



**APPRECIATION DE LA CHARGE
DYNAMIQUE DE TRAVAIL**

Professeur J. MALCHAIRE

- 25 Nov 2002 -

1. OBJECTIFS

Face à une condition de travail, les responsables de la santé se posent les questions suivantes:

- certaines phases de travail sont-elles ou non trop contraignantes?
- l'ensemble du travail, sur la durée totale de travail, est-il ou non trop contraignant?

De telles questions ne peuvent recevoir une réponse qu'à condition qu'une étude globale du poste de travail soit d'abord menée. Une telle étude, appelée ergonomie, vise:

- à connaître la procédure réelle (par opposition à la procédure théorique) de travail.
- à remettre l'aspect du poste auquel on s'intéresse a priori (ici la charge physique) dans son contexte, de manière à déterminer si d'autres aspects ne méritent pas tout autant d'attention, ou si d'autres encore, très favorables, doivent être préservés.
- à recueillir l'avis des travailleurs à la fois sur la pénibilité du travail dans son ensemble et sur la charge de certaines opérations.

Les deux questions de départ demandent également à être précisées quant à ce que l'on considère comme étant "trop" contraignant. Les limites seront appréciées ci-dessous, mais il est essentiel de noter qu'il s'agit de limites relatives et non absolues. Les questions devront dès lors être dédoublées:

- certaines phases sont-elles trop contraignantes
 - pour un sujet moyen?
 - pour certains travailleurs en particulier?
- l'ensemble du travail est-il acceptable
 - pour un sujet moyen?
 - pour tous les travailleurs pris individuellement?

La méthodologie générale d'analyse de la charge de travail repose sur le recueil de cinq types d'information.

1. Quelles sont les aptitudes physiques du travailleur?
2. Que fait le travailleur à un instant précis?
3. Comment le fait-il? Quelle est sa posture? Quels sont ses mouvements?
4. Quel en est le coût physiologique?
5. Comment perçoit-il individuellement la situation?

Nous présenterons successivement les méthodes susceptibles d'être mises en pratique pour le recueil de ces données, puis aborderons les principes d'interprétation.

2. PRINCIPES DE BASE

Les fonctions élémentaires vitales et a fortiori l'accomplissement d'un travail quelconque demandent une certaine consommation d'énergie. Cette énergie est fournie par la combustion de sucres et de graisses en présence de l'oxygène amené par le sang: la dépense énergétique peut donc être estimée par la consommation d'oxygène en litres par minute. Cette valeur peut être traduite en métabolisme en admettant qu'en moyenne la

combustion d'un litre d'oxygène par minute correspond environ à une production d'énergie métabolique de 5 kcal/min, soit quelque 350 watts.

Pour un sujet moyen de 30 ans et 70 kg,

- la consommation maximale d'oxygène peut atteindre environ 3 l/min;
- le métabolisme maximal ou Capacité Maximale de Travail (CMT) correspondant est 1 kW;
- un tel métabolisme ne peut cependant être maintenu durant plus de 5 minutes environ sur bicyclette ergométrique et le niveau métabolique compatible avec 8 heures de travail atteindrait environ le tiers de cette valeur maximale. Pour le sujet "standard" décrit ci-dessus, la Charge de Travail Acceptable (CTA), c'ad le métabolisme maximal moyen pour une journée de travail de 8 heures, est dès lors égal à 330 watts.
- par ailleurs, la dépense énergétique au repos, assis, durant la journée, est de l'ordre de 100 W, alors que le métabolisme basal (au repos à jeun, couché) est égal à 75 W;
- la dépense calorique totale DC_{tot} sur une journée est, pour un homme de 30 ans, 70 kg, de quelque 17200 kJoules (4100 kcal), étant donné les habitudes alimentaires dans nos pays;
- et le métabolisme moyen sur 24h peut être dans ces conditions $4100/24 = 170$ kcal/h, soit 200 W, soit encore environ 20% de CMT.

A partir des 3 limites, 100% pendant 5 min., 35% pendant 8h et 20% pendant 24h, il est possible de proposer une relation générale liant le pourcentage d'utilisation de CMT à la durée limite de travail D_{max} (min). Cette relation, proposée par BINK, s'écrit:

$$p = \log(5700/D_{max}) / 0.031$$

Inversement, on peut exprimer D_{max} en fonction de p par:

$$D_{max} = 5700 / 10^{0.031 \cdot p}$$

La table suivante donne les valeurs principales (arrondies) de cette relation.

p%	100	90	80	70	60	50	40	35	30	20
D_{max} min	5	10	20	40	80	160	320	480	640	1440

Cette relation appelle certaines remarques :

- Elle détermine le temps maximal pendant lequel, en continu, une charge de travail de p% de CMT peut être soutenue. Il ne s'agit donc pas de la durée maximale par jour et - en effet - des efforts correspondants à 70% de CMT par exemple peuvent être soutenus 4 fois par jour pendant 40 minutes pour autant que des temps de repos suffisants soient intercalés.
- La durée maximale en discontinu doit être déterminée en fonction de la dépense calorique totale maximale de 17200 kJoules par jour. Cela revient à dire que, en moyenne sur les 24 h, le pourcentage moyen d'utilisation de CMT ne peut dépasser 20%.

L'habitude a dès lors été prise de qualifier de **léger**, **moyen** et **lourd** des métabolismes de 175 W, 300 W et 400 W respectivement EN MOYENNE SUR 8 HEURES DE TRAVAIL, ce qui correspond à 8, 22 et 33% de la valeur de la CMT moins le métabolisme de repos (CMT - 100).

