



HAL
open science

Documentation sur le modèle thermorégulation humaine à 2 nœuds Modèle “ MAC_2N ”

Françoise Thellier, Françoise Monchoux

► To cite this version:

Françoise Thellier, Françoise Monchoux. Documentation sur le modèle thermorégulation humaine à 2 nœuds Modèle “ MAC_2N ”. [Rapport de recherche] Université toulouse 3 Paul Sabatier. 2005. hal-02177302

HAL Id: hal-02177302

<https://hal.science/hal-02177302>

Submitted on 8 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Rapport contrat PHASE – INFLUTHERM

Juin 2005

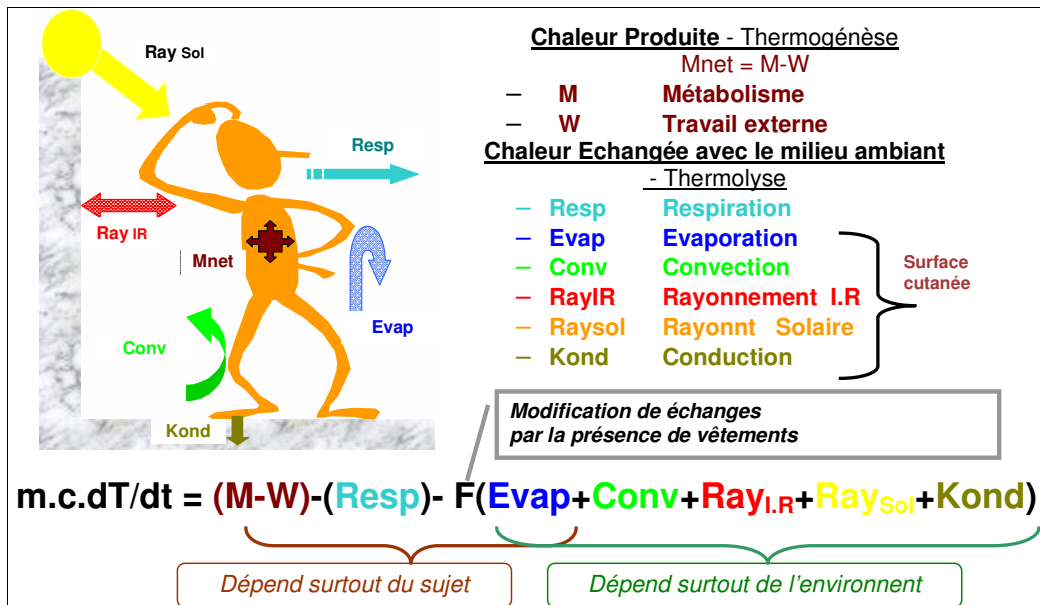
**Documentation sur le modèle
thermorégulation humaine à 2 nœuds
Modèle « MAC_2N »**

Françoise THELLIER – Françoise MONCHOUX

Introduction

Le corps humain est un système thermique complexe, il produit de la chaleur et de l'eau qu'il doit évacuer dans son milieu environnant (cf. figure). La contrainte à laquelle il doit faire face est de maintenir sa température interne autour de 37°C, quel que soit le climat. Pour cela il utilise divers processus de *régulation physiologique* involontaires qui lui permettent de s'adapter à une gamme plus ou moins large de situations. C'est un système de thermorégulation performant qui module la production et les transferts de masse et de chaleur, internes et externes.

En écrivant un bilan thermique simplifié on constate qu'une part des transferts dépendent essentiellement de l'individu lui-même (physiologie, activité, ..), mais tous les échanges cutanés dépendent beaucoup de l'environnement et peuvent énormément varier en fonction de la présence des vêtements.

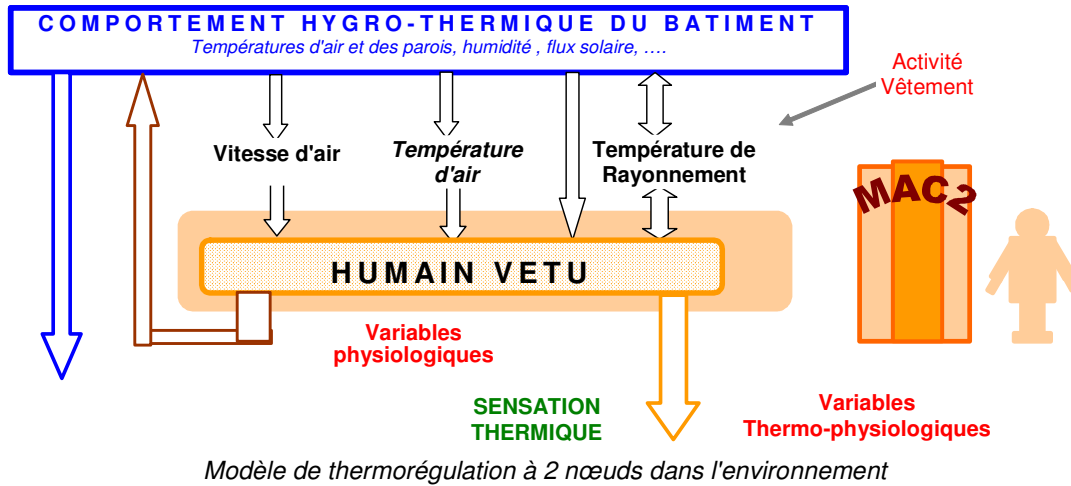


Bilan thermique du corps humain

Le logiciel « Mac_2N » (Modèle pour l'Analyse du Confort _ 2 Noeuds) à été développé et validé l'Université Paul Sabatier par les membres du laboratoire PHASE thématique « ambiance et confort » qui sont issus de l'ex-LESETH (Laboratoire d'Energétique). Ce modèle est une représentation simplifiée des phénomènes décrits ci-dessus, où le corps humain est décomposé en 2 nœuds thermiques. Le cœur du modèle, c'est-à-dire la représentation de la thermorégulation physiologique est basée sur le modèle de Gagge.

L'objectif de ce modèle est d'avoir un outil d'évaluation des enceintes habitées en termes d'effets sur le corps humain. Le domaine d'application est essentiellement l'habitat, pour lequel il a été conçu; mais il peut être utilisé dans tout type d'ambiance thermique en régime variable. Il faut noter que ce modèle n'a aucune validité dans le cas de situations hétérogènes.

La documentation qui suit est sur la base de la documentation "PROFORMA" utilisé par le CSTB. Le modèle numérique est écrit en Fortran et fonctionne sous l'environnement du logiciel TRNSYS (Transient System Simulation). Ce logiciel de simulation permet d'étudier des systèmes en régime transitoire. Il a une structure modulaire qui le rend particulièrement souple d'emploi : il suffit d'interconnecter les modules nécessaires à la simulation pour étudier une situation particulière. Toutes les variables physiques de l'environnement peuvent être calculées par des modules existants dans la bibliothèque de TRNSYS. Le schéma général de connexion est alors le suivant :



Le document qui suit comprend 4 parties :

- ✓ la fiche PROFORMA qui décrit de manière formelle le modèle,
- ✓ le listing commenté où sont notées les équations sous forme "standard"
- ✓ La liste de toutes les variables avec les notations utilisées dans le programme, les notations standard correspondantes, et les valeurs numériques.
- ✓ Le listing du programme

FICHE PROFORMA

MODELE : MAC_2N COMPORTEMENT THERMIQUE DU CORPS HUMAIN

Fiche signalétique

◆ Nom générique	MAC_2N			
◆ Objet :	Modèle d'Analyse pour le Confort (2 nœuds)			
◆ Phénomène :	Thermorégulation humaine et transferts thermiques homme environnement			
◆ Hypothèses :	Température homogène dans les couches			
◆ Méthode :	Bilan thermique			
◆ Caractère :	<input type="radio"/> intrinsèque	<input type="radio"/> interface	<input checked="" type="radio"/> couplage	<input type="radio"/> macro modèle
◆ Mode d'approche :	<input checked="" type="radio"/> simplifié	<input checked="" type="radio"/> détaillé	<input type="radio"/> empirique	<input type="radio"/> conventionnel
◆ Type :	<input type="radio"/> algorithmique	<input checked="" type="radio"/> équationnel	<input type="radio"/> jeux de données	<input type="radio"/> logique
◆ Validation	<input type="radio"/> qualitative	<input type="radio"/> analytique	<input type="radio"/> numérique	<input checked="" type="radio"/> expérimentale

INFORMATIONS GENERALES

- ◆ Auteur du modèle : H. DERBEL, F. THELLIER
- ◆ Organisme : Laboratoire PHASE - UPS Toulouse
- ◆ Rédacteur de la fiche : F. THELLIER
- ◆ Date de la version : Juin 2005

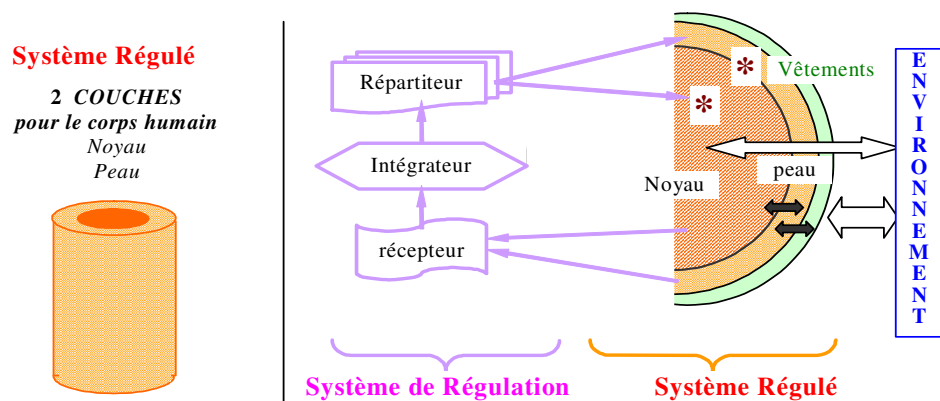
Hypothèses importantes

- ◆ Température homogène dans chaque couche
- ◆ Pas de rayonnement solaire
- ◆ Pas de transferts par conduction entre la peau et un solide
- ◆ Les vêtements sont représentés par une couche d'air + une couche de tissu
- ◆ Homme "standard" : poids : 70 kg, taille : 1.7m

Présentation générale

Le modèle MAC_2N permet le calcul de l'état thermique du corps humain soumis à une ambiance thermique instationnaire. Le cœur du modèle est basé sur le modèle de Gagge [1970] et reconnu par la communauté des thermo physiologistes [Parsons 1993, Werner 1993]. Nous avons largement modifié les transferts de chaleur au niveau cutané en particulier à travers les vêtements et surtout validé le modèle dans des conditions variées. Ce sont les modifications apportées qui font son originalité et l'élargissement de son champ d'application, par rapport au modèle original développé par les physiologistes

Le corps humain est divisé en 2 compartiments ou nœuds isothermes, les vêtements peuvent être représentés par une couche supplémentaire. L'être humain est modélisé par deux sous systèmes : le *système régulé* et le *système de régulation*. Le bilan thermique de chaque compartiment du *système régulé* est effectué en tenant compte de tous les transferts de masse et de chaleur. Les réactions physiologiques en sont déduites par le *système de régulation*. Les réactions du *système de régulation* interviennent directement sur la production ou les échanges de chaleur et modifient donc le bilan thermique du *système régulé*.



Composition du corps humain dans le modèle de thermo physiologie

- *Système contrôlé ou régulé* : c'est un système passif qui a les caractéristiques physiques et physiologiques réelles du corps humain ; il met en jeu uniquement les transferts de masse et de chaleur internes au corps et avec le milieu extérieur.

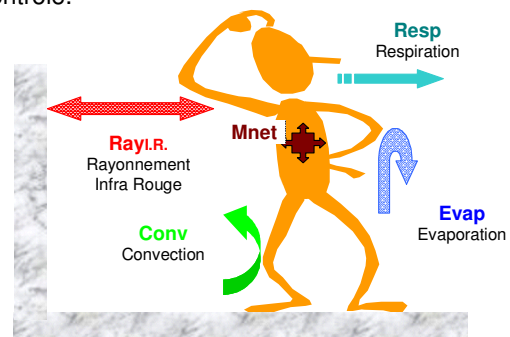
- *Système de contrôle ou de régulation* : c'est la partie active du système qui collecte et gère les informations sur l'état thermique du corps humain ; il commande les réactions physiologiques nécessaires au maintien de l'homéothermie et les répartit sur le système contrôlé.

Le bilan thermique d'un individu dépend des conditions environnementales auxquelles il est soumis. Le modèle a été développé pour des "conditions standard" correspondant à l'habitat donc certains transferts ne sont pas pris en compte. On a donc une version plus simple du bilan thermique donné en introduction.

Tous les échanges sont calculés par unité de surface corporelle.

Rayonnement solaire : non pris en compte car difficile à évaluer compte tenu des variations temporelles

Conduction : non pris en compte, car on considère que lorsqu'un individu est debout la surface du corps en contact avec un matériau avec lequel il pourrait y avoir des transferts conductifs est négligeable.



- *Mnet*
production de chaleur (W/m^2).
- *Conv, RayIR, Evap*
échanges cutanées (W/m^2).
- *Resp.*
échanges respiratoires (W/m^2).

