit der Kohlensäure-Rückatmungsmethode.
Arch. f. Kreislauff., 1963, 41, pp. 292-311.
- Doc. n. 4679/64 f: **Brandi G., Torelli G.** - Semplice metodo per la determinazione incruenta della gettata cardiaca nei soggetti a riposo o durante lavoro di modica intensità.
- Doc. n. 3716/65 f: Compte rendu de la réunion du groupe de travail ad hoc « Hémodynamique », Luxembourg, 22 janvier 1965.
- Doc. n. 3217/66 f: Compte rendu de la réunion du groupe de travail ad hoc « Hémodynamique », Luxembourg, 10 mars 1966.

C – ÉTUDE DES ÉCHANGES RESPIRATOIRES

Les échanges alvéolo-capillaires peuvent être étudiés par des mesures portant soit sur les gaz du sang, soit sur les gaz expirés, soit enfin grâce à l'inhalation de faibles quantités d'un gaz étranger, l'oxyde de carbone. La diversité des techniques utilisées pour ces mesures, comme les variables étudiées à partir de ces résultats, conduit à examiner successivement ces trois groupes de mesures et les renseignements qu'elles fournissent.

Gaz du sang artériel

Pendant de longues années, l'oxygène du sang artériel a été étudié à l'aide de l'appareil de Van Slyke tandis que la pression partielle de CO_2 était calculée à partir du CO_2 total et du pH. Ces deux méthodes classiques servent encore de référence dans beaucoup de laboratoires. Elles ont fait l'objet de différentes études critiques (Brasseur, 1961). Il a paru utile aux chercheurs de discuter au cours de réunion ad hoc la valeur de ces méthodes classiques, en particulier en ce qui concerne la pression partielle de CO_2 . Le calcul de la Pco_2 grâce à l'équation de Henderson pose encore un certain nombre de problèmes techniques délicats qui sont la rançon de la précision demandée. L'expérimentateur et le clinicien qui utilisent cette technique doivent, pour en surmonter les difficultés et chiffrer la précision, pratiquer dans leur laboratoire une étude préliminaire in vitro basée sur la tonométrie, ainsi que le Dr Stupfel, ancien collaborateur de Severinghaus, y insistait au cours d'une de ces réunions techniques. Des obstacles majeurs subsistent, la valeur exacte d'un tampon étalon et celle du pK' , en définitive l'une et l'autre restent liées et là encore une expérience personnelle permet d'accorder Pco_2 sanguine et Pco_2 gaz in vitro avant de les comparer in vivo. Il est évident que ces difficultés de la mesure indirecte de la Pco_2 font l'intérêt de méthodes parallèles plus simples comme celle d'Astrup ou de la mesure directe de la Pco_2 par l'électrode sanguine.

Lorsque le ravitaillement en oxygène du sang est peu perturbé, la mesure de la pression partielle d'oxygène est plus précise que la mesure de la saturation. Riley avait proposé, en 1957, une technique dite de la bulle qui a fait l'objet d'études critiques extensives de Brasseur dans le laboratoire du professeur Lavenne. Malheureusement, c'est une méthode délicate, exigeant une mise au point très consciencieuse, elle permet de déterminer Pco_2 et Po_2 en double mesure en 30 minutes. Sa pratique délicate l'a fait abandonner durant ces toutes dernières années.

Actuellement, la Pco_2 est mesurée soit directement à l'électrode, soit par une méthode d'interpolation dite d'Astrup. Cette dernière méthode, très en vogue, en raison de sa rapidité et de sa précision satisfaisante, est basée sur un principe assez simple : le pH est mesuré sur le sang qui a été tonométré à différentes Pco_2 . Un diagramme pH/logarithme de Pco_2 permet, avec les résultats de deux ou trois mesures

faites, de tracer une droite d'équilibration, qui permet d'obtenir aisément la valeur de la P_{CO_2} du plasma.

La mesure directe de la P_{CO_2} à l'électrode est celle la plus largement employée, semble-t-il, dans les laboratoires de la Communauté européenne. Les principes de cette méthode sont simples : le CO_2 issu d'un échantillon sanguin diffuse à travers une membrane et entre en contact avec une solution de bicarbonate. Le CO_2 se dissout alors en donnant naissance à de l'acide carbonique qui modifie le pH de la solution bicarbonatée. La mesure du pH de cette solution donne la valeur de la P_{CO_2} puisque celle-ci est une fonction logarithmique du pH. Les types d'électrodes varient d'un laboratoire à l'autre, l'électrode de Gleichmann-Lübbars ou de Loeschke sont largement employées dans les pays d'Europe ainsi que l'électrode de Severinghaus. La précision de la méthode dépend du Phmètre utilisé et on estime habituellement que la P_{CO_2} est déterminée à ± 1 mmHg pour une P_{CO_2} comprise entre 30 et 60 mmHg. Une telle précision n'est atteinte qu'à condition de vérifier soigneusement les étalonnages. L'électrode construite par Radiometer est souvent préférée car elle a un temps de réponse court et sa réponse est linéaire (Lavenne et collaborateurs).

La mesure de la pression partielle d'oxygène dans le sang à l'aide des électrodes a donné lieu à un exposé critique de Bartels lors d'une réunion ad hoc et qui résume aussi bien l'historique que les conditions d'utilisation de l'électrode de Clark. Il faut souligner que ces électrodes ont tendance à se couvrir d'un film protidique et qu'il est préférable d'utiliser des agitateurs de façon à mesurer plus précisément la P_{O_2} .

Ces micro-méthodes permettent des mesures sur du sang capillaire prélevé au lobule de l'oreille par exemple et d'éviter ainsi le prélèvement artériel dont les accidents sont redoutés à tort, semble-t-il, par certains. Ces micro-prélèvements, largement pratiqués dans le laboratoire de Ulmer, sont considérés par beaucoup d'autres chercheurs comme délicats et exigeant des techniciens particulièrement entraînés. La précision indiqués par le groupe de Bochum est très satisfaisante (± 2 mmHg pour résultats obtenus sur plusieurs centaines de mesures).

La chromatographie en phase gazeuse a été également utilisée pour mesurer le CO_2 et l'oxygène sanguins extraits par un dispositif original réalisé par J. Lacoste et collaborateurs. Les auteurs obtiennent pour l'oxygène une reproductibilité excellente, l'erreur étant inférieure à 1% tandis que les fluctuations sont un peu plus marquées avec le CO_2 tout en restant acceptables. Les tentatives des mesures de l'azote par ces auteurs sont beaucoup moins satisfaisantes. Ces chercheurs emploient comme gaz vecteur de l'hydrogène, tandis que les Américains ont recours, en général, à l'hélium tout comme Kreuzer. Cet auteur extrait les gaz des liquides, comme Farmi, à l'aide d'un appareil de Van Slyke volumétrique légèrement modifié, et déclare mesurer l'azote dans l'urine avec une précision de l'ordre de 2 à 3 mmHg, ce qui est remarquable ; cependant cette technique semble difficile à appliquer et comme l'a fait remarquer Cotes, une précision de 0,1% serait nécessaire pour les besoins de la physiologie clinique.

La ventilation alvéolaire peut être mesurée à partir de la P_{ACO_2} par diverses méthodes. Les uns (en particulier le groupe de Moers am Rhein, Pr. Worth) utilisent les formules de Bohr pour calculer les espaces morts et déduisent la ventilation de ceux-ci de la ventilation totale. D'autres emploient la classique formule V_{CO_2}/F_{ACO_2} et établissent

le rapport VA/V (Sartorelli, Toussaint, Sadoul). Enfin, récemment J. Lacoste a attiré l'attention sur le fait que le rapport VA/V pour le CO₂ pouvait être écrit sous la forme $V'A/V' = P_{ECO_2}/P_{ACO_2}$, ce qui permettait de mesurer ce rapport à partir de deux mesures de pression partielle de CO₂ et réduisait notablement les causes d'erreur. Ce rapport V'A/V' pour le CO₂ pourrait être plus simplement appelé ductance pulmonaire (J. Lacoste, 1966), terme qui peut être appliqué aussi au « fractional uptake » de Bates pour le CO.

Quoi qu'il en soit, les mesures de V'A/V' pratiquées chez les silicotiques ont montré fréquemment une augmentation de l'espace mort. Cette augmentation traduit la présence de zones alvéolaires pauvrement perfusées par rapport à leur ventilation. Elle explique l'augmentation non exceptionnelle de la ventilation minute alors que le quotient respiratoire normal permet d'affirmer qu'il n'y a pas d'hyperventilation alvéolaire.

Les analyses rapides de mélanges gazeux

Lors d'un précédent programme, des analyses faites à l'aide d'analyseurs à infrarouges ou de cataphéromètres à réponse rapide (Visser), avaient déjà permis d'obtenir des informations intéressantes. Durant ces dernières années, l'emploi des analyseurs à infrarouges, comme celui du spectrographe de masse s'est largement répandu.

On sait que le CO₂ est le gaz qui absorbe le plus de chaleur en infrarouges, les premières tentatives de mesures basées sur cette propriété remontent à la fin du XIX^e siècle. Le temps de réponse des analyseurs modernes peut être réduit à 0,04 ou 0,05 seconde ; il peut être facilement mesuré par le temps de retour au zéro en fin d'expiration. La précision de la mesure ne peut être élevée que si l'analyseur est rapide, elle peut atteindre plus ou moins 1 % sur des mesures répétées. Seuls, les analyseurs rapides, ayant une chambre d'analyse de petite taille permettent un échantillonnage continu d'une partie de l'expiration. Le gaz est prélevé soit au niveau de la bouche, soit au niveau de la narine, mais toujours au centre de la veine gazeuse et non au moyen d'une canalisation latérale. Comme le souligne Visser, les conditions de température, de pression, de saturation en vapeur d'eau doivent être minutieusement précisées. Agostoni signale la possibilité d'erreur pouvant atteindre 3 mmHg par variation de la pression du mélange suivant les conditions de prélèvements. Les procédés d'enregistrement jouent également un rôle et il est indispensable d'avoir un système d'enregistrement déformant aussi peu que possible l'information, soit enregistreur optique de haute sensibilité, soit enregistreur par jet d'encre. Visser souligne que la méthode par thermo-conductibilité est indépendante des variations de pression, il est donc possible de diminuer le temps de rinçage.

Le spectrographe de masse permet de résoudre avec plus d'élégance encore l'analyse de gaz respiratoires. Muysers, Worth et leur collaborateurs utilisent un spectromètre de masse respiratoire M.A.T., qui a des caractéristiques extrêmement satisfaisantes. Le pouvoir de résolution est très bon et la stabilité à long terme est meilleure que 0,25 % d'écart type absolu pour l'oxygène et le gaz carbonique. La variation minimale décelable de concentration gazeuse est de 0,1 mmHg. Le temps de réponse dépend de la longueur des capillaires et de la température, il varie entre 0,11 et 0,70 seconde pour une longueur de 60 à 200 cm et une température de 20 à 120° centigrade. Le temps

de réponse est de 4,1 secondes pour un capillaire de 70 cm à 80° centigrade. Le problème de la vapeur d'eau est correctement résolu par des systèmes d'admission à plusieurs étages.

Les spectrographes de masse à temps de vol sont généralement peu adaptés à la physiologie respiratoire. Cependant, des modifications originales ont permis à J. Lacoste d'écourter le temps de réponse jusqu'au dixième de seconde environ pour 90 % de la réponse. Ces modifications intéressent, en particulier, le système d'introduction et la source d'ions. Il reste un appareil encombrant et nécessite une réfrigération par l'azote liquide. Il est moins maniable que les spectrographes à déviation magnétique réservés à une seule analyse des gaz respiratoires.

Certains auteurs ont utilisé les analyseurs rapides pour obtenir d'une façon indirecte la composition en CO₂ du sang veineux mêlé par une méthode de réinspiration. Cette méthode a fait l'objet de critiques assez sévères de la part de Serra et de Pham et de leurs collaborateurs respectifs. Chez les pulmonaires chroniques fréquemment porteurs de troubles de distribution considérables, les valeurs obtenues par réinspiration sont souvent erronées en plus ou en moins sans que rien ne permette de prévoir le sens de ces variations. La déviation standard publiée par certains promoteurs de la méthode est d'ailleurs élevée puisqu'elle atteint près de 3 mmHg.