Ces valeurs concernent la population masculine moyenne. Pour la population féminine, le métabolisme maximal est en moyenne égal à 650 W. Il serait dès lors normal de considérer comme léger, moyen et lourd des métabolismes de 145 W, 220 W et 285 W pour la population féminine, EN MOYENNE SUR 8 HEURES DE TRAVAIL.

Toutes ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur et la lourdeur d'un travail et sa pénibilité sont essentiellement relatives aux capacités du travailleur concerné.

3. EVALUATION A PRIORI DU METABOLISME DE TRAVAIL

Le tableau 1 énumère les différentes approches qui peuvent être utilisées pour déterminer le métabolisme, ainsi que leur précision.

Selon la stratégie **SOBANE**, quatre niveaux sont considérés:

- Niveau 1, **Dépistage**: Deux méthodes simples et faciles sont présentées pour caractériser rapidement la charge de travail moyenne pour une profession donnée ou pour une activité donnée.
 - méthode A: classification selon le métier
 - méthode B: classification selon le genre d'activitéLes deux méthodes fournissent une évaluation grossière et peu précise. À ce niveau, une inspection du lieu de travail n'est pas nécessaire.
- Niveau 2, **Observation**: Trois méthodes sont présentées pour des personnes avec une connaissance parfaite des conditions de travail, mais sans nécessairement une formation en ergonomie. Elles permettent de caractériser la charge moyenne dans une situation de travail à un instant spécifique.
 - méthode A: le métabolisme est déterminé en fonction de la posture du corps et des efforts et postures des segments corporels
 - méthode B: le métabolisme moyen est déterminé en fonction de la vitesse de travail
 - méthode C: le métabolisme moyen est déterminé directement en fonction de l'activité.

Une procédure est décrite pour enregistrer les activités au cours du temps et pour calculer le métabolisme moyen pondéré dans le temps, en utilisant les données des méthodes ci-dessus.

La précision reste faible.

Une étude de temps est nécessaire pour déterminer le métabolisme dans les situations de travail qui impliquent un cycle de différentes activités.

- Niveau 3, **Analyse**: Le métabolisme moyen est déterminé à partir des enregistrements de fréquence cardiaque sur une période représentative. Cette méthode de détermination indirecte du métabolisme est basée sur la relation existant entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque dans des conditions définies. La méthode s'adresse aux personnes qualifiées en santé au travail.
- Niveau 4, **Expertise**: Les méthodes disponibles à ce niveau sont:
 - le mesurage de la consommation d'oxygène
 - la méthode directe par calorimétrie

Elles ne seront pas présentées ici.

Tableau 1 – comparaison des méthodes de détermination du métabolisme

Niveau	Méthode	Précision	Inspection du lieu de travail
<i>Dépistage</i>	A. Classification selon le métier	Information approximative Risque très grand d'erreur	Non nécessaire, mais une information est requise concernant l'équipement technique et l'organisation du travail
	B. Classification selon le genre d'activité		
<i>Observation</i>	A. Tables en fonction des postures et efforts	Risque élevé d'erreur Précision: $\pm 20\%$	Etude des temps nécessaire
	B. Tables en fonction des vitesses		
	C. Tables pour des activités spécifiques		
<i>Analyse</i>	Evaluation à partir d'enregistrement de la fréquence cardiaque dans des conditions définies	Risque moyen d'erreur Précision: $\pm 10\%$	Non nécessaire
<i>Expertise</i>	Mesurage de consommation d'oxygène	Erreurs dans les limites de la précision de la mesure ou de l'étude de temps Précision: $\pm 5\%$	Étude de temps nécessaire
	Calorimétrie directe		Non nécessaire

Les facteurs principaux affectant la précision sont:

- les différences individuelles
- les différences dans l'équipement de travail
- les variations dans la vitesse de travail
- les différences de techniques de travail et de compétences professionnelles
- les différences de genre et de caractéristiques anthropométriques
- les différences culturelles
- lors de l'utilisation des tableaux, les différences entre observateurs et leur niveau de formation
- en utilisant le niveau 3, la précision de la relation entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène, et la présence d'autres facteurs influençant la fréquence cardiaque

4. Niveau 1, *Dépistage*

- **Evaluation du métabolisme par professions.**

Le tableau 2 donne le métabolisme moyen pour différentes professions. Des variations importantes peuvent survenir en raison de différences en ce qui concerne la technologie, la nature exacte du travail, l'organisation du travail, etc.

Tableau 2 - Métabolisme pour différentes professions

Métier		Métabolisme (watts)
Artisans	Maçon	200 - 290
	Charpentier	200 - 310
	Vitrier	160 - 230
	Peintre	180 - 230
	Boulangier	200 - 250
	Boucher	190 - 250
	Horloger	100 - 130
Industrie minière	Mineur de charbon	200 - 400
	Ouvrier de four à coke	210 - 310
Sidérurgie	Ouvrier de haut fourneau	310 - 400
	Ouvrier de four électrique	220 - 260
	Mouleur manuel	250 - 430
	Mouleur à la machine	190 - 300
Métallurgie	Ouvrier de fonderie	250 - 430
	Forgeron	160 - 360
	Soudeur	130 - 220
	Tourneur	130 - 220
	Foreur	140 - 250
	Mécanicien de précision	130 - 200
	Imprimerie	Imprimeur
Relieur		135 - 200
Agriculture	Jardinier	200 - 340
	Conducteur de tracteur	150 - 200
Transport	Conducteur de voiture	125 - 180
	Chauffeur de bus	135 - 225
	Conducteur de tramway	145 - 210
	Grutier	115 - 260
Divers	Aide de laboratoire	150 - 180
	Enseignant	150 - 180
	Vendeur	180 - 220
	Secrétaire	125 - 150

- **Evaluation du métabolisme par catégories:**

Le tableau 3 définit 5 classes de métabolismes: repos, léger, moyen, lourd, très lourd. Ces qualificatifs sont utilisés pour un travail **EN CONTINU** de **8 h** (en tenant compte des pauses habituelles). Ils n'ont pas de sens pour un travail occasionnel de quelques instants.

