



MA.THER I MANnequin THERmique dans un Véhicule Automobile. Phase I: Conditions d'Hiver

Françoise Thellier, Frédéric Althabegoïty, Alain Cordier, Françoise Monchoux,
Guy Serin

► To cite this version:

Françoise Thellier, Frédéric Althabegoïty, Alain Cordier, Françoise Monchoux, Guy Serin. MA.THER I MANnequin THERmique dans un Véhicule Automobile. Phase I: Conditions d'Hiver. [Rapport de recherche] Université toulouse 3 Paul Sabatier. 2000. hal-02179537

HAL Id: hal-02179537

<https://hal.science/hal-02179537>

Submitted on 10 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.

MA.THER I

MAannequin THERmique dans un Véhicule Automobile. Phase I : Conditions d'Hiver

Françoise THELLIER, Frédéric ALTHABEGOÏTY, Alain CORDIER, Françoise MONCHOUX, Guy SERIN

Contrat industriel financé par : PSA Peugeot Citroën + Valéo

Classé confidentiel jusqu'en 2000

Réalisé au LESETH

Laboratoire Etudes des Systèmes et Environnement Thermique de l'Homme

Université Paul Sabatier - 118, Route de Narbonne - 31062 Toulouse Cedex

6 Rapports :

- n°1-septembre 1992
- n°2-février 1993
- n°3-juin 1993
- n°4-octobre 1993
- n°5-février 1994,
- Rapport Final juin 1994



Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"

Rapport d'avancement n°1 : Septembre 1992

1ère Partie - Bibliographie

I. LES MODELES DE THERMOREGULATION

I.1. Généralités	2
I.2. Les modèles de thermorégulation existants.....	5
Les modèles à 1 segment, multi-couches	5
Les modèles multi-segments, multi-couches.....	7
Tableau récapitulatif	11
I.3. Conclusions sur les modèles.....	13
I.4. Références bibliographique	14

II. BIBLIOGRAPHIE SUR LES VEHICULES

2ème Partie - Résultats

I. TESTS DU LOGICIEL EXISTANT, SENSIBILITE AUX PARAMETRES

I.1. Habitacle	19
I.2. Températures de paroi et d'air, vitesse d'air	20
I.3. Résultats	20
I.4. Variations de la température d'air.....	23

II. ASYMETRISATION DE MARCL

II.1. Modification du logiciel	25
II.2. Résultats	25
Influence de la vitesse d'air	27

Annexe I *Fiche Proforma du modèle MARCL de thermorégulation*

Annexe 2 *Fiche Proforma du modèle TRIM de sensation thermique*

1ère Partie - Etude Bibliographique

I. LES MODELES DE THERMOREGULATION

I.1. Généralités

Le développement et l'utilisation des modèles n'est pas un phénomène nouveau, les scientifiques ont commencé à s'intéresser à la thermorégulation au 18^{ème} siècle. Lavoisier fut le premier à établir le fait que l'homme produit de la chaleur et que le système de thermorégulation est capable de maintenir la température interne du corps constante dans des conditions assez variées.

Le plus ancien modèle de thermorégulation a été publié par Burton en 1934, qui fut le premier à appliquer les équations de transferts de chaleur et de masse à l'intérieur du corps humain. Le nombre des modèles a fortement augmenté durant les années 60 et 70 ; plus de 20 modèles ont été publiés. Durant les 20 dernières années relativement peu de progrès ont été réalisés. Pour être totalement fiable les modèles mathématiques ont besoin de connaissances plus détaillées sur le système de contrôle.

De nos jours environ 100 modèles existent de différents types : verbaux, mécaniques, électriques, neuronaux, mathématiques et même chimiques. Les biologistes, les physiologistes et les physiciens partagent le même intérêt pour le système de régulation mais l'approche est très différente, c'est pour cette raison qu'il existe une telle variété de modèle. Il y a différents types de modèles : les empiriques sont strictement limités aux conditions dans lesquelles ils ont été établis, les autres basés sur les phénomènes physiques ont un domaine d'application plus large, la plupart cependant les deux méthodes. Il faut donc être prudent sur leur domaine de validité.

Très peu de modèles sont utilisés par d'autre que l'auteur, pour différentes raisons : manque de connaissances, de confiance, de données d'entrée/sortie ou simplement de versions "prêtes à l'emploi" disponibles. Le modèle doit fournir des résultats suffisamment simples et précis pour pouvoir être interprété dans des situations pratiques pour lesquelles aucunes données expérimentales existent.

Le but d'un modèle de thermorégulation humaine est de calculer les principales variables physiologiques (température interne, température et mouillure cutanées,...) et les réactions de thermorégulation (transpiration, frisson,...), à partir des données physiques de l'environnement auquel le sujet est exposé (température de l'air, humidité,...) Il est important de noter que le modèle représente plus le comportement du système que le système lui même. La plupart des modèles ont été fait par des physiologistes, qui ont essayé de représenter au mieux le corps humain et d'en tirer des indices de contraintes thermiques. Des efforts constants ont été fait pour

prendre en compte les aspects suivants : géométrie et inhomogénéité du corps humain, transfert de chaleur par circulation sanguine, stratégies de régulation et leurs interactions.

Quasiment tous les modèles de thermorégulation sont basés sur le même principe. Une brève description du schéma général de fonctionnement est alors nécessaire. Les modèles sont en général séparés en deux parties : le système passif ou contrôlé et le système actif ou de contrôle. Le degré de complexité de ces deux sous-systèmes dépend de la finalité du modèle.

Le système passif ou contrôlé

Il a les mêmes caractéristiques physiques et physiologiques que le corps humain réel et ne représente que des transferts de masse et de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur du corps. En général le corps est divisé en compartiments, de 1 à plusieurs centaines. Ces compartiments sont supposés isothermes, et ont des propriétés uniformes, i.e. densité, capacité calorifique, conductivité, production de chaleur,... La division en compartiments correspond aux différents tissus anatomiques : peau, muscles,... Dans tous les modèles le sang joue un rôle très important, car chez les mammifères les réponses thermiques sont très liées à la circulation sanguine.

Les échanges de chaleur sont calculés dans chaque compartiment, la chaleur est produite par métabolisme (M) dans les différents compartiments. Elle doit être évacuée dans l'environnement afin de maintenir la température interne constante. Les transferts du centre à la périphérie se font par conduction tissulaire et convection sanguine, puis au niveau de la peau par convection (C), rayonnement (R), conduction (K), et évaporation (E). On note S le stockage de chaleur. On peut alors écrire : $M + C + R + K + E = S$ ($S=0$ pour la thermo-neutralité)

La température du corps résulte de l'équilibre thermique entre l'homme et l'environnement. Les échanges de chaleur avec l'environnement se produisent principalement à la surface de la peau. Il est évident qu'en régime permanent il faut que la température de la peau soit plus basse que la température centrale, sinon la chaleur produite ne peut être transférée du centre à la périphérie.

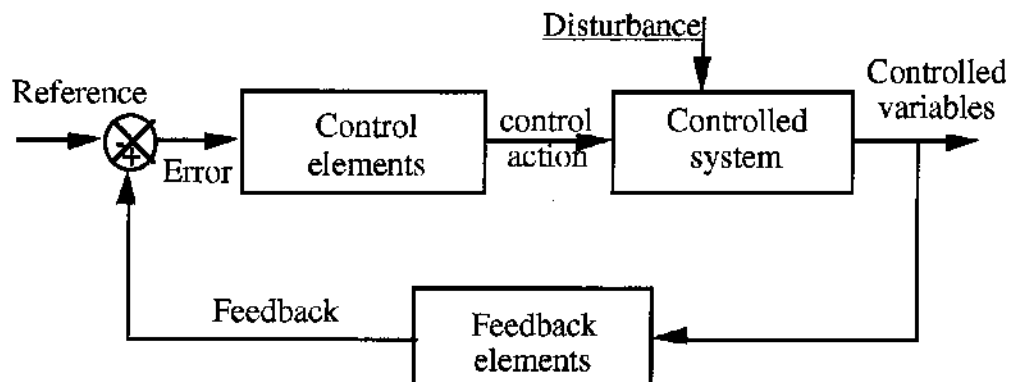
Le système actif ou de contrôle

Lorsque l'homme est exposé à une combinaison donnée de variables thermiques, le système de thermorégulation ajuste les fonctions de régulation afin de maintenir l'équilibre thermique et de garder la température interne constante.

Les quatre réactions de thermorégulation sont :

- *La sudation* : augmentation des pertes évaporatoires,
- *Les frissons* : augmentation de la production de chaleur
- *La vasodilatation* : augmentation de débit sanguin à la surface cutanée d'où augmentation des transferts vers la périphérie
- *La vasoconstriction* : diminution de débit sanguin à la surface cutanée d'où diminution des transferts

La plupart du temps le système de contrôle est considéré comme fonctionnant sur le principe de contre réaction négative (voir figure ci-dessous). Les thermorécepteurs centraux et cutanés sont connectés à l'intégrateur qui envoie à son tour des signaux pour activer les réponses hypothermiques ou hyperthermiques. Si le sujet a froid la vasoconstriction et les frissons apparaissent, si il a chaud il y a alors déclenchement de la vasodilatation et de la sudation.



Système de contrôle en boucle de contre réaction négative avec signal de référence

L'intensité de ces signaux dépend du résultat de la comparaison entre les signaux venant des thermorécepteurs et les valeurs de consignes correspondantes. L'effet résultant est appelé contrainte thermique, qui ne se manifeste pas par un paramètre unique, mais par plusieurs variables plus ou moins liées telles que : rythme cardiaque, pression sanguine, production de sueur, etc...

