

→ L. Fréville (1), P. Martin (1),
S. Métropolyt (2),
avec la collaboration technique de
D. François, P. Marsan, M. Villa (1)

(1) Service Evaluation et prévention
du risque chimique, INRS, Nancy.
(2) Centre des services informatiques,
INRS, Nancy.

Réalisation d'un banc d'essais automatisés pour les pompes individuelles de prélèvement

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC TEST BENCH FOR PERSONAL SAMPLING PUMPS

This paper describes an automatic test bench developed by the INRS to test the reliability of personal sampling pumps used for industrial hygiene purposes.

This automated system helps to increase the efficiency of pump testing in order to anticipate breakdowns and carry out preventive maintenance. It is designed to test five pumps simultaneously, at flow rates between 0.8 and 3 l.min⁻¹, and comprises two modules:

- one applies different pressure drop time sequences in order to study flow regulation efficiency;
- the other is a battery charger-tester.

A software programme controls the tests and monitors pump operating parameters (flow rate, pressure drop, battery power and discharge current), and provides flow stability graphs after each test (maximum duration 8 hours). The test bench is a prototype which could be improved upon in the light of the feedback received from users.

● personal sampling ● sampling pump ● test bench ● automation ● occupational exposure

Description d'un banc de tests automatisés, développé par l'INRS pour contrôler la fiabilité de pompes individuelles de prélèvement utilisées en hygiène du travail.

Ce système automatisé permet d'augmenter l'efficacité des tests de contrôle des pompes, afin d'anticiper les pannes et d'effectuer des opérations de maintenance préventive. Il est conçu pour tester cinq pompes simultanément, dans une gamme de débit comprise entre 0,8 et 3 l.min⁻¹, et est composé de deux modules :

- l'un permet d'appliquer, à chaque pompe, différentes séquences temporelles de pertes de charge, afin d'étudier l'efficacité de la régulation du débit de la pompe ;
- l'autre est un chargeur-testeur de batteries.

Un logiciel commande l'ensemble des tests et assure le suivi informatique des paramètres de fonctionnement des pompes (débit, perte de charge, tension et courant de décharge des batteries). Il propose en particulier, après chaque test d'une durée maximale de 8 heures, des graphiques de stabilité du débit.

Ce banc de test est un prototype qui pourra évoluer ultérieurement en fonction des remarques des utilisateurs.

● pompe de prélèvement ● prélèvement individuel ● banc d'essai ● automatisation ● exposition professionnelle

Les pompes individuelles d'échantillonnage sont utilisées en hygiène du travail pour effectuer des prélèvements d'atmosphères. Elles permettent d'évaluer l'exposition des salariés aux substances toxiques, gaz, vapeurs ou aérosols présents sur les lieux de travail.

En général, ces pompes sont à débit constant. Elles sont alimentées par des batteries nickel-cadmium et sont conçues pour maintenir un débit constant pendant la durée d'un poste de travail. Afin de tester leur fiabilité, l'INRS effectue des tests manuels en laboratoire toutes les 100 heures d'utilisation : ils permettent de contrôler l'état des batteries ainsi que la stabilité du débit de prélèvement. Mais ces tests sont coûteux en temps et ne permettent pas toujours d'anticiper les pannes. Une automatisation permettrait d'augmenter la rapidité, la performance des tests et de recueillir des informations utiles à la maintenance : ce sont en effet les conclusions des travaux de Ménard et coll. [1].

A partir de leur expérience et des essais décrits pour le contrôle des pompes et des

batteries [2 à 4], un système automatisé a été développé à partir d'un cahier des charges, défini en collaboration avec les utilisateurs. Il s'agit d'un banc de tests permettant de contrôler 5 pompes simultanément. C'est un prototype qui pourra évoluer ultérieurement.

1. Cahier des charges

1.1. Partie pneumatique des pompes

Les pompes individuelles de prélèvement ont des débits compris entre 10⁻³ et 5 l.min⁻¹.

Les débits les plus fréquemment utilisés lors de prélèvements en entreprises se situent entre 0,8 et 3 l.min⁻¹. C'est cette gamme qui est retenue pour le prototype.

Les pompes possèdent un système de régulation automatique pour maintenir un débit constant, dans une plage de pression

et de température. Les supports de prélèvement ou dispositifs d'échantillonnage doivent présenter une perte de charge dans les limites spécifiées par le fabricant. La perte de charge maximale généralement admissible est de 100 mbar (tableau I).

Le fonctionnement des pompes peut être altéré en cas de dépassement des plages de variations admises pour la pression et la température, en présence d'une humidité relative importante ou d'une atmosphère très polluée. Les problèmes rencontrés sont alors des arrêts intempestifs, des encrassements et surtout des instabilités de débit.

Afin de garantir le bon fonctionnement des pompes, des tests sont effectués périodiquement. Certains sont rapides à réaliser et ne nécessitent aucune automatisation. Il s'agit de contrôles visuels permettant de nettoyer ou remplacer les membranes, ainsi que des tests manuels :

- L'étanchéité de la pompe est vérifiée après obturation de l'orifice d'entrée. La pompe doit s'arrêter quelques secondes.
- Le courant d'alimentation du moteur est vérifié de manière non automatisée : le courant ne doit pas varier au-delà d'une

certaine limite fixée par le fabricant, sinon la régulation de la pompe peut être altérée.

Par contre, le test de stabilité du débit nécessite un contrôle automatique pour gagner du temps et recueillir des informations sur les variations de débit pendant une période de fonctionnement pouvant varier jusqu'à 8 heures. Pour réaliser ce test, les pompes doivent fonctionner à partir d'une alimentation stabilisée, afin de s'affranchir des problèmes liés aux batteries en mauvais état. Puis différentes pertes de charges sont appliquées à chaque pompe, permettant de vérifier automatiquement que les débits ne varient pas plus de $\pm 5\%$ du débit initial [5].