Exemple: monter un escalier est un travail très lourd s'il doit être fait pendant 8 h en continu; c'est tout à fait acceptable si cela dure 30 secondes.

Pour chaque classe, la moyenne et la gamme des valeurs de métabolisme sont indiquées ainsi qu'un certain nombre d'exemples. Ces activités sont censées inclure des pauses de détente courtes.

Tableau 3 – Catégories de métabolisme

Classe	Métabolisme (watts)	Exemples
Repos assis	100	
Repos debout	120	
Léger	180 (130 – 240)	<ul style="list-style-type: none"> • Travail de secrétariat • Travail assis manuel léger (taper sur un clavier, dessiner, coudre...) • Travail assis avec de petits outils, inspection, assemblage léger • Conduite de voiture, opération d'une pédale... • Forage, polissage légers de petites pièces • Utilisation de petites machines à main • Marche occasionnelle lente
Moyen	300 (241 – 355)	<ul style="list-style-type: none"> • Travail soutenu des mains et des bras (clouage, vissage...) • Conduite d'engins, tracteurs, camions... • Manutention occasionnelle d'objets moyennement lourds • Marche plus rapide (3,5 à 5,5 km/h)
Lourd	410 (356 – 465)	<ul style="list-style-type: none"> • Travail intense des bras et du tronc • Manutention d'objets lourds, de matériaux de construction • Pelletage, sciage à main, rabotage • Marche rapide (5,5 à 7 km/h) • Pousser, tirer chariots, brouettes
Très lourd	520 (> 466)	<ul style="list-style-type: none"> • Travail très intense et rapide • Pelletage lourd, creusage • Montée d'escaliers ou d'échelles • Marche très rapide, course (>7km/h)

5. Niveau 2, *Observation*

A. Evaluation du métabolisme par décomposition de la tâche

Le métabolisme est ici estimé à partir des observations suivantes:

- le segment de corps impliqué dans le travail: les deux mains, un bras, deux bras, le corps entier
- la charge de travail pour ce segment de corps: léger, moyen, lourd
- la posture de corps: au repos, à genoux, accroupi, debout, debout penché

Le tableau 4 donne la valeur moyenne et la gamme des métabolismes pour une personne standard, assise, en fonction du segment corporel impliqué et de la charge de travail.

Le tableau 5 donne les corrections à ajouter quand la posture est différente d'assise.

Il s'agit à nouveau de léger, moyen et lourd au sens d'une durée de travail de 8h .
La charge doit être appréciée selon les capacités moyennes des salariés et **NON** en fonction des capacités d'un salarié particulier, ni, a fortiori, de l'observateur.

**Tableau 4 - Charge de travail (en watts) pour un sujet assis,
en fonction de l'intensité du travail et de la zone corporelle impliquée**

Zone corporelle impliquée		Travail		
		Léger	Moyen	Lourd
Les 2 mains	Moyenne	125	155	170
	Gamme	<135	135-160	>160
Un bras	Moyenne	160	200	235
	Gamme	<180	180-215	>215
Les 2 bras	Moyenne	215	250	290
	Gamme	<235	235-270	>270
Le corps	Moyenne	325	440	600
	Gamme	<380	380-510	>510

Tableau 5 - Supplément dû à la posture principale du corps

Posture du corps	Métabolisme (watts)
Assis	0
À genoux	20
Accroupi	20
Debout	25
Debout penché	35

B. Evaluation du métabolisme en fonction de la vitesse de travail

Le tableau 6 permet d'évaluer le métabolisme pour une activité de déplacement en fonction de la vitesse de ce déplacement

Tableau 6 - Métabolisme lié à la vitesse de travail

Le métabolisme basal (80 W) doit être ajouté aux valeurs résultantes

Type de travail	Métabolisme
Métabolisme en fonction de la vitesse de marche en mètres par minute	$W \cdot (\text{m/min})^{-1}$
Marche: 0,55 à 1,40 m/min (2 à 5 km/h)	200
Marche en montant: 0,55 à 1,40 m/min (2 à 5 km/h)	
Pente 5°	320
Pente 10°	500
Marche en descendant: 0,55 à 1,40 m/min (2 à 5 km/h)	
Pente 5°	110
Pente 10°	90
Marche avec une charge sur le dos: 1,1 m/min (4 km/h)	
charge de 10 kg	225
charge de 30 kg	330
Métabolisme lié à la vitesse de montée en m/sec (distance verticale par seconde)	$W \cdot (\text{m/sec})^{-1}$
Montée d'escaliers	3240
Descente d'escaliers	945
Montée d'une échelle inclinée	
Sans charge	3000
charge de 10 kg	3400
charge de 20 kg	4000
Montée d'une échelle verticale	
Sans charge	3800
charge de 10 kg	4300
charge de 20 kg	4900

C. Evaluation du métabolisme pour des activités typiques

Le tableau 7 fournit des valeurs du métabolisme pour des activités typiques.