Il faut noter que la modélisation du contrôleur est importante. Les premiers modèles ne travaillaient qu'avec une variable : la température moyenne corporelle. Les modèles de Machle & Atkins [1947], Kerslake & Wadell [1958] et Whyndam & Atkins [1960] étaient très simple et en fait uniquement passifs. C'est dans les années 60 que le premier système de contrôle a commencé à être étudié (Whyndam 1960, Crosbie & Hardy, 1963), mais il ne s'agissait que d'un segment et seul le débit sanguin était contrôlé.

Peu de tentatives ont été faites pour représenter les différences inter-individuelles du système thermorégulateur. Havenith [1985] conclue que l'acclimatement, la forme physique, l'anthropométrie, les cycles circadiens ont un effet sur la température de consigne. Le sexe, l'âge sont considérés comme des variables secondaires qui sont en fait liées aux variables citées précédemment. Une complication supplémentaire intervient si on s'intéresse aux couplages entre ces diverses variables. Ces phénomènes étant encore très mal connus la majorité des modèles représente un individu "standard" sur lequel ont été faites les expériences permettant la validations. Seul le modèle de Konz (1979) prend en compte certains facteurs individuels.

1.2. Les modèles de thermorégulation existants

Une revue par ordre chronologique des modèles mathématiques les plus connus est présentée dans ce paragraphe. D'abord sont décrits les modèles représentant le corps entier puis les modèles multi-segments. Les principales caractéristiques, les avantages les inconvénients, les domaines d'application sont donnés. Le but de cette présentation n'est pas de décrire tous les modèles existants mais de faire le tour de la bibliographie, afin de trouver le modèle le plus adapté aux problèmes à traiter.

Nous n'avons pas tenu compte des modèles représentant un morceau du corps, ni ceux créés avant les années 60. Très peu de modèles ne fonctionnent pas d'après le principe décrit précédemment, les deux plus connus sont :

Smith et James (1964) Le corps est composé de trois couches représentant le tronc. Le battement cardiaque est utilisé comme indice de contrainte thermique, afin de calculer les alternances de périodes de travail et de repos.

Givoni et Goldman (1972). Ce modèle a été développé dans les années 70 par l'" US Army Research Institute of Environmental Medicine". Il est fait pour prédire la température rectale d'un groupe de sujets. Il est en grande part empirique, son utilisation est limitée aux ambiances chaudes.

Les modèles à 1 segment multi-couches

Les modèles simples ont été développés essentiellement pour les études sur le confort et les vêtements. Ils considèrent le corps dans son ensemble comme un segment unique. Ils amènent donc à des paramètres globaux (température moyenne cutanée, ...). Leur principal avantage est qu'ils sont en général facile d'emploi, et peu coûteux en temps de calcul.

Nous ne présenterons pas les modèles en régime permanent tel que ceux de Stewart et Goldman (1978), qui représente un cylindre humide recouvert d'une couche uniforme de vêtements, ce modèle a été créé essentiellement pour comprendre les phénomènes de transferts à travers le tissu.

Brown (1963). Le corps est représenté par 4 couches (centre, muscles, couche sous cutanée et l'épiderme). L'intérêt de ce modèle est l'étude des vêtements et de la réponse à l'immersion dans l'eau froide [Fan 1971].

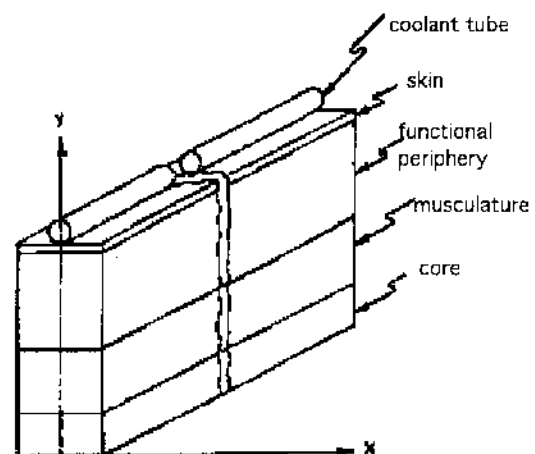
Crosbie, Hardy et Fessenden (1963). Le corps est représenté par trois plaques semi-infinies (centre, muscles et peau). Les auteurs ont supposé que le flux de chaleur est unidirectionnel du centre vers la peau. Le conductivité, la production de chaleur métabolique et le sueur sont fonction de la température moyenne du corps [Fan 1971, Houdas 1981].

Fanger (1967). Ce modèle est un des plus connus, il a été conçu pour les études sur le confort. Les équations sont basées sur deux observations principales : la température et la production de sueur nécessaires aux conditions de confort sont fonction du niveau d'activité, ceci a été établi par une série d'expériences (1396 sujets). Un bilan thermique très simplifié est ramené à un indice de confort PMV-PPD (Predicted Mean Vote et Predicted Percentage of Dissatisfied) [Fanger 1971]. Il n'y a pas de réactions de thermorégulation, la température de la peau et l'eau transpirée correspondent à celles nécessaires pour être en conditions de "confort optimal". Les calculs peuvent être effectués à la main, mais ils ne sont valables que pour des conditions homogènes en régime permanent et pour des valeurs de paramètres d'ambiance limités au domaine de variation rencontré dans l'habitat.

Yamamoto (1968). Le corps est divisé en 2 parties, l'intérieur qui reste à température relativement constante, et la surface qui échange de la chaleur avec l'environnement. Il n'y a pas de thermorégulation, mais le débit sanguin est fonction de la température ambiante.

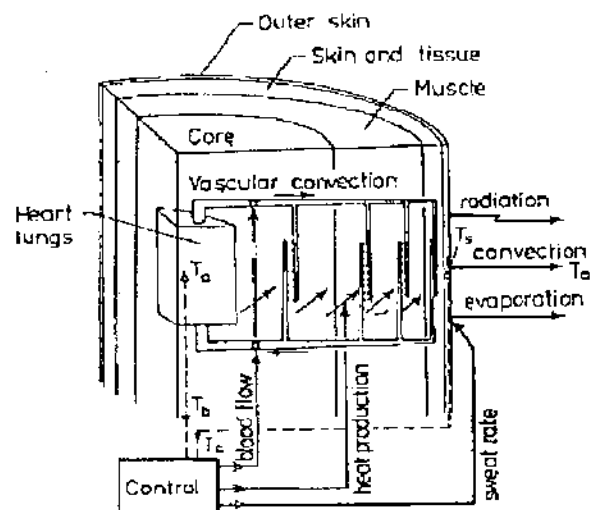
Buchberg et Harrah (1968).

Ce modèle a été créé par la "Royal Aircraft Establishment" pour analyser l'effet d'un sous-vêtements de refroidissement par conduction pour les pilotes. Le corps est représenté par plusieurs plaques (peau, périphérie, muscles, centre). Le vêtement est composé d'une série de tubes en contact avec la peau. L'inconvénient majeur est que le flux sanguin au niveau de la peau n'est pas pris en compte.



Atkins et Wyndham (1969).

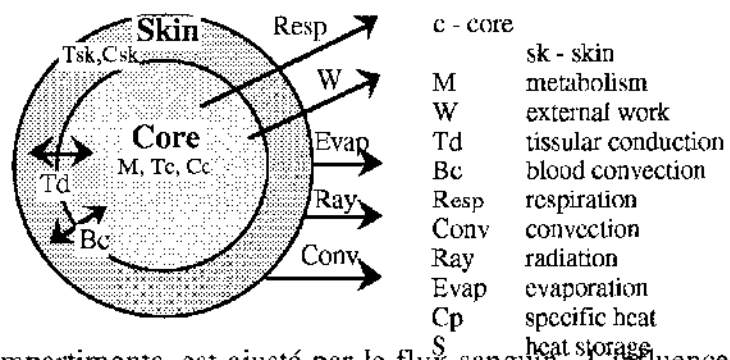
Le corps est représenté par un cylindre composé de 4 couches (centre, muscles, la partie profonde de la peau et la graisse et la surface de la peau sans vaisseaux sanguins). Il n'y a pas de transfert de chaleur le long de l'axe. Ce modèle prend en compte un flux sanguin qui collecte le sang venant des diverses parties. Le contrôle est fonction de signaux venant de la peau et du centre.



Webb (1970). Ce modèle a été créé pour développer un système de régulation automatique de vêtement de refroidissement par eau, d'un homme effectuant un fort exercice en étant isolé thermiquement de l'extérieur. Le corps est divisé en 3 couches : peau, squelette et muscles. L'homme est supposé être en permanence à l'équilibre thermique on calcul la puissance nécessaire pour maintenir cet équilibre.

Gagge (1970). Ce modèle est un des plus répandus et des plus fiables. Il est en fait une simplification du modèle de Stolwijk (voir plus loin). Il a été développé par des ingénieurs du bâtiment et fait partie de la norme américaine de la " American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineer (ASHRAE)". Il permet de prédire les conditions optimales, mais aussi de faire un étude globale des vêtements, du temps limite d'exposition à des conditions extrêmes. Ce modèle est en perpétuelles évolution en fonction des applications.

Le corps est représenté par une sphère composé de 2 couches concentriques : le centre (environ 90%), la peau (environ 10%) La chaleur est produite uniquement dans le centre ; les transferts se font de manière radiale.



Le pourcentage des deux compartiments. est ajusté par le flux sanguin. L'influence des habits est prise en compte par une simple résistance aux transferts de chaleur et d'humidité. Les réactions de thermorégulation sont calculées ; le contrôleur fonctionne sur le principe de température de consigne. Ce modèle permet entre autre de calculer divers indices.

Azer et Hsu - K.S.U. (1974). C'est un dérivé du modèle de Gagge. Certaines équations ont été modifiées, mais la structure générale est la même. Il amène à un indice de contrainte thermique qui est séparé en 2 termes : Tsens- (qui est fonction de la vasoconstriction), et Tsens+ (fonction de la mouillure).