Mais les analyseurs rapides de gaz expiré ont surtout été utilisés pour étudier les gradients artério-alvéolaires de CO₂ et d'oxygène. Les courbes obtenues avec les enregistreurs rapides montrent un plateau alvéolaire faiblement dénivelé chez le sujet sain et dont la pente est plus accusée chez les malades présentant des troubles de distribution. Une première discussion est celle concernant le choix du point représentatif de l'air alvéolaire moyen. Si les auteurs anglo-saxons prennent généralement le point de fin d'expiration, plusieurs auteurs européens tendent à considérer que la partie moyenne du plateau reflète plus fidèlement la composition de l'air alvéolaire. En prenant le point de fin d'expiration, on obtient quelquefois des gradients artério-alvéolaires négatifs, ce qui est un argument de poids pour ceux qui tiennent à prendre le point milieu du plateau alvéolaire.

Le gradient de CO₂, facile à mesurer avec un analyseur rapide à infrarouges, a été largement étudié chez le sujet sain. L'étude de ces variations, en fonction de la position, montre que le gradient est moindre en position couchée. Le gradient s'élève également avec l'âge. Ulmer et collaborateurs trouvent au-dessus de 60 ans des valeurs de gradient de 6 mmHg. Lacoste et collaborateurs observent, en position couchée, chez des sujets de moins de 40 ans, un gradient moyen de 1,7 mais avec une dispersion importante, si bien que certains sujets jeunes ont un gradient atteignant 6 mmHg.

Le gradient d'oxygène, mesuré par Siehoff, Muysers et Worth, grâce au spectrographe de masse, est de 15 mmHg au repos (Fig. 7). Lors de l'exercice, ce gradient tend à s'élever notablement. Il en est de même, d'ailleurs, du gradient de CO₂.

Chez les malades présentant des troubles de distribution, le capnigramme tend à se déformer, affectant une forme en S et simultanément le gradient alvéolo-artériel tend à augmenter de façon importante. Prenant par exemple le gradient moyen observé chez les bronchiteux, Pham trouve un gradient de 15 mmHg. Chez certains malades, le gradient dépasse 20 mmHg, puisque l'écart type de la série considérée est de 6,5.

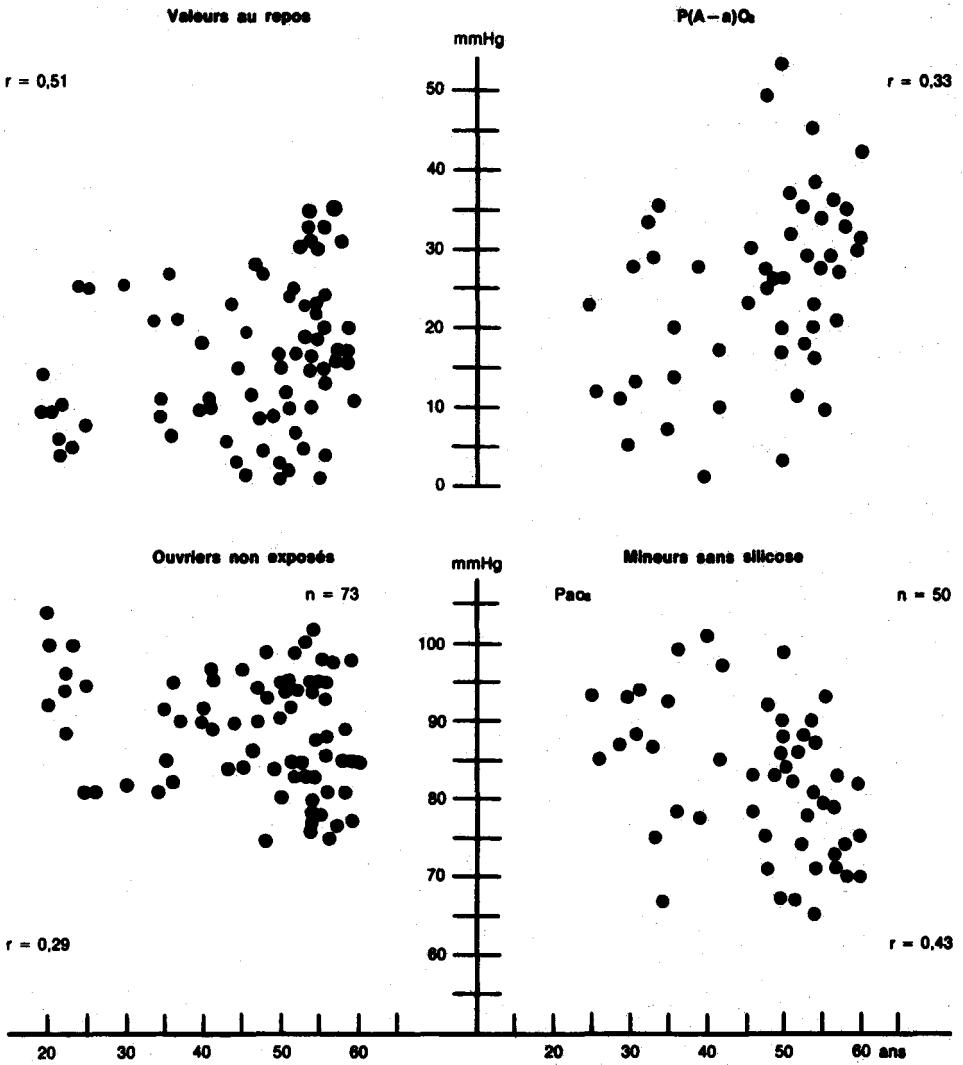


Fig. 7 — P_{aO_2} et gradient alvéolo-artériel en relation avec l'âge chez des mineurs non pneumoconiotiques et des ouvriers non exposés, valeurs au repos; d'après Worth.

Reichel, qui prend le gradient de fin d'expiration, trouve, pour le CO₂, chez des bronchiteux, une moyenne de près de 10 mmHg. Chez les silicotiques, le même auteur observe un gradient moins important à 4,21 mmHg ; il est vrai qu'il a éliminé de cette série les sujets présentant des troubles obstructifs. Worth, chez les silicotiques, trouve un gradient de CO₂ voisin de 7 mmHg sans différence significative suivant la gravité de la silicose.

Le groupe de Milan (professeur Vigliani) trouve des valeurs semblables pour le gradient artério-alvéolaire de CO₂ chez le mineur silicotique (valeurs moyennes 5,3 mmHg dans les formes micronodulaires et 9,7 mmHg dans les formes pseudo-tumorales).

Il existe une certaine corrélation entre le rapport V'A/V' et le gradient de CO₂, cependant cette corrélation reste lâche.

Worth et collaborateurs ont noté que le gradient d'oxygène était souvent plus élevé chez les mineurs sans silicose que chez les silicotiques.

Le groupe de Bochum a cherché à étudier les échanges respiratoires avec les isotopes d'oxygène en faisant porter leurs études non seulement sur l'air expiré, mais aussi sur le sang artériel.

Test de transfert du CO

Le test de transfert de l'oxyde de carbone, appelé souvent test de diffusion du CO, présente un intérêt indiscutable, tant en clinique qu'en expertise. Malheureusement, le test de CO est loin d'être parfaitement standardisé et sa signification n'est pas encore complètement éclaircie.

Le test de diffusion en apnée inspiratoire a été le premier décrit par Krogh en 1915. Il est basé sur l'hypothèse de départ que l'oxyde de carbone inspiré par un sujet qui reste en apnée inspiratoire, décroît exponentiellement dans les alvéoles. Dans ces conditions, on peut calculer la quantité d'oxyde de carbone passée dans le sang en une minute et par mmHg de différence de pression entre l'alvéole et le sang, ce qui a été défini comme la capacité de diffusion pulmonaire. En réalité, comme l'ont très bien montré les études de Roughton en Angleterre et celle de Bartels et de Moll en Allemagne, la diffusion du CO de l'alvéole jusqu'à l'hémoglobine n'est pas aussi simple que l'avait pensé Krogh et il faut considérer les diverses causes qui séparent l'air inspiré de la surface des hématies, la quantité de sang présente dans les alvéoles, la diffusion dans les hématies elles-mêmes, etc. D'autre part, la détermination des concentrations alvéolaires, au début et à la fin de l'apnée, n'est pas aisée. Pour toutes ces raisons, le test primitivement proposé par Krogh, est, d'une part, devenu un test de transfert et non simplement de diffusion et d'autre part il a dû être rigoureusement standardisé.

La commission ad hoc réunie sur ce problème par la Haute Autorité a conclu que pour mesurer TCO selon la méthode en apnée inspiratoire, il est souhaitable de disposer d'un circuit spirométrique permettant l'enregistrement intégral des volumes et des temps au cours de l'épreuve. Avec de tels appareils, on obtient chez le sujet normal des valeurs reproductibles et il est facile de minimiser les erreurs faites sur la durée de l'apnée et des valeurs normales ont pu être établies par certains laboratoires avec une distribution acceptable. TCO mesuré par cette méthode apparaît relativement

peu sensible aux troubles de distribution ainsi que l'ont montré ses promoteurs en Europe, en particulier Englert et Billiet ; ces auteurs ont mesuré le transfert du CO en apnée sur des asthmatiques après et avant aérosol bronchomodificateur sans observer de discordance importante des résultats. Ayant fait des mesures chez 100 sujets normaux, Englert propose la formule suivante qui tient compte des caractéristiques physique et de l'âge :

Homme $12,19 S - 0,27 \text{ Age} + 18,12$ déviation standard 3,6

Femme $7,7 S - 0,23 \text{ Age} + 18,14$

où S est la surface en m^2 et l'âge est exprimé en années.

Cette formule est peu différente de celle présentée par Billiet.

TCO augmente avec le volume alvéolaire. Pour Englert, cette augmentation est d'un peu moins de 5ml/litre. Pour Cotes, ces variations sont un peu moindres.

La mesure du transfert du CO en régime stable a d'abord été proposée par Filley en calculant la pression partielle de CO dans l'alvéole à partir de la valeur artérielle du CO_2 . Cette méthode de Filley a été pratiquement abandonnée au profit de la méthode de Bates, tout au moins dans les laboratoires européens. Alors que le transfert du CO mesuré en apnée se traduit par une seule variable, avec la technique du régime stable, les auteurs utilisent soit sa mesure TCO, soit TCO rapporté à la ventilation TCO/V' , soit enfin le coefficient de ductance selon le vocabulaire de Lacoste. Ce dernier a l'avantage de ne pas nécessiter la mesure de la pression alvéolaire de CO dans la partie terminale de l'expiration. Cette mesure exige un analyseur à rayonnement à infrarouges répondant rapidement. La valeur du transfert du CO obtenue par cette méthode est fonction de toutes les résistances opposées au CO depuis son inhalation jusqu'à sa combinaison avec l'hémoglobine. On ne prétend donc nullement mesurer l'état fonctionnel de la seule membrane alvéolo-capillaire ou du lit alvéolo-capillaire. La ventilation joue un rôle très important et TCO augmente avec la ventilation alvéolaire. Les inégalités de la ventilation interne influencent la valeur calculée du CO. Finalement, ce TCO régime stable représente un indice global de la fonction respiratoire permettant une évaluation rapide des divers troubles respiratoires. Des valeurs normales sont disponibles à l'heure actuelle pour les sujets de sexe masculin âgés de 30 à 65 ans au repos comme au cours d'un exercice de 50 watts. Le *tableau 7* résume les valeurs proposées par Dechoux et collaborateurs. L'intérêt de la méthode est de ne pas exiger de coopération particulière et de pouvoir être pratiquée au cours de l'exercice. Comme épreuve de triage, TCO en régime stable présente un intérêt certain.

De multiples études comparatives de ces techniques ont été publiées durant ces dernières années en particulier par Visser et Kreukniet. Ces auteurs soulignent bien la difficulté de définir une réelle pression partielle alvéolaire. D'autres études sont actuellement en cours, en particulier à Louvain, Charleroi, Nancy, etc., visant à comparer les relations de ces diverses méthodes et à mieux saisir l'intérêt de chacune. Il est impossible, dans le cadre de cette étude, de donner une idée complète des travaux multiples effectués par les équipes de recherches de la C.E.C.A. sur ce thème.

Pezzagno et ses collaborateurs ont utilisé une méthode de réinspiration du CO qui permettrait, selon eux, d'obtenir des résultats plus précis concernant le volume sanguin capillaire et la diffusion à travers la membrane. Ils disposent de valeurs de référence pour une centaine de sujets normaux et ont étudié la corrélation existant avec la surface corporelle. Ils ont poursuivi leurs études chez plusieurs centaines d'insuffisants respiratoires de type divers.