Domaine d'application - Règles d'usage

HYPOTHESES DETAILLEES

- L'individu est un homme "standard":
Age : 20 ans ; Taille : 1,7 m; Poids : 70 Kg; Surface corporelle : 1,8 m²
- Il ne change pas de posture au cours de l'exposition
- Il est en bonne santé, non acclimaté et ne s'alimente pas
- Chaque couche est à température homogène.
- Pas de transfert dans le sens longitudinal.
- Le métabolisme n'est produit que dans le noyau
- L'apport supplémentaire dû aux frissons est déterminé par le système de contrôle et n'est réparti que dans le noyau
- Pas de rayonnement solaire
- Pas de transferts par conduction entre la peau et un solide
- Les vêtements sont représentés par une couche d'air + une couche de tissu
- Les vêtements ne sont pas totalement imperméables et opaques
- Les pertes respiratoires sont prises en compte dans le noyau

Remarques : la base du modèle de thermo physiologie a été établie pour un homme standard, tous les coefficients de transfert et du système de régulation dépendent de ces caractéristiques physiologiques. On sait que en particulier la thermorégulation change en fonction de l'âge et du sexe principalement. Par conséquent il n'est pas envisageable de simplement changer les caractéristiques physiques pour représenter un autre type de population.

CONDITIONS DE VALIDITE

Conditions climatiques proches de l'habitat.

Le modèle n'est pas valable pour un autre milieu que l'air ou pour des climats extrêmes.

Le pas de temps interne (dt) de calcul est d'une minute.

Les limitations d'utilisations sont essentiellement liées aux hypothèses.

LISTE DES APPLICATIONS

Les applications peuvent être variées, ce modèle peut être utilisé dans toutes les conditions non extrêmes et pour des variations relativement rapides du climat, c'est le cas en particulier de l'habitat, mais aussi toute enceinte habitable: voiture, train, avion, ...

MODELES ASSOCIES

Ce modèle est prévu pour fonctionner dans le logiciel TRNSYS (Transient Simulation System, Université de Madison - Wisconsin). TRNSYS gère la convergence et les couplages entre MAC_2 et les autres modèles.

DESCRIPTION FORMELLE

NOMENCLATURE

Toutes les variables sont décrites dans le tableau en annexe. De façon générale dans la description certaines variables son indicées.

indice	Signification
sk	Variables de la couche cutanée
cr	Variables du noyau
bm	Variables moyennes pour le corps
cl	Variables des vêtements
θ	Variables de la Couche d'air sous vestimentaire

PARAMETRES ou PARAMETERS :

Ce sont les données qui restent invariables dans le temps. Les "parameters" sont entrées par le vecteur Par() dans modèle.

Nom	Définition	Unité	Domaine	Valeur par défaut
idb	Mode d'entrée de l'humidité			
Feff	Feff=feff. ε ε : émissivité feff : Facteur effectif de surface rayonnante	-	0.5 - 1	0.68
kclo	coefficient d'augmentation de surface de Vêtement	-	0 - 1	0
icl	Indice de perméabilité	-	0 - 1	0.5
mf	Masse surfacique des fibres du Vêtement	g/m ²		
cp	Chaleur massique des fibres	J / g. °C		
f	Fraction de volume des fibres	-		
x	Épaisseur couche de tissu	m		
pn	Pente de la courbe de taux de reprise	-		

ENTREES OU INPUTS :

Ce sont les données qui peuvent varier au cours du temps et sont en général issues des autres modules de TRNSYS. Les "inputs" sont entrées par le vecteur XIN() dans TRNSYS.

Nom	Définition	Unité	Domaine	Valeur initiale
act	Activité	met ou W/m ²		58 W/m ²
we	Rendement du travail externe		0 - 0.5 ²	0
ta	Température d'air	°C	10 - 40	20
vel	vitesse d'air	m/s	0 - 1	0.1
tr	température moyenne de rayonnement	°C	10 - 40	20
rhp	Humidité relative (si idb=1) pression de vapeur (si idb=2)	% ou Pa		
debv	débit sous vestimentaire	m ³ /s.m ²		
clo	isolement vestimentaire	Clo	0 - 4	0

SORTIES ou OUPUTS :

Ce sont les données calculées par le modèle et qui peuvent varier au cours du temps et qui peuvent être couplées à d'autres modules de TRNSYS.

Nom	Définition	Unité
Tcr	température du centre	°C
Tsk	température de la périphérie	°C
Tcl	température de surface des vêtements	°C
qres	pertes par respiration	W/m ²
dry	pertes sensibles	W/m ²
evap	perte par évaporation cutanée	W/m ²
store	stockage de chaleur	W/m ²
shiv	indice de frissons	-
pwet	Mouillure cutanée	-
regsw	sudation de régulation	g/s.m ²
drip	eau qui coule	g/s.m ²
alpha	Proportion de masse cutanée	-
teta	température sous vestimentaire	°C
emax	pouvoir évaporatoire	W/m ²
Stsk	Sensation cutanée	-
Stcr	Sensation interne	-
Stw	Sensation de mouillure	-

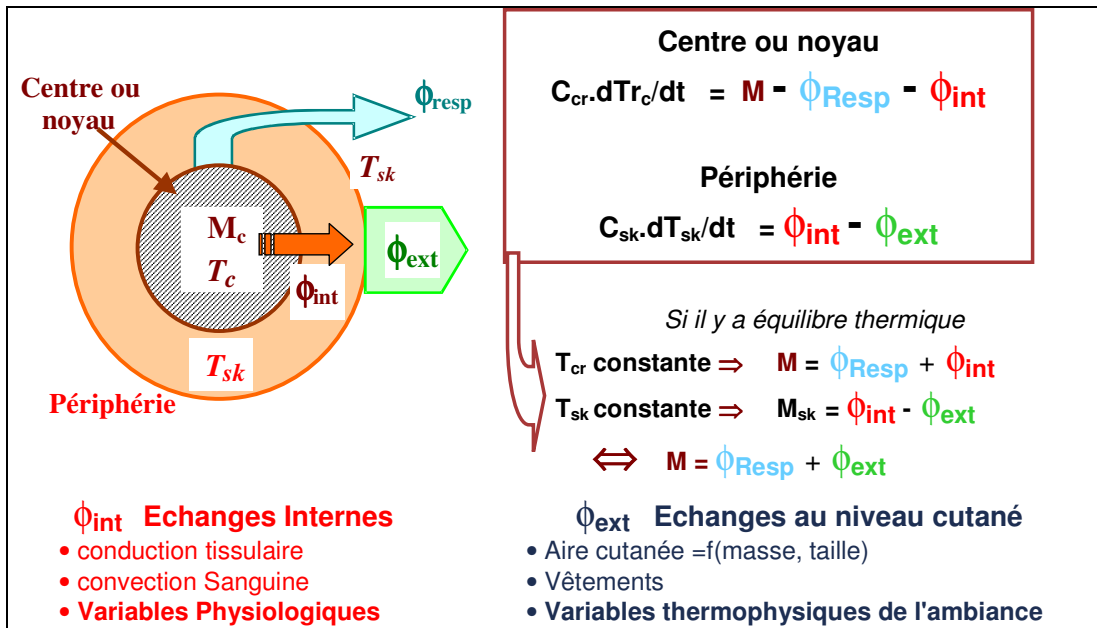
DESCRIPTION DETAILLEE

SYSTEME CONTROLE

Ce modèle correspond à un "individu standard" mesurant $h=1,70$ m et pesant $m=70$ kg. La surface cutanée d'échange totale est de $1,80$ m², d'après l'expression de Dubois. $A_{du} = 0.202 m^{0.425} \cdot h^{0.725}$

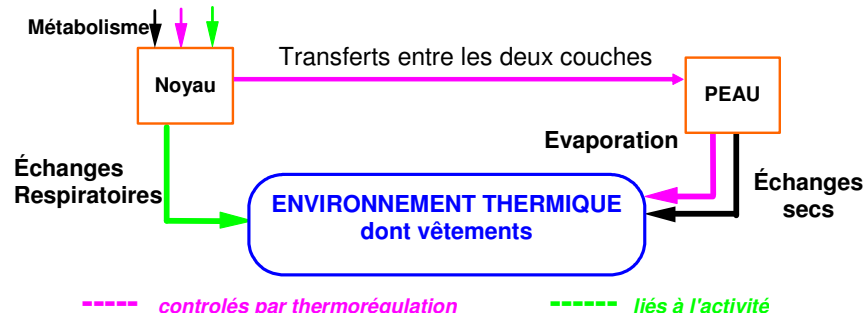
Le système contrôlé représentant le corps humain est un cylindre, il est divisé en 2 nœuds ou couches concentriques. Le nœud central représente le noyau du corps dont la température T_{cr} doit peu varier. La couche extérieure représente la périphérie dont la température T_{sk} varie.

Pour chaque couche, le bilan thermique est calculé en tenant compte de la production locale et des échanges avec l'autre couche ou avec le milieu extérieur. Le schéma général est le suivant :



La chaleur produite M dans le noyau est évacuée vers la périphérie Φ_{int} par conduction tissulaire et par convection sanguine, d'une part et d'autre part vers l'extérieur par respiration. Au niveau de la surface cutanée les transferts se font par échanges secs ou sensibles et latents.

Tous les transferts de chaleur sont supposés monodimensionnels de façon radiale. Une partie des transferts et de la production peuvent être modulés par la thermorégulation ou dépendent de l'activité.



L'importance relative des compartiments dépend de la vasomotricité qui intervient dans le calcul de α , qui correspond à la masse relative de la peau.

$$\alpha = \text{Masse de la peau} / \text{masse totale du corps}$$

On détermine alors la température moyenne corporelle T_{bm} (Mean Body Temperature) :

$$T_{bm} = \alpha \cdot T_{sk} + (1 - \alpha) \cdot T_{cr}$$

La masse de chaque compartiment dépend donc de α

$$m_{cr} = (1 - \alpha) m_{corps} \quad m_{sk} = \alpha \cdot m_{corps} \quad \text{avec} \quad m_{corps} = 70 \text{ kg}$$

bilan thermique de chaque couche : Pour chaque couche on peut écrire le bilan thermique (chaque terme est décrit plus loin) :

• Centre $C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = (HF_{cr}) \cdot A_{du} = (M - W - \Phi_{int} - \Phi_{resp}) A_{du}$

• Peau $C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = (HF_{sk}) \cdot A_{du} = (\Phi_{int} - \Phi_{dry} - \Phi_{evap}) \cdot A_{du}$

Si on écrit ce bilan sur un pas de temps Δt on peut déterminer la température de chaque compartiment en fonction de la température au pas de temps précédent.

$$T_{cr}(t + \Delta t) = T_{cr}(t) + \Delta t (HF_{cr} / C_{cr})$$

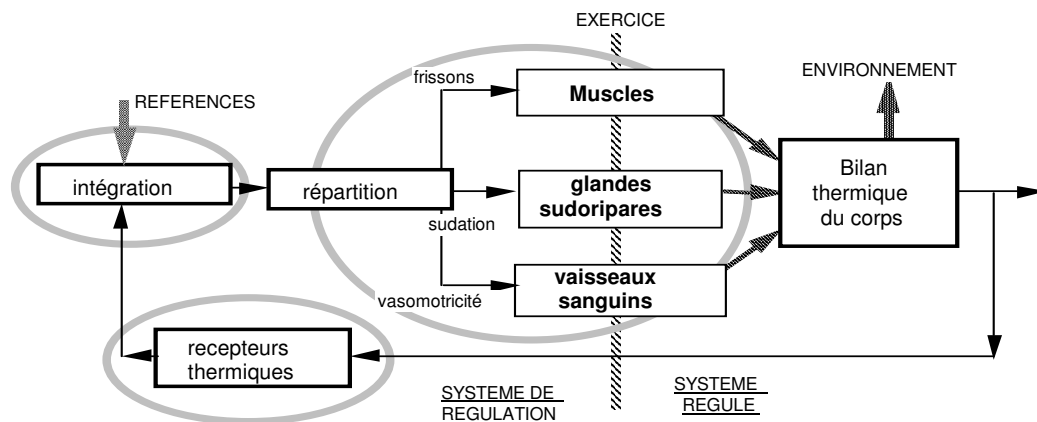
$$T_{sk}(t + \Delta t) = T_{sk}(t) + \Delta t (HF_{sk} / C_{sk})$$

SYSTEME DE CONTROLE

Le système de thermorégulation du corps humain est très complexe et donc difficile à modéliser. Les physiologistes l'ont représenté par un système à rétroaction. Il est établi pour l'homme "standard" en bonne santé et non acclimaté.

Le système de contrôle détermine les réactions physiologiques du corps ; il commande le débit d'eau suée, l'augmentation de production de chaleur due aux frissons et le débit sanguin cutané. Il peut être décomposé en trois parties :

- La première correspond aux thermorécepteurs qui détectent l'état thermique du système contrôlé.
- Par comparaison entre la température des compartiments et leur température de consigne respective, un signal donne une information de "chaud" ou de "froid".
- La deuxième intègre et détermine l'amplitude des commandes à partir des informations données par les récepteurs thermiques.
- La troisième effectue la répartition des commandes dans le système contrôlé. Elles sont de trois sortes et permettent de réguler la sudation, les frissons, la vasomotricité.



Les équations qui représentent le système de contrôle ne sont pas linéaires, il est donc impossible, sans le modèle, d'en prévoir les effets.

1) Signal d'erreur correspondant aux thermorécepteurs

Le système compare la température de chaque nœud T_i à la température de consigne $T_{i,SET}$ pour en déduire un signal de chaud (WARM) ou froid (COLD).