1.2. Batteries

Elles sont généralement constituées de plusieurs accumulateurs nickel-cadmium 1,2 V. Lors des prélèvements d'atmosphères sur les lieux de travail, ces accumulateurs ne sont souvent que partiellement déchargés puis rechargés aussitôt. Ils présentent alors un effet mémoire qui peut engendrer des chutes de tension à la décharge [2].

Il faut donc porter une attention particulière aux phénomènes de décharge et charge des accumulateurs, de façon à optimiser leur temps de fonctionnement.

Les batteries doivent être contrôlées par un chargeur-testeur qui effectue des cycles de décharge-charge, de façon à éliminer l'effet mémoire [2]. Si une batterie est restée longtemps inutilisée ou si elle est neuve, il est utile d'envisager des cycles de décharge-charge [6]. La dernière charge est pulsée, c'est-à-dire maintenue à son niveau optimum grâce à des impulsions aux fréquences indiquées par le fabricant. La capacité de la batterie est ainsi en principe améliorée, sa valeur est calculée par le chargeur-testeur. La capacité est un indicateur permettant de prévenir le vieillissement d'une batterie. A titre d'exemple, si la capacité de la batterie ne dépasse pas 80 % de la capacité initiale après 4 cycles de décharge/charge, la batterie est éliminée [1]. Le chargeur-testeur sélectionne les batteries en bon état en tenant compte de ce critère. Un historique des capacités dans le temps peut être réalisé afin de comparer les valeurs obtenues à celles fournies par le fabricant [7].

Le chargeur-testeur doit permettre également de tester différents types d'accumulateurs, Ni-Cd (nickel - cadmium), Ni-MH (nickel - hydrure métallique), acceptant des courants de charge plus forts et doit offrir à l'utilisateur la possibilité de programmer les courants et temps de charge en fonction du type de batterie.

1.3. Traitement des données

Deux systèmes de gestion des données sont mis en place : l'un pour le module de tests pneumatiques, l'autre pour le module de contrôle des batteries. Les tests associés aux deux modules sont indépendants mais peuvent se faire simultanément pour faciliter l'utilisation du banc de tests. Les deux modules sont pilotés à l'aide d'un micro-ordinateur et d'un logiciel qui a été développé d'après les critères suivants :

- L'utilisateur programme, pour chaque voie, une séquence de différentes pertes de charges qu'il souhaite appliquer à la pompe. A chaque valeur est associée une durée d'application.
- Une courbe de débit en fonction de la perte de charge peut être visualisée en temps réel. La fréquence des acquisitions est de l'ordre de la seconde.
- A chaque instant, l'utilisateur peut connaître l'état des batteries (en charge ou en décharge) et leurs tensions nominales.
- Les données sont stockées sur disque dur. Un tableau récapitulatif des résultats

TABLEAU I

PERTES DE CHARGE MAXIMALES ADMISSIBLES À L'ASPIRATION -
MAXIMUM ALLOWABLE PRESSURE DROPS DURING SUCTION

Pompe	Perte de charge (mbar)	Débit (l.min ⁻¹)	Température d'opération
Gillian HFS 113	51	2	- 20 + 45 °C
Gillian HFS 513	100	2	- 20 + 45 °C
Gillian Gilair 5	100	2	- 20 + 45 °C
Gillian gilair	63	2	- 20 + 45 °C
Ametek Mg4	76	2	0 + 50 °C
SKC PCXR7	100	2	- 20 + 45 °C
MSA Flow-lite ET	51	2	- 10 + 45 °C

TABLEAU II

CRITÈRES RETENUS POUR L'AUTOMATISATION DES TESTS DE POMPES -
CRITERIA ADOPTED FOR PUMP TEST AUTOMATION

Module pneumatique	Module des batteries
1. Débits de 0,8 l.min ⁻¹ à 3 l.min ⁻¹	1. Cycles de décharge-charge
2. Applications de différentes pertes de charges, maximum 100 mbar	2. Programmation des courants et temps de charge
3. Mesures de débit, perte de charge	3. Indication de l'état de la batterie
4. Alimentation stabilisée des pompes	4. Calcul de la capacité

permet de distinguer les pompes en état de fonctionnement et celles nécessitant une opération de maintenance.

Le cahier des charges est résumé dans le [tableau II](#). En complément des tests décrits précédemment, la norme NF X 43-282 [5] prévoit d'étudier l'influence de la température et de la résistance mécanique sur la stabilité du débit. Ces tests ne sont pas actuellement retenus dans la réalisation du prototype, mais peuvent être ajoutés ultérieurement.

2. Réalisation

2.1. Module de tests pneumatiques

Ce module est représenté sur la [figure 1](#). Cinq pompes de prélèvement y sont connectées.

2.1.1. Choix techniques

La pompe à tester est raccordée au module de tests pneumatiques pour chaque voie selon la [figure 2](#).

Le module de tests pneumatiques comprend pour chaque voie une vanne modifiant la perte de charge, un capteur de débit et une carte débitmètre assurant la gestion des données. Le capteur de débit et la vanne sont placés en amont de la pompe.

Le capteur de débit est un orifice calibré de diamètre 1,25 mm. La mesure de débit est effectuée par mesure de pression différentielle. Ce système de mesure a été choisi de façon à introduire une faible perte de charge dans le circuit. La perte de charge minimale mesurée, lorsque la vanne est entièrement ouverte, est de 3 mbar à 1 l.min⁻¹. Une sonde de température, placée dans le capteur de débit, permet de corriger les valeurs de débit en fonction de la température, en appliquant la loi des gaz parfaits.