Tableau 7

Variations du transfert du CO en régime stable chez le sujet sain, selon Dechoux et collaborateurs

D _{CO} au repos					
Groupe d'âge	Age moyen	D _{CO}	D _{CO} /m ²	D _{CO} /V _T	F _{CO}
30-39	36.2	20.3	10.9	2.04	47
Écart type		4.35	2.40	0.52	4.34
40-49	44.3	19.1	10.3	2.02	45.5
Écart type		3.77	1.86	0.45	4.01
50-59	53.4	17.2	9.8	1.80	42.4
Écart type		3.81	1.96	0.48	4.18
60 →	63.4	14.6	8.1	1.51	39.7
Écart type		3.00	1.63	0.37	4.97
D _{CO} à l'exercice de 50 W					
30-39	36.2	32.9	17.6	1.54	43.5
Écart type		6.20	3.35	0.35	4.57
40-49	44.3	31	16.8	1.38	41.3
Écart type		5.69	2.84	0.34	5.36
50-59	53.4	27.9	15.5	1.22	37.9
Écart type		7.53	3.90	0.37	6.35
60 →	63.4	25.6	14	1.06	35.2
Écart type		4.97	2.72	0.32	6.02

Quoique les études des échanges respiratoires aient été très nombreuses durant ces dernières années, au sein des divers laboratoires aidés par la Haute Autorité de la Communauté européenne du charbon et de l'acier, il semble nécessaire de poursuivre les recherches, tant pour aboutir à des conclusions valables sur les techniques de mesure que pour préciser les tables susceptibles de concerner les travailleurs de la C.E.C.A. et en particulier les pneumoconiotiques et les bronchiteux. Les études

communautaires entreprises pour confronter les techniques utilisant l'oxyde de carbone et la mesure des gradients alvéolo-artériels doivent aboutir dans un assez bref délai à des résultats intéressants.

BIBLIOGRAPHIE

Compte rendu de la Commission ad hoc « Échanges respiratoires » – Tests du transfert du CO, Luxembourg, 21 janvier 1965, Doc. n° 3305/65 f.

Billiet L.

De bepaling van de pulmonaire diffusiecapaciteit.
Thèse impr., Louvain, 1965.

Brasseur L.

Comparaison entre les troubles ventilatoires et les modifications des gaz du sang chez des houilleurs pneumoconiotiques en instance de pension.
Rev. Institut Hygiène des Mines, 1963, 18, pp. 63-70.

Détermination de la pression partielle d'oxygène dans le sang. Étude de la technique à la bulle selon Riley.

Rev. Institut Hygiène des Mines, 1961, 16, pp. 102-121.

Crépet M., Gaffuri E., Reggiani A.

La determinazione della capacità di diffusione polmonare del monossido di carbonio nella diagnostica pneumologica.

Lavoro Umano, 1962, 14, pp. 61-72.

Dechoux J., Pivoteau C.

La mesure de la capacité de diffusion alvéolo-capillaire chez le sujet normal et le pneumoconiotique.

J. franç. Méd. Chir. Thor., 1960, 14, pp. 329-335.

Englert M., Denolin H.

La capacité de diffusion pulmonaire et le volume sanguin capillaire dans la sténose mitrale.

Bull. Physio-Pathol. Resp., 1966, 2, pp. 387-397.

Gasthaus L., Muysers K., Siehoff F., Worth G.

Neuere Ergebnisse atemphysiologischer Untersuchungen von Kohlenbergarbeitern unter Berücksichtigung von Silikose, Bronchitis und Emphysem. IV. Mitteilung: Totraum und alveolare Ventilation.

Arch. f. Gewerbepathol. u. Gewerbehyg., 1962, 19, pp. 76-86.

Neuere Ergebnisse atemphysiologischer Untersuchungen von Kohlenbergarbeitern unter Berücksichtigung von Silikose, Bronchitis und Emphysem. VIII. Mitteilung: Die Lage der Sauerstoffbindungskurven.

Arch. f. Gewerbepathol. u. Gewerbehyg., 1965, 21, pp. 276-281.

- Kreukniet J., Visser B.F.**
 Recherche sur la capacité de diffusion du CO chez des patients avec une distribution inégale de la ventilation.
Rev. franç. Études clin. et biol., 1963, 8, pp. 553-558.
- Lacoste J.**
 Modèles mathématiques d'échanges respiratoires.
Bull. Physio-Pathol. Resp., 1966, 2, pp. 133-154.
- Lacoste J., Rouch Y., Rizzo A.**
 Mesures simultanées des coefficients de ductance pulmonaire pour CO₂, O₂ et CO (Homme sain et malade au repos).
Bull. Physio-Pathol. Resp., 1966, 2, pp. 553-567.
- Lacoste J., Carnimeo N., Iaia E., Maiorano V.**
 La gas-cromatografia nello studio della funzione respiratoria.
Minerva Pneumol., 1966, 5, pp. 102-106.
- Maugeri S., Capodaglio E., Pezzagno E.**
 Analisi e interpretazione delle alterazioni dei processi di scambio gassoso a livello alveolo-capillare in pneumopatie croniche.
Minerva Pneumol., 1965, 4, pp. 68-79.
- Muysers K., Siehoff F.**
 Sauerstoff- und Kohlensäurepartialdruck während der Ausatmung bei Bergleuten und nicht-staubexponierten Arbeitern.
Beitr. Silikose-Forsch., 1960, 4, pp. 447-456.
- Auswirkungen von Störungen des respiratorischen Gasaustausches auf die Blutchemie bei Kohlenbergarbeitern.
Beitr. Silikose-Forsch., 1965, 6, pp. 579-585.
- Muysers K., Siehoff F., Worth G.**
 Respiratorischer Gasaustausch von Sauerstoffisotopen.
Beitr. Silikose-Forsch., 1963, 5, pp. 389-395.
- Muysers K., Siehoff F., Worth G., Gasthaus L.**
 Neuere Ergebnisse atemphysiologischer Untersuchungen von Kohlenbergarbeitern unter Berücksichtigung von Silikose, Bronchitis und Emphysem. I. Mitteilung: Das Verhalten der Gase im arteriellen Blut.
Arch. Gewerbepathol. u. Gewerbehyg., 1961, 18, pp. 358-369.
- Neuere Ergebnisse atemphysiologischer Untersuchungen von Kohlenbergarbeitern unter Berücksichtigung von Silikose, Bronchitis und Emphysem. V. Mitteilung: Endexpiratorisch-arterielle Sauerstoff- und Kohlensäuredruckdifferenzen in Ruhe und bei Körperbelastung.
Arch. Gewerbepathol. u. Gewerbehyg., 1962, 19, pp. 589-612.
- Pezzagno G., Salvadeo A., Capodaglio E.**
 Valutazione degli scambi gassosi a livello alveolo-capillare mediante determinazione della capacità di diffusione polmonare per il monossido di carbonio e del volume capillare polmonare.
Minerva Pneumol., 1963, 2, pp. 13-35.

Pham Q.T., Schrijen F., Carbonnel S.

Les gradients alvéolo-artériels chez les malades.
Le Poumon et le Cœur, 1963, 19, pp. 471-488.

Pivoteau C., Dechoux J.

Influence de la ventilation, au repos et à l'effort, sur la capacité de diffusion du CO mesurée par la méthode en régime stable, chez le sujet normal.
J. franç. Méd. Chir. Thor., 1963, 17, pp. 481-497.

Reichel G.

Le gradient alvéolo-artériel de PCO₂ et les gaz du sang artériel dans les troubles restrictifs et obstructifs de la ventilation.
Le Poumon et le Cœur, 1963, 19, pp. 459-470.

Sartorelli E., Baraldi V., Grieco A., Zedda S.

La capacità di diffusione polmonare dei gas nei silicotici. Ricerche con un metodo all'ossido di carbonio.
La Medicina del Lavoro, 1963, 54, pp. 191-200.

Le alterazioni del rapporto ventilazione/perfusione nei silicotici, valutate in base al gradiente arterio-alveolare di Pco₂.
La Medicina del Lavoro, 1963, 54, pp. 524-527.

Serra R., Greve L.H., Visser B.F.

La détermination indirecte de la Paco₂.
Le Poumon et le Cœur, 1960, 16, pp. 947-959.

Siehoff F., Muysers K., Worth G.

Les gradients d'oxygène et de CO₂ de fin d'expiration chez les mineurs au repos, au cours d'un exercice musculaire et pendant la phase de récupération.
Le Poumon et le Cœur, 1963, 19, pp. 449-457.

Siehoff F., Worth G., Gasthaus L., Muysers K.

Neuere Ergebnisse atemphysiologischer Untersuchungen von Kohlenbergarbeitern unter Berücksichtigung von Silikose, Bronchitis und Emphysem. II. Mitteilung: Das Verhalten des Sauerstoff- und Kohlensäurepartialdruckes in der Expirationsluft.
Arch. Gewerbepathol. u. Gewerbehyg., 1961, 18, pp. 479-494.

Ulmer W.T., Berta G., Reichel G.

Sauerstoff- und Kohlensäurepartialdruckmessung im arteriellen und Ohrläppchenkapillarblut mit stabilisierten Mikroelektroden.
Med. thorac., 1963, 20, pp. 235-249.

Ulmer W.T., Hertle F., Reichel G.

Les gradients de Pco₂ alvéolo-artériels, leurs relations avec la position corporelle et l'âge.
Le Poumon et le Cœur, 1963, 19, pp. 369-378.

Ulmer W.T., Reichel G.

Untersuchungen über die Altersabhängigkeit der alveolären und arteriellen Sauerstoff- und Kohlendrucke.

Klin. Wschrft., 1963, 41, pp. 1-6.

Ulmer W.T., Thews C., Reichel G.

Klinische Anwendbarkeit einer mikroanalysenmethode zur Bestimmung des Sauerstoff- und Kohlendruckes im arteriellen Blut aus hyperämisierten Capillaren.

Dtsch. ges. inn. Med., 1963, 69, pp. 670-675.

Visser B.F., Serra R.

Analyse rapide des concentrations respiratoires de gaz carbonique et d'oxygène.

Doc. n° 4776/64, Luxembourg, 1964.

Worth G.

Hypoxie und Silikose als klinisches Problem.

Beitr. Silikose-Forsch., 1965, 6, pp. 505-509.

Worth G., Muysers K., Siehoff F.

Zur Problematik der Normwerte der arteriellen O₂ – und CO₂ – Partialdrucke sowie der alveolo-arteriellen O₂ – und CO₂ – Druckgradienten im Rahmen arbeitsmedizinischer Fragen.

Med. thorac., 1963, 20, pp. 223-234.

Worth G., Gasthaus L., Muyners K., Siehoff F.

Neuere Ergebnisse atemphysiologischer Untersuchungen von Kohlenbergarbeitern unter Berücksichtigung von Silikose, Bronchitis und Emphysem.

Arch. Gewerpatho. u. Gewerbehyg., 1961, 18, pp. 581-595.

D — ERGOSPIROMÉTRIE

L'utilité des épreuves de charge pour l'exploration des possibilités cardio-respiratoires d'un ouvrier n'est plus à démontrer. Parmi ces examens, l'étude des paramètres respiratoires au cours d'un exercice musculaire est largement employée ; les modalités techniques sont extrêmement variables et elles sont rarement les mêmes d'un centre à l'autre. Cette disparité tient d'une part à des difficultés d'appareillage, d'autre part à la complexité des réponses de l'organisme lors d'un exercice musculaire. Ces deux problèmes ont été l'objet de multiples travaux qui seront rapportés dans leurs grandes lignes avant de décrire les diverses techniques, les réponses normales et enfin les modifications entraînées par les pneumoconioses et les bronchopathies chroniques.

I — Appareillage - Variables étudiées

Les ergomètres ont été contrôlés et discutés de façon approfondie par Bonjer et Cara, tandis que les circuits de mesure ont été particulièrement étudiés par le groupe de Haselt, enfin les dosages des acides lactique et pyruvique, ont été envisagés par le groupe du professeur Lequime de Bruxelles.

1° Ergomètres

Bonjer, en liaison avec le comité de normalisation, a effectué une vaste enquête sur les divers types d'ergomètres utilisés dans les pays de la Communauté.

La plupart des ergomètres nécessitent, pour un niveau de puissance donné, une fréquence de pédalage imposé et fixe (*Tableau 8*). Les bicyclettes de Jaeger et de Lohde, ces dernières dérivées du prototype de Lanooy, sont conçues pour permettre une variation de la vitesse de pédalage tout en conservant une puissance constante. Les appareils sont néanmoins munis d'un tachymètre ou d'un signal lumineux permettant d'imposer une vitesse de rotation minimale (40 tours pour un effort de 100 watts par exemple). Les étalonnages ont mis en évidence une influence des variations de fréquence sur la puissance effectivement produite, une variation de 10 tours par minute autour de la fréquence de 60 introduisant une erreur de 4%. En dehors des erreurs liées à l'effet fréquence, la bicyclette de Lanooy est sensible aux variations de température pouvant survenir après un effort de longue durée, l'échauffement du disque en cuivre venant fausser les valeurs indiquées.