Dans les équations qui suivent $i = sk, cr, ou bm$

$$\begin{array}{llll} \text{Si } T_i > T_{i,SET} & \text{chaud} & \text{alors} & \text{WARM}_i = T_i - T_{i,SET} & \text{COLD}_i = 0. \\ \text{Si } T_i \leq T_{i,SET} & \text{froid} & \text{alors} & \text{WARM}_i = 0 & \text{COLD}_i = T_{i,SET} - T_i \end{array}$$

Les signaux sont ensuite diminués de 0.1°C mais positifs. Ceci permet d'avoir une plage de 0.2°C autour de la température de consigne dans laquelle aucune réaction de thermorégulation n'aura lieu.

$$\text{WARM}_i = \text{WARM}_i - 0.1 \quad \text{COLD}_i = \text{COLD}_i - 0.1$$

2) Intégration :

Les signaux sont ensuite intégrés pour déterminer la commande

DILAT signal de vasodilatation
DILAT = CDIL * WARMC

STRIC signal de vasoconstriction
STRIC = CSTR * COLDS

SKBF débit sanguin (SKin Blood Flow)
SKBF = (SKBI + DILAT) / (1. + STRIC)
SKBF doit être compris entre deux valeurs : minimale et maximale

3) Répartition :

Les signaux calculés précédemment sont ensuite répartis aux effecteurs

- Sudation

$$\text{REGSW} = \text{CSW} * \text{WARMB} * \exp^{(\text{WARMS}/10.7)}$$

REGSW est limité par une valeur supérieure REGWSL

- Vasomotricité

La modification du débit sanguin cutané entraîne une variation du coefficient α de proportion des deux couches, et intervient également dans les échanges internes.

$$\alpha = \text{alpha} = a1 + a2 / (a3 * \text{SKBF} + a4)$$

- Frissons

$$\text{SHIV} = \delta * \text{COLDS} * \text{COLDC}$$

Ce qui entraîne une augmentation de production de chaleur $M = \text{Act} + \text{SHIV}$

Production de chaleur ou métabolisme

La production de chaleur par métabolisme est supposée avoir lieu au niveau du noyau. Quand le corps est en activité, la puissance métabolique totale produite M_{tot} est transformée d'une part en puissance mécanique utile W et d'autre part en puissance thermique M_{net} .

$$M_{tot} = M_{net} + W$$

• Le métabolisme basal est la production de chaleur minimum liée aux fonctions vitales de l'organisme. Il dépend du sexe, de l'âge, de la morphologie, ... En condition de neutralité thermique, pour un homme "standard" au repos et allongé, le métabolisme est de 45 W/m^2 .

• Le métabolisme peut augmenter en fonction de l'activité physique. Les muscles ont un rendement mécanique maximal de 25 %. Le rendement η_w du travail externe est fixé pour toute la durée de l'exposition. Pour la plupart des activités faibles courante ce rendement est nul. Seule la part transformée en chaleur nous intéresse par conséquent on calcul M_{net} :

$$M_{net} = M_{tot} - W = M_{tot}(1 - \eta_w) \quad \text{avec} \quad W = \eta_w * M_{tot}$$

• Le métabolisme peut être également augmenté par les frissons, M_{SHIV} , lorsque le corps a besoin de se réchauffer. La production de chaleur supplémentaire liée aux frissons est définie par le système de

régulation. Finalement on obtient :

$$\text{Puissance totale produite} \quad \text{RM} = \text{M}_{\text{tot}} + \text{shiv}$$

$$\text{Puissance produite sous forme de chaleur} \quad \text{M} = \text{M}_{\text{net}} + \text{M}_{\text{SHIV}} = \text{RM} - \text{W}$$

Remarques :

- ✓ Le métabolisme peut être exprimé en W/m^2 ou en met ($1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$). Il peut varier de 0.8 met à plus de 10 met.
- ✓ Le modèle n'a pas été conçu pour de fortes activités, donc pour plus de 4 met, les résultats doivent être analysés avec précaution.
- ✓ Les valeurs de métabolisme et de rendement du travail sont disponibles dans de nombreux ouvrages (cf. exemples en annexe)

Transfert de chaleur du noyau vers la surface cutanée

La production de chaleur dans le corps est permanente. Si cette chaleur n'est pas dissipée, son accumulation va aboutir à une élévation de la température interne du corps. Pour éviter ce problème, des échanges de chaleur doivent avoir lieu du noyau vers la périphérie. Ces transferts de chaleur internes sont de deux sortes :

• La convection sanguine BC : Ces transferts sont dus à la circulation sanguine. Ils sont régis par les mécanismes de thermorégulation (vasomotricité). Le sang assure la majeure partie des échanges thermiques entre les différents organes. Le transfert de chaleur par convection forcée prend place entre le noyau et la périphérie. Le débit sanguin cutané SKBF est déterminé par le système de thermorégulation.

$$\text{Bc} = \text{SKBF} * \text{Cb} * [\text{Tcr} - \text{T(sk)}] \quad \text{Cb est la capacité thermique du sang}$$

On considère que la masse volumique du sang est égale à celle de l'eau 1 kg/l

• La conduction tissulaire (TD). Les transferts par conduction à travers les tissus (muscles, graisse, peau,...), sont bien moins importants que les transferts sanguins. Ces échanges se font de manière radiale d'une couche à l'autre et ont été établis sur un modèle de cylindre comme fonction de l'épaisseur des couches et de leur conductivité thermique.

$$\text{TD} = \text{Tc} * [\text{Tcr} - \text{Tsk}]$$

Ces deux modes de transferts sont alors regroupés on obtient, l'expression du flux interne Φ_{int} ou Htc :

$$\text{Htc} = (\text{Tc} + \text{skbf} * \text{Cb}) [\text{Tcr} - \text{Tsk}] \quad \text{Tc} = 5.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Les échanges respiratoires

A l'inspiration, l'air passe sur les muqueuses chaudes et humides. A l'expiration, cet air proche de 37°C et saturé en vapeur d'eau passe à nouveau sur les muqueuses qui avaient été légèrement refroidies lors de l'inspiration. A la sortie des voies respiratoires, sa température est à T_{exp} et il est saturé en vapeur d'eau. En général l'air est expiré plus chaud et plus humide qu'il n'est inspiré ; il s'agit donc d'une perte énergétique pour le corps. Le bilan net de ces transferts de chaleur est la somme des échanges de chaleur sensible (ou échanges par convection : C_{resp}) et des échanges de chaleur latente (ou échanges par évaporation : E_{resp}). Ces pertes respiratoires sont prises en compte uniquement dans la couche centrale

$$\Phi_{\text{resp}} \text{ ou } \text{Resp} = \text{C}_{\text{resp}} + \text{E}_{\text{resp}}$$

$$\text{C}_{\text{resp}} = 0,0014 \text{ M}_{\text{tot}} (\text{T}_{\text{exp}} - \text{T}_a) \quad \text{E}_{\text{resp}} = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ M}_{\text{tot}} (\text{P}_{\text{sat}}(\text{T}_{\text{exp}}) - \text{P}_a)$$

$$\text{T}_{\text{exp}}: \text{Température de l'air expiré} \quad \text{T}_{\text{exp}} = 32,5 + 0,066 \text{ T}_a + 1,99 \cdot 10^{-4} \text{ P}_a$$

Transferts de chaleur par évaporation et eau suée

Pour conserver l'équilibre thermique du corps, la production de sueur nécessaire est déterminée par le système de thermorégulation.

On définit la mouillure cutanée ω comme la fraction de peau mouillée par la sueur. Elle est calculée

par la comparaison entre la quantité d'eau maximum pouvant se trouver sur la peau et la quantité d'eau se trouvant sur la peau à un instant donné.

$$\omega = \text{surface de peau mouillée par la sueur} / \text{surface de peau totale}$$

Les échanges par évaporation ne sont jamais nuls, mais ils sont compris entre :

- une valeur maximale, appelée pouvoir évaporatoire maximal de l'ambiance (E_{max}) qui correspond au flux de chaleur latente maximum pouvant être évacué dans l'ambiance, dans le cas où la peau est totalement mouillée, c'est-à-dire $\omega = 1$.
- une valeur minimale, qui correspond à la perspiration insensible (diffusion de l'eau à travers les cellules cutanées) appelée encore : évaporation diffuse (E_{diff}). Elle n'a lieu que sur les surfaces de la peau non mouillées par la sueur.

L'évaporation diffuse est toujours présente et l'évaporation de la sueur dépendra de la quantité de sueur produite qui est déterminée par le système de thermorégulation (reg_{sw}). On peut alors écrire que la chaleur latente évacuée à la surface de la peau, $Evap$, est la somme de l'évaporation diffuse E_{dif} et de l'évaporation de la sueur E_{sw} :

$$Evap = E_{dif} + E_{sw}$$

$E_{dif} = [1 - \omega] \cdot 0.06 E_{max}$	Evaporation diffuse sur les zones non mouillées
$E_{sw} = \omega \cdot E_{max}$	Evaporation de la sueur sur la fraction de peau mouillée

Par ailleurs on définit la mouillure effective $\omega_e = Evap/E_{max} = 0.06 + 0.94 \cdot \omega$, qui correspond à la proportion de surface mouillée.

L'évaporation requise est déterminée par la thermorégulation : $E_{rsw} = L_v \cdot Reg_{sw}$	
Débit de sueur produite	Reg_{sw} (g/s.m ²)
Mouillure requise	$\omega_{req} = E_{rsw}/E_{max}$

On alors deux configurations :

- Si $\omega_{req} < 0.5$ la peau est relativement sèche tout peut s'évaporer

Evaporation de la sueur	$E_{sw} = E_{rsw} = \omega_{req} E_{max}$
Evaporation diffuse	$E_{dif} = (1 - \omega_{req}) \cdot 0.06 \cdot E_{max}$
Evaporation totale	$Evap = E_{dif} + E_{sw}$
Débit massique d'eau évaporé	$sud = Evap/L_v$ (g/s m ²)
Mouillure effective	$\omega_e = Evap/E_{max}$
- Si $\omega_{req} > 0.5$ la peau est humide et le rendement d'évaporation baisse $R_{sw} = 1 - \omega^2$

Evaporation de la sueur	$E_{sw} = R_{sw} \cdot \omega_{req} E_{max}$
Evaporation diffuse	$E_{dif} = (1 - \omega_{req}) \cdot 0.06 \cdot E_{max}$
Evaporation totale	$Evap = E_{dif} + E_{sw}$
Débit massique d'eau évaporé	$sud = Evap/L_v$ (g/s m ²)
Mouillure effective	$\omega_e = Evap/E_{max}$
débit d'eau non évaporée	$Drip = (1 - R_{sw}) \cdot Reg_{sw}$ (g/s m ²)
débit total d'eau	$H_2O = sud + drip$
- si E_{max} est négatif c'est qu'il y a condensation sur la peau (cas rare) alors $Evap = E_{max}$ ce qui constitue un apport de chaleur

Transfert de chaleur entre la peau et le milieu ambiant.

Les échanges de chaleur au niveau de la peau avec le milieu extérieur se font par chaleur sensible Q_{sk} et par chaleur latente ou évaporation $Evap$ au niveau de la peau.

Décrire les échanges de chaleur, entre une personne vêtue et son environnement thermique proche est complexe. Il faut tenir compte de l'environnement immédiat de la peau. Il peut y avoir trois configurations où les transferts de chaleur sont totalement différents :

- une partie de sa surface corporelle est nue et directement en contact avec l'ambiance
- d'autres parties sont protégées de l'ambiance par un vêtement,

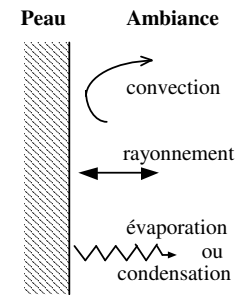
- certaines parties sont en contact avec des objets tels que le sol, siège, lit,

Etant donné la simplification du modèle à deux nœuds, plusieurs hypothèses sont faites :

- On considère qu'en général les personnes sont debout, par conséquent la surface en contact avec un solide est suffisamment petite pour ne pas en tenir compte. Dans le cas d'une personne assise dans un fauteuil, si on veut tenir compte de la modification des échanges, on considère alors l'élément comme faisant partie du vêtement ce qui ramène le calcul des échanges à l'autre configuration.
- Pour une personne vêtue, la tenue vestimentaire ne recouvre pas la totalité du corps (le plus souvent la tête et les mains sont dévêtues), on considère donc que la totalité du corps est recouverte d'un vêtement aux propriétés uniformes.

Les échanges thermiques sur la peau nue

Lorsque la surface cutanée est nue et non en contact, les échanges de chaleur s'effectuent avec le milieu extérieur par convection, rayonnement et évaporation (ou condensation). Les échanges thermiques par chaleur latente sont dus au changement de phase de l'eau au niveau de la surface cutanée. Les échanges par évaporation sont toujours des pertes de chaleur pour l'organisme, contrairement aux échanges sensibles qui peuvent être des pertes ou des gains. La condensation d'eau sur la peau qui peut être un gain de chaleur, est très rare.



Transferts de chaleur par convection

Les échanges convectifs au niveau de la peau s'écrivent : $Conv_{sk} = hc.[T_{sk} - T_a]$

La détermination du coefficient h_c est importante car il intervient également dans les échanges évaporatifs hc est fonction de la vitesse d'air relative. On a alors deux expressions possibles :

- Dans le cas le plus fréquent : $hcv = 2.7 + 8.6 V_{air}^{0.67}$
- Dans le cas d'une activité la vitesse d'air relative peut être plus élevée que celle dans le local, pour $M > 58 W/m^2$, on utilise : $hca = 1.15 (M_{tot} - 50)^{0.39}$

Finalement hc sera la valeur maximale de ces deux coefficients.