D'après la [figure 2](#), la perte de charge totale en amont de la pompe est ($P_a - P_p$). Elle est calculée à partir des valeurs de pressions différentielle et absolue données respectivement par le capteur de débit et le capteur de pression absolue P_a , unique pour les 5 voies. La vanne permet de modifier cette perte de charge totale jusqu'à 100 mbar pour des débits compris entre 0,8 et 3 l.min⁻¹. Son diamètre de passage est de 3 mm.

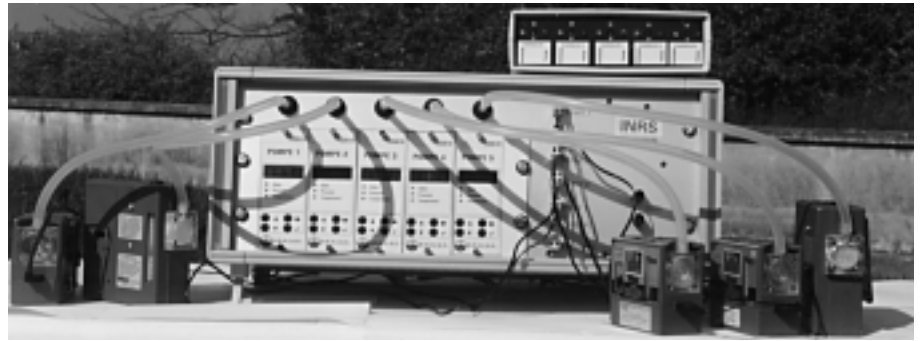


Fig. 1. Le module de tests pneumatiques et le chargeur-testeur de batteries
- The pneumatic test module and battery charger-tester

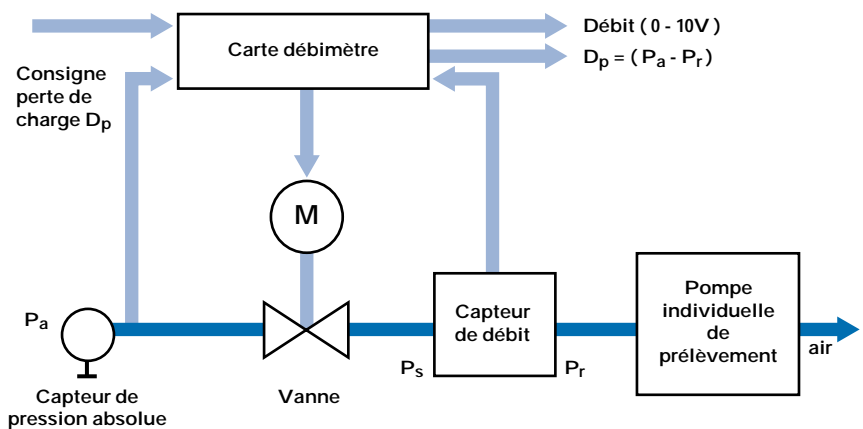


Fig. 2. Ligne de tests pour une voie
- Test line for one channel

La carte électronique associée au capteur de débit collecte les informations en tension (0-10 V) correspondant à la consigne de perte de charge D_p . Les valeurs de débit et de perte de charge réelle ($P_a - P_p$) sont restituées en sorties analogiques (0-10 V). D'autres cartes électroniques rassemblent les informations provenant de l'ensemble de ces capteurs et assurent en particulier le calcul du débit et le pilotage des vannes.

2.1.2. Fonctionnement

Le débit des pompes doit être préalablement réglé de façon manuelle avant d'effectuer les tests. Les pompes sont ensuite positionnées sur des supports spécifiques pour être alimentées par une tension stabilisée réglable entre 4 et 8 V.

Le module de tests pneumatiques est relié à un ordinateur par l'intermédiaire d'une interface qui assure le multiplexage

des données. Une carte d'acquisition de données AT MIO 16 (National Instruments) assure le transfert des données en temps réel entre l'ordinateur et les capteurs. Elle permet de piloter l'ouverture des vannes, ainsi que l'alimentation du module et des pompes, de façon à démarrer ou arrêter automatiquement une séquence de tests.

L'utilisateur programme, pour chaque voie, différentes séquences de pertes de charges en fonction du temps. La durée des tests peut être différente pour chaque voie. Chaque débitmètre reçoit une commande en tension, correspondant à la consigne de perte de charge totale et agit sur l'ouverture de la vanne. Celle-ci se positionne pour que la perte de charge totale mesurée corresponde à la consigne avec une précision de 5 mbar. Le débitmètre n'effectue pas de régulation. Ceci est important pour ne pas gêner la régulation de la pompe.

L'étude de la stabilité du débit permet d'étudier l'endurance de la pompe. A titre d'exemple, après application d'une perte de charge, des comparaisons peuvent être faites sur les temps de stabilisation, et sur le comportement des pompes par rapport aux limites de tolérance du débit fixées par la norme NF X 43-282 [5].

2.1.3. Etudes des performances

Débit

Il s'agit de connaître la précision des capteurs de débit du module de tests pneumatiques. Pour cela, le montage suivant est réalisé : la pompe de prélèvement représentée sur la figure 2 est remplacée par une pompe fort débit (100 l.min⁻¹), précédée d'un débitmètre massique régulateur étalon de gamme 0-10 l.min⁻¹. Ce montage permet de s'affranchir des problèmes d'instabilités du débit des pompes de prélèvement.

Les capteurs de débit donnent une valeur rapportée aux conditions standard de température et de pression. L'exactitude de la gamme est vérifiée avec un débitmètre massique étalonné dans les conditions normales. Une correction des valeurs de débit en fonction de la température permet de conclure à l'équivalence des mesures. Le plus grand écart entre les deux débits est observé pour la voie n° 3. Le graphique n° 1 en *annexe I* représente les valeurs du capteur de débit (y) en fonction du débit du débitmètre massique étalon (x). Trois séries de données s'inscrivent entre les droites :

$$y = x - 0,05$$

et $y = x + 0,05$, indiquant que les capteurs de débit ont une précision absolue de 0,05 l.min⁻¹.