Pour les ergomètres à fréquence fixe, l'étalonnage de l'ergostat de Fleisch a montré qu'il existait une bonne corrélation entre la valeur indiquée et la valeur réelle. L'appareil de Müller qui ne comporte pas, comme le précédent, un étalon incorporé n'est pas exempt d'erreurs, celle-ci pouvant dépasser 10% pour les puissances supérieures à 100 watts.

Tableau 8

Caractéristiques des ergomètres décrits		Ergomètre de Lanooy	Ergomètre de Fleisch	Ergomètre de Müller	Ergomètre de Jaeger	Ergomètre de Knipping
Fréquence du pédalier	variable	X				
	constante		X	X		X
Volant d'inertie	insuffisant				X	
	suffisant		X	X		
	largement calculé	X				X
Puissance disponible	0 - 200 W	X	X	X	X	X
	0 - 250 W	X	X	X		X
	0 - 300 W	X	X			X
	0 - 400 W	X				
Augmentation automatique de la puissance		X		X		
Étalon incorporé			X			X

d'après F.H. Bonjer, 1964

Les ergomètres à manivelle type Dargatz, construits sur les conseils de Knipping sont maintenant munis d'un étalon incorporé qui permet leur utilisation correcte.

Certains centres utilisent d'autres procédés de charge. Le step-test est une méthode peu coûteuse, mais faisant intervenir plusieurs facteurs, elle ne permet pas une précision rigoureuse de la puissance développée et ne donne pas de résultats reproductibles.

La marche sur tapis roulant demande un type d'effort plus physiologique, l'intensité de l'effort est déterminée à partir du poids du sujet, de la vitesse et de l'inclinaison du tapis roulant selon une relation simple. Le procédé est difficile à appliquer

chez le sujet âgé car il nécessite une certaine habileté et il a contre lui l'inconvénient d'être cher et lourd.

2° Circuits spirométriques

Les circuits spirométriques employés pour mesurer les volumes et les débits aériens pulmonaires sont rarement adaptés à la mesure de la ventilation au cours de l'exercice. Les circuits fermés non ventilés ne sont pas pourvus d'un dispositif absorbant le CO₂ avec suffisamment d'efficacité. Pour des exercices entraînant la production de 1,5 litre de CO₂/minute (environ 120 watts) les 40 ou 50 ml de CO₂ rejetés à chaque expiration ne sont souvent que très imparfaitement retenus par la chaux sodée, il y a donc réinspiration de CO₂ ou rebreathing. D'autre part, dans les spiromètres non ventilés, les soupapes sont souvent défectueuses, entraînant une résistance anormale ou également des phénomènes de réinspiration.

Circuits fermés ventilés

L'introduction d'un ventilateur dans un circuit fermé ne signifie pas nécessairement une amélioration de l'épuration en CO₂, il faut encore que le débit assuré par la turbine soit suffisant. Il doit rincer la totalité de l'espace mort entre la fin de l'expiration et le début de l'inspiration, c'est-à-dire en moins d'un dixième de seconde. Un débit inférieur à celui de l'expiration ou de l'inspiration risque de gêner la ventilation du sujet examiné.

L'épuration en anhydride carbonique du circuit doit être rapide et complète ; ceci ne dépend pas de la présence et des caractéristiques d'une turbine mais de la surface d'absorption. Pour les débits de CO₂ supérieurs à 2 litres/minute, la chaux sodée n'est plus satisfaisante et la potasse est généralement préférée. De tels débits commandent un système de refroidissement, la fixation du CO₂ par la soude ou la potasse étant fortement exothermique.

Enfin, dans un circuit fermé, le gaz inspiré doit conserver une teneur constante en oxygène. Le remplacement de l'oxygène consommé est effectué à partir d'un obus d'oxygène dont la pureté n'est jamais rigoureuse, il en résulte un appauvrissement progressif de l'air du circuit en oxygène. Lors d'un exercice à puissance élevée, ou lorsque plusieurs examens sont pratiqués consécutivement sans rinçage du circuit, la concentration inspiratoire d'oxygène (FIO₂) s'abaisse parfois dans des proportions importantes. Par exemple, si l'oxygène employé contient 0,01 d'impuretés, le FIO₂ passe de 0,209 à 0,195 à la 20^e minute d'un exercice de 200 watts, effectué au metabographe de Fleisch. Pour cette raison, les utilisateurs du metabographe de Fleisch ajoutent souvent en dérivation un analyseur de Pauling qui permet de vérifier FIO₂ constamment.

Parmi les avantages des circuits fermés, s'inscrit la possibilité de vérifier continuellement plusieurs paramètres : ventilation, fréquence, consommation d'oxygène. Certains appareils indiquent à des intervalles de temps choisis la valeur de ces diverses variables ainsi que celle du CO₂ et du quotient respiratoire par exemple, en ramenant ces volumes gazeux aux conditions habituelles : BTPS pour les volumes ventilés, STPD pour les gaz échangés oxygène et CO₂.

Une étude critique du métabographe de Fleisch avait déjà été ébauchée lors du précédent programme par le groupe de Hasselt, elle a été complétée et le même groupe a étudié les difficultés de la mesure en circuit ouvert.

Circuits ouverts

Le principe du circuit ouvert est extrêmement simple. Le sujet inspire l'air ambiant et rejette son air expiré dans un réservoir, généralement un sac de toile caoutchoutée ou de plastique appelé sac de Douglas. La séparation entre air inspiré et air expiré est assurée par un système de soupape. La récolte de l'air inspiré est effectuée pendant un temps rigoureusement mesuré et ensuite le sac de Douglas ou le réservoir sont vidés à travers un compteur spirométrique ou dans une cloche de Tissot. La composition du gaz expiré peut être déterminée de façon précise par l'analyse chimique des gaz généralement effectuée à l'aide de l'appareil de Scholander. Enfin, la fréquence respiratoire est comptée pendant une période de temps donnée ou bien enregistrée à l'aide d'un pneumographe.

Un tel dispositif est économique et peu encombrant ; il peut être employé aussi bien dans un laboratoire de recherche sur les lieux mêmes du travail. Par contre, le dispositif du circuit ouvert comprend un certain nombre d'inconvénients qui ne sauraient être minimisés. Il commande l'emploi de l'embout buccal et du pince-nez, l'interposition d'un masque ajoutant un espace mort considérable qui fausserait les résultats. Le dispositif de soupape implique un espace mort qui, sur certains appareillages, dépasse 100 ou 150 cm³, c'est-à-dire qu'il est considérable. Les soupapes opposent au passage du gaz une certaine résistance à laquelle viennent s'ajouter les résistances éventuellement opposées par les tuyaux de caoutchouc (faible diamètre, rétrécissement, coudures ou crénelures) ou le déplissement du sac vide.

Ces objections ne sont pas d'un intérêt uniquement théorique, les mesures de J.D. Moreau et de Brasseur ont montré que la résistance du circuit ouvert pouvait entraîner d'importantes erreurs. Ces auteurs à l'Institut d'Hygiène des mines de Hasselt ont soumis 60 houilleurs à des efforts successifs d'intensité identique en étudiant les échanges respiratoires, d'une part en circuit fermé par le métabographe de Fleisch, et d'autre part en circuit ouvert avec une valve de Collins et un sac de Douglas. La différence entre la consommation d'oxygène et le rejet de CO₂ n'était pas significative, par contre, la fréquence et le débit ventilatoire, les équivalents respiratoires pour l'oxygène et le CO₂ étaient nettement plus élevés en circuit fermé et ces différences étaient significatives. Elles atteignaient pour la fréquence 8,5 %, pour le débit ventilatoire 5,2 % ; pour les équivalents respiratoires à l'oxygène et au CO₂, les auteurs belges observaient 6,3 % et 6,8 % respectivement. Ces modifications des paramètres respiratoires s'accompagnaient de perturbation des gaz du sang. Pour un groupe de 48 sujets, la moyenne des saturations oxyhémoglobiniées s'établissait à 95,7 % en circuit fermé, celle des P_aCO₂ à 37,6 mmHg, tandis qu'en circuit ouvert la moyenne s'abaissait pour la saturation de 1,6 et s'élevait pour la P_aCO₂ de 0,5. Ces différences étaient significatives au point de vue statistique. Chez certains sujets, l'abaissement de la saturation oxyhémoglobinée était particulièrement accusée, on relève par exemple dans cette série une saturation oxyhémoglobinée de 97 % en circuit fermé qui s'abaisse à 89,5 % en circuit ouvert, tandis que la P_aCO₂ passe de 42 mmHg à 45 mmHg. La résistance du circuit employé était cependant relativement modeste,

il s'agissait de résistance avant tout expiratoire atteignant 4,5 cm d'eau pour un débit de 2 l/sec et 10 cm d'eau pour un débit de 3 l/sec.

Lamur et collaborateurs à Liège, ajoutant sur un circuit des résistances un peu plus élevées puisque de 5 cm d'eau pour 1 l/sec et de 15 cm d'eau 2 l/sec, n'observaient pas de chutes marquées de la saturation oxyhémoglobinée avant d'atteindre un niveau supérieur à celui utilisé par le groupe de Hasselt. Mais il faut souligner que dans le premier cas, il s'agissait d'ouvriers mineurs, tandis que dans le second il s'agissait de sujets sains qui n'avaient été soumis à aucun risque professionnel et étaient généralement plus jeunes.

Ainsi l'utilisation d'un circuit ouvert offrant des résistances même peu importantes risque de fausser les résultats et ceci d'autant plus qu'il s'agit de sujets à la limite du pathologique. On peut résumer ces travaux en disant qu'une augmentation des résistances au niveau du circuit respiratoire entraîne une diminution du débit ventilatoire avec réduction de la fréquence ventilatoire et dans certains cas des modifications non négligeables des gaz du sang. Ces perturbations ne sont pas observées avec un circuit fermé de bonne construction, ni avec un circuit ouvert convenablement étudié.

L'emploi d'un circuit ouvert étant nécessaire pour les études de Poste, il n'est pas inutile de préciser les caractéristiques d'un circuit ouvert satisfaisant. La soupape doit être une soupape à faible résistance et à grand débit, la soupape mise au point par Dejours s'est avérée satisfaisante. Elle a un espace mort de 50 cm³ et la perte de charge, pour un débit voisin de 150 l, n'atteint pas 1 cm d'eau. Le passage à travers le robinet à 3 voies doit se faire directement et non pas à angle droit. Ce robinet à trois voies ne doit pas comprendre d'étranglement. Enfin, entre la soupape ventilatoire et le sac où l'air expiré sera recueilli, le tuyau interposé doit être court et d'un diamètre supérieur à 30 mm, les parois doivent être lisses et non chenillées comme l'avait déjà indiqué Cara autrefois. Au sac de Douglas, à soufflets, qui oppose une certaine résistance, on préférera un sac en néoprène latex léger et à parois minces du type ballon météorologique. Avec ce circuit ouvert amélioré, étudié par Brasseur, la résistance est très minime, pour un débit continu de 150 l/mn elle ne dépasse pas 1,25 cm d'eau à l'expiration. Ce débit de 150 l/mn de référence est celui qui doit être retenu lorsque l'on veut utiliser un tel dispositif pour des exercices effectués à une puissance de 120 watts.

3° Paramètres

Paramètres cardiovasculaires

La fréquence cardiaque est couramment mesurée au cours des tests d'exercice soit continuellement, et dans ce cas un électrocardiographe avec dérivations thoraciques est habituellement employé, soit de façon discontinue par simple prise manuelle du pouls. Sous la direction du professeur Denolin, l'équipe travaillant dans le service Lequime étudie aussi le débit cardiaque par les colorants, l'électrocardiogramme et la pression partielle.

La détermination du débit cardiaque et du débit systolique au cours de l'effort est faite par la méthode de Stewart-Hamilton. Deux mesures de débit cardiaque sont

pratiquées au repos, la fréquence cardiaque étant déterminée à partir d'un électrocardiogramme. Le sujet est ensuite soumis à trois niveaux d'effort de 40, 70 et 100 watts. Deux mesures de débit cardiaque sont effectuées à chaque palier dès que la consommation d'oxygène est stable vers la 5e ou 7e minute. Appliquée chez 41 sujets, la méthode est satisfaisante à 6,4 % près en moyenne. Dans 13 cas, la méthode a été confrontée avec les résultats de la méthode de Fick et la différence est en moyenne de 8,5 %. L'électrocardiogramme enregistre les dérivations CR₂, CR₄ et CR₅, le bras droit étant utilisé comme référence. Chaque onde R entraîne la décharge quasi instantanée d'un condensateur couplé avec l'électrocardiogramme, chaque déflexion ainsi enregistrée étant directement proportionnelle à la fréquence cardiaque. Rosenkranz et Drews fixent 4 électrodes précordiales en V₁, V₃, V₅, V₆ et une électrode indifférente et V_L au niveau du dos à l'aide de deux sangles caoutchoutées, les membres restant libres. Le tracé est enregistré d'abord au repos puis en continu toutes les 30 secondes et lors de la récupération chaque minute pendant 5 minutes.