Transferts de chaleur par rayonnement

Les échanges radiatifs dans le domaine de l'infra rouge, sont exprimés de façon simplifiée correspondant aux hypothèses suivantes :

- ✓ Le gaz est transparent
- ✓ L'environnement est à une température uniforme égale à la température moyenne de rayonnement T_{mrt} et une émissivité égale à un, il n'y a donc pas de réflexion
- ✓ Le rétro-rayonnement, c'est à dire que les échanges du corps vers lui-même, est pris en compte par le facteur de surface effective rayonnante f_{eff} , qui dépend de la posture

$f_{eff} = A_{ray} / A_{du}$ A_{ray} surface qui rayonne vers l'environnement

$f_{eff} = 0.69$ personne assise, $f_{eff} = 0.72$ personne debout

ϵ est assez élevé dans le domaine de l'infra rouge. Pour la peau et les vêtements on prend en général ϵ entre 0.9 et 0.97

On obtient alors : Φ_{ray} ou $Ray_{sk} = f_{eff} \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot [T_{sk}^4 - T_{mrt}^4] = h_r \cdot [T_{sk} - T_{mrt}]$

avec $h_r = f_{eff} \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{moy}^3$ et $T_{moy} = \frac{[T_{sk} + T_{mrt}]}{2}$

Remarques :

- ✓ De façon à simplifier les entrées du modèle et compte tenu de l'expression ci-dessus c'est

($\text{eff} \cdot \epsilon$) qui est donné comme valeur de paramètre et qui par conséquent reste constant au cours de l'exposition.

- ✓ pour des calculs plus précis, pour des surfaces ayant des émissivités plus faibles, ou pour une configuration géométrique plus complexe (par exemple personne assise à un bureau) l'équation ci-dessus n'étant plus valable il est conseillé d'utiliser un calcul plus fin d'échanges radiatifs.

Evaporation maximale

Évaporation maximale sur la surface cutanée d'un sujet nu

$$E_{\max} = h_e \cdot [P_{\text{sat}, T_s} - P_a]$$

$P_{\text{sat}, T_{\text{sk}}}$ pression partielle de vapeur à température de la peau

h_e coefficient d'évaporation lié au coefficient de transfert par convection (h_c) par la relation de Lewis : $h_e = L_w \cdot h_c$ $L_w = 0,0165 \text{ K/Pa}$

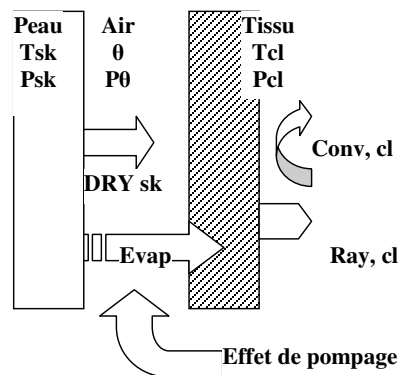
Transferts à travers les vêtements

Lorsque la peau est recouverte d'un vêtement, les transferts se compliquent. Le rôle essentiel des vêtements est de modifier les échanges entre la surface cutanée et le milieu environnant en créant un microclimat sous vestimentaire. Il apparaît entre la peau et les tissus des couches d'air dont l'épaisseur varie en fonction de la posture (assise ou debout), du vêtement lui-même (dimension des ouvertures au niveau des manches, col, ... ; porosité du tissu, ...) et de l'activité de l'individu. Les mouvements provoquent une convection forcée (effet de pompage) qui modifie les transferts thermiques. Dans la matière textile, les transferts de chaleur s'effectuent par conduction, les transferts de masse se font par diffusion pour la phase vapeur et/ou par migration pour la phase liquide. Tout se complique s'il y a plusieurs couches de vêtements donc plusieurs couches d'air.

Hypothèse : On considère que le vêtement est composé de deux couches : une couche d'air et une couche de tissu, d'épaisseur x , respectivement à température θ et T_{cl} .

L'isolation vestimentaire totale est I_{cl} (donné en clo) les valeurs sont celles que l'on trouve dans la littérature (cf. annexe). On considère que la moitié de cette isolation est due à la couche d'air et l'autre à la couche de tissu.

Dans la couche d'air il peut y avoir de la convection sous-vestimentaire. L'air circule avec un débit qui peut aller de 5 à 115 l/min



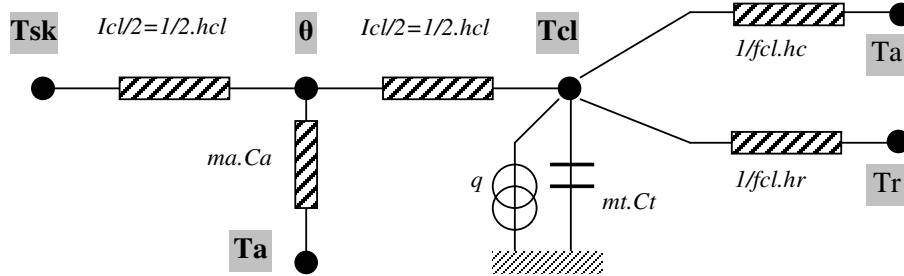
Les échanges à la surface des vêtements avec le milieu ambiant s'effectuent par convection, rayonnement et évaporation sur une surface $A_{\text{du}} \cdot f_{\text{cl}}$ du vêtement à température T_{cl} .

f_{cl} est le facteur d'accroissement de la surface d'échange dû aux vêtements, il dépend du type de vêtement (épaisseur du tissu, coupe, ...).

$f_{\text{cl}} = 1 + k_{\text{clo}} \cdot I_{\text{clo}}$ k_{clo} coefficient d'augmentation de surface. Valeur moyenne $k_{\text{clo}} = 0.27$

Transferts secs

On peut représenter les transferts par le schéma électrique suivant :



• Transferts secs à la surface du vêtement

Convection en surface du vêtement : l'expression est la même que pour la peau nue si ce n'est que la surface des vêtements est à la température Tcl

$$\text{Conv}_{cl} = hc \cdot fcl \cdot [Tcl - Ta]$$

hc : coefficient de convection à la surface des vêtements ayant la même valeur que celui du sujet nu

Rayonnement à la surface du vêtement : Les transferts radiatifs se font au niveau des vêtements. (Raycl) sont calculés avec la même méthode que pour la peau nue décrite précédemment.

$$\text{Ray}_{cl} = \text{feff} \cdot fcl \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot [Tcl^4 - Tmrt^4] = hr \cdot fcl \cdot [Tcl - Tmrt]$$

• Echanges sous vestimentaire

On suppose que l'air qui entre dans la couche sous vestimentaire à la température ambiante Ta est réchauffé pendant son passage. La convection sous vestimentaire, difficile à estimer, est souvent négligée par rapport aux modes de transferts prépondérants. Cela peut se justifier si l'épaisseur de la lame d'air entre la peau et le vêtement est faible (vêtement collé au corps, fermé au col et aux manches). Le débit d'air, dépend des ouvertures des vêtements, de leur perméabilité à l'air, de la vitesse de l'air à la surface des vêtements et de l'activité du sujet (effet de pompage dû aux mouvements). On considère un débit global et constant.

Au nœud de température d'air sous-vestimentaire on peut écrire :

$$2 \cdot hcl \cdot (Tsk - \theta) + ma \cdot Ca \cdot (Ta - \theta) = 2 \cdot hcl \cdot (\theta - Tcl)$$

Avec $ma = \rho_a \cdot debv$

debv débit d'air massique dans la couche sous vestimentaire par unité de surface (kg/s.m^2)

debv débit d'air volumique dans la couche sous vestimentaire par unité de surface ($\text{m}^3/\text{s.m}^2$)

ρ_a masse volumique de l'air $\rho_a = 1,177 \text{ kg/m}^3$

ca capacité thermique massique de l'air. $ca = 1006 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$

$$\theta = \frac{2 \cdot h_{cl} (T_{sk} + T_{cl}) + debv \cdot \rho_a \cdot ca \cdot T_a}{4 \cdot h_{cl} + debv \cdot \rho_a \cdot ca}$$

On a alors le flux sec au niveau de la peau : $\text{Dry}_{sk} = 2 \cdot hcl \cdot (Tsk - \theta)$

• Echanges dans la couche de tissu

On considère que le tissu peut être assez épais pour tenir compte de son inertie, par ailleurs on tient également compte du fait que l'eau stockée dans le tissu peut changer d'état ce qui entraîne un dégagement ou une absorption de chaleur, q.

Au nœud de température de vêtement Tcl on écrit :

$$2 \cdot hcl \cdot (\theta - Tcl) + q - fcl \cdot hc \cdot (Tcl - Ta) - fcl \cdot hr \cdot (Tcl - Tr) = mt \cdot Ct \cdot (dTcl/dt)$$

m_t masse du tissu (g/m^2)
 C_t capacité thermique du tissu ($\text{J/g}^\circ\text{C}$)
 q flux chaleur liée au changement de phase (W/m^2)

On considère que la masse du tissu est uniquement celle des fibres d'où : $m_t.C_t = m_f.C_f$

d'où
$$dT_{cl}/dt = -a T_{cl} + b \quad T_{cl}(t+\Delta t) = T_{cl}(t) \cdot \exp^{-a.\Delta t} + (b/a) \cdot (1 - \exp^{-a.\Delta t})$$

avec
$$a = \frac{2.h_{cl} + f_{cl} \cdot (hr + hc)}{m_f.c_f} \quad b = \frac{2.h_{cl}\theta + f_{cl}(hr.Tr + hc.Ta) + qc}{m_f.c_f}$$

Transferts de masse dans les vêtements

On considère que le tissu peut contenir une certaine masse d'eau M , sous forme de vapeur mv dans l'air emprisonné entre les fibres, sous forme liquide ml , ou absorbée dans la fibre mab
 $M = mab + mv + ml$

- ✓ Masse de vapeur : On pose que la vapeur d'eau se comporte comme un gaz parfait.
 Dans le tissu la vapeur se trouve dans volume $x(1-f)$ d'air emprisonné entre les fibres.
 D'où $P_{cl} \cdot x \cdot (1-f) \cdot r = mv \cdot T_{cl}$ r constante des gaz parfait pour l'air
 f fraction de volume occupé par les fibres

$$mv = (P_{cl} \cdot x \cdot (1-f)) / r \cdot T_{cl}$$

la masse de vapeur maximale est atteinte lorsque $P_{cl} = P_{sat,T_{cl}}$

d'où $mv_{max} = (P_{sat,T_{cl}} \cdot x \cdot (1-f)) / r \cdot T_{cl}$

- ✓ Masse absorbée elle dépend des propriétés du tissu et de son taux de reprise τ qui dépend de l'humidité relative. De façon à simplifier on considère que le taux de reprise τ a l'expression suivante :
 $\tau = pn.HR = pn \cdot (P_{cl} / P_{sat,T_{cl}})$, avec pn constant

$$mab = \tau \cdot mf = pn \cdot (P_{cl} / P_{sat,T_{cl}}) \cdot mf$$

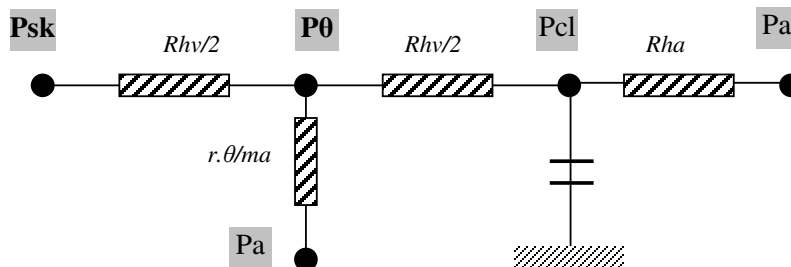
si on néglige ml $M = mv + mab = (P_{cl} \cdot x \cdot (1-f)) / r \cdot T_{cl} + pn \cdot (P_{cl} / P_{sat,T_{cl}}) \cdot mf$

d'où
$$M = P_{cl} \cdot \left[\frac{x \cdot (1-f)}{r \cdot T_{cl}} + \frac{pn \cdot mf}{P_{sat,T_{cl}}} \right]$$

- ✓ La masse d'eau maximale M_{max} est atteinte lorsque $P_{cl} = P_{sat,T_{cl}}$
 d'où $mv_{max} = (P_{sat,T_{cl}} \cdot x \cdot (1-f)) / r \cdot T_{cl}$ et $mab_{max} = pn \cdot mf$

$$M_{max} = \left[\frac{P_{sat,T_{cl}} \cdot x \cdot (1-f)}{r \cdot T_{cl}} + pn \cdot mf \right]$$

De la même façon que pour les transferts secs on peut faire le schéma électrique suivant représentatif des transferts de masse :



Pour calculer la chaleur latente évacuée à la surface de la peau Evap, on utilise les mêmes équations que pour une partie nue sauf celle concernant l'évaporation maximale sur la surface cutanée.