Les modèle multi-éléments, multi-couche

Les modèles simples sont très utiles pour une première approche, mais leur température uniforme est une simplification excessive par rapport à la réalité, pour pouvoir représenter de manière fiable la physiologie. Par exemple en climat froid la circulation sanguine est réduite dans les extrémités pour maintenir le plus possible les organes vitaux à température constante, ceci va provoquer une baisse importante de la température des extrémités ; on ne peut alors plus du tout considérer que la température cutanée est homogène. Dans ces cas il faut alors obligatoirement faire appel à des modèles plus détaillés.

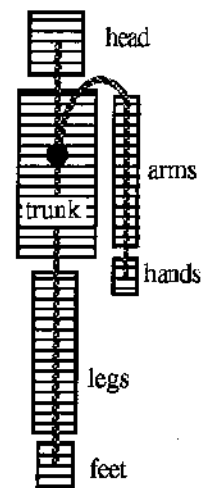
Stolwijk & Hardy (1966,1970). Dans la première version du modèle de Stolwijk et Hardy (1966), le corps était divisé en 7 compartiments : 3 cylindres (tête, tronc, extrémités), chacun divisé en 2 couches, plus le flux sanguin reliant les couches entre elles. Le version suivante a été créée pour les programmes spatiaux de la NASA, et a été largement utilisée dans les simulations pour les missions Apollo et Skylab [Stolwijk 1970, 73].

Plus tard il a été utilisé par d'autres pour étudier les conditions de confort [Haslam 1988, Thellier 1989].

Dans la version actuelle, le corps est divisé en 25 compartiments : 6 segment (tête, tronc, bras, mains, jambes et pieds), chacun divisé en 4 couches (centre, muscles, graisse et peau). Les transferts de chaleur se font de façon radiale, et le flux sanguin relie les compartiments entre eux.

Stolwijk a apporté beaucoup au niveau du système de contrôle qui était jusqu'alors très grossier. Il a intégré toutes les connaissances les plus récentes dans ce domaine. Le contrôleur fonctionne sur le principe du "point de consigne".

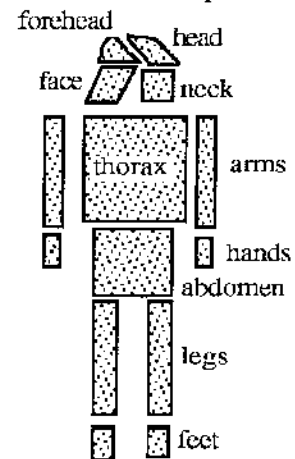
Ce modèle est une source d'inspiration pour beaucoup d'autres modèles [Gordon 1976, Wissler 1982, Kuznetz 1976]. Plusieurs auteurs ont fait des estimations sur sa validité [Berglund 1972 & 1978, Haslam 1987 & 1988]. Il ressort de ces études que ce modèle procure de bons résultats dans les conditions chaudes et neutres, mais qu'au froid il a tendance à être moins précis, car en fait il est difficile de valider la production de frissons car celle-ci est quasiment impossible à mesurer. D'autre part la commande de sudation manque d'une influence de l'activité. Stolwijk & Hardy (1977) suggèrent que l'introduction d'un compartiment supplémentaire pourrait améliorer les prédictions du modèle.



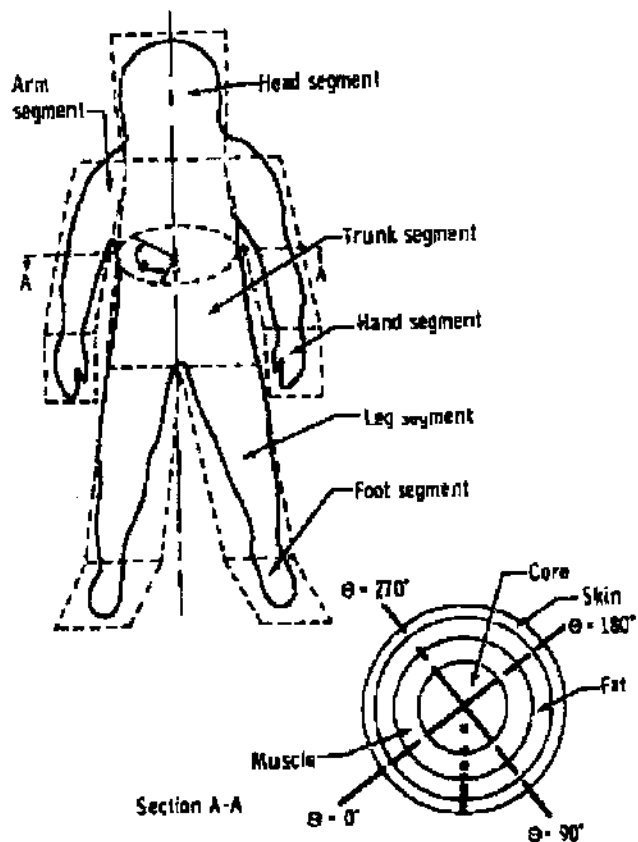
Montgomery (1974). Il s'agit d'une version modifiée du modèle de Stolwijk. Sa précision est accrue pour un homme plongé dans l'eau froide avec un combinaison de plongée. Chaque segment est redécoupé en 10 couches (4 pour le centre, 4 pour les muscles, graisse et peau) plus le flux sanguin, ce qui fait 61 nœuds au total. Certains paramètres sont fonction de la taille, du poids et du métabolisme basal. Les échanges avec le milieu extérieur sont modifiés : il n'y a pas de rayonnement ni d'évaporation. Les échanges conducto-convectif sont calculés en fonction des caractéristiques de l'eau et les échanges respiratoires sont pour une forte pression. Ce modèle a été validé uniquement pour des immersions partielles et donne de bons résultats, sauf pour de forts changements d'activité.

Gordon (1976). Ce développement du modèle de Stolwijk a été spécialement conçu pour prévoir les réactions à des expositions de climats très froids. Le corps est divisé en 14 cylindres ou parties de sphère, chaque segment étant lui-même composé de 4 ou 5 couches.

Par exemple l'abdomen comporte 5 couches (centre, os, muscle, graisse et peau). Chaque tissu est subdivisé en 2 ou 3 sous-couches, ce qui fait un total 44 compartiments et 154 nœuds. Le sang sort de chaque compartiment à température de celui ci et retourne au centre. Le système de contrôle apour entrées des signaux venant de la tête, de la peau, mais aussi du flux au niveau de la peau. Uniquement les réactions contre le froid sont calculées, les résultats sont fiables , mais le modèle ne peut être utilisé en climat neutre ou chaud



Kuznetz (1976). Ce modèle est très largement basé sur celui de Stolwijk, il a aussi été conçu pour le NASA, pour modéliser un homme dans un scaphandre spatiale lors de sorties dans l'espace. Le but principal était de développer un système de contrôle automatique du confort thermique dans le scaphandre. Il a évolué par la suite et permet de calculer les variations de températures dans deux dimensions spatiales : radiale et angulaire pour le tronc. Le corps est divisé en 10 segments (tête, tronc, 2 bras , 2 mains, 2 jambes, 2 pieds), plus le flux sanguin. Ce qui fait 41 compartiments. Le gradient de température est déterminé pour 7 nœuds dans le sens radial et dans 4 directions angulaires.



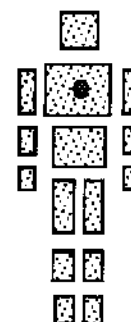
Des expositions à des climats très asymétriques ont été réalisées, et entraînent des températures très différentes sur les deux côtés du corps. Le modèle a été validé sur l'expérience suivante : le sujet est exposé à un mur de 82 ou 93 °C et le mur opposé à -6,7 °C. La différence de températures des deux cotés du tronc peut atteindre 7 à 15°C, et la différence entre les résultats de modélisation et d'expériences ne dépasse jamais 1.5°C.

Konz (1979). Ce modèle est le seul à prendre en compte les facteurs interindividuels. Les femmes ont une capacité de transpirer plus faible, les battements cardiaques varient en fonction de l'âge. Le poids, la taille et le graisse peuvent être entrés dans le modèle. Konz a obtenu de bons résultats pour les simulations des comportements individuels.

Wissler (1982). Wissler a développé toute une série de modèles. Le premier date de 1961, il ne représentait que le régime stable sans système de contrôle. Le corps était divisé en 7 éléments : tête, tronc, 2 bras, 2 jambes. Les cylindres représentatifs sont supposés isotropes. En 1963 le modèle fut modifié pour prendre en compte les régimes transitoires, puis plusieurs facteurs ont été rajoutés, tel que : les variations du débit sanguin local, de la production de chaleur. Malgré tout il n'y avait pas de système de contrôle.



En 1982 Wissler a présenté un modèle issu de celui de Stolwijk mais comportant 250 compartiments (15 segments de 15 à 21 couches), avec un contrôleur amélioré qui prend en compte les vitesses de variations des températures et de meilleures réactions pour les frissons. Il considère les transferts entre les larges artères ou veines et les tissus, mais aussi entre les éléments adjacents par l'intermédiaire du sang.



Charny & Hagman (1987). Ce modèle a été créé par des ingénieurs biomédicaux, pour des traitements hypothermiques contre le cancer. C'est à l'origine le modèle de Stolwijk pour les aspects thermiques auquel sont rajouté un modèle pour les effets électromagnétiques et un pour les effets des radiations micro-ondes. Le corps est divisé en 16 segments (tête, cou, torse, abdomen, 2 hauts du bras, 2 avant-bras, 2 mains, 2 cuisses, 2 mollets, 2 pieds), chacun divisé en 4 couches, plus le flux sanguin, soit 65 compartiments. On peut aussi calculer l'effet d'une perfusion chaude, et d'un refroidissement par pulvérisation d'eau sur la peau. Ce modèle n'a été validé qu'en conditions médicales.