Perte de charge

Les valeurs de perte de charge totale indiquées par le module de tests pneumatiques sont vérifiées de la façon suivante : un manomètre vertical à colonne d'eau est ajouté au montage précédent selon la *figure 3*.

Une pompe fort débit (100 l.min⁻¹), précédée du débitmètre massique régulateur (DMR), permet d'obtenir un débit stable. Le manomètre vertical sert d'étalon de travail et mesure la perte de charge totale :

$$D_p = (P_a - P_r)$$

La perte de charge indiquée sur le module de tests pneumatiques est comparée à la valeur donnée par le manomètre étalon. Des mesures sont effectuées en notant simultanément ces deux valeurs et en faisant varier le débit Q du capteur de débit, à l'aide du débitmètre massique régulateur, ainsi que la perte de charge D_p par modification de l'ouverture de la vanne. On obtient ainsi des courbes :

$$\sqrt{D_p} = f(Q) \text{ (cf. annexe II).}$$

Chaque famille de droites correspond à un pourcentage d'ouverture variable de la vanne. Ponctuellement, il existe des différences entre les pertes de charges indiquées par le manomètre étalon et par le module de tests pneumatiques. C'est pourquoi une correction est effectuée et intégrée au logiciel de pilotage (cf. *annexe III*). Les pertes de charges sont estimées avec une précision de 3 mbar.

2.2. Module de contrôle des batteries

La figure 1 représente aussi le module de contrôle des batteries, réalisé selon le cahier des charges décrit précédemment. Il est indépendant du module de tests pneumatiques. Il est connecté à un ordinateur via la liaison série RS 232, permettant l'emploi d'un ordinateur portable.

Il s'agit d'un chargeur-testeur programmable. A partir d'un protocole de dialogue préalablement établi, il retourne une réponse à chaque commande envoyée dans un format spécifique. Les 5 batteries sont testées indépendamment les unes des autres en fonction du type de test demandé. La capacité est calculée suite à une opération de décharge, à travers une résistance de 15 Ω jusqu'à une tension limite de 4 V.

2.3. Automatisation des tests

Le banc de tests est relié à un micro-ordinateur, de configuration minimale 486 DX33 sous Windows 3.11.

Le logiciel de pilotage a été développé par le service informatique de l'INRS à l'aide de l'outil de développement Labwindows CVI (National Instruments), dans l'environnement windows, qui utilise la programmation en langage C.

Il permet de programmer le module de tests pneumatiques, en choisissant soit un test qualifié de manuel, soit un test automatique.

Lors d'un test dit manuel, l'utilisateur visualise en temps réel la courbe d'évolution du débit en fonction de la perte de charge qu'il choisit d'appliquer à la pompe (*fig. 4*). Ce test n'est disponible que pour deux voies et permet d'effectuer des comparaisons en temps réel entre deux pompes. Dans ce cas, les valeurs de débit sont enregistrées toutes les 0,5 s, de façon à étudier les éventuelles pulsations de débit.

Lors d'un test automatique, des valeurs temporelles de perte de charge sont programmées pour chacune des 5 pompes. Les valeurs de débit et perte de charge sont ensuite moyennées toutes les 3 s et enregistrées sur disque dur. La durée maximale de ce test est de 8 heures.

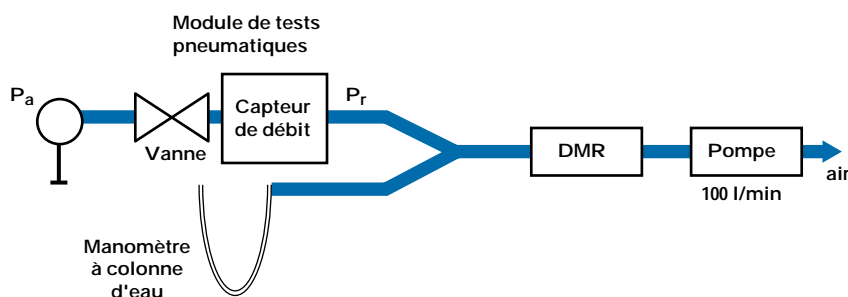
Dans les deux types de tests, les valeurs temporelles de débit et de perte de charge sont stockées dans des fichiers textes. Le logiciel donne accès à un résumé indiquant le pourcentage de temps de dépassement des valeurs limites de tolérance du débit au cours du test.

Un programme sous Labwindows, indépendant du logiciel de pilotage, donne accès à la fin du test automatique aux graphes représentant l'évolution du débit et de la perte de charge pour chacune des 5 pompes (*fig. 5*). Il est par ailleurs possible de reprendre les données sous un tableur pour faire une présentation personnalisée.

Le logiciel de pilotage permet aussi de dialoguer avec le module de contrôle des batteries. L'utilisateur programme pour chaque voie le mode de fonctionnement : soit une simple charge, soit une simple décharge, soit 1, 2, ou 3 cycles de décharge/charge. Il choisit le courant ainsi que le temps de charge en fonction des caractéristiques des batteries. Le chargeur-testeur donne accès en temps réel à la tension de la batterie, au courant de décharge et à l'état de la batterie (en cours de charge, en cours de décharge...).

Ces paramètres sont stockés sur disque dur, ce qui permet de tracer des courbes

Fig. 3. Vérification de la perte de charge totale - Total pressure drop verification



de décharge et charge à l'aide d'un tableur classique et de comparer les batteries entre elles. La *figure 6* représente des courbes de décharge et charge suivies d'une charge pulsée.