Rhv résistance des vêtements aux transferts d'humidité : $Rhv = Lv / (hc.iL.Lw)$
 Rha résistance de surface aux transferts d'humidité : $Rha = Lv / (fcl.hc.Lw)$

• **pression dans la couche sous vestimentaire**

$$(P_{sk}-P_{\theta})/(R_{hv}/2)+(r.\theta/ma)(P_a - P_{\theta}) = (P_{\theta}-P_{cl})/(R_{hv}/2)$$

D'où
$$P_{\theta} = \frac{\frac{2.(P_{sk} + P_{cl})}{rhv} + \frac{debv.pa}{r.\theta}}{\frac{4}{rhv} + \frac{debv.pa}{r.\theta}}$$

Remarque : En l'absence de débit sous vestimentaire et de stockage d'eau

$$(P_{\theta}-P_{cl})/(R_{hv}/2)=(P_{cl}-P_a)/R_{ha} \quad \text{d'où} \quad P_{\theta}=P_{cl}*((0.5.R_{hv}/R_{ha})+1)-(0.5.P_a.R_{hv}/R_{ha})$$

• **pression dans la couche de tissu**

$$(P_{\theta}-P_{cl})/(R_{hv}/2)-(P_{cl}-P_a)/R_{ha} = dM/dt \quad \text{et} \quad M = P_{cl} (x.(1-f)/r.T_{cl}) + (pn.mf./P_{sat,T_{cl}})$$

d'où $dM/dt = -c.M + d$
$$M(t + \Delta t) = M(t) * e^{(-c*\Delta t)} + \frac{d}{c}(1 - e^{(-c*\Delta t)})$$

$$c = \left(\frac{2}{rhv} + \frac{1}{rha}\right) / \left(\frac{x.(1-f)}{r.T_{cl}} + \frac{Pn.mf}{P_{sat,T_{cl}}}\right) \quad d = \frac{2.P_{\theta}}{rhv} + \frac{P_a}{rha}$$

La production de chaleur liée à la variation de masse d'eau : q

- si $M < M_{max}$ une partie de l'eau reste à l'état de vapeur dans l'air emprisonné dans les fibres et une partie est absorbée en libérant une certaine quantité de chaleur
 $q = hs.(dM/dt).(mab,max/M_{max})$ (hs chaleur de sorption)
- si $M > M_{max}$ l'eau en surplus change d'état ce qui s'accompagne d'une production ou absorption de chaleur :
 $q = Lv.(dM/dt)$

SENSATIONS THERMIQUES

Trois sensations sont calculées elles correspondent à des notions différentes :

- Stsk : sensation thermique générale, elle est liée à la température de peau
- Stcr : sensation liée à la température centrale, qui correspond plutôt à des dépassements de valeurs "normales"
- Stw : sensation de mouillure qui n'a de sens qu'en climat chaud

Le résultat est exprimé sur une échelle en 7 points :

-3 Très Froid -2 Froid -1 Légèrement Froid 0 Neutre
 3 Très Chaud 2 Chaud 1 Légèrement Chaud

Les sensations thermiques ont été établies dans 4 cas, en fonction de l'activité et de la tenue vestimentaire.

Repos : métabolisme < 120 W/m² dévêtu : Icl < 0.6 clo

Les sensations dépendent directement de chaque variable. Les limites de chaque gamme sont données dans le tableau.

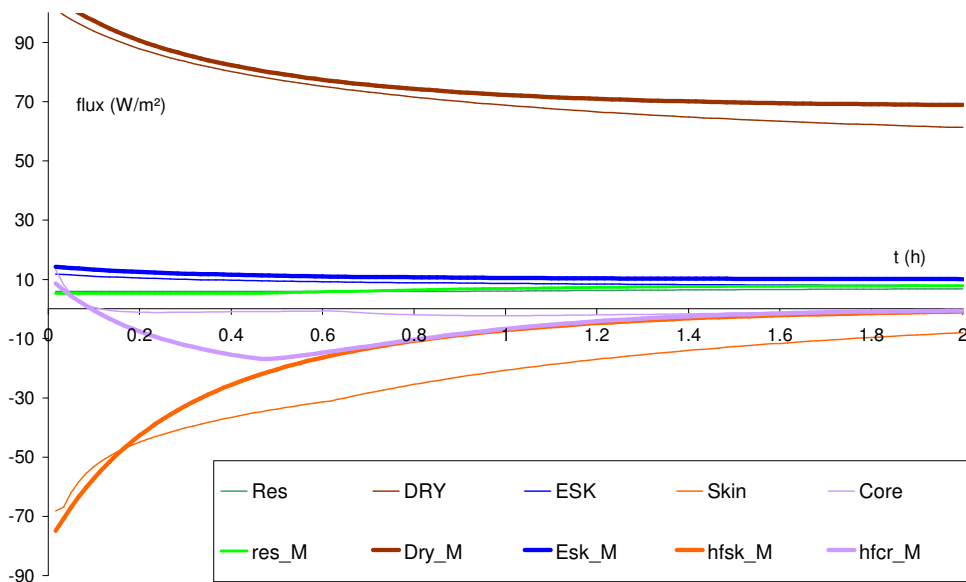
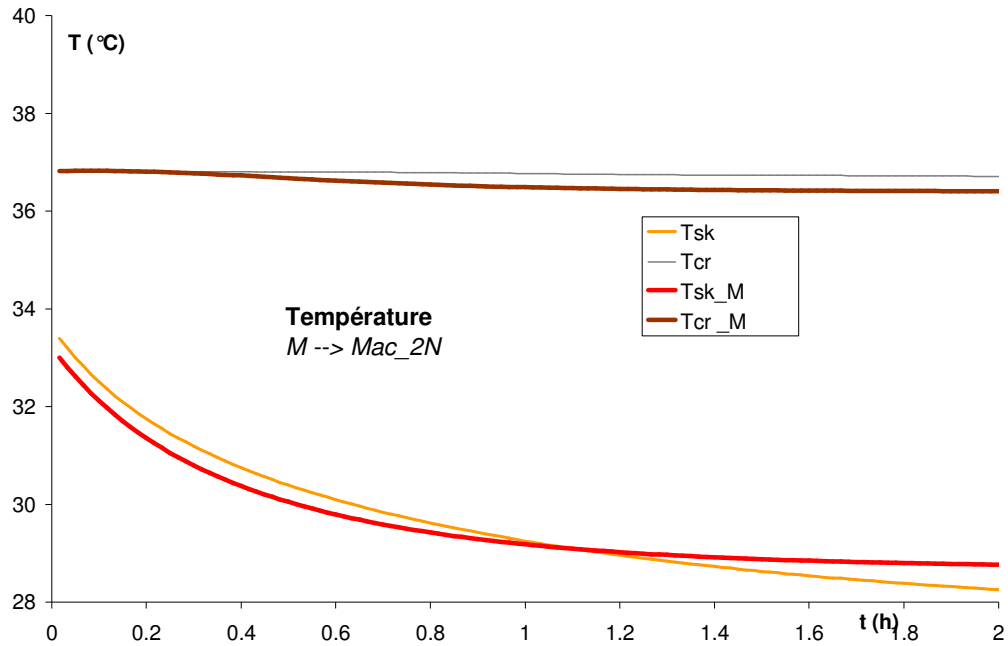
		TF		F		LF		N		LC		C		TC
		-3		-2		-1		0		1		2		3
Repos dévêtu														
w						0.05		0.27		0.57		0.84		1.0
Tin				34.0		36.5		37.5		41.5				
Tsk	24.8		29.8	31.6		32.9		34.2		34.6		35.4		37.6
Repos Vêtu														
w						0.05		0.17		0.46		0.76		1.0
Tin				34.0		36.5		37.5		41.5				
Tsk	24.8		30.1	31.7		33.1		34.3		34.7		35.7		37.0
Activité Dévêtu														
w						0.05		0.36		0.77		0.88		1.0
Tin						36.5		38.5		40.0				
Tsk	24.8		27.0	28.4		30.2		31.5		33.8		34.8		38.0
Activité Vêtu														
w						0.05		0.25		0.58		0.88		1.0
Tin						36.5		38.5		40.0				
Tsk	24.8		28.0	29.1		31.8		32.9		34.0		35.1		37.7

Validation

Le programme "human balance" disponible sur le net et Mac_2N sont comparé

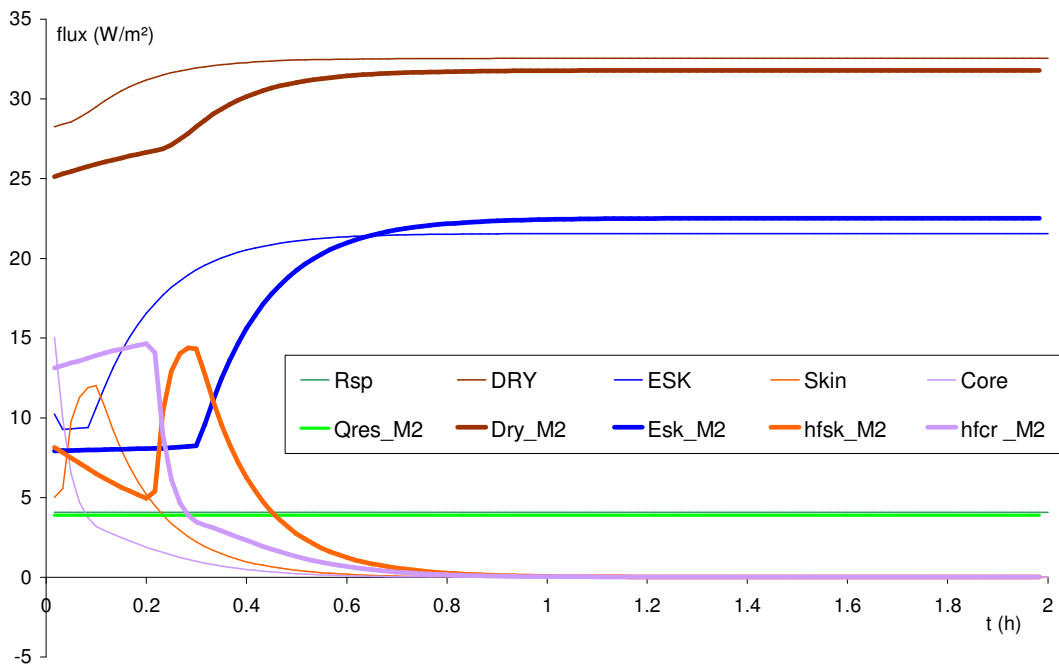
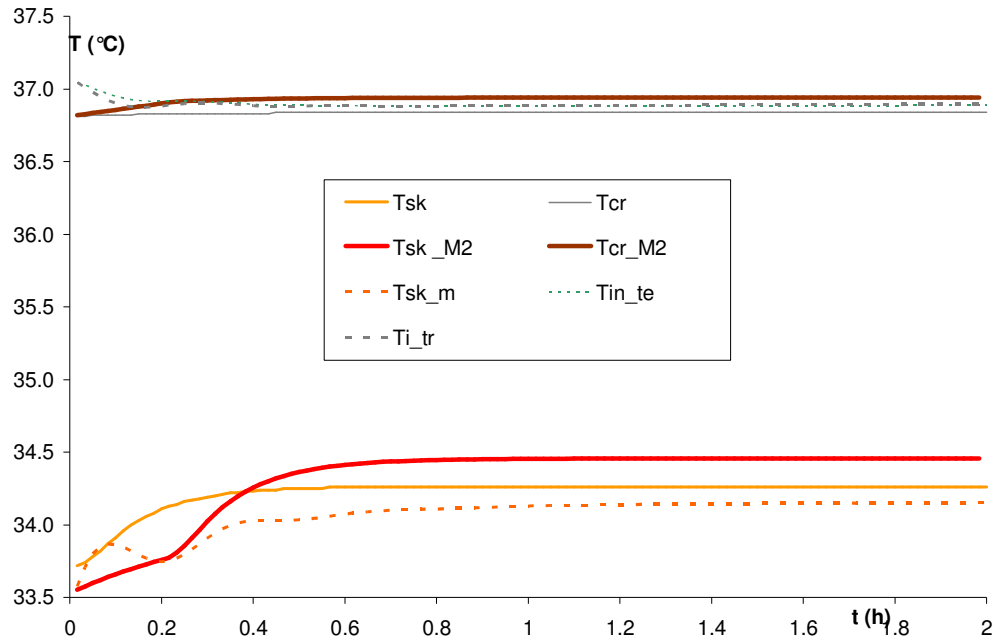
HR=50 % Vair= 1 m/s feff. $\epsilon= 0.72$ Icl= 0 – sujet nu Act= 1 met= 58W/m²