Tikuizi & Gonzalez (1988). C'est à la base le modèle de Stolwijk et Montgomery. L'auteur a modifié les commandes de contrôle des frissons, qui dépendent directement et localement de la température cutanée. Le signal est atténué par le pourcentage de graisse du sujet. Ce modèle a été développé pour prévoir les temps de survie lors des immersions dans l'eau froide. Les résultats sont bons mais le modèle n'a été validé que pour de l'eau modérément froide de 20 à 24 °C.

Werner & Buse (1988). C'est le seul modèle anatomique. La première version (1977) avait été élaborée pour calculer le profil interne de température. Le corps est projeté sur une grille en 3 dimensions, et permet la représentation des principaux organes. Il comprend 54 composants (16 zones cutanées, 10 zones musculaires, 6 types de vaisseaux, 4 de système nerveux, cœur, foie, poumons, reins, ...). Tous les composants ont les caractéristiques réelles. Les échanges avec le milieu environnant sont calculés pour la position verticale en condition "standard". Il n'y a pas de système de thermorégulation, les comparaisons avec des expériences ont été faites uniquement en "ambiance neutre".

Récapitulatif des modèles mathématiques existants

Nom & date:	<u>Nom</u> de l'auteur du modèle et première <u>date</u> répertoriée d'apparition
*C; *S; *L; (*N):	nombre de Comp artiments, n^b Seg ments; n^b (L) couches; n^b N œuds (seulement si il est différent de n^b C); ces nombres font référence seulement à la physiologie si il existe des vêtements ils ne sont pas comptés.
Régulation:	Indique si il y a un système de thermorégulation
appl.	principales <u>appl</u> cations
carac	principales <u>carac</u> téristiques du modèle
Avantages:	domaine de validation, avantages du modèle
Inconvénients:	problèmes, limitations du modèle, restriction d'utilisation

Nom	date	*C, *S, *L, *N, Régul.	Appl. & carac	Avantages	Inconvénients
Smith	1964	3 N, 1 S, 3L, non	- prédiction du rythme cardiaque		- représente seulement le tronc
Givoni	1972	1C, 1S, 1L, non	- US Army institute - prédiction température rectale	- bons résultats en conditions chaudes	- modèle empirique - pas valable en conditions chaudes
Modèle un segment, multi-couches					
Brown	1963	4C, 4L, non	- études des vêtements - immersion dans l'eau		
Crosbie	1963	3C, 3L, non	- 3 plaques semi-infinies		- corps considéré comme un plaque
Fanger	1967	1C, 1L, non	- études confort - calcul PMV-PPD	- très répandu - calculs simples	- valable seulement en conditions de confort - régime stable, ambiance homogène
Buchberg	1968	4C, 4L, non	- vêtements de refroidissement	- effet local de refroidissement par conduction	- 4 plaques infinies
Webb	1970	3C, 3L, non	- vêtements à liquide de refroidissement		
Gagge	1970	3C, 2L, oui	- ingénieur chauffage - confort thermique, vêtements, temps tolérances	- très répandu - résultats fiables - calcul d'indices	- climat homogène
Azer (K.S.U.)	1974	3C, 2L, oui	- Gagge's modifié - indices de sensation thermique	" " " "	" " " "
Hsia	1975	3C, 2L, non	- compréhension de débit sanguin		- représente seulement un membre
Buse	1977	5C, 4L, ±oui	- Atkins & Wyndham modifié	- couches à temp. non homogènes	

Nom	date	*C, *S, *L, *N, Régul.	Appl. & carac.	Avantages	Inconvénients
Modèles multi-segments, multi couches					
Stolwijk	1966	7C, 3S, 2L, oui	- projet NASA	- bonne représentation du système de contrôle	- créé pour un homme nu en conditions "standard"
Stolwijk	1970	25C, 6S, 4L oui	- créé pour la NASA - la plupart des autres modèles en sont dérivés	- bon degré de flexibilité - très répandu	- manque de prise en compte de l'exercice sur la sudation
Montgomery	1974	61C, 6S, 10 L oui	- homme dans l'eau froide - Stolwijk modifié	- certaines variables sont fonction du poids et de la taille	- pas satisfaisant en régimes transitoires
Gordon	1976	44C, 10S 4 or 5L, 154N oui	- prédiction de la réponses en conditions froides et très froides - Stolwijk modifié	- fiable en conditions froides	pas valable en conditions de neutralité et chaudes
Konz	1979	25C, 6S, 4L, oui	- Stolwijk modifié	- considère les facteurs inter-individuelles	
Kuznetz	1979	41C, 10S, 4L, 361 N, oui	- créé pour NASA-EVA - Stolwijk modifié - variations angulaires des temp.	- échanges de chaleur avec une combinaison de refroidissement - utilisé pour le contrôle de la combinaison	
Wissler	1982	250N, 15S, 15 à 21 L, oui	- Stolwijk modifié	- modification du système de régul.	
Charny	1987	65C, 16S, 4L oui	- créé par des médecins- Stolwijk modifié	- prend en compte les ondes inclus aussi électromagnétiques & micro-ondes	- validé seulement en applications médicales
Tikuisi	1988	25C, 6S, 4L oui	- temps de survie en eau froide - Stolw. & Montgomery modifié	- système de contrôle affiné	- validé dans l'eau froide (20-24°C)
Werner	1988	54 composants	- analyse des profils de temp. interne	- meilleure prédiction des temp. internes	- pas de réactions physiologiques

1.3. Conclusion sur les modèles

Le tableau précédent est un récapitulatif des principaux modèles existants. Les modèles simples de loin les plus répandus : sont le Gagge et le KSU. Ils sont très proches, fonctionnent sur le même principe et possèdent un système de thermorégulation. Ils sont validés par un grand nombre d'expériences et valables en régime transitoire. Leurs inconvénients majeurs est qu'ils ne sont fiables que pour des conditions homogènes pour l'ambiance et l'exercice physique.

Pour les modèles plus complexes, il faut noter que plus un modèle est compliqué plus il a besoin de données détaillées difficiles à obtenir. Depuis 1970 la quasi totalité des modèles créés sont issus de celui de Stolwijk. D'autre part très peu de modèles sont disponibles sous forme informatique, voir même en version complète au niveau des équations. La plupart du temps il ne s'agit que de descriptions du mode de fonctionnement général, de modifications faites par rapport aux versions précédentes ou d'équations trop globales, sans aucune valeur de paramètre nous permettant de retranscrire le modèle sous forme numérique.

Par ailleurs il n'existe apparemment aucun modèle prenant en compte les problèmes d'expositions au soleil, ou d'échanges par conduction avec des matériaux autres que les combinaisons à liquide de refroidissement utilisées dans l'espace. Le seul modèle prenant en compte les échanges conductifs a été développé pour les études sur le bilan thermique lors du sommeil en fonctions du nombre de membres sortis de la couverture [Höppe 198], ce qui est assez loin du problème du siège.

Le modèle qui semblerait le plus adapté serait celui de Kuznetz car il prend en compte les membres séparément et différencie l'avant et l'arrière du sujet. Malheureusement il semble très difficile d'en obtenir une version complète et les publications qui ont été faites à ce sujet ne donnent que très peu de détails.

Nous nous sommes donc orienté définitivement vers l'amélioration de MARCL, en fonction des besoins, à partir de la version que nous possédons actuellement.

Les modèles MARCL (Modèle de thermorégulation humaine) et TRIM (Modèle de sensations thermiques) dans leur état actuel sont décrits dans les fiches Proforma données en Annexe.

I.4. Références Bibliographiques

- ATKINS, A.R., WYNDHAM, C.H., 1969
A study of temperature regulation in the human body with the aid of an analogue computer. Pflügers Arch., 307 : pp.104-119.
- AZER N.Z., HSU S., 1977
The prediction of thermal sensation from a simple model of human physiological response. ASHRAE Trans., Vol. 83, pp.88-102.
- BATATO M., 1989
Energétique du corps humain. Presses polytechniques Romanes, collection meta, 142 p.
- BERGLUND L.G., 1978
Mathematical models for predicting the thermal comfort response of building occupants. ASHRAE Trans., Vol. 84(1), pp.735-749.
- BERGLUND L.G., STOLWIJK J.A.J., 1972
The use of simulation models of human thermo-regulation in assessing acceptability of complex dynamic thermal environments. Energy conservation strategies in building. Comfort, acceptability and health. Stolwijk ed., pp.157-191.
- BUSE, M., WERNER, J., 1985
Heat balance of the human body : Influence of variations of locally distributed parameters. J. Theor. Biol., 114 : pp.34-51.
- CHARNY C.K., HAGMANN M., LEVIN R., 1987
A whole body thermal model of man during hyperthermia. IEEE trans. of biomed. engin., Vol. BME 34, NO5, may .
- DEDEAR R.J., AULICIEMS A., 1985
Validation of Predicted Mean Vote model of thermal comfort in six Australian field studies. ASHRAE Trans., Vol. 91(2B), pp.452-467.
- DOHERTY T.J., ARENS E., 1988
Evaluation of physiological bases of thermal comfort models. ASHRAE Trans., Vol. 94(1), pp. 1371-1384.
- FAN, L.T., HSU, F.T., HWANG, C.L., 1971
A review on the mathematical models of the human thermal system. BME-18(3) : pp.218-234.
- FANGER O., 1971
Thermal comfort. Mac Graw Hill , New-York.
- GAGGE A.P., 1981
Rational temperature indices of thermal comfort. Bioengineering thermal physiology and comfort.
 K. Cena, J. Clark editor, Elsevier, pp.79-98.
- GAGGE A.P. , 1973
Rational temperature indices of man's thermal environment and their use with a 2-node model of his temperature regulation. Fed. proc. 32, pp.1572-1582.
- GALEOU M., 1991
La sensation thermique de l'homme dans son habitat des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations. Thèse d'université Toulouse n°1008
- GIVONI B., GOLDMAN R.F., 1972
Predicting rectal temperature response to work, environment, and clothing. J. Applied Physiol., Vol. 32(6), pp.812-822,
- GORDON R., ROEMER R., HORVATH S., 1976
A mathematical model of human temperature regulatory system - Transient cold exposure response. IEEE Trans. on biomed. eng., Vol. BME-23, n° 6.
- GWOSDOW A.R., BERGLUND L.G. , 1989
Physiological and behavioral temperature regulation of men in simulated nonuniform thermal environments between 18 and 30°C. Aerospace Medical assoc. aviation, space & environ.med.
- HARDY, J.D., 1972
Regulation of body temperature in man - an overview. Energy conservation in buildings. Stolwijk, J. (ed.), J.B. Pierce Lab., pp. 14-37.