La pression artérielle peut être mesurée par la méthode auscultatoire ou même directement par voie intra-artérielle. A l'effort, la mesure est souvent difficile pour apprécier les bruits de la diastolique qui peuvent disparaître.

Paramètres sanguins

L'oxymétrie transcutanée a été abandonnée par tous, mais plusieurs groupes de recherche utilisent un trocart de Courmand-Riley placé dans l'artère humérale pour recueillir du sang artériel et procéder à des bilans répétés. Ulmer préconise l'utilisation de microprélèvements inférieurs au 1/10 cm³ au niveau du lobule de l'oreille hyperémié.

Les variables les plus couramment étudiées sont les gaz du sang, pressions d'oxygène et de gaz carbonique. Le CO₂ est déterminé en général par voie indirecte à partir du pH et du contenu total plasmatique ou sanguin du CO₂. La Pao₂ est mesurée directement à l'électrode. Certains étudient aussi l'évolution de l'acide lactique dans le sang artériel. En effet, si au cours du repos l'acide lactique veineux est souvent un peu plus élevé que l'acide lactique artériel, au cours de l'exercice la lactacidémie artérielle s'élève plus rapidement et ce n'est qu'après 10 ou 15 minutes que les deux taux s'égalisent. Lorsque la lactacidémie est élevée, l'égalisation ne se produit pas pendant l'effort, mais à un moment variable de la récupération (Denolin). Il y a avantage à faire porter la mesure sur le plasma, le taux plasmatique étant plus élevé que celui du sang total. La méthode enzymatique a l'avantage d'être simple et rapide. Des séries de mesures en double font penser à Denolin que la pression de cette technique est satisfaisante pour le dosage de l'acide lactique au cours de l'exercice, les variations observées étant toujours largement supérieures aux erreurs liées à la méthode elle-même. Selon le même auteur, les résultats obtenus ne seraient pas significativement différents de ceux fournis par la technique de Barker et Summerson, quoique cette dernière donne souvent des valeurs un peu plus élevées. Visser utilise la technique de Barker modifiée par Ström (1949). L'auteur cherche une corrélation entre l'acide lactique ainsi dosé et le taux calculé à partir des variations de la concentration bicarbonatée pendant l'exercice. L'étude porte sur 67 pulmonaires chroniques effectuant une épreuve de 100 watts sur cyclergomètre.

In vivo, la concordance numérique est bonne entre les variations de l'acide lactique artériel pendant l'effort et les variations mesurées des bicarbonates métaboliques.

In vitro, par contre, la réponse des ions HCO_3 après addition d'une certaine quantité d'acide lactique est toujours inférieure numériquement à la quantité d'acide ajoutée. L'élévation du taux d'acide pyruvique à l'effort ne serait pas suffisante pour expliquer ces différences. Les variations de la concentration en bicarbonates corrigées ou non de la composante respiratoire permettent de déduire les variations d'acide lactique à l'effort : $\Delta \text{acide lactique} = 0,33 - 0,97 (\Delta \text{CO}_3 - t - 0,18 \Delta \text{Pco}_2)$ avec $r = 0,81$. Le taux d'acide lactique pouvant ainsi être calculé à partir du pH : $\Delta \text{acide lactique} = 1,8 - 40,2 \Delta \text{pH}$.

Le dosage de l'acide pyruvique est un peu plus délicat car celui-ci est instable même si l'on travaille à basse température. Cependant, le groupe bruxellois pense qu'il ne faut pas pour autant ajouter des substances inhibant la transformation d'acide pyruvique en acide lactique (fluorure, cyanure de potassium ou iodoacétate). Ajoutant une quantité connue d'acide pyruvique à du sang, il la retrouve par dosage enzymatique à ± 5 p. 100 près.

Pour ces prélèvements artériels, on peut utiliser soit le trocart original de Cournaud-Riley, soit le trocart en téflon avec aiguille et mandrin métallique qui en dérive. Ce dernier dispositif permet au sujet examiné de faire quelques mouvements au cours du cathétérisme artériel sans risque de se blesser mais il est plus délicat à mettre en place que l'instrumentation construite entièrement en métal.

Autres variables considérées

Le gradient alvéolo-artériel de CO_2 a été pris en considération par les auteurs allemands, Worth et collaborateurs d'une part et Ulmer et collaborateurs d'autre part. Dans ce cas, il importe évidemment de disposer d'analyseurs à CO_2 par l'infrarouge, dont la réponse soit très rapide et il est logique de tenir compte de la PACO_2 de fin d'expiration.

Le transfert du CO par la technique en régime stable (Dechoux et Pivoteau) peut aussi être mesuré au cours de l'exercice mais ici encore la rapidité de l'analyseur va jouer un rôle essentiel. Ces faits sont discutés à propos des tests au CO.

II – Modalité des divers tests ergospirométriques

Pour déterminer l'aptitude à l'effort et pour mesurer les réponses de l'organisme aux nouvelles conditions métaboliques, de nombreuses combinaisons sont possibles qui varient largement d'un centre à un autre. Les différents types d'effort ont été longuement discutés lors des Entretiens de Nancy en 1962 et analysés dans l'enquête de Bonjer.

Les épreuves de courte durée, ne nécessitant qu'un appareillage simple, recherchent grossièrement la réponse de l'organisme à une charge fixée dans son intensité et dans sa durée. La puissance est habituellement fixe et ne tient pas compte des résultats d'autres investigations (spirographie par exemple). Les épreuves de longue durée recherchent l'obtention d'un état d'équilibre de façon à juger des possibilités d'adaptation de l'organisme à une épreuve d'endurance. Les différentes combinaisons entre

puissance imposée et durée de l'exercice peuvent être représentées sous forme de schémas géométriques permettant de suivre le déroulement de l'épreuve dans le temps.

Dans l'épreuve dite rectangulaire, le sujet effectue un travail à puissance constante pendant une durée fixée et qui varie suivant les laboratoires de 10 à 20 minutes. Des épreuves sous-maximales à charge unique maintenues pendant 15 à 20 minutes permettant de suivre les paramètres respiratoires ($V'O_2$, V' , ERO_2) biologiques (pH, métabolites acides, saturation oxyhémoglobinée, pressions partielles d'oxygène et de gaz carbonique) et circulatoires. Dans certains cas complexes, l'évaluation directe du débit cardiaque est nécessaire pour juger de l'aptitude à l'effort.

La notion de puissance maximale supportée (PMS) développée à Nancy depuis une dizaine d'années correspond à l'exercice le plus intense pouvant être maintenu pendant 20 minutes, l'état d'équilibre étant apprécié sur la ventilation. Sa détermination nécessite des épreuves répétées, la puissance étant augmentée de 20 watts à chaque exercice.

Les épreuves dites en paliers successifs ne sont intéressantes que si la durée de chaque niveau de puissance est suffisamment longue, pour qu'un stade d'équilibre ventilatoire puisse être apprécié chaque fois. L'examen conduit dans ces conditions, en une seule séance à la détermination de la PMS. Les épreuves triangulaires qui dérivent des précédentes procèdent par une succession de charges croissantes mais trop courtes pour permettre un état stable.

Aussi faut-il distinguer entre les épreuves en régime stable telles que les épreuves rectangulaires et à paliers longs et les épreuves sans régime stable qu'elles soient ou non de courte durée. Cette notion d'état stable est diversement appréciée selon les centres, la tolérance à l'effort pouvant être jugée sur les seules données ventilatoires (V' et ERO_2) plus rarement sur des modifications circulatoires ou biologiques. Le groupe de Hasselt, dans une étude portant sur 60 mineurs en expertise, effectuant une épreuve d'effort sur tapis roulant standardisée à 120 watts, pendant 10 minutes, étudie l'évolution des paramètres respiratoires au cours des 6 dernières minutes de l'effort. La consommation d'oxygène est pratiquement stabilisée à la 6e minute. Pour d'autres paramètres, on constate une augmentation significative du QR, du rejet de CO_2 , du débit ventilatoire et de la fréquence respiratoire. Les travaux de Sadoul et collaborateurs ont montré que pour des efforts de cette importance la période d'adaptation pouvait demander 10 minutes chez le sujet moyennement entraîné.

Une commission ad hoc réunie en 1964 a décidé de considérer 2 types d'épreuves dans le cadre des recherches de la C.E.C.A. :

d'une part, une épreuve simple et rapide, de débrouillage, de type triangulaire, augmentant de 10 watts toutes les minutes et débutant à 60 watts,

d'autre part, une épreuve plus longue, rectangulaire, dans un but clinique, couplée à des études ventilatoire, cardiocirculatoire et biologique.

Résultats

La comparaison avec les données de la littérature est rendue difficile par la diversité des méthodes utilisées, du choix des sujets examinés et du mode d'expression des résultats. En effet, les réponses ventilatoires dépendent du degré d'entraînement

des sujets, de leur âge, de la position adoptée sur l'ergomètre, de l'intensité de l'effort exprimé en kg/m, en watts ou en consommation d'oxygène, de la durée de l'effort et des critères adoptés pour l'état stable.

1°) Réponses normales

Les réponses physiologiques, à côté des données ventilatoires, ont été étudiées au niveau du sang artériel et par l'évolution des paramètres cardiovasculaires.

Données respiratoires et sanguines

Brasseur étudie la fonction respiratoire de 16 sujets normaux pendant la 10e minute d'une effort de 120 watts en position couchée sur l'ergostat de Fleisch. Le circuit respiratoire est un circuit ouvert. Les mêmes ouvriers effectuent ensuite un effort de 150 watts durant 20 minutes sur tapis roulant avec respiration en circuit fermé.

La ventilation pour un effort de 120 watts est de $40,54 \pm 5,34$ l/m, l' ERO_2 est de $24,8 \pm 3,2$. Au cours de l'effort sur tapis roulant, l'auteur note une augmentation significative de la ventilation si l'on considère les moyennes de la 7e à la 10e minute (34,50 l/m) et de la 16e à la 20e minute (35,50 l/m), mais l'état stable est estimé atteint dès la 11e minute. La consommation d'oxygène est plus importante pendant l'effort sur bicyclette que sur tapis roulant. Cette constatation incite à la prudence dans la comparaison des données recueillies au cours d'exercices sur des ergomètres différents. Bobbert à Leiden, comparant entre eux différents tests ergométriques, trouve que pour une même puissance imposée, la consommation d'oxygène et la ventilation sont plus élevées pour un effort effectué à la manivelle que pour ceux effectués sur un bicyclette ou sur le tapis roulant.

Le centre de physiopathologie respiratoire de Nancy a poursuivi ses recherches dans l'évaluation de la capacité de travail par la détermination de la PMS.

L'adaptation de l'organisme aux niveaux énergétiques élevés sous l'influence de l'entraînement physique a été recherchée. Des épreuves ergospirométriques de 20 minutes à puissance constante ont été réalisées chez des individus sains non entraînés (21 sujets), dont la PMS est supérieure à 140 watts et chez 17 sportifs dont la PMS est supérieure à 170 watts. La consommation d'oxygène augmente dans les deux groupes de façon linéaire avec la puissance imposée, mais elle est plus élevée chez les non entraînés (1574 ml/m) contre 1476 ml chez les sportifs. L' ERO_2 augmente avec la puissance imposée, mais il est en moyenne toujours plus élevé chez les sujets non entraînés alors que la fréquence ventilatoire des deux groupes est non différente.

L'évolution des gaz du sang au cours de l'effort a été étudiée dans un certain nombre de laboratoires notamment à Bochum et à Moers.

Les résultats enregistrés par Friehoff au Bergmannsheil chez des sujets sportifs ou sains non entraînés viennent apporter des renseignements utiles pour interpréter les résultats observés chez les silicotiques. Dans les deux groupes, la PaO_2 s'abaisse légèrement en même temps que la PAO_2 s'élève, le gradient alvéolo-artériel passant de 6,6 à 17,3 mmHg au cours de la 8e minute d'un effort de 120 watts. Chez aucun des sujets, il n'a été noté d'hypoxémie à l'effort.

Ulmer insiste sur l'importance de l'évolution de la P_{aO_2} chez le sujet normal au cours de l'effort. C'est très précocement vers la 3^e minute de l'exercice que des modifications peuvent apparaître, les valeurs pouvant s'abaisser autour de 90 à 92 mmHg pour les sujets de moins de 30 ans jusqu'à 72 mmHg pour des ouvriers entre 50 et 60 ans, mais l'intervalle de variation très large au repos, s'amenuise au cours de l'effort.