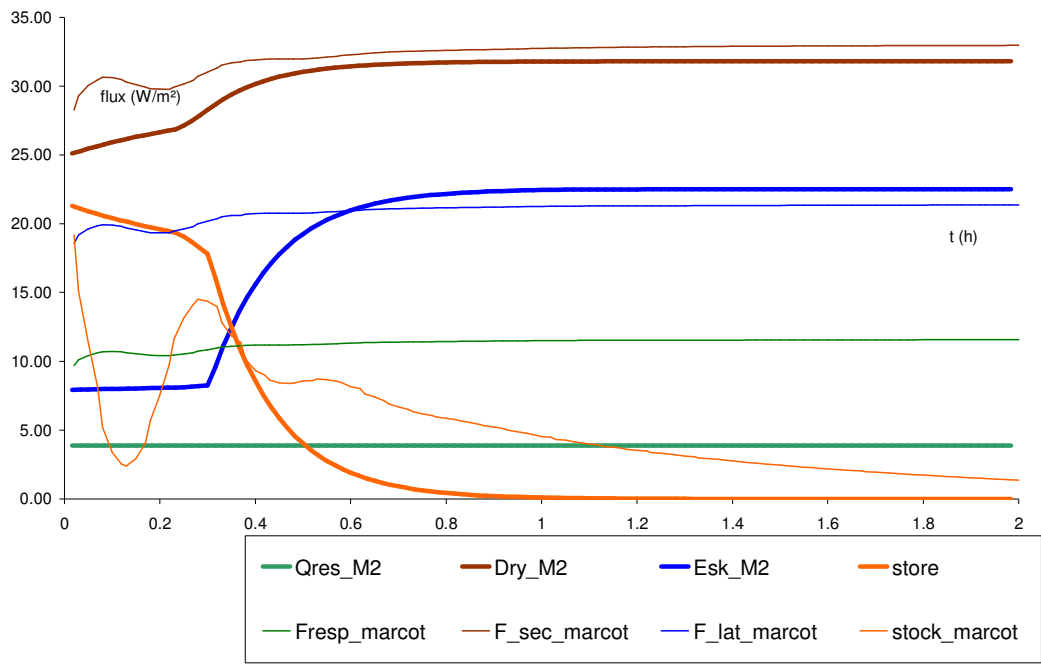
Conditions I : Ta=Tr=20°C



Conditions II : Ta=Tr=30°C

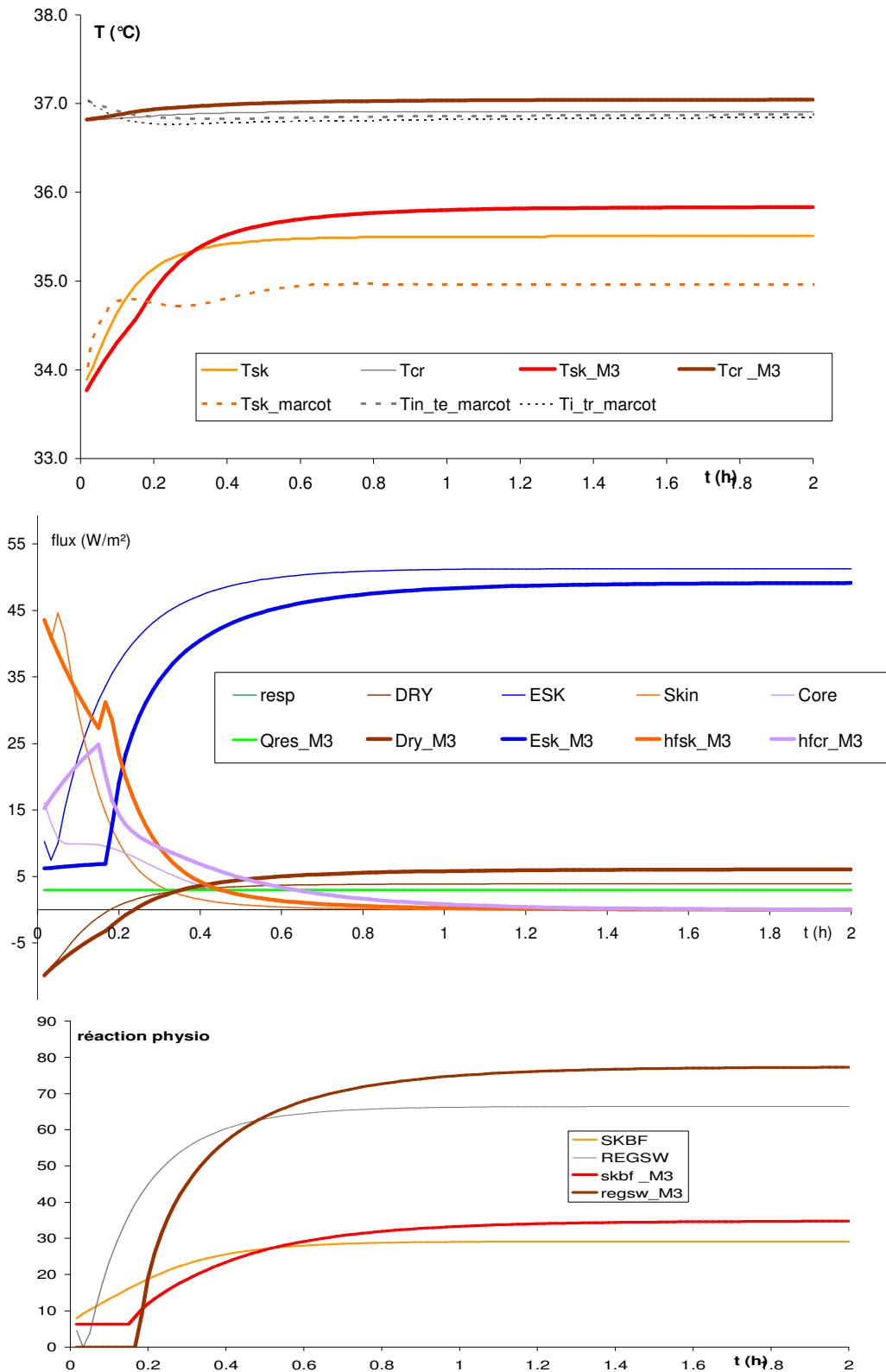
Comparaison supplémentaire avec MARCOT (modèle de thermorégulation à 27 nœuds)





Conditions III : $T_a = T_r = 35\text{ }^\circ\text{C}$

Comparaison supplémentaire avec MARCOT (modèle de thermorégulation à 27 nœuds)



ANNEXE

Valeur de métabolisme

Activity Metabolic rates [M]	W/m2	Met
Reclining	46	0.8
Seated relaxed	58	1.0
Clock and watch repairer	65	1.1
Standing relaxed	70	1.2
Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)	70	1.2
Car driving	80	1.4
Graphic profession - Book Binder	85	1.5
Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry)	93	1.6
Teacher	95	1.6
Domestic work -shaving, washing and dressing	100	1.7
Walking on the level, 2 km/h	110	1.9
Standing, medium activity (shop assistant, domestic work)	116	2.0
Building industry -Brick laying (Block of 15.3 kg)	125	2.2
Washing dishes standing	145	2,5
Domestic work -raking leaves on the lawn	170	2.9
Domestic work -washing by hand and ironing (120-220 W/m2)	170	2.9
Iron and steel -ramming the mould with a pneumatic hammer	175	3.0
Building industry -forming the mould	180	3.1
Walking on the level, 5 km/h	200	3.4
Forestry -cutting across the grain with a one-man power saw	205	3.5
Agriculture -Ploughing with a team of horses	235	4.0
Building industry -loading a wheelbarrow with stones and mortar	275	4.7
Sports -Ice skating, 18 km/h	360	6.2
Agriculture -digging with a spade (24 lifts/min.)	380	6.5
Sports -Skiing on level, good snow, 9 km/h	405	7.0
Forestry -working with an axe (weight 2 kg. 33 blows/min.)	500	8.6
Sports -Running, 15 km/h	550	9.5

Tableau Exemples de valeurs de métabolisme et de rendement du travail, pour différentes activités pratiques

Type d'activité	Métabolisme		Rendement du travail
	W/m ²	met	
Couché au repos	0,8	47	
Assis au repos	1,0	58	
Activité sédentaire (bureau, domicile, laboratoire, école)	1,2	70	
Debout au repos	1,2	70	
Activité légère, debout (achats, industrie légère)	1,6	93	
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager)	2,0	116	0,05
Activité soutenue (travail lourd sur machine)	3,0	175	0,15
Marche à une vitesse de :	3,2 Km/h	116	
	4,8	151	
	6,4	220	
	8,0	330	
Marche sur un pente, à une vitesse de :			
	5% 1,6 km/h	139	0,07
	5 3,0	232	0,11
	15 1,6	168	0,15
	15 3,0	406	0,19
	25 1,6	209	0,21
Marche à 4 Km/h avec une charge de 20Kg	3,8	220	0,10
Course à pied : 10 km/h	14,8	830	
Nage à :	1,6 km/h	315	
	2,4	760	

Valeur d'isolation vestimentaire

Garment description		clo	m ² °C/W
Underwear, pants	Pantyhose	0.02	0.003
	Panties	0.03	0.005
	Briefs	0.04	0.006
	Pants 1/2 long legs, wool	0.06	0.009
	Pants long legs	0.10	0.016
Underwear, shirts	Bra	0.01	0.002
	Shirt sleeveless	0.06	0.009
	T-shirt	0.09	0.014
	Shirt with long sleeves	0.12	0.019
	Half-slip, nylon	0.14	0.022
	Shirts Tube top	0.06	0.009
	Short sleeve	0.09	0.029
	Light weight blouse, long sleeves	0.15	0.023
	Light weight, long sleeves	0.20	0.031
	Normal, long sleeves	0.25	0.039
	Flannel shirt, long sleeves	0.30	0.047
	Long sleeves, turtleneck blouse	0.34	0.053
	Trousers	Shorts	0.06
Walking shorts		0.11	0.017
Light-weight trousers		0.20	0.031
Normal trousers		0.25	0.039
Flannel trousers		0.28	0.043
Overalls		0.28	0.043
Coveralls	Daily wear, belted	0.49	0.076
	Work	0.50	0.078
Highly-insulating Coveralls	Multi-component, filling	1.03	0.160
	Fibre-pelt	1.13	0.175
Sweaters	Sleeveless vest	0.12	0.019
	Thin sweater	0.20	0.031
	Long sleeves, turtleneck (thin)	0.26	0.040
	Sweater 0.28 0.043 Thick sweater	0.35	0.054
	Long sleeves, turtleneck (thick)	0.37	0.057
Jacket	Vest	0.13	0.020
	Light summer jacket	0.25	0.039
	Jacket	0.35	0.054
	Smock	0.30	0.047
Coats and Overjackets and overtrousers	Coat	0.60	0.093
	Down jacket	0.55	0.085
	Parka	0.70	0.109
	Overalls multi-component	0.52	0.081
Sundries	Thick, ankle socks	0.05	0.008
	Thick, long socks	0.10	0.016
	Slippers, quilted fleece	0.03	0.005
	Boots 0.1 0.016 Gloves	0.05	0.008
Skirts, dresses	Light skirt, 15 cm. above knee	0.10	0.016
	Light skirt, 15 cm. below knee	0.18	0.028
	Heavy skirt, knee-length	0.25	0.039
	Light dress, sleeveless	0.25	0.039
	Winter dress, long sleeves	0.40	0.062
Sleepwear	Long sleeve, long gown	0.30	0.047
	Thin strap, short gown	0.15	0.023
	Hospital gown	0.31	0.048
	Long sleeve, long pyjamas	0.50	0.078
	Body sleep with feet	0.72	0.112
	Undershorts	0.10	0.016
Robes	Long sleeve, wrap, long	0.53	0.082
	Long sleeve, wrap, short	0.41	0.064
Chairs	Fabric-covered, cushioned, swivel	0.10	0.016
	Armchair	0.20	0.032

LISTE DES VARIABLES

Notation dans prog	Notation standard	Unité	Signification	Rmq	Valeurs
a			Variable intermédiaire		
act	M	Met, W/m ²	Métabolisme d'activité	INPUTS	Act=1 met = 58.2 W/m ² (repos assis)
Alpha ,alpha _i	α	-	Coefficient de pondération noyau périphérie		alpha _i = 0.1
b, b1, b2			Variable intermédiaire		
ccr	Ccr	J/kg °C	Capacité thermique du noyau		
Cdil	CDIL	l/(m ² .s.K)	Constante de vasodilatation		CDIL=0.055 l/(m ² .s.K) =200 l/(m ² .h.K)
chc , chca, chcv	h _c	W/m ² . °C	Coefficient d'échange convectif		W/m ²
chclo	hcl	W/m ² . °C	Coeff de transferts de vêtements		W/m ²
cho	ho	W/m ² . °C	Coeff transferts de surface		
Chr , chri	hr	W/m ² . °C	Coeff d'échange radiatif		Chri = 4.7 valeur initiale
clo	I _{cl}	W/m ² . °C	isolement vestimentaire	INPUT	clo
coldb	COLDB	°C	Signal de froid moyen		0 ≤ coldb
coldc	COLDC	°C	Signal de froid central		0 ≤ coldc
colds	COLDS	°C	Signal de froid cutané		0 ≤ colds
cp	C _p	J/g. °C	chaleur massique des fibres	PARAM	
cres	C _{res}	W/m ²	Convection respiration		
csk	Csk	J/kg °C	Capacité thermique de la peau		
Cstr	Cstr	ND	Constante de vasoconstriction		Cstr=0.1
Csw	Csw	g/(m ² .s. °C)	Constant pour la sudation		Csw = 0.047 g/(m ² .s) = 170 g/(m ² .h)
d			Variable intermédiaire		
debv		m ³ /m ² .s	débit sous vestimentaire	INPUTS	
dilat	DILAT	ND	Coeff de dilation		
dm	dM	g/m ²	Variation de masse d'eau dans le tissu		
dry	φ _{dry}	W/m ²	Transferts secs		
Dt	dt	s	Pas de temps interne		
dtbm	dT _{bm}	°C/s	Variation de température moyenne		
docr	dT _{cr}	°C/s	Variation de température du centre		
dtsk	dT _{sk}	°C/s	Variation de température cutanée		
edif	E _{dif}	W/m ²	Evaporation diffuse		
edrip	E _{drip}	g/m ² .s	Eau qui ruisselle		0 ≤ edrip
emax	E _{max}	W/m ²	Evaporation maximale		
eres	E _{res}	W/m ²	Evaporation respiratoire		

ersw	E _{sw}	g/m ²	Evaporation requise par la régulation		
esk, eski	E _{sk}	W/m ²	Evaporation cutanée		Eski=2 W/m ²
f		ND	fraction de volume occupé par les fibres	PARAM	
fcl	F _{cl}	ND	Facteur d'augmentation de surface		Fcl
feff	feff.ε	ND	feff. Facteur de surface effective rayonnante .ε émissivité		
ha	L _v	J/g	Chaleur latente de changement de phase de l'eau		Ha=2450 J/g
hfcr	HF _{cr}	W/m ²	Heat Flow centre		
hfsk	HF _{cr}	W/m ²	Heat Flow peau		
hs	hs	J/g	Chaleur latente de sorption		Hs=2600 J /g
htc		W/m ²	Transfert interne		
idb			Mode d'entrée humidité	PARAM	
il	I _L	ND	indice de perméabilité	PARAM	Varie entre 0.6 et 0.7
info()			Données internes de TRNSYS		
kclo	k _{cl}	ND	facteur d'augmentation de surface de Vêtement	PARAM	
lr	L _w	°C/Pa	Coefficient de lewis		Lw = 0.0165 K/Pa
m	M	g/m ²	Masse d'esu dans le tissu		
mabm	Mabmax	g ou kg	Masse d'eau absorbée par le tissu		
man			Variable intermédiaire		
mf	m _f		masse des fibres du Vet	PARAM	
mmax	M _{max}	g/m ²	Masse d'eau maximale dans le tissu		
mvm		g/m ²	Masse de vapeur dans le tissu		
pa	P _{air}		Pression partielle de vapeur dans l'air		
pcl, pcl1, pcl2	P _{cl}	Pa	Pression de vapeur dans le tissu		
pn	α ou τ		pente de la courbe de taux de reprise	PARAM	
prsw		ND	Mouillure requise		
psk	P _{sk}	Pa	Pression de vapeur cutanée		
Ps, sk ou		Pa	Pression de vapeur saturante à Tsk ou Tcl		
pteta pteta1,pteta2	P _θ	Pa	Pression de vapeur dans la couche sous vestimentaire		
pwet	ω	ND	Mouillure cutanée		
qc	Q	W/m ²	Chaleur produite par changement de phase		
qres	φ _{res}	W/m ²	Pertes respiratoires totale		
r	r	J/g.K	Constante des gaz parfaits pour la vapeur		r =0.462 J/g.K