Un résumé des résultats des tests indique la validité des batteries grâce aux valeurs des capacités.

CONCLUSION

Le banc de test de faible encombrement dispose d'un système d'exploitation des données très souple, ce qui facilite considérablement son utilisation. L'archivage dans le temps des paramètres de fonctionnement des batteries, et des valeurs de débit en fonction des pertes de charges, doit permettre d'anticiper les opérations de maintenance et d'assurer un meilleur suivi des pompes. Ce banc de test est adapté à tout type de pompe ayant un débit de 0,8 l.min⁻¹ à 3 l.min⁻¹. Il a été testé avec des modèles Gilian type Gilair et HFS. Il s'agit d'un prototype, c'est-à-dire qu'en fonction des remarques des utilisateurs, des modifications pourront être apportées.

Deux appareillages sont actuellement en tests à la CRAM des Pays-de-la-Loire ainsi qu'à l'INRS, ce qui permettra de faire évoluer le prototype.

Article reçu en juillet 1998, accepté en novembre 1998



Fig. 4. Suivi du débit en temps réel en fonction de la perte de charge appliquée (limites horizontales : $\pm 5\%$ et $\pm 10\%$ du débit initial) - Real-time flow rate monitoring in relation to pressure drop applied (horizontal limits: $\pm 5\%$ and $\pm 10\%$ of initial flow rate)

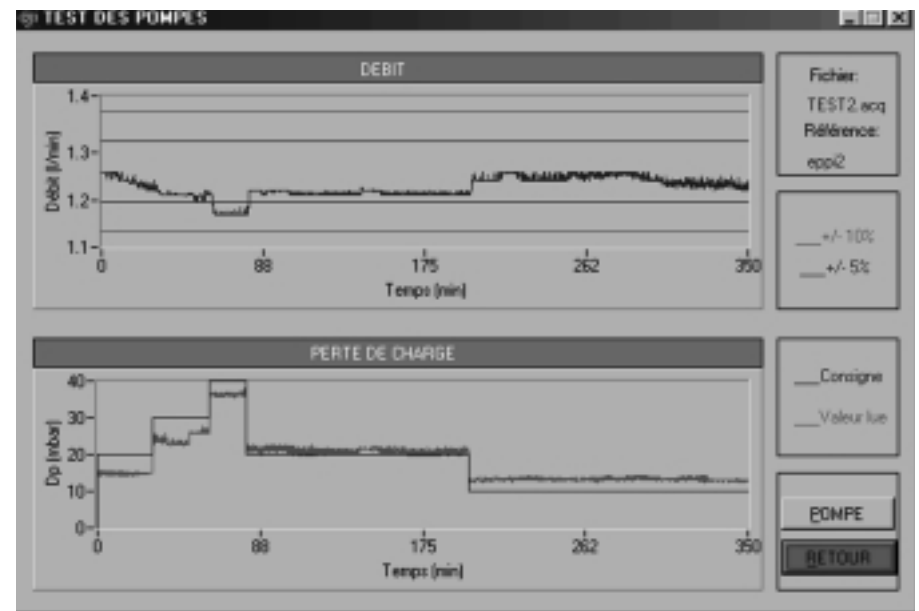


Fig. 5. Résultats du test automatique - Automatic test results

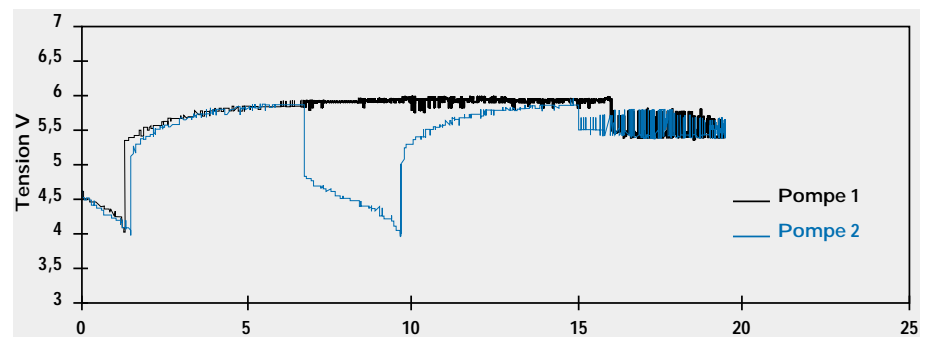


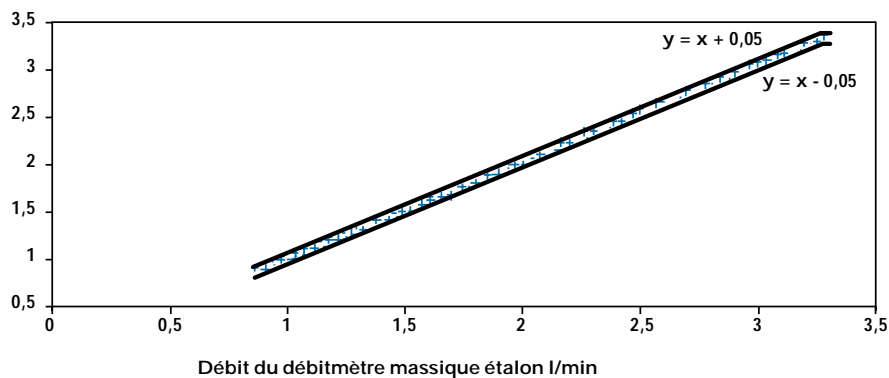
Fig. 6. Courbes de décharge/charge des batteries (abscisse : temps en h) - Battery discharge/charge curves (time in hours)