Tableau 7 - Métabolisme pour des activités spécifiques

Activités	M (watts)
Sommeil	70
Repos assis	100
Repos debout	125
Marche chemin uni, solide, de niveau	
1. sans charge	
à 2 km/h	200
à 3 km/h	250
à 4 km/h	300
à 5 km/h	360
2. avec charge	
10 kg de charge, 4 km/h	330
30 kg de charge, 4 km/h	450
Marche chemin uni, solide, en montée	
1. sans charge	
5° inclinaison, 4 km/h	320
15° inclinaison, 3 km/h	380
25° inclinaison, 3 km/h	540
2. avec charge 20 kg	
15° inclinaison, 4 km/h	490
25° inclinaison, 4 km/h	740
Descente à 5 km/h, sans charge	
5° inclinaison	240
15° inclinaison	250
25° inclinaison	320
Echelle 70° vitesse 11,2 m de dénivellation par minute	
non chargé	520
20 kg de charge	650
Pousser ou tirer des wagonnets, 3,6 km/h, chemin plat, solide	
force de poussée : 12 kg	520
force de poussée : 16 kg	670
Porter une brouette, chemin uni, 4,5 km/h, bandage en caoutchouc, 100 kg de charge	410
Limer du fer	
42 coups de lime/min	180
60 coups de lime/min	340
Travail au marteau (2 mains), poids du marteau: 4,4 kg, 15 coups/min	520
Menuiserie	
sciage à la main	400
sciage à la machine	180
rabotage à la main	540
Maçonnerie, 5 briques/min	310
Vissage	180
Creuser une tranchée	520
Travail sur machine-outil	
léger (réglage, assemblage)	180
moyen (chargement)	250
lourd	380
Travail avec une machine manuelle	
léger (polissage léger)	180
moyen (ponçage)	290
lourd (forage lourd)	410

D. Evaluation du métabolisme moyen au cours d'un travail variable

Pour déterminer le métabolisme moyen sur une phase de travail, il est nécessaire d'effectuer une étude des temps d'exécution qui inclut une description détaillée du travail. Ceci demande de classer chaque activité en tenant compte de facteurs tels que la durée de l'activité, les distances parcourues, les hauteurs, les poids manipulés, le nombre d'actions effectuées...

Le métabolisme pour un cycle de travail peut être déterminé à partir des métabolismes des diverses activités et des durées respectives par:

$$M = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n M_i t_i \quad (1)$$

où

- M est le métabolisme moyen du cycle de travail, en watts
- M_i est le métabolisme de l'activité i , en watts
- t_i est la durée de l'activité, en secondes
- T est la durée, en secondes, de la phase de travail considérée et est égal à la somme des durées partielles t_i

L'enregistrement des activités professionnelles et la durée des activités pendant un jour ouvrable ou pendant une période particulière peut être simplifié en employant le journal décrit au tableau 8.

Tableau 8 – Journal d'enregistrement des activités

Date						
Sujet						
Lieu de travail						
Température de l'air (°C)						
Température de globe (°C)						
Humidité de l'air (RH %)						
Vitesse de l'air (m/s)						
Isolement vestimentaire (clo)						
Heure	Minute	Numéro de la tâche				
		1	2	3	---	n
..						
..						

La procédure préconisée est la suivante:

- choisir un opérateur représentatif
- déterminer la phase de travail à analyser, en s'intéressant à sa représentativité

- observer le travail de cet opérateur pendant la phase déterminée
- déterminer les composantes de la tâche et le métabolisme correspondant, au moyen des tableaux 4, 5, 6 ou 7
- numéroter ces composantes et préparer le journal
- enregistrer le numéro de la composante dès qu'elle débute

Après l'observation:

- calculer le temps passé à chaque composante de la tâche
- calculer le métabolisme moyen par l'expression ci-dessus

La table des résultats peut prendre la forme du tableau 9:

Tableau 9 - Table récapitulant les résultats

Tâche:..... Date:..... Observateur:.....

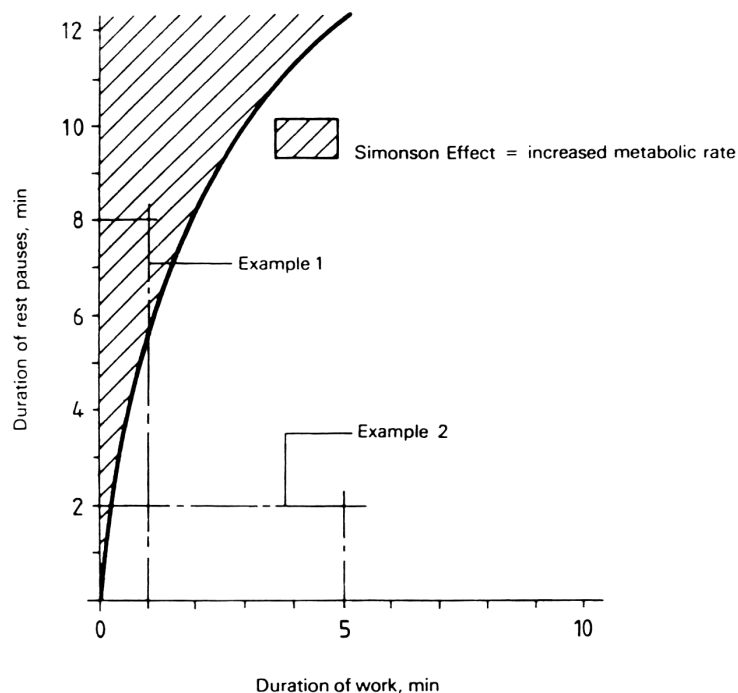
Composantes		M_i W	Temps t_i sec	Produit $M_i t_i$
N°	Description			
1	Tâche 1	M_1		
2	Tâche 2	M_2		
..				
i	Tâche i	M_i		
..				
n	Tâche n	M_n		
	Total			
	Métabolisme moyen		X	X

Influence des durées de travail et de repos

La méthode exposée ci-dessus ne peut pas être utilisée pour l'évaluation du métabolisme moyen pour des conditions de travail avec alternances de périodes courtes d'activité et longues de repos. Dans ce cas-ci, elle conduirait à une sous-estimation du métabolisme connu sous le nom d'effet de Simonson. La limite de validité des combinaisons repos - travail est donnée à la figure 1:

- l'exemple 1 concerne un cycle de 8 min de repos et 1 min de travail. Dans ce cas, la technique exposée ci-dessus pour calculer le métabolisme moyen mènerait à une sous-estimation de la valeur réelle du métabolisme
- dans l'exemple 2, les tableaux peuvent être employés avec la précision indiquée.