Worth étudie les valeurs des gaz artériels et alvéolaires chez des ouvriers sains non exposés et chez des mineurs exposés mais indemnes de signes radiologiques pour juger de l'influence éventuelle d'une inhalation prolongée de poussières, de gaz ou de vapeurs sur les paramètres gazométriques. L'effort est réalisé sur l'ergomètre de Lohde (125 watts). La P_{aO_2} est en moyenne de 80 mmHg pour la classe d'âge de 50 à 60 ans chez les ouvriers non exposés. Les mineurs présentent des valeurs sensiblement plus basses (respectivement 67 et 65 mmHg avant et après 50 ans). La pression d'oxygène artérielle est donc nettement affectée par l'âge des sujets, elle diminue en moyenne de 2,9 mmHg par décennie. Le gradient alvéolo-artériel d'oxygène augmente par décennie de 5,1 mmHg. Par contre, l'âge est sans influence au niveau des deux groupes sur la P_{aCO_2} et sur gradient de CO_2 . Il n'existe pas de différence entre les deux groupes au repos et à l'effort.

Reichel et Breidenbach, à Bochum, arrivent à des conclusions identiques. Le gradient alvéolo-artériel d'oxygène est plus nettement élevé chez les sujets exposés de longue date que chez des sujets sains témoins mais aucune corrélation n'est trouvée entre les valeurs de la P_{aO_2} et la durée de l'exposition au risque.

La signification de la lactacidémie à l'effort a été particulièrement étudiée par le groupe de Denolin. Dans le but de standardiser les épreuves d'effort, les auteurs belges ont déterminé le taux d'acide lactique pour une même consommation d'oxygène selon que l'effort est effectué d'emblée sous une charge importante ou par paliers progressifs. Les résultats montrent que les phénomènes métaboliques sont moins intenses si les charges sont imposées progressivement. Lorsque la charge est constante et importante, l'acide lactique s'élève dès le début de l'effort, parfois dès la 30^e seconde pour augmenter linéairement jusqu'à la 3^e minute. L'évolution ultérieure de la courbe de la lactacidémie dépend ensuite de la tolérance à l'effort. Si l'effort est bien supporté, le taux d'acide lactique décroît à partir de la 10^e minute pour revenir à son niveau initial même lorsque l'effort est très prolongé. En cas d'effort mal toléré, l'acide lactique s'accroît sans cesse jusqu'à la fin de l'effort.

La pyruvicémie semble évoluer plus lentement que le taux d'acide lactique au cours d'un effort constant. Des études sur la détermination de la quantité d'acides organiques libérés pendant l'effort ont été poursuivies par Deenstra. Le rapport acide lactique/acide pyruvique est directement dépendant de la pression d'oxygène. Si celle-ci vient à diminuer sous l'effet de l'effort, le rapport est modifié dans le sens d'une superproduction d'acide lactique.

Évolution des paramètres cardio-circulatoires

L'adaptation cardio-vasculaire au cours de l'effort a été étudiée de manière approfondie par le groupe de Bruxelles.

La fréquence cardiaque est un paramètre facile à mesurer et sert de base aux tests d'effort les plus courants. Chez le sujet normal, soumis à un effort d'intensité constante, le pouls grimpe rapidement pour atteindre un plateau après 4 ou 5 minutes. Si l'épreuve est de type triangulaire, la fréquence cardiaque croît linéairement avec la charge imposée à la consommation d'oxygène.

Les auteurs à la suite des travaux suédois ont standardisé une épreuve permettant d'évaluer la capacité de travail à partir des données de la fréquence cardiaque sous le nom de C.T. 170. La fréquence de 170 a été choisie car elle est voisine de celle qui correspond théoriquement à la consommation maximale d'oxygène. L'effort est accompli sur un cyclergomètre et les charges imposées augmentent de 150 kgm à chaque palier de 5 minutes. Trois charges sont en général nécessaires pour extrapoler à 170. La fréquence cardiaque est déterminée à partir d'un électrocardiogramme enregistré pendant les 30 dernières secondes de chaque niveau d'effort. Les auteurs trouvent une excellente concordance entre les résultats de la CT 170 et les données de l'anamnèse chez 50 sujets normaux âgés de 18 à 50 ans. Degre et Denolin ont étudié d'autre part deux méthodes qui utilisent les valeurs de la fréquence cardiaque au cours de la phase de récupération, cette période étant souvent prise en considération dans les tests en médecine sportive.

Le pouls moyen de récupération consiste à mesurer l'évolution du pouls pendant les trois premières minutes de récupération et à établir la moyenne de ces trois chiffres. On ne doit accorder à cette épreuve qu'une valeur de dépistage pour différencier les sujets capables d'une activité modérée (pouls moyen > 125/minute) de ceux aptes à une activité lourde (pouls moyen < 125/minute), l'effort demandé étant réalisé par trois paliers de 5 minutes de 300, 450 puis 600 kgm/m.

Le demi-temps de récupération est obtenu à partir des valeurs de la fréquence cardiaque à la dernière minute de l'effort et pendant les six premières minutes de récupération. Mais ce paramètre est sans valeur, les auteurs n'ont pas trouvé de concordance entre les résultats du test et l'aptitude physique de référence chez 34 sujets.

Le débit cardiaque et le débit systolique ont été mesurés par la même équipe chez 35 sujets normaux effectuant un effort sous-maximal assis sur une bicyclette jusqu'à une consommation d'oxygène de 1,7 l/m. Les auteurs trouvent un accroissement linéaire du débit cardiaque et proposent une formule de régression à partir de ces données : $DC \text{ (l/min)} = 6,1 V'O_2 \text{ (l/min)} + 4,43$. Le débit systolique s'accroît de 30 % à l'effort, dans la même série, par rapport à la valeur de repos pour une consommation d'oxygène de 1 l/min. pour ne plus être modifié ensuite par des efforts plus intenses. L'élévation de la fréquence cardiaque évolue alors parallèlement à l'accroissement du débit cardiaque et à la consommation d'oxygène.

La mesure de la pression artérielle ne présente qu'un intérêt mineur dans la détermination de la capacité physique du sujet normal. La pression systolique de l'artère humérale s'élève dès le début de l'effort puis se stabilise à un niveau qui est fonction de l'intensité de la charge. Pour des efforts croissants il n'y a pas de parallélisme entre l'accroissement de la charge et l'élévation tensionnelle.

2°) Résultats chez les malades

De nombreux travaux ont étudié les variables enregistrées pendant l'effort chez des pneumoconiotiques et chez des pulmonaires chroniques pour évaluer globalement la fonction cardio-respiratoire de ces sujets. Certains laboratoires se sont attachés à comparer les renseignements fournis par l'épreuve d'effort à ceux obtenus à partir des méthodes analytiques d'exploration fonctionnelle. Le groupe de Hasselt discute la valeur des critères généralement retenus pour apprécier l'invalidité d'origine respiratoire à partir des résultats des épreuves d'effort. Les paramètres respiratoires sont enregistrés au métabographe de Fleisch au cours d'un effort de 120 watts durant 20 minutes sur le tapis roulant chez 16 ouvriers de surface et 87 houilleurs silicotiques aux divers stades, âgés de moins de 45 ans et encore en activité. L'absence de régime stable ventilatoire n'est pas retenue par les auteurs comme un critère d'incapacité d'origine pulmonaire. L' ERO_2 est statistiquement augmenté dès le stade micronodulaire et augmente avec l'aggravation de la pneumoconiose mais la différence entre pseudo-tumoraux et sujets normaux est toutefois peu importante. Pour ces auteurs, l' ERO_2 augmente avec l'effort mais il peut être normal en cas de troubles fonctionnels indiscutables. Le sang artériel à l'effort permet de découvrir une désaturation sans hypercapnie chez des mineurs encore en activité ne présentant pas de plainte pulmonaire. Les diminutions de la Pao_2 significatives dès le stade 2p, augmentent de fréquence avec l'évolution de l'image radiologique. Des Pao_2 inférieures à 70 mmHg ne sont fréquentes que chez les pseudo-tumoraux. Pour Lavenne, la désaturation artérielle à l'effort doit être considérée comme le principal critère d'invalidité pour les malades au stade B et C (Tableau 9).

Tableau 9

Image radiologique	Nombre total de sujets examinés	$\text{Pao}_2 < 85 \text{ mmHg}$ à l'effort	
		Nombre de cas	%
O	16	0	0
Z + 1	18	1	5,5
2 (p et m)	27	7	25,9
3 (p, m et n)	26	13	50,0
A + B + C	30	26	86,6

La même équipe compare les résultats des épreuves d'effort chez des ouvriers encore en activité par rapport à ceux enregistrés chez des ouvriers pensionnés. L'étude porte sur 120 houilleurs silicotiques âgés de 35 à 45 ans encore au travail et sur 22 ouvriers de surface de même âge, et d'autre part sur 65 mineurs invalides pensionnés et 6 pseudo-tumoraux au stade terminal de l'affection. Tous les sujets effectuent après une spirométrie une épreuve de 120 watts en position couchée sur le cyclergomètre de Fleisch puis une marche de 20 minutes sur tapis roulant entraînant une consommation d'oxygène de 1400 à 1500 ml/min. Chez les ouvriers encore au travail, la Pao_2 et le gradient alvéolo-artériel d'oxygène sont pratiquement identiques

chez les ouvriers témoins de surface et chez les silicotiques aux stades 2 et 1. Dans le groupe des invalides on ne trouve une rétention de CO_2 à l'effort que lorsque le VEMS est inférieur à 1200 ml. Enfin, les stades terminaux de la pneumoconiose entraînent une hyperventilation alvéolaire à l'effort par le développement de troubles bronchiques et d'emphysème.

J.D. Moreau du même institut étudie les symptômes subjectifs et la fonction pulmonaire de 175 houilleurs vus en expertise, comparés à 79 volontaires. Une marche sur tapis roulant est imposée (120 watts) jusqu'au moment où la ventilation n'augmente plus pendant 3 minutes consécutives. L'étude montre qu'une relation semble exister entre l'existence d'une polypnée ($f > 30$) d'effort et la cessation de travail, 60,4 % des non-volontaires sont polypnéiques contre 46,1 % des volontaires. Cette polypnée paraît liée à l'hyperventilation. En effet, 82 % des non-volontaires et 73,5 % des volontaires ont un ERO_2 supérieur à 30 et une fréquence ventilatoire supérieure à 30. La fréquence de l'hyperventilation et de la polypnée d'effort semble augmenter avec la perte d'entraînement.

La même remarque quant au sous-entraînement est faite par le groupe de Denolin en ce qui concerne les répercussions métaboliques et cardiaques de l'effort des 50 mineurs silicotiques à lésions radiologiques minimales, en instance de pension. L'hyperventilation est présente chez 25 %. L'acidose métabolique d'effort est constante, mais la relation qui unit cette acidose à l'hyperventilation est encore mal éclaircie. Le bilan fonctionnel pratiqué chez des mineurs en expertise, et par conséquent en conditions de non-entraînement, risque de surestimer le degré d'incapacité si on prend des critères de normalité obtenus à partir des résultats chez des sujets normaux bien entraînés physiquement.

Les mêmes auteurs recherchent une éventuelle corrélation entre les modifications métaboliques au niveau de l'acide lactique et l'évolution des paramètres ventilatoires et circulatoires enregistrés au cours de l'effort. 86 sujets exposés effectuent un effort de 100 watts en position assise sur une bicyclette ergométrique. Les sujets sont répartis en deux groupes homogènes selon la tolérance à l'effort évaluée à partir des critères ventilatoires. Les résultats biologiques montrent l'absence d'une relation serrée entre le taux de la lactacidémie et l'hyperventilation. Pour un même taux d'acide lactique, on peut observer des ERO_2 variant du simple au double et pour un même ERO_2 les valeurs de l'acide lactique peuvent être très variables (Fig. 8). A la fin de l'effort il n'existe qu'un lien lâche entre l'acide lactique et la pression partielle de CO_2 .