BIBLIOGRAPHIE

1. MENARD L., CARON B., LARIVIERE P. - Computerized personal pump tester and cyclor. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 1993, 8, 4, pp. 327-333.
2. MYERS G. E. - An automatic cyclor/charger for nickel-cadmium batteries. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1981, 42, 7, pp. 542-545.
3. HAMILL D.C., PARKER B.R. - Advances in battery charging for portable video: low-cost, microcomputer-controlled fast charging for Ni-Cads. *SMPTE Journal*, 1985, 3, pp. 296-304.
4. ABELL M.T., AGEE J.P., HENTZ P.A., ANASTAS M.Y., BOYD J.E. - Personal pump reliability tester. *Applied Industrial Hygiene*, 1989, 4, 6, pp. 143-146.
5. NF EN 1232 - Air des lieux de travail. Pompes pour l'échantillonnage individuel des agents chimiques. Exigences et méthodes d'essais. Paris - La Défense, AFNOR, avr. 1997, 21 p. (Norme homologuée, Indice de classement X 43-282).
6. KOVEIN R.J., ABELL M.T. - Benefits of a nickel-cadmium battery cyclor. *Applied Industrial Hygiene*, 1986, 1, 4, pp. 29-33.
7. KOVEIN R.J., HENTZ P.A. - A digital current capacity tester for rechargeable batteries. *Applied Industrial Hygiene*, 1988, 3, 2, pp. 51-54.

ANNEXE I

Fig. A I-1. Précision du capteur de débit de la voie n° 3 du module de tests pneumatiques
- Accuracy of flow rate sensor for channel 3 of pneumatic test module



ANNEXE II

VÉRIFICATION DE LA PERTE DE CHARGE DU MODULE DE TESTS PNEUMATIQUES

Les pertes de charges lues sur le module de tests pneumatiques et sur le manomètre à colonne d'eau étalon sont représentées en fonction du débit. La comparaison des valeurs est effectuée en faisant varier le pourcentage d'ouverture de la vanne du module de tests pneumatiques (%V).

Les graphiques sont tous tracés sur le modèle de la figure A-II-1, avec :
 $\%V1 > \%Vi > \%V4$

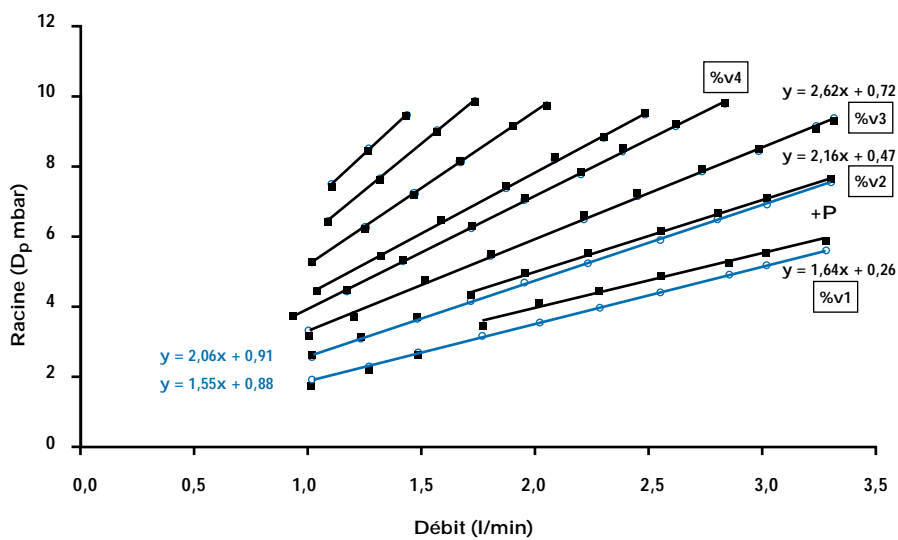


Fig. A II-1. Voie n° 1 - Channel 1

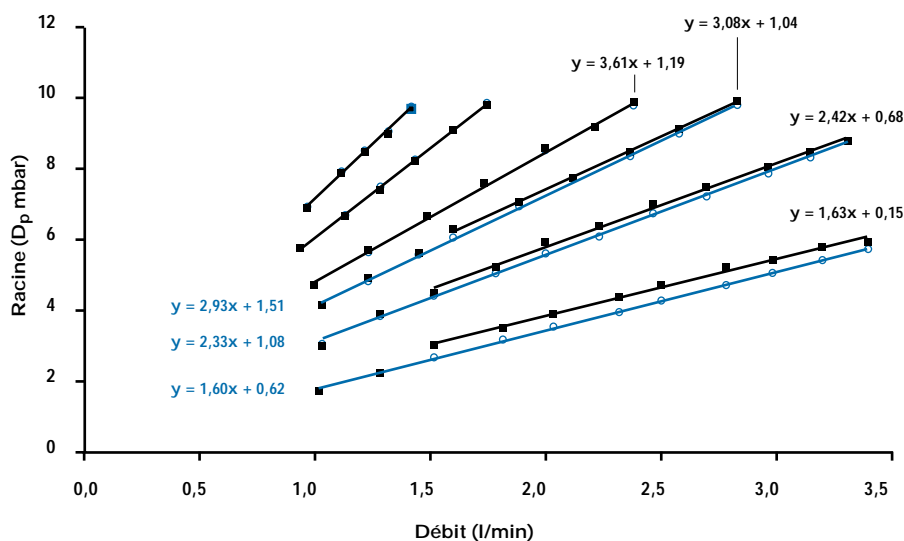


Fig. A II-2. Voie n° 2 - Channel 2

○ Colonne d'eau
 ■ Banc

ANNEXE II (suite)