- HASLAM R.A., PARSONS K.C., 1987
A comparison of models for predicting human response to hot and cold environments. Ergonomics, Vol. 30(11), pp.1599-1614.
- HASLAM R.A., PARSONS K.C., 1988
An evaluation of computer-based models that predict human responses to the thermal environment. ASHRAE Trans., Vol. 94 .
- HASLAM, R.A., PARSONS, K.C., 1988
Quantifying the effects of clothing for models of human response to the thermal environment. Ergonomics, 31(12) : pp.1787-1806.
- HÖPPE P., BAUGARTNER A. 1985
Responses of thermophysiological parameters of sleeping subjects to variant climatic conditions. Proc. Clima 2000, Copenhagen ,p.133-138.
- A.HOUDAS Y., 1981
Modelling of heat transfer in man. Bioengineering thermal physiology and comfort. K. Cena & J.A. Clark editor, Elsevier, Chap.7, pp.111-120.
- HSIA, T.C., 1975
A prototype segmental model for blood flow and heat transfer in the limb. Computer Programs in Biomedicine, 4 : pp.219-225.
- INT-HOUT D. , 1990
Thermal comfort calculations computer model. Symp. of thermal comfort and indoor environment, pp.840-844
- JONES, R.W., GRAY, J.S., 1963
System theory and physiological processes. Science, 140 : pp.461-466.
- KONZ S., HWANG C., DHIMAN J., 1975
An experimental validation of mathematical simulation of human thermo-regulation Comput biol. Med, Pergamon press, Vol.7, pp. 71-82.
- KUZNETZ L., 1976
Control of thermal balance by a liquid circulating garment based on a mathematical representation of the human thermo-regulatory system. NASA Tech. Memorandum, TM-X-58190, JSC-11579.
- KUZNETZ L.H., 1979
A two-dimensional transient model of human thermo-regulation. Am. J. Phys. : R266-R277.
- KUZNETZ L.H., 1980
Automatic control by a liquid-cooled garment. J. Biomed. Engineering Vol.102: pp.155-161.
- LOTENS W.A., 1988
Comparison of thermal predictive models for clothed humans. ASHRAE Trans. Vol. 94(1), pp.1321-1341.
- MITCHELL D., ATKINSA, WYNHAMC., 1972
Mathematical and physical models of thermo-regulation. In : Bligh, J., Moore, R.E. (eds), Essays on temperature regulation. North-Holland Publ. Amsterdam, pp. 37-54.
- MOCHIDA, T., 1982
A model of heat loss by perspiration and temperature sensation index - equi-skin temperature lines with inconstant wettedness. Bull. Fac. Engineer., Hokkaido Univ., 107 : pp.1-11.
- MONTGOMERY, L.D., 1974
A model of heat transfer in immersed man. Annals of biomed. Engineer., 2 : pp.19-46.
- NEVINS, R.G., SPRAGUE, C.H., 1973
Prediction of thermal sensation with a simple thermo-regulatory model. Arch. Sci. Physiol., 27 : A425-A432.
- NISHI, Y., IBAMOTO, K., 1969
Model skin temperature - an Index of thermal sensation in cold, warm and humid environments. ASHRAE Transact., 75(2) : 94-107.
- SIMIONESCO L., HORNET D., 1988
Thermal modelling of the EVA astronaut. Proc. of the 3rd Europ. Symp. on Space Control & life support. ESA SP-288, p. 227-232.

- SRAGUE C., JAIR, NEVIN R., AZER N., 1974.
The prediction of thermal sensation for man in moderate thermal environment via a simple thermo-regulatory model. ASHRAE Trans., Vol. 80(1), pp.130-146.
- STEWART, J.M., GOLDMAN, R.F., 1978
Development and evaluation of heat transfer equations for a model of clothed man. The S. African mech. engineer., 28 : pp.174-178.
- STOLWIJK J.A.J., 1970
Mathematical model of thermo-regulation. Physical & behavioral temperature regulation. J. Hardy, A. Gagge, J. Stolwijk editor. Thomas publisher Springfield, chap. 48, pp.703-721.
- STOLWIJK J.A.J., HARDY J.D., 1966
Temperature regulation in man - A theoretical study. Pflügers Arch. Gen. Physiol., Vol. 291, pp.129-162.
- STOLWIJK J.A.J., NADEL E.R., 1973
Thermo-regulation during positive and negative work. Federation proceeding Vol. 32(5), pp.1607-1613.
- STOLWIJK, NADEL, WENGER, 1973
Development and application of a mathematical model of human thermo-regulation. Environnement thermique physiologie - psychologie. Arch. Sci. Physiol., Vol. 27, A303-A310, .
- THELLIER F., 1989
Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort. Thèse d'université, Toulouse, n°510.
- TIKUISIS P., GONZALEZ R., PANDOLF K., 1988
Thermoregulatory model for immersion of humans in cold water. J. Appl. Physiol. 64(2): pp.719-727.
- TIKUISIS P., GONZALEZ R., PANDOLF K., 1988
Prediction of Thermoregulatory responses and endurance time in water at 20 and 24°C. Aviation Space and Environmental medicine, 58; pp.742-748
- WEBB P., 1975
Thermal exchanges and temperature stress. Foundations of space biology and medicine. Joint USA/USSR publication, Vol II, Book 1, Chap. 3, pp. 95-126.
- WERNER, J., 1977
Mathematical treatment of structure and function of the human thermo-regulatory system. Biol. Cybernetics, 25 : pp.93-101.
- WERNER, J., 1986
Do black-box models of thermo-regulation still have any research value ? Contribution of system theoretical models to the analysis of thermo-regulation. The Yale J. of Biol. and Medicine, 59 : pp.335-348.
- WERNER J., BUSE M. 1988
Temperature profiles with respect to inhomogeneity and geometry of the human body. J. Applied Physiol., Vol. 65(3), pp.110-118.
- WISSLER E.H., 1970
Comparison of computed results obtained from two mathematical models - A simple 14-node model and a complex 250-node model. Symp. internat. de thermorégulation comportementale, pp.455-458.

II. BIBLIOGRAPHIE SUR LES ASPECTS DE CONFORT DANS LES VEHICULES

Articles disponibles au LESETH

Nous ne citons ici évidemment que les articles ayant un rapport avec les véhicules

BEZIAN J.J., CHEIKH A., FONZES G., 1992

Modélisation dynamique des échanges par convection naturelle à l'intérieur d'un habitacle automobile. Journées de la S.F.T., Sophia-Antipolis mai 1992, pp.1-9

CHRISTIE T., 1991

La climatisation des voitures exigences et réalisations. Chauffage Ventilation Conditionnement, n°5 mai 1991, pp.18-19

DELLA ROLLE C., TAREZA A., PALAZZETTI R., GOAN B., CARISO B., 1989

thermal confort in the passanger compartment: a contribution to its evaluation Proc. international congress, technology status and prospects about the thermal vehicle comfort., Bologna April 1989.

GWOSDOW A.R., BERGLUND L.G., 1987

Clothing distribution influences thermal responses of man in cool environments.. J. Therm. Biol., Vol 12, No 2, pp. 91-95.

GWOSDOW A.R., BERGLUND L.G., 1989

physiological and behavioral temperatureregulation of men in simulated nonuniform thermal environments..

Aviation, Space and environmental medicine, june 1989, pp. 558-565

ISHIHARA Y., HARA J., SAKAMOTO H., KAMEMOTO K., OKAMOTO, 1991

Determination of flow velocity distribution in a vehicle interoir using a vizualization and computation techniques. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 25-March 1, pp.51-62.

INGERSOLL J.G., KALMA T.G., MAXWELL L.M., NEIMLEC R.J., 1992

Automobile passaenger compartment thermal confort model

- Part I : Compartment cool-down/warm-up calculation .

- Part II : Human thermal confort calculation

Sans références

LARNICOL P., 1990

Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son environnement. Rapport de stage, DEUST d'énergétique d'Orsay

LEVENT, 1985

Confort thermique des véhicules.

Proc. Clima 2000, Copenhagen .

LIN C.H., HAN T., KOROMILAS C.A., 1992

Effects of HVAC design parameters on passenger thermal confort. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29/

MESSANA C., PALAZZATI M., PARISI PRESICCE L., PETRUCCIOLI G., SALOTTI G., 1991

Solar ventilation in vehicles. The role of components involved. XXIII Fisita congress, Torino, PP. 901-909.

NEWBOROUGH M., PROBERT S.D. , 1984

Improving the thermal confort of sedentary man. Applied Energy, 17, pp. 283-299.

PACHIAUDI G., BLANCHET V., LETISSERAND D., 1989

Le confort thermique en situation réelle : cas des transports longue distance. Journées de la S.F.T. : Evaluation des échanges de chaleur du confort thermique et des durées de tolérance dans diverses situations de vie et de travail, 14 juin 1989

PAKLEZA J., SACADURA J.F. 1989

Le confort thermique en situation réelle : cas d'un véhicule individuel. Journées de la S.F.T. : Evaluation des échanges de chaleur du confort thermique et des durées de tolérance dans diverses situations de vie et de travail, 14 juin 1989

PERRIN F., 1991

Modélisation du comportement thermique d'un habitacle d'automobile : approche de l'étude du confort. Thèse d'université, Lyon 91 ISAL.