Figure 1 – Domaine d'augmentation du métabolisme



L'augmentation du métabolisme dû à l'effet de Simonson dépend du type de travail et des groupes musculaires utilisés.

E. Interpolation entre les valeurs données par les tableaux

L'interpolation des valeurs métaboliques est correcte.

Quand les vitesses de déplacement diffèrent de celles indiquées dans les tableaux, l'interpolation n'est cependant valable que dans une marge de $\pm 25\%$ de la vitesse indiquée.

F. Cas des opérateurs non "standards"

Les valeurs rapportées dans les tableaux ont été normalisées pour un opérateur "standard", travaillant dans un environnement thermique confortable.

Pour une personne donnée accomplissant une tâche donnée, le métabolisme peut varier dans certaines limites autour des valeurs moyennes données dans les tables, du fait de l'influence des facteurs mentionnés précédemment.

On peut estimer que:

- pour le même travail et dans les mêmes conditions de travail, le métabolisme peut varier d'environ $\pm 5\%$ d'une personne à une autre
- pour une personne formée à l'activité, la variation est d'environ 5 % dans des conditions de laboratoire.

Sur le terrain, c'est-à-dire quand l'activité n'est pas exactement la même d'une fois à une autre, une variation allant jusqu'à plus de 20 % peut être constatée.

Vu ce risque d'erreur, il n'est pas normalement justifié, à ce niveau de l'évaluation, de prendre en considération les différences de taille, genre... des sujets.

La considération du poids du sujet peut se justifier seulement pour des activités comportant des mouvements du corps entier, tels que marcher, s'élever, soulever un poids...

En ambiances chaudes, une augmentation d'au maximum 10 à 20 W peut survenir du fait de la fréquence cardiaque accrue et de la transpiration. Une telle correction n'est pas justifiée ici.

D'autre part, en ambiances froides, une augmentation importante du métabolisme peut être observée si l'opérateur frissonne. Le port de l'habillement lourd augmente également le métabolisme, en augmentant le poids du sujet et en diminuant la facilité des mouvements.

6. Niveau 3, Analyse

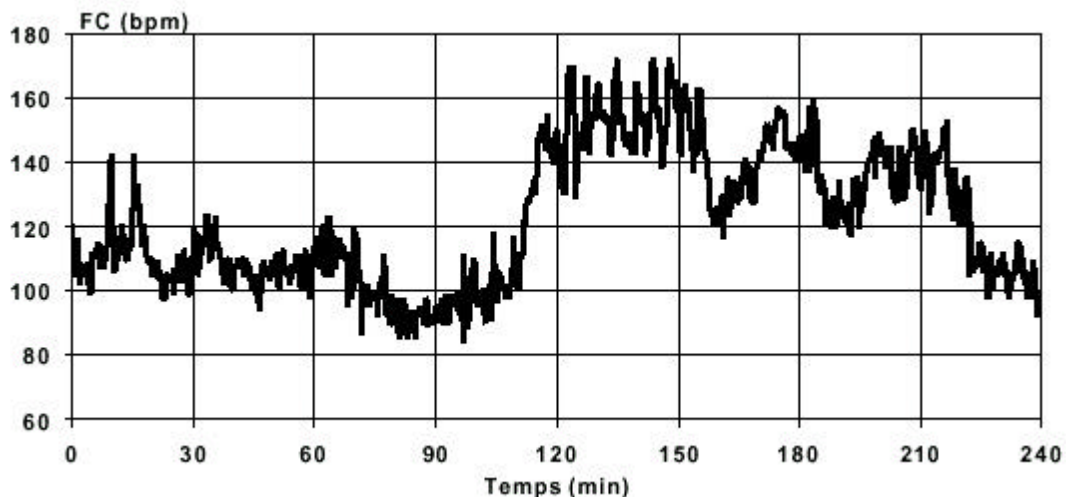
- **Estimation du métabolisme à partir de la fréquence cardiaque**

La fréquence cardiaque à un moment donné peut être considérée comme une somme de plusieurs composants.

$$FC = FC_0 + \Delta FC_M + \Delta FC_S + \Delta FC_T + \Delta FC_N + \Delta FC_E$$

où

- FC_0 est la fréquence cardiaque, en battements par minute, au repos, en position couchée, dans des conditions thermiques neutres
- ΔFC_M est l'augmentation de la fréquence cardiaque due à la charge musculaire dynamique, dans des conditions thermiques neutres
- ΔFC_S est l'augmentation de la fréquence cardiaque due au travail musculaire statique. Cette composante dépend de la relation entre la force utilisée et la force volontaire maximale du groupe musculaire en fonctionnement
- ΔFC_T est l'augmentation de la fréquence cardiaque due à la contrainte thermique. Cette composante est discutée dans la norme ISO 9886
- ΔFC_N est l'augmentation de la fréquence cardiaque due à la charge mentale
- ΔFC_E est la composante résiduelle de la fréquence cardiaque due, par exemple, aux effets respiratoires, au rythme circadien, à la déshydratation.



Dans le cas du travail dynamique utilisant les groupes musculaires principaux, avec seulement un peu de charge musculaire statique et en l'absence de contrainte thermique et de charge mentale, le métabolisme peut être estimé en mesurant la fréquence cardiaque pendant le travail.