roc	$\rho.c$	$J/m^3 \cdot ^\circ C$	ρ Masse volumique de l'air C capacité thermique de l'ai		$\rho = 1.164 \text{ kg/m}^3$ à $30^\circ C$ $C = 1007 \text{ J/kg}^\circ C$ à $30^\circ C$
Regsw, regswl	REGSW	$g/m^2.s$	Régulation par la sueur		$regsw \leq regswl$ $regswl = 0.139 \text{ g/m}^2.s = 500 \text{ g/m}^2.s$
rh	HR	%	Humidité relative de l'air		
rha		$Pa.m^2.s/g$	Résistance aux transferts humide des vêtements de la couche d'air		
rhp			Humidité relative ou pression de vapeur	INPUTS	Attention $0 < rh < 1$
rnsk			Humidité relative au niveau de la peau		
rhv	Rhv	$Pa.m^2.s/g$	Résistance aux transferts humide des vêtements		
rm	M		Production métabolique		
ro	ρ	kg/m^3			
shiv	SHIV	W/m^2	frissons		
skbf, ...i, ...l, ...m	SKBF	$l/(m^2.s)$	Débit sanguin l valeur initiale L valeur max, m valeur min		$skbm \leq skbf \leq skbl$ $skbfi = 1.75 \cdot 10^{-3} \text{ l/(m}^2.s) = 6.3 \text{ l/(m}^2.h)$ $skbfl = 0.025 \text{ l/(m}^2.s) = 90 \text{ l/(m}^2.h)$ $skbm = 1.66 \cdot 10^{-4} \text{ l/(m}^2.s) = 0.5 \text{ l/(m}^2.h)$
stime			Temps cumulé		
store		W/m^2	Stockage de chaleur		
stric	STRIC		Commande de vasoconstriction		
svp, svp(t)	$P_{sat(t)}$	Pa	Pression de vapeur saturante	svp(t) real function	
ta	T_{air}	$^\circ C$	Température d'air	INPUTS	
Tbm, ttbm	T_{bm}	$^\circ C$	Température moyenne corporelle		
tcl	T_{cl}	$^\circ C$	Température du tissu		
tclold		$^\circ C$			
tcr	T_{cr}	$^\circ C$			$tcri = 36.8$ valeur initiale $tocr = 36.8$ consigne
Teta, teta1, teta2	θ	$^\circ C$	Température sous vestimentaire		
tr	T_{mrt}	$^\circ C$	température moyenne de rayonnement	INPUTS	
tsk	T_{sk}	$^\circ C$	Température cutanée		$ttski = 33.7$ valeur initiale $ttsk = 33.7$ consigne
vel	V_{air}		vitesse d'air	INPUTS	
warmb		$^\circ C$	Signal chaud moyen		$0 \leq warmb$
warmc		$^\circ C$	Signal chaud des thermo récepteurs de centre		$0 \leq warmc$
warms		$^\circ C$	Signal chaud des thermo récepteurs cutanés		$0 \leq wars$

we	η	ND	Rendement du travail	INPUTS	
x	E	m	épaisseur couche de tissu	PARAM	
OUT			Vecteur de sorties pour TRNSYS		

LISTING COMMENTE

(en vert les lignes de communication avec TRNSYS

en bleu les lignes correspondant aux vêtements

	<pre> SUBROUTINE TYPE147 (TIME,XIN,OUT,T,DTDT,PAR,INFO,ICNTRL,*) C***** C object: mac2 iisibat model: mac_2 C C author: h. derbel C editor: laboratoire phase C last modified: juin 06, 2005 f. thellier C C modele de thermoregulation humaine a 2 noeuds en régime transitoire C avec transfert de chaleur et de masse a travers les vetements (effet de pompage) C C***** </pre>	
	<pre> DOUBLE PRECISION XIN,OUT ! TRNSYS-Common blocks INTEGER NI,NP,ND,NO PARAMETER (NI=8,NP=9,NO=20,ND=0) INTEGER*4 INFO,ICNTRL REAL T,DTDT,PAR,TIME DIMENSION XIN(NI),OUT(NO),PAR(NP),INFO(15) CHARACTER*3 YCHECK(NI),OCHECK(NO) COMMON /LUNITS/ LUR,LUW,IFORM,LUK COMMON /SIM/ TIME0,TIMEF,DELT,IWARN </pre>	<p>Déclaration pour TRNSYS Delt = pas de temps de la simulation (h)</p>
	<pre> real lr,il,iclo,kclo,mf,m,man,mvm,mabm,mmax </pre>	<p>Déclaration nombres réels</p>
Premier pas de temps de la simulation	<pre> C***** premiere itteration + premier pas de temps ***** if(info(7).ge.0)go to 10 INFO(6)=NO INFO(9)=1 CALL TYPECK(1,INFO,NI,NP,ND) </pre>	<p>Communication avec TRNSYS</p>
	<pre> C -----Entrees des parametres idb=PAR(1) ! =1 humidite relative (%); =2 pression vapeur (Pa) feff= PAR(2) ! facteur effectif de surface rayonnante x emissivité kclo=PAR(3) ! facteur d'augmentation de surface de Vet il=PAR(4) ! indice de permeabilité mf=PAR(5) ! masse des fibres du Vet cp=PAR(6) ! chaleur massique des fibres f=PAR(7) ! fraction de volume des fibres </pre>	<p>Entrée des paramètres par TRNSYS</p>

	<pre> x=PAR(9) ! epaisseur couche de tissu pn=PAR(9) ! pente de la courbe de taux de reprise </pre>	
	<pre> c ----- Constantes physiologiques et autres ttsk=33.7 ;ttcr=36.8 csw=0.047 ; cstr=0.1 lr= 0.0165 sig=5.67e-8 ha=2450. hs=2600 </pre>	Entrée des constantes physiologiques et des autres paramètres physiques
	<pre> c ----- Valeurs Initiales tski= 33.7 ; tcrc=36.8 c ----- Initialisation des variables physiologiques tsk=tski ; tcr=tcrc alpha=alpha1 tbm=alpha*tsk+(1.-alpha)*tcr shiv=0. chr=chri </pre>	Initialisation des variables
	<pre> 10 continue C***** fin premiere itteration du premier pas de temps </pre>	
	<pre> stime=0. </pre>	Temps cumulé
	<pre> c Lecture des entrees </pre>	
INPUTS	<pre> act=XIN(1) ! Activite we=XIN(2) ! rendement du travail ta=XIN(3) ! Temperature d'air vel=XIN(4) ! vitesse d'air tr=XIN(5) ! temperature moyenne de rayonnement rhpa=XIN(6) ! Humidité relative (si idb=1) ! pression de vapeur (si idb=2) debv=XIN(7) ! débit sous vestimentaire clo=XIN(8) ! isolement vestimentaire </pre>	Affectation des entrées de TRNSYS
	<pre> c c----- changement d' unite if(act.lt.15.) act=act*58.2 ! de met à W/m2 wk=we*act C ----- iclo=0.155*clo ! de Clo a m²K/W tak=ta+273.15 ; trk=tr+273.15 ! de °C a K </pre>	Changement d'unités
	<pre> c-----Choix entre RH ou Pa (IDB=1 si entree=RH , 2 pour Pa) if(idb.eq.1) then rh=rhpa pa=rh*svp(ta) else pa=rhpa rh=pa/svp(ta) endif </pre>	Permet de calculer HR % et Pair

	c	
	<pre> if(clo.le.0.01) then ! sujet nu icl=1. ; facl=1 chclo=1.e5 </pre>	Sujet nu icl=1. Fcl=1 chclo=1.e5
vêt	<pre> else ! sujet vetu fcl=1.+kclo*clo chclo=1./(iclo) endif </pre>	sujet vetu Fcl=1.+kclo*icl chcl=1./(icl)
hc et ho	<pre> c***** Calcul de coeff.de transf.de la chal. par conv. c-----chca correspond au cas de la marche dans l'air calme chca=0. if((act.gt.50) chca=1.16*(act-50)**.39 c-----chcv=air en mouvement dans la piece chcv=2.7+ 8.6*Vair**0.67 chc=amax1(chca,chcv) cho=chr+chc </pre>	$h_{ca}=1.15.(act - 50)^{0.39}$ $h_{cv}=2.7+ 8.6 \text{ Vair}^{0.67}$ h_c=max(h_{ca},h_{cv}) $h_o=h_r+h_c$
	c	
vêt	<pre> c resistance au transfert de masse (pa.m2.s/g) if(clo.gt.0.) then rhv=ha/(lr*chclo*il) rha=ha/(lr*chc*fcl) endif </pre>	$R_{hv} = L_v / (L_w \cdot h_{cl} \cdot i_l)$ $R_{ha} = L_v / (L_w \cdot F_{cl} \cdot h_c)$
	if(info(7).ge.0)go to 40	Uniquement pour la première itération de chaque pas de temps
	<pre> if(clo.eq.0.) then ! sujet nu tcl=tsk </pre>	Sujet nu $T_{cl} = T_{sk}$
Sujet vêtu	<pre> else ! sujet vetu tcl=(chclo*tsk+facl*(chc*ta+chr*tr))/(chclo+facl*cho) </pre>	Sujet vêtu $T_{cl} = \frac{h_{cl} \cdot T_{sk} + F_{cl} \cdot (h_c \cdot T_a + h_r \cdot T_r)}{h_{cl} + F_{cl} \cdot (h_c + h_r)}$
	<pre> 21 tclold=tcl chr=4.*feff*sig*((tclk+trk)/2)**3 cho=chr+chc tcl=(chclo*tsk+fcl*(chc*ta+chr*tr))/(chclo+fcl*cho) </pre>	Stockage de la valeur pour itération interne $h_r = 4 \cdot \text{Feff} \cdot \sigma \cdot \left[\frac{T_{cl} + T_r}{2} \right]^3$ $T_{cl} = \frac{h_{cl} \cdot T_{sk} + F_{cl} \cdot (h_c \cdot T_a + h_r \cdot T_r)}{h_{cl} + F_{cl} \cdot (h_c + h_r)}$ $h_o = h_c + h_r$
	<pre> if(abs(tcl-tclold).gt.0.01) goto 21 </pre>	Test : si à deux itérations successives Tcl varie de plus de 0.01 °C on recommence
	<pre> teta=(tsk+tcl)/2. ! Estimation temperature initiale du micro-climat </pre>	$\theta = \frac{T_{sk} + T_{cl}}{2}$

	<pre>c Masse initiale d'eau contenue dans le vetement (g/m2) m=(pa*x*(1-f))/(r*tak)+(pn*mf*rh)</pre>	$m = \frac{P_a \cdot x \cdot (1 - f)}{r \cdot P_a + P_n \cdot m_f \cdot rh}$
	<pre>c Pression partielle du vetement, du micro_climat et au niveau de la peau (Pa) pcl1=r*m*tclk*svp(tcl) pcl2=(x*(1-f)*svp(tcl))+(pn*mf*r*tclk) pcl=pcl1/pcl2</pre>	$P_{cl} = \frac{r \cdot m \cdot T_{cl} \cdot P_{sat,Te}}{(x \cdot (1 - f) \cdot P_{sat,Tcl}) + (pn \cdot mf \cdot r \cdot T_{cl})}$
	<pre>if (debv.eq.0.) then ! pas de débit sous vestimentaire psk=0.06*svp(tsk) .+0.94*pcl else pteta=pcl*((0.5*rhv/rha)+1)-(0.5*pa*rhv/rha) psk=(0.06*svp(tsk)+(0.94*pteta) endif endif</pre>	<p>Pas de débit sous vest $P_{sk}=0.06 \cdot P_{Sat(Tsk)}+0.94 \cdot P_{cl}$</p> <p>Si débit sous vest $P_{\theta}=P_{cl} \cdot ((0.5 \cdot rhv/rha)+1)-(0.5 \cdot P_a \cdot rhv/rha)$ $P_{sk}=(0.06 \cdot P_{sat,Tsk})+(0.94 \cdot P_{\theta})$</p>
	40 continue	
	<pre>c-----Boucle----- 20 continue</pre>	
	dt=60	dt 1 minute
THERMOREGULATION	<pre>c ***** système de controle thermoregulation</pre>	
	<pre>C ----- signal d'erreur Cutanée if(tsk.gt.ttsk) then warms=tsk-ttsk colds=0. else colds=ttsk-tsk warms=0. endif</pre>	<p>Signaux d'erreur</p> <p>Si $T_{sk} > T_{sk, SET}$ chaud $warms = T_{sk} - T_{sk, SET}$ $colds = 0.$</p> <p>Si $T_{sk} \leq T_{sk, SET}$ froid $warms = 0$ $colds = T_{sk, SET} - T_{sk}$</p>
	<pre>c ----- signal d'erreur central if(tcr.gt.ttcr) then warmc=tcr-ttcr coldc=0. else coldc=ttcr-tcr warmc=0. endif</pre>	<p>Si $T_{cr} > T_{cr, SET}$ chaud $warmc = T_{sk} - T_{sk, SET}$ $coldc = 0.$</p> <p>Si $T_{cr} \leq T_{cr, SET}$ froid $warmc = 0$ $coldc = T_{cr, SET} - T_{cr}$</p>
	<pre>c ----- signal d'erreur Moyen tbm=alpha*tsk+(1.-alpha)*tcr if(tbm.gt.ttbm) then warmb=tbm-ttbm coldb=0. else coldb=ttbm-tbm warmb=0. endif</pre>	<p>Si $T_{bm} > T_{bm, SET}$ chaud $warmb = T_{bm} - T_{bm, SET}$ $coldb = 0.$</p> <p>Si $T_{bm} \leq T_{bm, SET}$ froid $warmb = 0$ $coldb = T_{bm, SET} - T_{cr}$</p>
	<pre> warms=warms-0.1 if(warms.lt.0.)warms=0. warmc=warmc-0.1 if(warmc.lt.0.)warmc=0.</pre>	<p>Pour chaque signal d'erreur, on diminue la valeur de 0.1 °C Puis on impose que ce signal soit positif</p>