ROBIN R., 1992

Conception des systèmes de climatisation automobile.. Bulletin de liaison n°2 du G.U.T., Janvier 1992

TANAKA H., KITADA M., TANIGUCHI Y., OHNO Y., SHENAGAWA T., AOKI H., 1992

Study on car air conditioning system controlled by car occupants' skin temperature - Part 2 development of a new air conditioning system Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.21-27

TANIGUCHI Y., AOKI H., FUJIKAKE K., TANAKA H., KITADA M. 1992

Study on car air conditioning system controlled by car occupants' skin temperature - Part 1 Research on a method of quantitative evaluation of car occupants' thermal sensations by skin temperatures. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.13-19

UEDA M., TANIGUCHI Y., AOKI H., 1992

A new method using neural networks to evaluate the transitional thermal sensation of an automobile occupant. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.75-80

Journée spécialisée : confort thermique dans les véhicules de transport, 19 mai 1988.

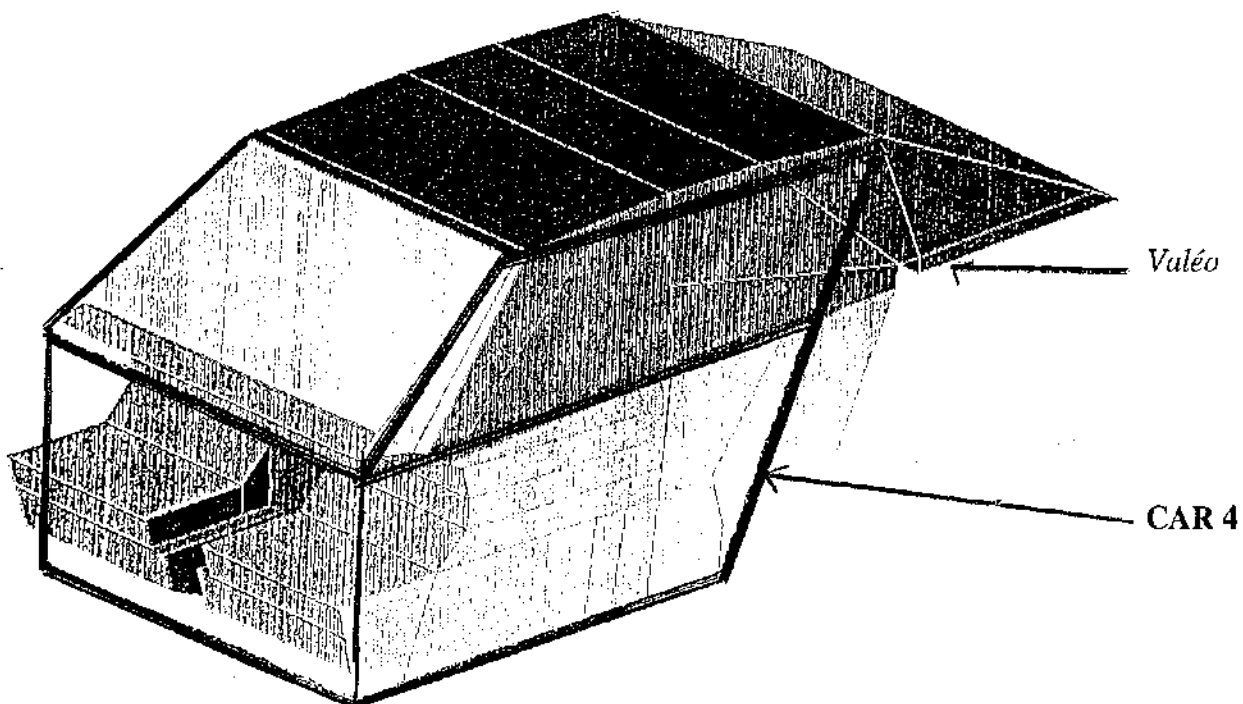
2ème Partie - RESULTATS

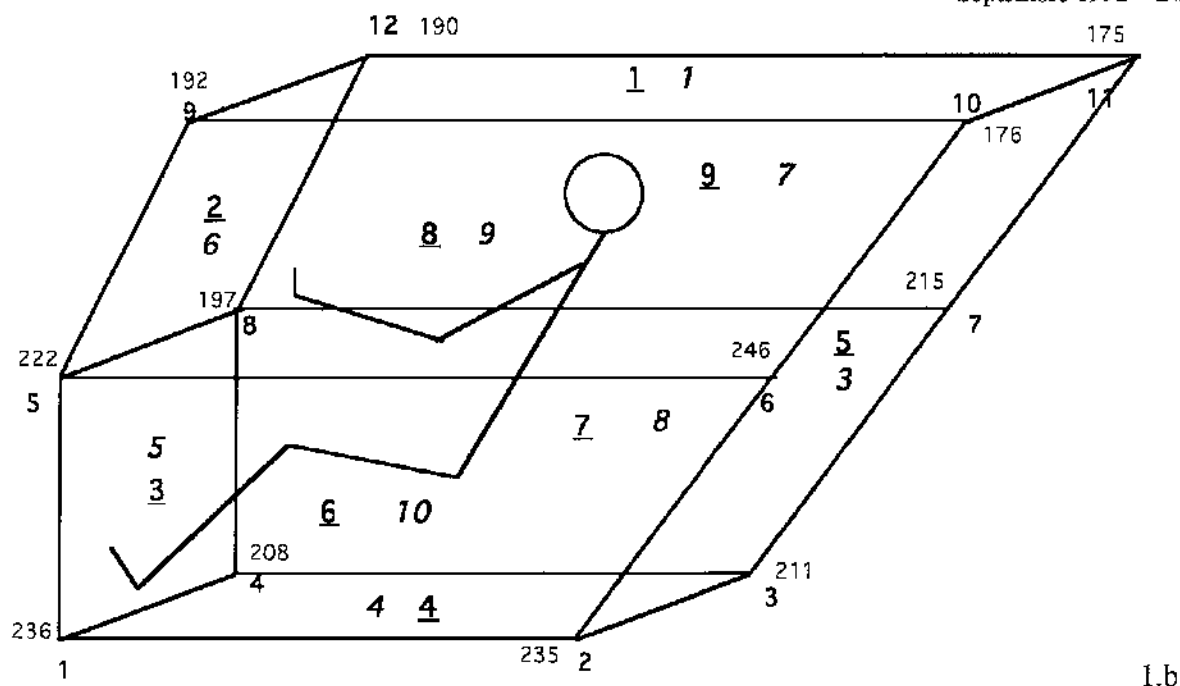
I. TESTS DU LOGICIEL EXISTANT, SENSIBILITE AUX PARAMETRES

Il avait été décidé de procéder à des essais du logiciel sur une configuration homme-voiture plausible. A cet effet, nous avons modélisé l'habitacle de la BX, d'après les données fournies par VALEO, avec des données de températures et de vitesses d'air tirées des expériences de VALEO.

II.1. Habitacle

Notre logiciel de calcul des échanges infrarouges n'accepte que 30 surfaces ; en l'attente de l'utilisation du logiciel de VALEO, nous avons dû réduire l'habitacle de la BX à 9 surfaces, puisque le corps humain nécessite 21 surfaces. La Figure 1-a représente les limites de l'habitacle réduit modélisé par nous (CAR 4) et par VALEO. La Figure 1-b donne l'équivalence des points et des surfaces pour notre modèle (CAR 4) et celui de VALEO (dans la nomenclature VALEO).





en **gras souligné**: surfaces du deck CAR4
en *italiques*: équivalents pour VALEO

en **gras**: points du deck CAR4
en fin: équivalents pour VALEO

Figure 1 : dessin de l'habitacle tiré de la BX de VALEO

II.2. Températures de paroi et d'air, vitesse d'air

Les températures de paroi et d'air sont celles mesurées par VALEO (expérience Juil. 91). Elles sont reportées sur les Figures 2-a et 2-b. On suppose que le conducteur était préalablement à l'équilibre thermique dans une ambiance neutre. Son entrée dans la voiture correspond à une baisse importante de la température ambiante, suivie d'une remontée en température, puis d'une baisse temporaire au niveau des pieds uniquement.

Les vitesses d'air utilisées ont été fournies par VALEO :

partie du corps	tête	tronc	bras	main	jambes	pieds
vitesse (m/s)	0,4	0,25	0,1	0,1	0,7	1,6

II.3. Résultats

La Figure 3-a donne les températures de peau mesurées par VALEO. La Figure 3-b donne les résultats de simulation.

L'allure générale des courbes est respectée. La position relative des courbes ne l'est pas toujours, de même que l'amplitude des variations. Il faut noter que les simulations ont été menées avec deux hypothèses lourdes de conséquences :

1) L'habillement n'étant pas connu, nous avons pris des valeurs d'isolation vestimentaire qui nous semblaient plausibles, mais qui peuvent s'éloigner de la réalité.