Une relation linéaire peut alors être supposée entre la fréquence cardiaque et le métabolisme. Si les restrictions mentionnées ci-dessus sont prises en considération, cette méthode peut être plus précise que les précédentes.

La fréquence cardiaque peut être enregistrée sans interruption, par exemple en utilisant un équipement télémétrique, ou peut être mesurée manuellement, avec une précision réduite, en comptant les pulsations artérielles (voir ISO 9886).

La fréquence cardiaque moyenne FC peut être calculée sur des intervalles fixes de temps, par exemple 1 minute, sur différents cycles de fonctionnement ou sur la durée totale de la journée de travail.

En présence d'une charge thermique importante, de travail musculaire statique, de travail dynamique avec de petits groupes musculaires, ou encore d'une charge mentale importante, la pente et la forme de la relation fréquence cardiaque - métabolisme peuvent changer considérablement. La procédure pour corriger les valeurs de fréquence cardiaque pour l'effet thermique est décrit dans la norme ISO 9886.

7. PREDICTION DE LA CAPACITE MAXIMALE DE TRAVAIL ET DE LA RELATION (FC-M) INDIVIDUELLE

La capacité maximale de travail peut être déterminée directement par une épreuve d'effort maximale ou indirectement par une épreuve sous-maximale. Ces épreuves exigent un matériel sophistiqué et requièrent une grande motivation des travailleurs. D'autre part, certains estiment que de telles épreuves, quelles que soient les précautions prises, font courir un risque inacceptable pour le travailleur. Enfin, il est évident que de telles épreuves ne peuvent être réalisées à grande échelle et doivent donc être réservées aux cas exceptionnels où la connaissance de l'état physique du travailleur est primordiale. Ces techniques sont donc très rarement utilisées dans l'environnement de travail et ne seront pas décrites ici.

Le plus généralement, la CMT et la relation (FC-M) sont prédites en fonction de l'âge et du poids de la personne. Cette relation peut être calculée à partir de 2 points:

- Les valeurs de fréquence cardiaque et de métabolisme au repos:
 - Le métabolisme au repos assis M_0 peut en général et a priori être considéré comme égal à 100 W (hommes et femmes).
 - La FC au repos assis FC_0 s'avère en moyenne égale à 75 bpm. Cette valeur varie très fortement cependant entre sujets et pour un même sujet en fonction des circonstances journalières. Si l'on dispose d'un enregistrement continu de la FC au poste de travail, il paraît préférable d'adopter comme fréquence de repos la valeur de FC dépassée durant 99% du temps d'observation (FC_{99}). Cette valeur correspond en général à la FC durant les périodes de repos prises par le travailleur.
- Les valeurs maximales de fréquence cardiaque et de métabolisme
 - La valeur maximale de FC varie de manière assez systématique avec l'âge selon l'expression (hommes et femmes):

$$FC_{max} = 205 - 0.62 \text{ âge}$$
 - La valeur de métabolisme maximal correspond à la consommation maximale d'oxygène. Elle peut être prédite en fonction du poids et de l'âge de la personne par l'une des expressions suivantes:

$$CMT = (18 - 0.1 * \text{Age}) \text{ Poids} \quad (\text{hommes})$$

$$(14.5 - 0.1 * \text{Age}) \text{ Poids} (\text{femmes})$$
 ou mieux

$$CMT = (76 - 0.4 * \text{Age}) \text{ Poids}^{2/3} \quad (\text{hommes})$$

$$(55 - 0.35 * \text{Age}) \text{ Poids}^{2/3} \quad (\text{femmes})$$
- A partir des couples de valeurs (FC_0, M_0) et (FC_{max}, CMT), la relation peut s'écrire:

$$FC = a M + b$$
 où $a = (FC_{max} - FC_0) / (CMT - M_0)$
 $b = FC_0 - a \cdot M_0$

Le poids concerné est le poids sans tenir compte des tissus adipeux nuisant à l'aptitude physique. A défaut de mesures plus spécialisées (épaisseur du pli cutané), on devra estimer ce poids maigre en comparant le poids réel au poids normal qui, pour les hommes, est donné par:

$$P = 0.75 \text{ Taille} + 0.31 \text{ Age} - 65 \text{ (hommes)}$$

$$P = 0.64 \text{ Taille} + 0.31 \text{ Age} - 55 \text{ (femmes)}$$

et au poids idéal:

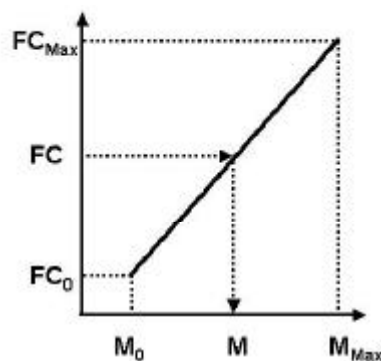
$$P = (3 \cdot \text{Taille} - 250) / 4 \quad (\text{hommes et femmes})$$

Ces expressions seront utilisées pour déduire le métabolisme à partir de la fréquence cardiaque. Il est essentiel d'en garder à l'esprit les limites de validité

- Les estimations de CMT, FC_{max} , FC_0 et M_0 sont approximatives.
- Ces expressions sont valables strictement pour des valeurs de FC supérieures à 110-120 bpm. En-dessous, interviennent des effets émotionnels ou autres pouvant fausser totalement la relation.
- La FC peut être influencée par les conditions thermiques de travail, de sorte que la relation devienne inapplicable. En pratique, on constate une élévation en moyenne de 33 bpm par degré d'élévation de la température du corps. Cette valeur est cependant très fortement variable d'un sujet à l'autre.
- La FC augmente démesurément par rapport au métabolisme dans le cas d'efforts statiques tels que le port d'objets, les efforts de traction,... La relation (FC, M) n'est alors plus valable.
- Même dans le cas d'effort dynamique (marche, mouvements alternatifs), la relation dépend des muscles mis en jeu et est donc différente suivant qu'il s'agit d'un travail des mains ou des jambes.