	<pre>warmb=warmb-0.1 if(warmb.lt.0.)warmb=0. colds=colds-0.1 if(colds.lt.0.)colds=0. coldc=coldc-0.1 if(coldc.lt.0.)coldc=0. coldb=coldb-0.1 if(coldb.lt.0.)coldb=0.</pre>	
	C ----- integration	integration
	<pre>dilat=cdil*warml stric=cstr*colds skbf=(skbi+dilat)/(1.+stric)</pre>	Dilat Coefficient de vasodilatation Stric Coefficient de vasoconstriction Skbf (skin Blood Flow) débit sanguin
	<pre>c----- - limitation du débit sanguin if(skbf.lt.skbm) skbf=skbm if(skbf.gt.skbf1) skbf=skbf1</pre>	skbm < skbf < skbf1
	C repartition	
	<pre>c-----modification de alpha alpha=.0417737+.7451832/(skbf*3600+.585417)</pre>	
	<pre>c-----sudation de regulation regsw=csw*warml*exp(warml/10.7) if(regsw.gt.rgswl) regsw=rgswl ersw=.68*regsw</pre>	regsw=csw*warml*e ^(warml/10.7) regsw < rgswl Ersw= Lv. Regsw
	<pre>c-----determination des frissons shiv=19.4*colds*coldc rm=act+shiv</pre>	SHIV= d.COLDS.COLDC M= Act+SHIV
	c c ---- transferts cutanés	
	<pre>if(clo.eq.0.) then ! Sujet nu chr=4.*feff*sig*((tskk+trk)/2)**3 dry=chc*(tsk-ta)+chr*(tsk-tr)</pre>	Sujet nu $h_r = 4 \cdot Feff \cdot \sigma \cdot \left[\frac{T_{sk} + T_r}{2} \right]^3$ DRYSK= h _c .(T _{sk} -T _a)+ h _r .(T _{sk} -T _r)
	<pre>else ! sujet vetu man=m</pre>	Sujet vêtu
Vêtement	<pre>c Nouvelle pression partielle du micro -climat (Pa) pteta2=2.*(psk+pcl)/rhv+(debv*pa./(r*1.8*(teta+273.15))) pteta2=4./rhv+(debv/(r*1.8*(teta+273.15))) pteta=pteta1/pteta2</pre>	$P\theta = \frac{pteta2}{pteta1} = \frac{2 \cdot (P_{sk} + P_{cl}) + \frac{debv \cdot pa}{r \cdot Adu \cdot \theta}}{\frac{4}{rhv} + \frac{debv \cdot pa}{r \cdot Adu \cdot \theta}}$

<pre> cc Masse d'eau contenue dans le vetement (g/m2) c1=(2./rhv)+(1./rha) c2=x*(1-f)/(r.tclk)+(pn*mf/svp(tcl) c=c1/c2 d=(2.*pteta/rhv)+(pa/rha) m=man*exp(-c*dt)+(d/c)*(1-exp(-c*dt)) </pre>	$C = \frac{\frac{x.(1-f)}{r.Tcl} + \frac{Pn.mf}{P_{sat,Tcl}}}{\left(\frac{2}{rhv} + \frac{1}{rha}\right)}$ $d = \frac{2.P_{\theta}}{rhv} + \frac{P_a}{rha}$ $m = man * e^{(-c*dt)} + \frac{d}{c} (1 - e^{(-c*dt)})$
<pre> c Chaleur due a la sorption de l'eau par les fibres qc (W/m2) dm=m-man mvm=(svp(tcl).x*(1-f))/(r*tclk) mabm=pn*mf mmax=mvm+mabm </pre>	$dM = m - man$ $M_{vm} = \frac{P_{sat,Tcl} . x . (1 - f)}{r . T_{cl}}$ $Mabm = pn . mf \quad Mmax = Mvm + Mabm$
<pre> C calcul de la chaleur liee au changement de phase if (m.gt.mmax) then ! trop d'eau dans le tissu qc=(ha*dm)/dt else qc=(hs*dm)/(dt)*(mabm/(mmax)) endif </pre>	$M > Max \quad qc = (L_v . dM) / dt \text{ (t en seconde)}$ $M < Max \quad qc = h_s . \frac{dM}{dt} . \frac{Mab}{Mmax}$
<pre> c----- Calcul de teta tetal=(2.*chclo*(tsk+tcl)+(debv*roc*ta) teta2=(4.*chclo)+(debv*roc) teta=tetal/teta2 </pre>	$\theta = \frac{tetal}{teta2} = \frac{2.h_{cl}(T_{sk} + T_{cl}) + debv.pa.ca.T_a}{4.h_{cl} + debv.pa.ca.}$
<pre> c----- Dry heat balance : solve for tcl and chr chr=4.*feff*sig*((tclk+trk)/2)**3 </pre>	$h_r = 4 \cdot Feff \cdot \sigma \cdot \left[\frac{T_{cl} + T_r}{2} \right]^3$
<pre> a=(2.*chclo+fac1*(chr+chc))/(mf*cp) b1=2.*chclo*(teta+273.15) b2=fcl*chc*(tak+trk) b=(b1+b2+qc)/(mf*cp) tcl=(tclk*exp(-a*dt)+(b/a)*(1-exp(-a*dt))) tcl=tclk-273.15 </pre>	$a = \frac{2..h_{cl} + f_{cl} . (hr + chc)}{mf . cp} \quad b1 = 2 . h_{cl} . \theta \quad b2 = f_{cl} . hc . (Ta + Tr)$ $b = \frac{b1 + b2 + qc}{mf . cp} = \frac{2..h_{cl} . \theta + f_{cl} . (hr . Tr + hc . Ta) + qc}{mf . cp}$ $T_{cl} = T_{cl} . \exp^{-a.t} + (b/a) . (1 - \exp^{-a.t})$
<pre> dry=2.*chclo*(tsk-teta) endif </pre>	$Dry = 2..h_{cl} . (T_{sk} - \theta)$ <p>Fin sujet vetu</p>
<pre> c ---- calcul de Emax </pre>	
<pre> f(clo.eq.0.) then ! sujet nu emax=Lw.hc.(pssk-pa) </pre>	<p>sujet nu $E_{max} = Lw . hc . (P_{sat,Tsk} - P_a)$</p>

Vêtement	<pre> else ! sujet vetu if(debv.eq.0.) then emax= (pssk)-pcl) * (ha/rhv) else emax = (pssk)-pteta) * (ha*2./rhv) endif endif </pre>	<p>sujet vêtu</p> <p>Si pas de débit sous vestimentaire : $E_{max} = (P_{sat,Tsk} - P_{cl}) \cdot \frac{L_v}{Rh_v}$</p> <p>si débit non nul $E_{max} = (P_{sat,Tsk} - P_{\theta}) \cdot \frac{L_v}{Rh_v/2}$</p>
	endif	Fin sujet vêtu
Mouillure et Evaporation	<pre> c----- mouillure et production d'eau ersw=ha*regsw ! evaporation requise prsw=ersw/emax ! mouillure requise edif=(1.-prsw)*.06*emax </pre>	Calcule de la mouillure
	<pre> if(prsw.le.0.) then esw= prsw*emax esk=edif+esw sud = esk/ha drip=0 </pre>	Cas de la mouillure faible
	<pre> else rsw=1-prsw*prsw esw= rsw*prsw*emax esk=edif+esw pwet=esk/emax sud = esk/ha drip=(1-rsw).regsw endif </pre>	Cas de la mouillure élevée
	<pre> h2o=sud+drip pwet=esk/emax </pre>	
	<pre> c-----si emax<0. il peut y avoir condensation C. Esk est alors de la chaleur recu if(emax.lt.0.) then pdif=0. edif=0. esk=emax ersw=0. endif </pre>	$E_{max} < 0$. cas de la condensation
	<pre> c-----pression de vapeur et humidite relative au niveau cutané psk=pwet*pssk+(1.-pwet)*pa rhsk=vpsk/pssk </pre>	$P_{sk} = \omega P_{sat,Tsk} + (1-\omega)P_a$ $RH_{sk} = P_{sk} / P_{sat,Tsk}$

vêtement	<pre> c ----- transferts humides à travers le vet if(clo.gt.0.) then pcl1=m*r* tclk*svp(tcl) pcl2=(x*(1-f)*svp(tcl))+(r*pn*mf*tclk) pcl=pcl1/pcl2 if(debv.eq.0.) then psk=(pwet*svp(tsk))+(1-pwet)*pcl else psk=(pwet*svp(tsk))+(1-pwet)*pteta endif endif endif </pre>	<p>Sujet vêtu</p> $pcl_1 = r.m.T_{cl}.P_{sat,T_{cl}}$ $pcl_2 = (x.(1-f).P_{sat,T_{cl}}) + (r.pn.mf.T_{cl})$ $P_{cl} = \frac{r.m.T_{cl}.P_{sat,T_{cl}}}{(x.(1-f).P_{sat,T_{cl}} + (pn.mf.r.T_{cl}))}$ <p>debit sous vestimentaire</p> $debv=0 \quad Psk = \omega.P_{sat,tsk} + (1-\omega).P_{cl}$ $debv \neq 0 \quad Psk = \omega.P_{sat,tsk} + (1-\omega).P_{\theta}$
C**** bilan		
Bilan thermique	<pre> c----- pertes respiratoires texp= 32.5 + 0.066* ta + 1.99e-4*pa eres=17.251e-5*rm*(svp(texp)-pa) cres=0.0014*rm*(texp-ta) qres=cres+eres c-----bilan thermique (W/m2) htc=(5.28+4180*skbf)*(tcr-tsk) hfsk=htc-dry-esk hfcr=rm-wk-htc-qres store=hfsk+hfcr cc Calcul des nouvelles temperatures c C capacité thermique (homme standard : 70 kg, 1.8 m2) c capacité thermique massique : 3492 J/kg.K ccr=3492*70*(1.-alpha) dtcr=(hfcr*Adu)/ccr*dt tcr=tcr+dtcr csk=3492*70*alpha dtsk=(hfsk*adu8)/csk*dt tsk=tsk+dtsk pssk=svp(tsk) dtbm=alpha*dtsk+(1.-alpha)*dtcr </pre>	<p>$T_{exp} = 32,5 + 0,066 Ta + 1,99.10^{-4} Pa$</p> <p>$E_{res} = 17.25.10^{-5} M_{tot} (P_{sat,texp} - Pa)$</p> <p>$C_{res} = 0.0014 M_{tot} (T_{exp} - Ta)$</p> <p>$q_{res} = C_{res} + E_{res}$</p> <p>$H_{tc} = (5.28 + C_{sang} * skbf) . (T_{cr} - T_{sk})$</p> <p>$HF_{sk} = htc - dry - esk$</p> <p>$HF_{cr} = M_{tot} - Work - htc - qres$</p> <p>$store = HF_{sk} + HF_{cr}$</p> <p>$C_{cr} = C.m.(1.-\alpha)$ $C_{sk} = C.m.\alpha$</p> <p>$dT_{cr} = (HF_{cr}.Adu)/ccr*dt$ $dT_{sk} = (HF_{sk}.Adu)/csk.dt$</p> <p>$T_{cr} = T_{cr} + dT_{cr}$ $T_{sk} = T_{sk} + dT_{sk}$</p> <p>$dT_{bm} = \alpha dT_{sk} + (1.-\alpha)*dT_{cr}$</p>
	<pre> stime=stime+dt/3600 if(stime.lt.delt)go to 20 </pre>	<p>Si Stime < Delt (pas de temps de simulation) on recommence</p> <p>Attention dt en s et delt (pas de temps simulation en heure)</p>
-----SORTIES-----		

Sorties TRNSYS	<pre> OUT(1)=tcr ! temperature du centre OUT(2)=tsk ! température de la peripherie OUT(3)=tcl ! température de surface des vetements OUT(4)=gres ! pertes par respiration OUT(5)=dry ! pertes sensibles OUT(6)=esk ! pertes par evaporation cutanée OUT(7)=store ! stockage de chaleur OUT(8)=shiv ! frisson OUT(9)=pwet ! mouillure cutanee OUT(10)=regsw*3600 ! sudation de régulation OUT(11)=drip ! eau qui coule OUT(12)=alpha ! proportion peau OUT(13)=teta ! temperature sous vestimentaire OUT(14)=emax ! pouvoir evaporatoire OUT(15)=stsk ! sensation cutanee OUT(16)=stcr ! sensation interne OUT(17)=stw ! sensation de mouillure OUT(18)=hfsk ! flux total peau OUT(19)=hfcr ! flux total centre OUT(20)=skbf*3600 ! débit sanguin cutané </pre>	Préparation des sorties pour TRNSYS