2) Les seules températures d'air disponibles sont celles au niveau des pieds et du siège ; nous avons supposé que toutes les parties du corps, excepté les pieds, étaient dans de l'air à cette dernière température. Ces deux approximations suffisent à interdire de pousser trop loin les comparaisons Expérience - Simulation. *Il conviendra de bien mesurer tous les paramètres des expériences futures.*

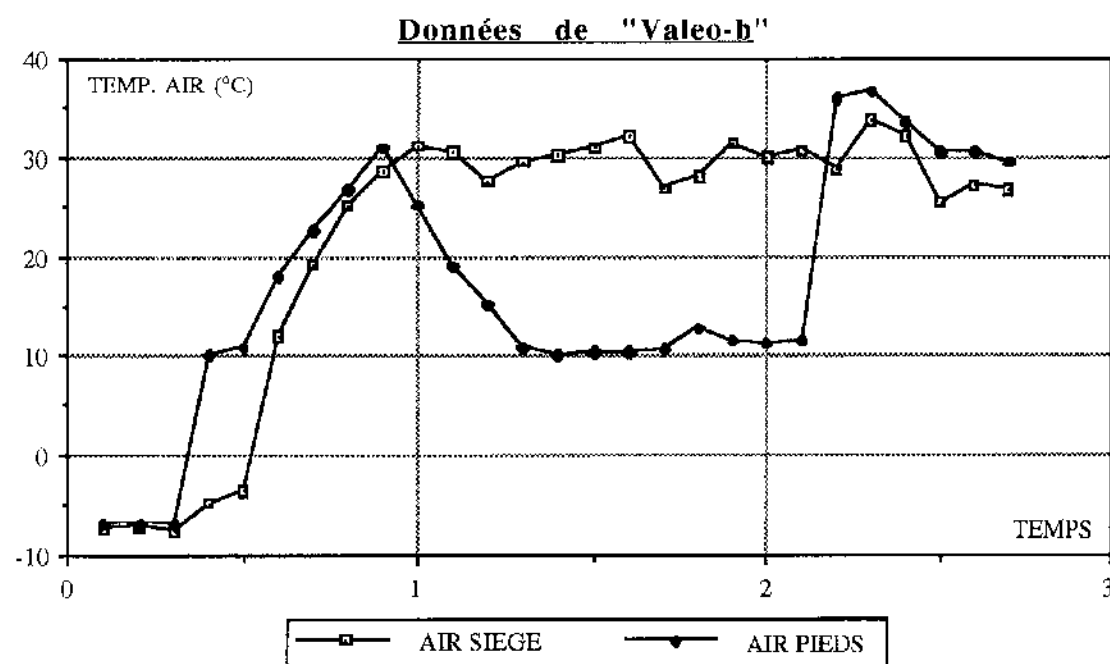
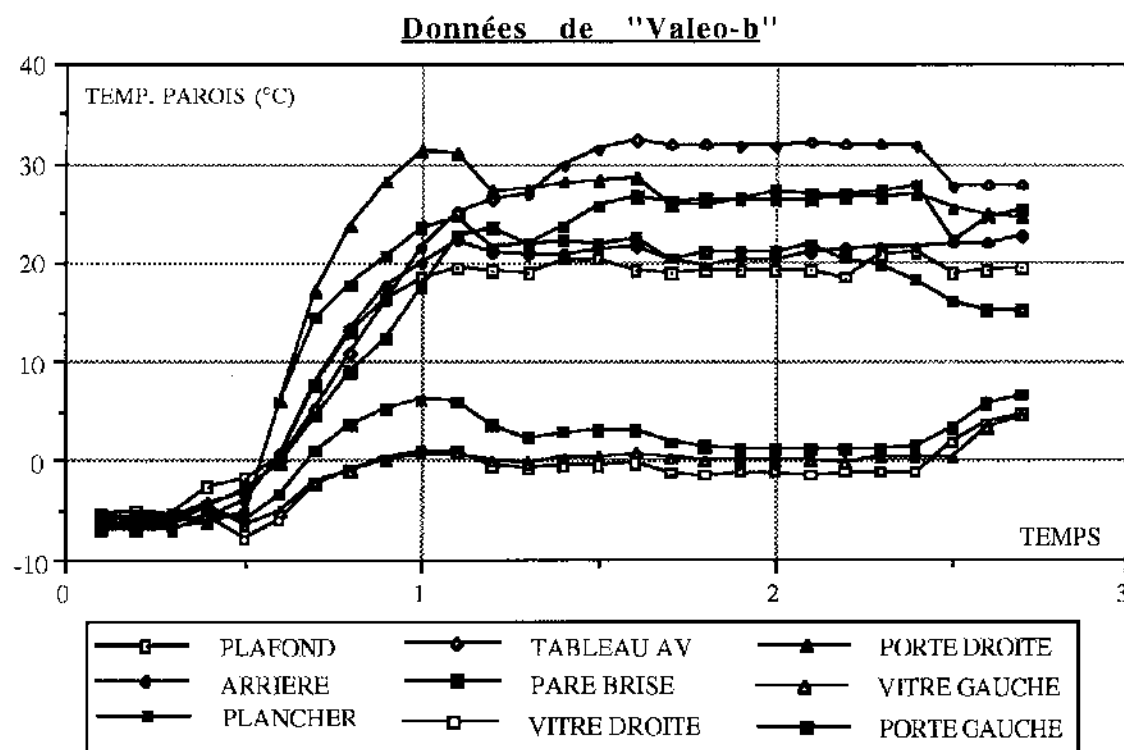
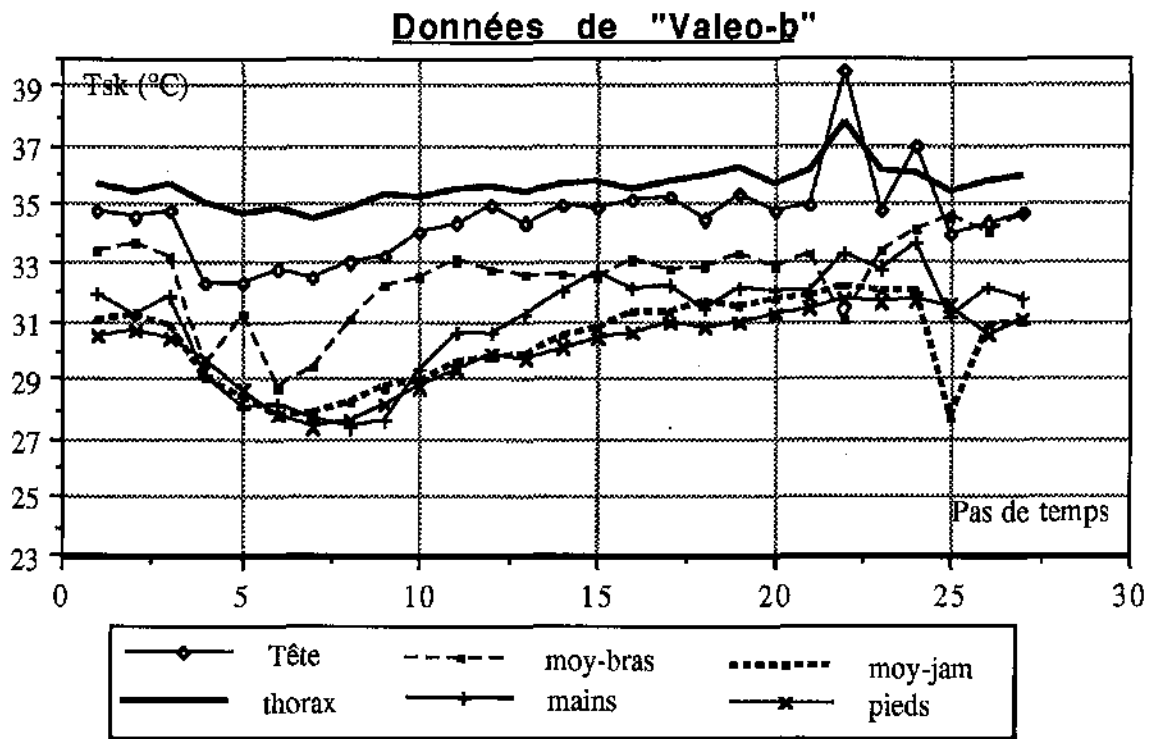
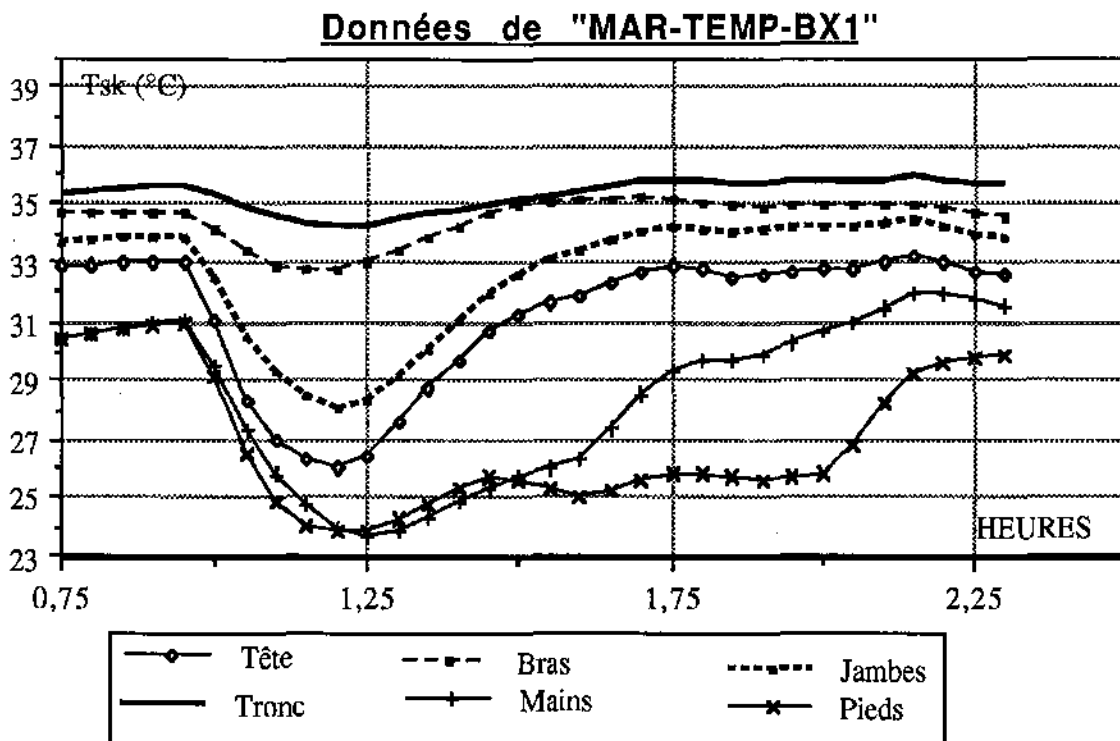


Figure 2 : Conditions ambiantes dans le véhicule



3.a : Résultats des expériences Valéo



3.b: Résultats de simulation

Figure 3.: Températures cutanées locales

Il faut noter que les points de mesures des températures sont importants. En effet sur la figure 3' on peut remarquer que les températures du biceps et de l'avant-bras sont très différentes. Nous avons choisi dans les courbes précédentes d'utiliser la moyenne des deux températures (moy-bras), mais en fait la température du bras calculée est plus proche de celle du biceps. Ce problème est bien connu des physiologistes : il faut trouver un emplacement qui soit représentatif pour chaque segment.