Ces effets de charge statique, masse musculaire, effets neurogènes, etc... sont impossibles à quantifier, de sorte que les valeurs de métabolisme déduites de la FC ne pourront pas être interprétées comme représentant la dépense énergétique. Ce ne sera cependant pas une limitation si l'objectif est d'apprécier la charge de travail de quelque nature qu'elle soit et ses répercussions.

Aussi, la valeur déduite de la FC sera-t-elle appelée **Métabolisme équivalent**, c'est-à-dire, métabolisme qui, sur le vélo ergométrique, lors d'une épreuve d'effort, eut donné lieu à la même valeur de FC que celle observée au poste de travail.



La relation est utilisée pour dériver le métabolisme à partir de la fréquence cardiaque moyenne mesurée.

Le tableau 10, donne, avec une certaine perte de précision, la relation FC – M en fonction de l'âge et du poids de la personne.

Tableau 10 - Relation Métabolisme (en watts) – Fréquence cardiaque, prédite en fonction de l'âge et du poids du sujet (femmes et hommes)

Age (années)	Poids				
	50 kg	60 kg	70 kg	80 kg	90 kg
Femmes					
20	5.2 FC - 270	6.1 FC - 324	6.8 FC - 378	7.6 FC - 427	8.1 FC - 473
30	5.0 FC - 257	6.0 FC - 311	6.7 FC - 361	7.2 FC - 410	7.9 FC - 457
40	4.9 FC - 244	5.6 FC - 165	6.3 FC - 346	7.0 FC - 392	7.7 FC - 439
50	4.7 FC - 229	5.4 FC - 279	6.1 FC - 328	6.7 FC - 373	7.4 FC - 418
Hommes					
20	6.7 FC - 361	7.6 FC - 428	8.5 FC - 491	9.4 FC - 553	10.1 FC - 610
30	6.5 FC - 355	7.4 FC - 419	8.3 FC - 482	9.2 FC - 542	9.9 FC - 600
40	6.3 FC - 346	7.2 FC - 410	8.1 FC - 472	9.0 FC - 531	9.7 FC - 587
50	6.1 FC - 335	7.2 FC - 400	7.9 FC - 461	8.8 FC - 518	9.5 FC - 574

8. Niveau 4, Expertise Evaluation du métabolisme par le mesurage de la consommation d'oxygène

Les méthodes d'expertise, extrêmement difficiles à mettre en œuvre et nécessitant des appareils très coûteux, ne seront pas exposées ici. Le lecteur intéressé en trouvera la description dans la norme ISO 8996.

L'évaluation du métabolisme à partir de la consommation en oxygène implique le mesurage des concentrations en oxygène des gaz inspirés et expirés et du débit ventilatoire. Les appareils de mesurage sont encombrants, d'un usage délicat et requièrent un personnel spécialisé. Le port du masque ou (ce qui est préférable pour des problèmes d'étanchéité) d'un embout buccal et d'un pince-nez posent non seulement des problèmes d'acceptabilité pour le personnel, mais donnent lieu à des modifications du comportement physiologique tel que de l'hyperventilation.

Il est bien évident qu'il serait aberrant de chercher par ces techniques à évaluer le métabolisme associé à des travaux de faible charge physique (travaux sédentaires par exemple). Même pour les travaux lourds, où, a priori, le port de l'appareil ne représente qu'une faible charge supplémentaire pouvant sans doute être négligée, certaines études ont montré que la présence de l'observateur et l'inconfort dû à l'appareillage (impossibilité de parler ou de fumer par exemple) est susceptible de modifier assez radicalement les procédures et les rythmes de travail, de sorte qu'en définitive la consommation d'oxygène mesurée ne peut être considérée comme étant celle exigée en routine par la tâche.

Ces techniques de mesurage direct ne pourront donc être utilisées qu'avec discernement et dans des circonstances exceptionnelles.

9. PENIBILITE DU TRAVAIL

L'appréciation de la pénibilité du travail durant un intervalle de temps Δt peut être réalisée de la manière suivante:

- Calculer le pourcentage moyen d'utilisation de CMT sur cet intervalle.
Si l'on part des fréquences cardiaques, cela revient à calculer au temps t :
 - ✧ la FC moyenne sur l'intervalle Δt
 - ✧ le métabolisme équivalent: $M_{eq\Delta t,t} = (FC_{\Delta t,t} - b) / a$
 - ✧ le % d'utilisation $p_{\Delta t,t} = M_{eq\Delta t,t} / CMT * 1000$.
- Calculer la durée limite de travail continu D_{max} correspondant à $p_{\Delta t,t}$ par la relation de BINK.
- Calculer la dose de pénibilité $DOSE_{\Delta t,t} = 100 \Delta t / D_{max}$: rapport de la durée du travail à la durée maximale autorisée en continu.

Le calcul pour $\Delta t = 480$ min est unique puisqu'il considère l'ensemble de la séquence de travail et concerne la pénibilité globale.