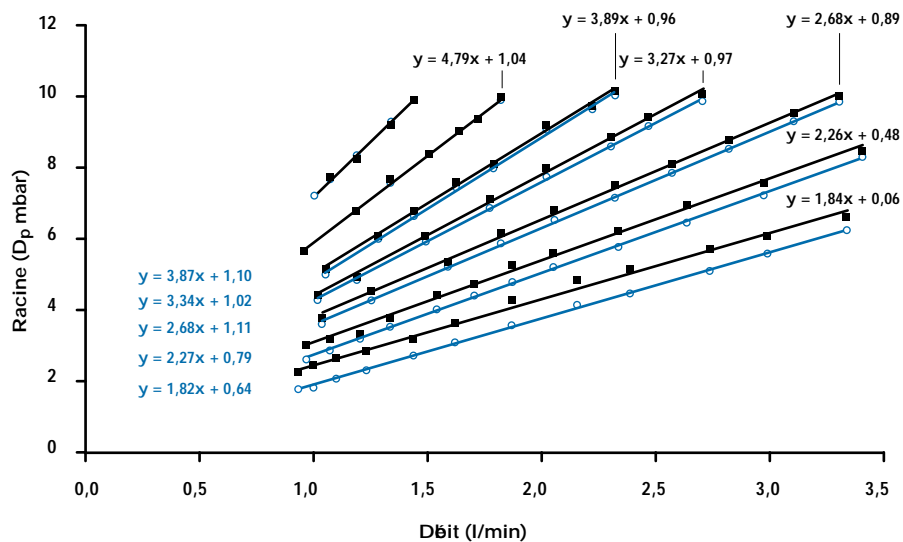


Fig. A II-3. Voie n° 3 - Channel 3

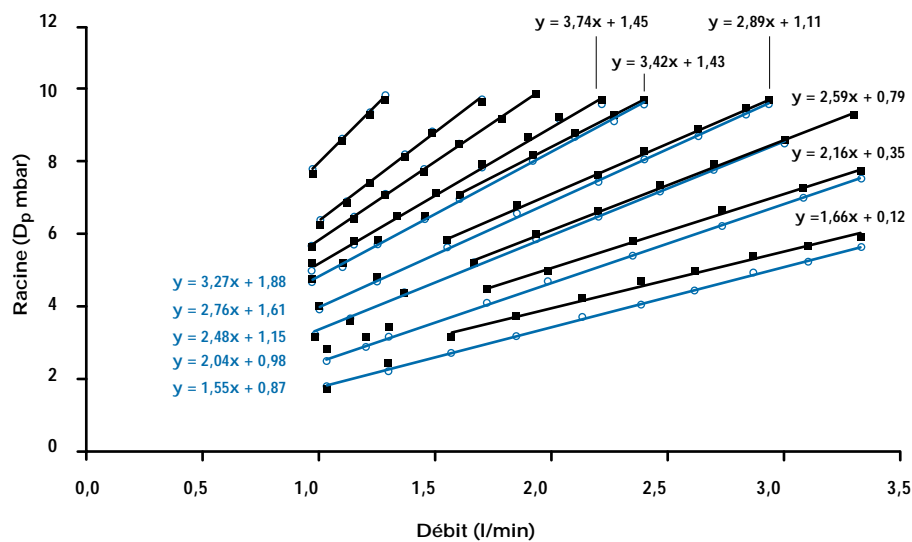


Fig. A II-4. Voie n° 4 - Channel 4

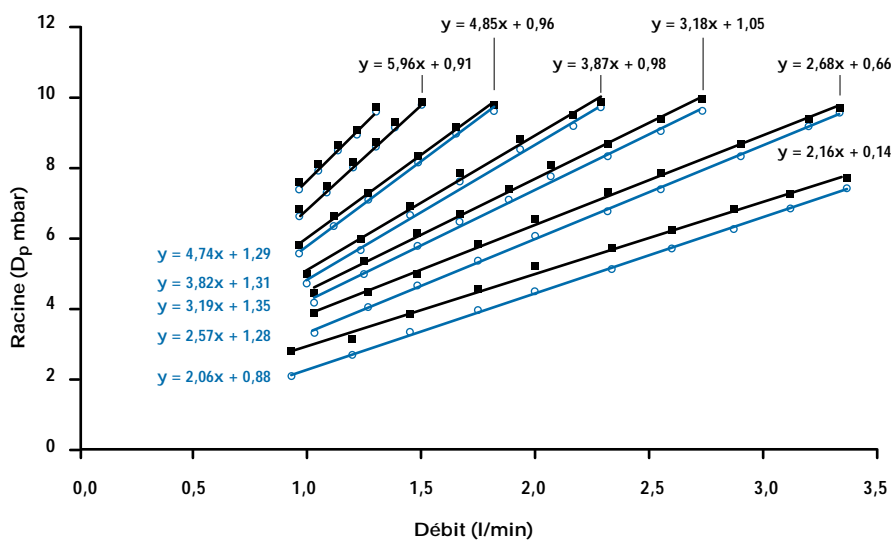


Fig. A II-5. Voie n° 5 - Channel 5

ANNEXE III

CORRECTION DE LA PERTE DE CHARGE POUR LA VOIE N° 1

La figure A-II-1 (cf. *annexe II*) est composée d'un ensemble de droites $\sqrt{D_p} = f(Q)$, avec D_p : perte de charge [mbar] et Q : débit [l.min⁻¹]. Les points matérialisés par des cercles ont pour ordonnées $\sqrt{D_{p_{col}}}$, avec $D_{p_{col}}$: la perte de charge lue sur le manomètre à colonne d'eau étalon. Les points matérialisés par des carrés ont pour ordonnées $\sqrt{D_{p_{banc}}}$, avec $D_{p_{banc}}$: la perte de charge lue sur le module pneumatique.