Les efforts mal supportés ne s'accompagnent pas nécessairement d'un taux élevé d'acide lactique, tous les critères ventilatoires d'un effort mal supporté peuvent être réunis sans que les perturbations métaboliques puissent expliquer les troubles notés. D'autre part, toutes les caractéristiques d'un effort bien supporté peuvent rester stables au long de l'exercice et ceci malgré l'apparition d'une acidose métabolique. Les auteurs trouvent un certain parallélisme entre la fréquence cardiaque et la lactacidémie. Pour les fréquences élevées, l'acide lactique est souvent très augmenté, au delà de 60 mg/100 ml. Les variations individuelles du débit cardiaque pour un effort de même intensité sont grandes. Chez les sujets supportant mal l'effort, le débit cardiaque est diminué et la différence est significative mais l'acidose métabolique

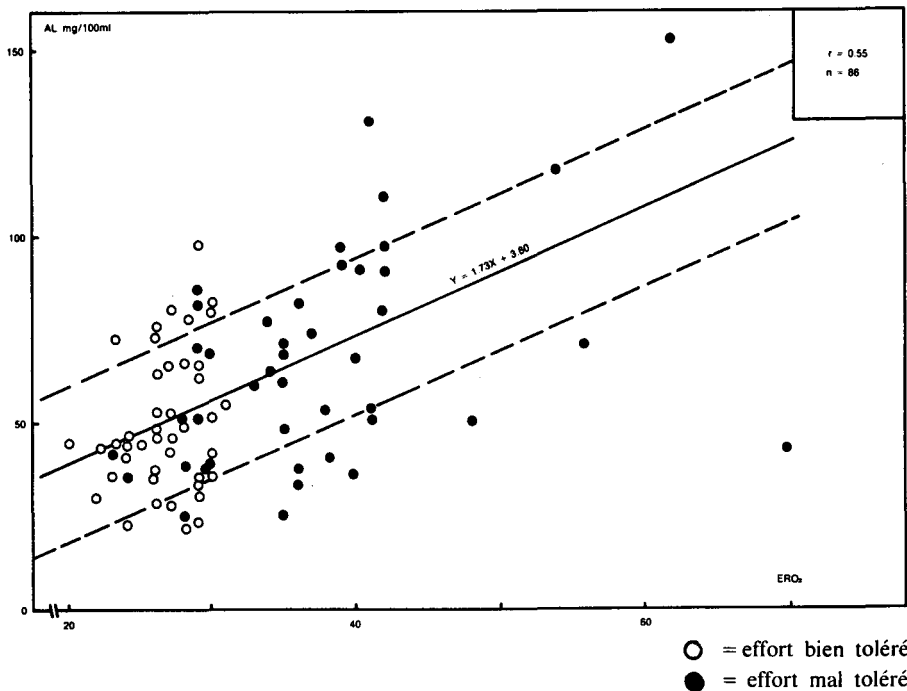


Fig. 8 — Corrélation entre le taux d'acide lactique plasmatique artériel et l'ERO₂, d'après De Coster.

n'est pas liée au débit cardiaque mesuré à l'état d'équilibre et ne dépend pas de la valeur du débit systolique, ni de la différence artério-veineuse.

Le groupe de Moers, dans le cadre de l'exploration fonctionnelle des mineurs atteints de silicose, de bronchite chronique et d'emphysème, étudie au niveau du sang d'effort les répercussions des troubles de l'oxygénation sur l'équilibre acido-basique. Les auteurs étudient divers métabolites sanguins, les pressions partielles d'oxygène et de gaz carbonique au repos et après un effort standard de 125 watts sur la bicyclette de Lanooy chez 212 mineurs, silicotiques pour la plupart et chez 46 ouvriers non exposés d'âge équivalent. Lors de l'effort les bicarbonates standards et les bases tampons s'abaissent, les lactates et les pyruvates augmentent chez tous les sujets de façon plus marquée chez les sujets âgés entre 50 et 60 ans. La différence de l'augmentation du taux des lactates pendant l'effort n'est pas significative entre les mineurs avec ou sans silicose et les ouvriers non exposés. Les valeurs de la Pao₂ et de la Paco₂ sont plus basses chez les mineurs que chez les sujets non exposés. L'élévation plus importante des lactates, des excès de lactate, chez les mineurs, est mise sur le compte d'une diminution de la distribution périphérique d'oxygène périphérique sans faire intervenir une diminution de la saturation oxyhémoglobinée, de la capacité en oxygène. Le fait d'observer une augmentation de l'acide pyruvique d'autant plus importante que la Pao₂ est basse suggère que la pression partielle d'oxygène au niveau

des tissus est fondamentale et que sa diminution entraîne un nouvel état d'équilibre avec l'augmentation des produits d'échanges anaérobiques.

Le Laboratoire de Nancy précise l'intérêt et les limites des épreuves d'effort sur plus de 200 malades pneumoconiotiques et bronchiteux comparés à 82 sujets sains entraînés ou non. Les fréquences respiratoires relevées pour chaque sujet au niveau de sa puissance maximale supportée (Fig. 9) montrent que les normaux ne présentent

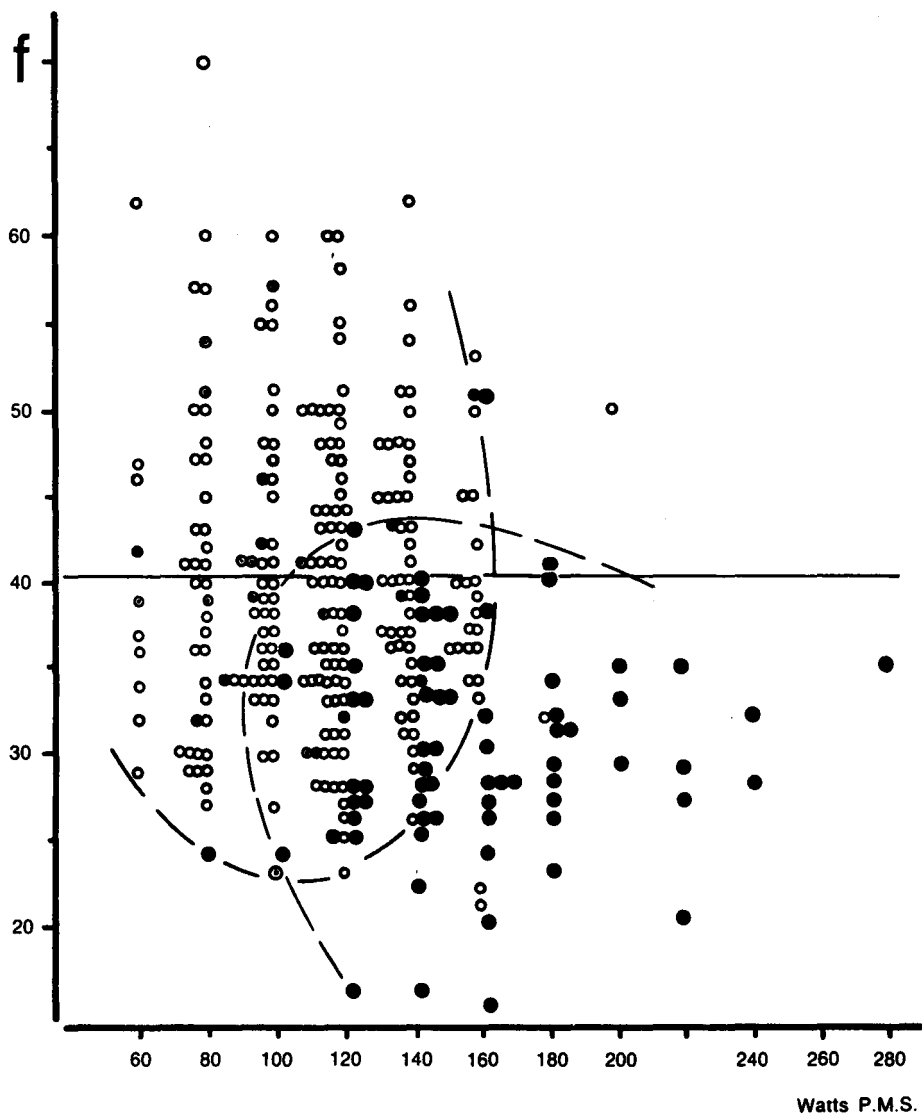


Fig. 9 — Fréquence ventilatoire des cinq dernières minutes de la PMS chez 82 sujets sains (●) et chez 216 malades pneumoconiotiques (○) tuberculeux et bronchiteux (⊙); selon Lacoste.

que très exceptionnellement une fréquence respiratoire supérieure à 40/minute, sans que le QR soit pour autant supérieur à 1. L'élévation de l'ERO₂ est constante au cours de l'épreuve d'effort et dépasse habituellement 30. Cette élévation est surtout nette chez les malades qui ont une PMS basse. Comme chez le sujet sain, la PMS doit être appréciée sur un tracé suivant un faisceau d'arguments, en tenant compte de l'élévation de la fréquence respiratoire, de l'augmentation de l'ERO₂ (supérieur à 32), de la valeur du QR qui se rapproche ou dépasse l'unité, de la fréquence cardiaque qui met souvent longtemps à croître et qui plafonne, et de l'allongement des périodes d'adaptation et de récupération.

A côté du rôle de la PMS comme méthode globale dans un bilan fonctionnel, les mêmes auteurs soulignent son rôle pronostique à côté des autres méthodes explorant la fonction cardio-respiratoire. Les valeurs de la PMS de 126 handicapés respiratoires sont confrontées avec l'activité professionnelle de ces sujets durant les 3 à 5 dernières années. Lorsque la PMS est égale ou supérieure à 120 watts, l'ouvrier peut maintenir sans difficulté un travail lourd. Si la PMS est plus basse, égale ou inférieure à 80 watts les ouvriers ne sont capables que d'un travail léger ou sédentaire. Dans les cas, où la PMS est nettement diminuée, il existe une bonne corrélation entre la PMS et les gaz du sang. Robin, dans sa thèse à Nancy, confronte les valeurs des gaz du sang et la PMS chez 58 sujets pneumoconiotiques. Chez 10 d'entre eux, la PMS est supérieure à 120 watts et aucun n'a d'anomalie des gaz du sang artériel lors d'un exercice de 40 watts. Chez les 23 mineurs dont la PMS est plus basse, comprise entre 80 et 100 watts, on trouve une désaturation oxyhémoglobinée chez 7 d'entre eux pour un effort de même intensité et 3 malades sont hypercapniques. Chez les 17 sujets dont la PMS est inférieure à 80 watts, 5 sont désaturés au repos et 4 au cours de l'exercice.

L'étude chimique du sang, au cours d'une épreuve correspondant à la PMS montre une importante acidose de type métabolique, le pH s'abaissant de près de 0,05 unité et le CO₂ total de plus de 10 volumes à la vingtième minute. Pavlov et Gualdi étudiant ce phénomène chez 12 silicotiques et 6 sujets normaux ne trouvent pas de différence significative au niveau de l'acidose pour les 2 groupes alors que la ventilation chez les malades est supérieure à 35 % en moyenne à celle des sujets normaux.

Le groupe de Crépet à Padoue étudie la capacité de travail de mineurs silicotiques et de bronchiteux chroniques en évaluant le coût métabolique d'une épreuve sur bicyclette ergométrique. Parmi 46 silicotiques âgés de moins de 45 ans et atteints de formes micronodulaires vus en expertise, 15 % ne supportent pas une charge au delà de 5 Cal/min et 30 % montrent une incapacité jugée sur les critères ventilatoires pour une charge de 3 Cal/min. 41 bronchiteux sont soumis à des charges ne dépassant pas 5 Cal/min (70 watts), compte tenu de l'âge qui dépasse en moyenne 50 ans, et l'effort n'est pas tenu par 40 % d'entre eux.

J. Dechoux à Créhange étudie depuis quelques années le transfert du CO à l'effort pour évaluer la capacité de travail des mineurs. TCO est déterminée au cours d'une épreuve d'effort de 50 watts à charges croissantes. L'auteur trouve une corrélation entre ce paramètre rapporté à la surface corporelle (TCO/S) et la PMS déterminée sur une bicyclette ergométrique sur plus de 500 mineurs avec ou sans pneumoconiose (Fig. 10).