Si l'on ne dispose d'aucune information concernant l'activité du sujet en dehors de ses heures de travail en usine et si l'on fait l'hypothèse qu'il est alors au repos (100w), le calcul de la pénibilité à partir de la dépense énergétique journalière totale est superflu, le critère de 35% de CMT sur 8h étant plus sévère. En effet, pour un sujet standard (CMT = 1000 W et $DC_{tot} = 17200$ kJ)

- la dépense énergétique maximale durant les 8 h de travail est
 $1000 * 35\% * 8 \text{ h} * 3600 \text{ sec/h} = 10080 \text{ kJ}$
- la dépense énergétique en dehors des heures de travail
 $100 * 16 \text{ h} * 3600 \text{ sec/h} = 5760 \text{ kJ}$,

soit au total 15.840 kJ.

10. Perception des travailleurs

L'approche la plus courante consiste en interroger le(s) travailleur(s) sur:

1. ses habitudes sportives, tabagiques, de loisirs en général.
2. ses activités particulières durant les jours qui précèdent l'observation et en particulier durant les dernières 24 h.
3. sa sensation de fatigue et de nervosité avant et après le travail.
4. son impression générale de la pénibilité du travail réalisé.
5. la localisation et l'intensité de douleurs corporelles éventuelles avant et après le travail sur, par exemple, le diagramme corporel de Corlett et Bishop.

Il est évident que ces données doivent être couvertes par le secret professionnel et qu'elles ne peuvent être valablement recueillies que si

1. il existe une relation de confiance entre observateur et observé;
2. les objectifs de l'étude ont été clairement expliqués;
3. le travailleur est librement consentant.

11. Interprétation

On dispose donc en parallèle de

1. la liste chronologique des activités;
2. la liste des postures successives;

3. le relevé de FC (Fig 1);
4. l'avis du travailleur.

Ce qui permet

1. de comprendre l'organisation générale du travail et de la quantifier;
2. de déterminer le cycle de travail éventuel;
3. de distinguer les arrêts fortuits et systématiques;
4. de reconnaître et de qualifier les phases les plus pénibles, de manière à guider la recherche d'améliorations ergonomiques.

Reste à apprécier sur l'ensemble du poste si le travail est acceptable en absolu et en relatif. Pour ce faire, on utilise les tables récapitulatives d'activités et de postures permettant de reconnaître

- la fréquence et la durée totale des activités les plus contraignantes;
- la fréquence des différentes postures, mouvements ou efforts.

Sur base de ces données, des analyses complémentaires spécialisées peuvent éventuellement être entreprises pour quantifier le risque associé à certains mouvements et rechercher une solution.

L'analyse globale de FC peut être réalisée de la manière suivante:

- tracé de l'histogramme cumulé donnant le pourcentage du temps d'observation pendant lequel toute valeur de FC a été dépassée. En particulier, on retiendra:
 - FC_1 et FC_{10} : fréquences cardiaques dépassées pendant 1% et 10% du temps, représentatives des pics de FC au poste de travail
 - FC_{99} : fréquence cardiaque dépassée pendant 99% du temps, représentative des valeurs au repos (pour autant que la phase d'observation ait compris des périodes de repos !) et qui est utilisée comme valeur de FC de repos FC_0 pour les calculs ci-dessous.
 - la gamme de variations de FC est dès lors ($FC_1 - FC_{99}$) ou ($FC_{10} - FC_{99}$);
- calcul du temps total pendant lequel une valeur de FC considérée comme limite a été dépassée (ex.: 115, 130 ou FC correspondant à 33% de CMT);
- calcul de la FC moyenne dont on peut déduire le métabolisme équivalent, le pourcentage d'utilisation de la CMT et la durée limite d'exposition. A cette fin, la relation (FC, M) est recalculée sur la base de couples au repos ($FC_{99}, 100$) et au maximum (FC_{max}, CMT).

L'interprétation finale est basée sur:

- les valeurs les plus élevées de FC.
La limite $FC = (200 - \text{âge})$ est souvent pratiquée pour des épreuves d'effort sous-maximal. Cela paraît encore trop élevé sur le terrain et on pourrait préconiser $(190 - \text{âge})$ comme valeur limite de pointe à n'atteindre éventuellement que de manière fortuite.
- le M_{eq} exigé par ce poste.
Si M_{eq} dépasse 350 W sur les 8 heures, on peut estimer que le travail est à la limite physique des travailleurs. S'il dépasse 250 W, alors que sont comprises dans l'analyse les phases de récupération, il y a lieu de surveiller les phases de travail les plus intenses et une analyse partielle, comme ci-dessus mais sur une séquence de travail, doit être menée.

- les pourcentages d'utilisation de la CMT, permettant cette fois de juger sur une séquence ou sur l'ensemble du poste si le travail est acceptable pour le travailleur proprement dit. La discussion est en fait la même que pour le M_{eq} , les valeurs repères étant cette fois 33 et 25% respectivement.

L'état du travailleur avant le travail et ses réponses aux interrogations permettent d'apprécier son degré de forme physique en général et en particulier le jour de l'observation. Ses opinions sur le poste et son appréciation de la pénibilité ou de douleurs ressenties permettent de mieux distinguer les opérations posant problème et de mieux rechercher les solutions possibles. Elles permettent également de corroborer l'appréciation finale sur le poste de travail.

REFERENCES

1. CORLETT J.N., BISHOP R.P. (1976) A technique for assessing postural discomfort. *Ergonomics*, 19, 2: 175-182.
2. ISO 8996 (1987) Détermination du métabolisme énergétique, Organisation Internationale de Standardisation, Genève.
3. MALCHAIRE J., MAIRIAUX Ph. (1985) Validité de la prédiction de la consommation maximale d'oxygène. *Arch. Mal. Prof.*, 46, 6 : 379-384.
4. MALCHAIRE J. (1988) Méthodologie générale d'interprétation des enregistrements continus de fréquence cardiaque aux postes de travail. *Cah. Méd. Trav.*, Vol XXV, 4 : 181-186.