Il se dégage deux familles de droites pour lesquelles une correction est nécessaire. En effet, pour les autres droites, les valeurs $\sqrt{D_{p_{banc}}}$ et $\sqrt{D_{p_{col}}}$ apparaissent confondues. Il s'agit donc de corriger les valeurs $D_{p_{banc}}$ et de les faire coïncider avec les valeurs $D_{p_{col}}$, prises comme références.

Le *tableau A-III* définit les équations des droites inscrites sur la figure A-II-1 et intervenant dans la correction :

TABLEAU A-III

	$\sqrt{D_{p_{banc}}} =$ D_p lue sur le banc	$\sqrt{D_{p_{col}}} =$ D_p lue sur la colonne d'eau
Série 1	$\sqrt{D_{p_{banc1}}} = 1,55 \times Q + 0,88$	$\sqrt{D_{p_{col1}}} = 1,64 \times Q + 0,26$
Série 2	$\sqrt{D_{p_{banc2}}} = 2,06 \times Q + 0,91$	$\sqrt{D_{p_{col2}}} = 2,16 \times Q + 0,47$
Série 3	$\sqrt{D_{p_{banc3}}} = \sqrt{D_{p_{col3}}} = 2,62 \times Q + 0,72$	

Soit un point de fonctionnement $P(Q, \sqrt{D_{p_{banc}}})$, la correction de $D_{p_{banc}}$ dépend de la position de P par rapport aux droites :

$$\sqrt{D_{p_{banc1}}} = f(Q), \sqrt{D_{p_{banc2}}} = f(Q) \text{ et } \sqrt{D_{p_{banc3}}} = f(Q).$$

Si $\sqrt{D_{p_{banc}}} \geq \sqrt{D_{p_{banc3}}}$, alors aucune correction n'est effectuée.

Si $\sqrt{D_{p_{banc}}} < \sqrt{D_{p_{banc3}}}$ et si $Q < 1,7$ l.min⁻¹, les points de fonctionnement $P(Q, \sqrt{D_{p_{banc}}})$ ne sont pas représentés mais les valeurs $D_{p_{banc}}$ sont aussi considérées comme équivalentes à $D_{p_{col}}$. Aucune correction n'est effectuée.

Si $\sqrt{D_{p_{banc}}} < \sqrt{D_{p_{banc3}}}$ et si $Q \geq 1,7$ l.min⁻¹, alors la valeur est corrigée selon 3 cas différents qui dépendent de l'écart e_1 entre $\sqrt{D_{p_{banc}}}$ et $\sqrt{D_{p_{banc1}}}$, puis de l'écart e_2 entre $\sqrt{D_{p_{banc}}}$ et $\sqrt{D_{p_{banc2}}}$, et de l'écart e_3 entre $\sqrt{D_{p_{banc}}}$ et $\sqrt{D_{p_{banc3}}}$.

$$\begin{aligned} \text{Soit } e_1 &= |\sqrt{D_{p_{banc}}} - \sqrt{D_{p_{banc1}}}| \\ \text{Soit } e_2 &= |\sqrt{D_{p_{banc}}} - \sqrt{D_{p_{banc2}}}| \\ \text{Soit } e_3 &= |\sqrt{D_{p_{banc}}} - \sqrt{D_{p_{banc3}}}| \end{aligned}$$

Pour chaque série du tableau, on détermine une équation $\sqrt{D_{p_{col}}}$, valeur de référence en fonction de $\sqrt{D_{p_{banc}}}$, valeur à corriger :

$$\text{Pour la série 1 : } E_1 = \sqrt{D_{p_{col1}}} = 1,06 \times \sqrt{D_{p_{banc1}}} - 0,67$$

$$\text{Pour la série 2 : } E_2 = \sqrt{D_{p_{col2}}} = 1,05 \times \sqrt{D_{p_{banc2}}} - 0,48$$

La valeur corrigée de la perte de charge est notée $\sqrt{D_{pC}}$.

$$\text{Si } \min(e_1, e_2, e_3) = e_1, \text{ alors : } \sqrt{D_{pC}} = E_1 = 1,06 \times \sqrt{D_{p_{banc}}} - 0,67$$

$$\text{Si } \min(e_1, e_2, e_3) = e_2, \text{ alors : } \sqrt{D_{pC}} = E_2 = 1,05 \times \sqrt{D_{p_{banc}}} - 0,48$$

$$\text{Si } \min(e_1, e_2, e_3) = e_3, \text{ alors : } \sqrt{D_{pC}} = E_3 = \sqrt{D_{p_{banc}}}$$

La précision de la valeur $\sqrt{D_{pC}}$ est estimée de la façon suivante :
soit $P(Q, \sqrt{D_{p_{banc}}})$, avec $\sqrt{D_{p_{banc1}}} < \sqrt{D_{p_{banc}}} < \sqrt{D_{p_{banc2}}}$,
soit $\sqrt{D_{pC1}}$, la valeur corrigée de $\sqrt{D_{p_{banc}}}$ avec l'équation E1,
soit $\sqrt{D_{pC2}}$, la valeur corrigée de $\sqrt{D_{p_{banc}}}$ avec l'équation E2,

il apparaît que l'écart maximal entre $\sqrt{D_{pC1}}$ et $\sqrt{D_{pC2}}$ est de 2 mbar.

De plus, la dispersion des points $(Q, \sqrt{D_{p_{banc}}})$ par rapport à la droite $\sqrt{D_{p_{banc1}}}$ ou $\sqrt{D_{p_{banc2}}}$ est évaluée à 1 mbar. Après correction, on peut estimer que les pertes de charge totales sont données avec une précision de 3 mbar.

■

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 2^e trimestre 1999, N° 175 - ND 2107 - 1200 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.-L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 02-7389-0777-6