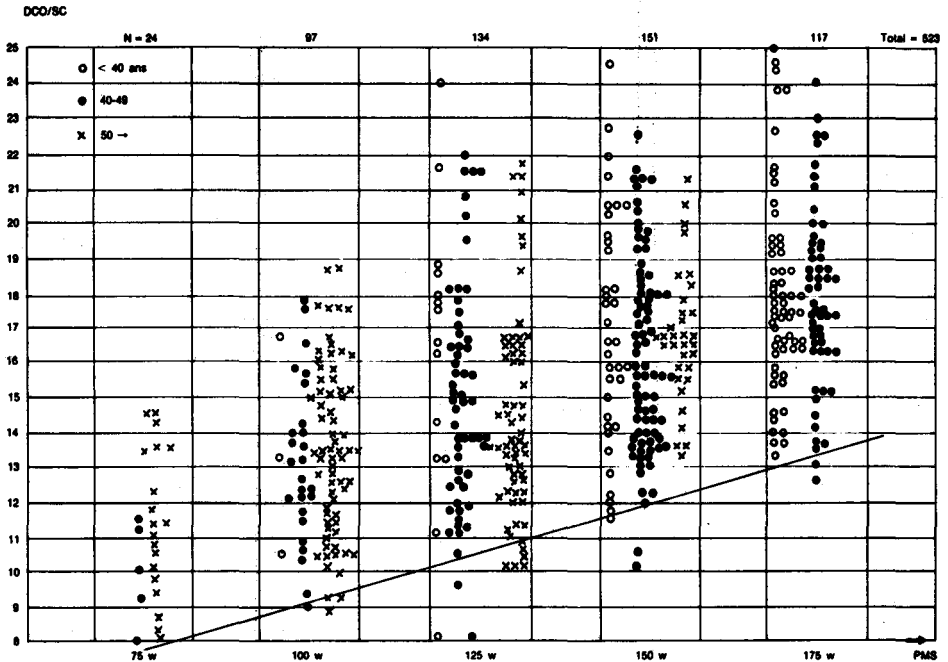


Fig. 10 — Corrélation DCO et PMS chez 523 mineurs, d'après Dechoux.

III — Normalisation des épreuves d'effort

Les membres de la commission de normalisation de la C.E.C.A. réunie au Luxembourg en 1966 ont décidé de normaliser les épreuves d'effort en précisant deux types d'épreuves ergométriques : celles destinées à la clinique et permettant une analyse physio-pathologique, et celles destinées au dépistage. Les conditions de l'épreuve ont été standardisées. Le choix de l'appareillage s'est porté sur la bicyclette ergométrique mais celle-ci doit être correctement étalonnée. L'effort est réalisé en position assise, le sujet pédalant à une fréquence voisine de 60 tours par minute. Le circuit de mesure spirométrique, fermé ou ouvert, est laissé au libre choix de l'utilisateur, mais les résistances du circuit et la composition de l'air inspiré en ce qui concerne l'oxygène et le gaz carbonique doivent être contrôlés soigneusement.

Pour réaliser une épreuve d'effort, la température ambiante ne devra pas dépasser les valeurs de 15° et 24°C pour un degré hygrométrique de 30 à 60 %. L'alimentation ne sera pas modifiée la veille de l'épreuve. L'examen sera pratiqué 2 à 4 heures après un repas léger.

En médecine du travail, une épreuve trapézoïdale progressive a été proposée. Une progression par paliers de 30 watts toutes les 3 minutes est recommandée. La valeur de la charge initiale à appliquer et la fin de l'épreuve sont fixées par l'opérateur selon l'état clinique du sujet et la manière dont il supporte l'effort. Avant l'épreuve, il est recommandé de compléter l'examen clinique par un examen électrocardiographique. Lors de l'exercice, le sujet doit être surveillé cliniquement et contrôlé sur le plan

physiologique par l'étude des paramètres facilement mesurables, ventilatoires (f , V' , $V'O_2$, ER_{O_2}) et cardiocirculatoires (pouls, tension artérielle et électrocardiogramme). L'apparition d'une douleur précordiale, d'une cyanose, un changement dans le tracé électrocardiographique, une élévation anormale de la tension artérielle ou de la fréquence cardiaque imposeront l'arrêt.

En clinique, la durée et l'intensité de l'épreuve seront choisies en fonction des buts physio-pathologiques recherchés. L'épreuve de type rectangulaire sera faite sur une durée d'au moins 7 minutes et il est recommandé de choisir une valeur de la puissance égale à un multiple de 20 watts (60, 80 watts, etc.). Pour mesurer en régime stable la ventilation, la consommation d'oxygène, le débit cardiaque, le rejet de gaz carbonique, une durée d'au moins 10 minutes semble nécessaire. Ces épreuves cliniques doivent être contrôlées sur le plan gazométrique artériel. L'accord n'est pas encore fait sur les variables sanguines à mesurer et sur les valeurs « normales » à retenir. En ce qui concerne l'acide lactique et l'acide pyruvique, différentes enquêtes ont montré que les méthodes de dosage sont souvent peu vérifiées et donnent des résultats douteux.

Pour interpréter les épreuves, trois sortes de réponses ont été considérées.

Les réponses de première catégorie correspondent à l'effort toléré : par exemple l'incrément par minute pour un effort croissant de 10 watts/minute dans une épreuve trapézoïdale est pour Nissardi :

Pouls	$V'O_2$	$V'CO_2$	V'
5	0,10	0,08-0,12	1,5

et en régime stable pour un effort de 120 watts, on peut citer les valeurs obtenues par Durand : $V'O_2$: $1,8 \pm 2 \sigma$ et $V' = 42$ l/minute.

Les réponses de deuxième catégorie correspondent à l'effort non toléré. Pour juger de la tolérance à l'effort, Bonjer et Nissardi accordent une grande valeur sur le plan graphique aux angles formés par les valeurs croissantes de la charge et la fréquence cardiaque ou de la ventilation en fonction du temps.

Enfin, les réponses de troisième catégorie montrent une limite pour un effort maximum. On ne dispose encore que de très peu de données statistiques, sauf en ce qui concerne la consommation d'oxygène.

BIBLIOGRAPHIE

Bobbert A.

Physiological comparison of three types of ergometry.

J. Appl. Physiol., 1960, 15, pp. 1007-1014.

Energy expenditure in level and graded walking.

J. Appl. Physiol., 1960, 15, pp. 1015-1021.

Bonjer F.H.

Étude comparative des épreuves d'effort utilisées pour l'examen des mineurs silicotiques dans divers instituts des pays de la C.E.C.A.

Doc. n° 4537/66 f.

Brasseur L.

Effets de la résistance du circuit de prélèvement de l'air expiré sur la ventilation et les gaz du sang au cours de l'effort.

Rev. Inst. Hygiène, Hasselt, 1961, 16, pp. 242-250.

Fonction respiratoire, au repos et à l'effort de sujets « normaux » travaillant en surface dans les charbonnages.

Rev. Inst. Hygiène, Hasselt, 1961, 16, pp. 262-280.

Brasseur L., Degueldre G., Moreau J.D., Tremouroux J.

Mise au point d'un circuit ouvert peu résistant pour le prélèvement des gaz expirés.

Rev. Inst. Hygiène, Hasselt, 1961, 16, pp. 251-261.

Crépet M., Gaffuri E., Picotti G.

La capacità di lavoro dei pneumopatici cronici.

La Medicina del Lavoro, 1962, 53, pp. 81-64.

De Coster A., Messin R., Denolin H.

Acide lactique, pouls et électrocardiogramme au cours de l'ergospirométrie.

Poumon et Coeur, 1963, 19, pp. 633-639.

Répercussions métaboliques et cardiaques de l'effort chez les anthraco-silicotiques.

Rev. Inst. Hygiène Hasselt, 1964, 19, pp. 5-20.

De Coster A., Messin R., Denolin H., Englert M.

Aspects fonctionnels des anthraco-silicoses micromodulaires.

Lille Médical, 1963, 8, pp. 1164-1183.

De Coster A., Messin R., Degré S., Denolin H.

Acidose lactique et comportement cardio-respiratoire au cours de l'effort physique.

Bulletin Physio-Pathol. Resp., 1963, 2, pp. 105-119.

Dalloz A., Perrin L.F., Brune Mme.

Étude des résultats d'une épreuve d'effort standard chez les silicotiques en fonction des différents examens cliniques et biologiques et de l'enquête professionnelle.

Arch. Mal. Profes., 1960, 21, pp. 524-530.

Dechoux J., Pivoteau C.

Test à l'oxyde de carbone en régime stable et capacité de travail.

Bull. Physio-Pathol. Resp., 1966, 2, pp. 189-197.

Degré S., Denolin H.

Étude de l'aptitude physique par détermination de la fréquence cardiaque au cours de l'effort et pendant la période de récupération.

Acta Cardiologica, 1965, 20, pp. 17-26.

Denolin H., Messin R., Degré S., Vendernoten P., De Coster A.

Adaptation cardio-circulatoire au cours de l'effort musculaire, aspects physiologiques et applications pratiques.

Acta Cardiologica, 1966, 21, pp. 653-709.

Groh H. (von), Drasche H.

Zur Energetik der Krankengymnastik.

Zeitschr. f. Biologie, 1964, 114, pp. 421-440.

Friehoff F.

Der Gasaustausch bei gesunden Männern unter Ruhebedingungen und während körperlicher Arbeit.

Plügers Arch., 1960, 270, pp. 431-444.

Der Gasaustausch bei Silikose.

Beitr. Silikose Forsch., 1961, 72, pp. 1-20.

Lacoste J., Robin H., Badouin R.

L'ergospirométrie chez les malades.

In 5e série Entretiens de physio-pathologie respiratoire, Nancy, 1962, pp. 53-93.

Lavenne F., Brasseur L.

Exploration fonctionnelle à l'effort en vue de l'évaluation de l'invalidité d'origine respiratoire chez les houilleurs.

Rev. Inst. Hygiène, Hasselt, 1964, 19, pp. 21-26.

Évolution des troubles fonctionnels respiratoires des houilleurs.

Rev. Inst. Hygiène, Hasselt, 1966, 21, pp. 194-211.

Moreau J.D.

Exploration fonctionnelle à l'effort. Comparaison des méthodes en circuit ouvert et en circuit fermé.

Inst. Hyg. Mines, Hasselt, 1961, 16, pp. 175-192.

Évolution des paramètres respiratoires au cours de l'effort.

Rev. Inst. Hygiène, Hasselt, 1963, 18, pp. 15-19.

Moreau J.D., Belayew D.

Symptômes subjectifs et fonction pulmonaire des houilleurs en expertise et de volontaires encore au travail.

Rev. Inst. Hygiène, Hasselt, 1963, 18, pp. 187-202.

Pavlov B., Gualdi G.

Équilibre acido-basique au cours de la puissance maximale supportée chez les malades.

Poumon et Coeur, 1967, 23, pp. 147-154.

Peslin R., Robin H., Heran J., Reichart Ed.

Ergospirométrie, techniques et résultats chez l'homme sain.

In 5e Série, Entretiens de physio-pathologie respiratoire, Nancy, 1962, pp. 1-52.

Peslin R., Petrella A.

Échanges respiratoires au cours d'un exercice à puissance constante chez des sportifs et chez des sujets non entraînés.

Giornale di Pneumol., 1964, 5, pp. 499-505.

Reichel G., Breidenbach F.

Die Lungenfunktion von staubbelasteten Bergarbeitern ohne röntgenologische Silikose in Ruhe und bei Belastung.

Med. Thorac., 1962, 19, pp. 92-108.

Robin H.

La ventilation et les échanges chez les pneumoconiotiques. Leur étude au repos et au cours de l'exercice musculaire.

Thèse dact. Paris, 1966, 175 p.

Rosenkranz K.A., Drews A.

Über eine modifizierte Ableitungsmethode zur Registrierung von Brustwandelektrokardiogrammen während dosierter körperlicher Belastung. *Zeitschrift f. Kreislaufforschung, 1964, 53, pp. 615-618.*

Sadoul P., Heran J., Arouete A., Grieco B.

Valeur de la puissance maximale supportée, déterminée par des exercices musculaires de 20 minutes pour évaluer la capacité fonctionnelle des handicapés respiratoires.

Bull. Physio-Pathol. Resp., 1966, 2, pp. 209-222.

Ulmer W.T., Berta G., Reichel G.

Sauerstoff- und Kohlensäurepartialdruckmessung im arteriellen und Ohrläppchenkapillarblut mit stabilisierten Mikroelektroden.

Med. Thorac., 1963, 20, pp. 235-249.

Visser B.F., Kreukniet J., Maas A.H.J.

Increase of whole blood lactic acid concentration during exercise as predicted from pH and P_{CO_2} determinations.

Pflügers Arch., 1964, 281, pp. 300-304.

Worth G., Gasthaus L., Muysers K., Siehoff F.

VII - Mitteilung: Säure-Basen-Gleichgewicht.

Int. Archiv. für Gewerbepathologie u. Gewerbehygiene, 1964, 20, pp. 604-613
et Zur Klinik der „Frühsilikose“.

Beiträge Silik. Forsch., 1964, 83, pp. 1-63.

Worth G., Muysers K., Siehoff F.

Zur Problematik der Normwerte der arteriellen O_2 - und CO_2 - Partialdrucke sowie der alveolo-arteriellen O_2 - und CO_2 .

Druckgradienten im Rahmen arbeitsmedizinischer Fragen.

Med. Thorac., 1963, 20, pp. 223-234.

SERVICE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

14 662/2/68/1