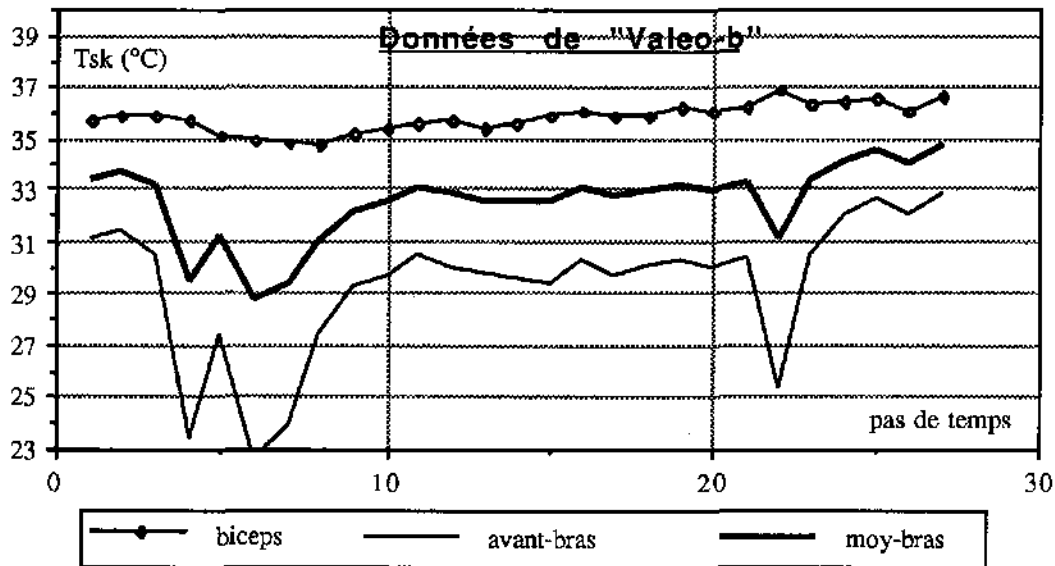


Figure 3' : températures du bras lors des expériences

II.4. Variations de la température d'air

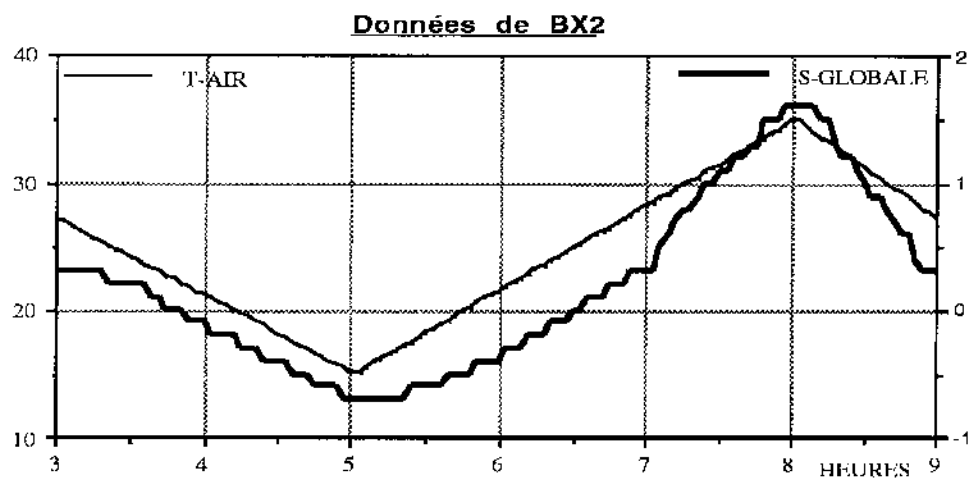
On a conservé les vitesses d'air précédentes. On a imposé des températures de paroi constantes, déduites de l'état stable de l'expérience précédente (temps 2 de la Figure 2-a).

surface de l'habitable	plafond	arrière	plancher	tableau	pare-brise	Vitre	Portière
température (°C)	20	20	20	32	0	0	26

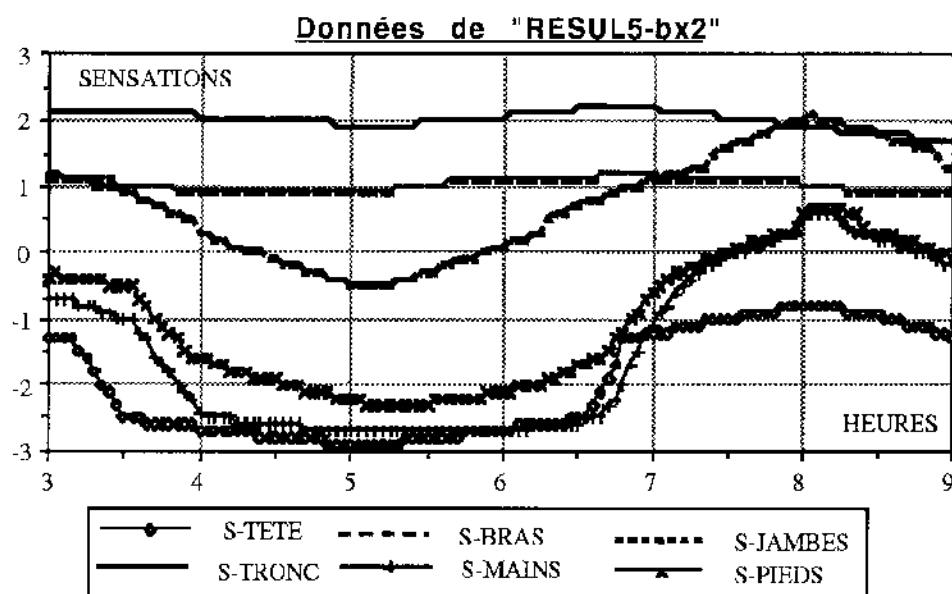
La température de l'air est supposée la même pour toutes les parties ; elle suit la courbe représentée sur la Figure 4-a, après deux heures de stabilisation à 27°C. La sensation globale est représentée sur la Figure 4-a ; les sensations locales sur la Figure 4-b et les températures de peau sur la Figure 4-c.

Les valeurs calculées sont évidemment sujettes à caution (voir hypothèses ci-dessus). Toutefois, on peut tirer des conclusions intéressantes sur les sensibilités respectives des diverses parties.

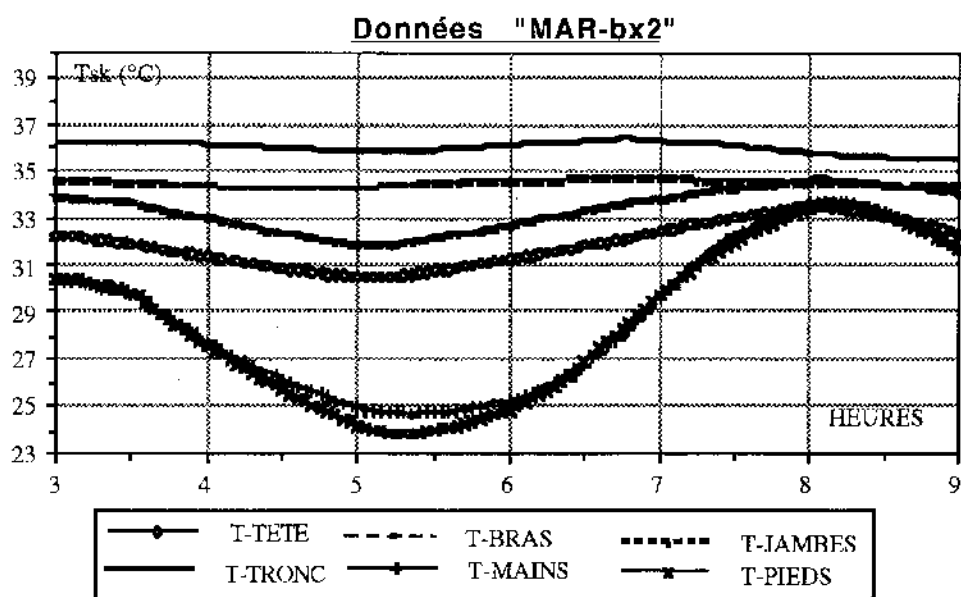
Avant de poursuivre dans l'étude de la sensibilité aux paramètres, il faudra bien fixer les conditions physiques de la simulation (vêtements, etc.) et lister les variations à imposer aux paramètres.



4.a : température d'air et sensation globale



4.b : Sensations locales



4.c : Températures locales

Figure 4 : Résultats de simulation

II. ASYMETRISATION DE MARCL

III.1. Modification du logiciel

L'influence du rayonnement et, notamment, du rayonnement solaire, doit se manifester avec un poids différent sur les deux côtés du corps. Aussi a-t-il été décidé en juillet 1992 de commencer l'asymétrisation du mannequin thermique.

L'étude bibliographique a montré que le modèle de Kuznetz réalisait bien cette tâche et permettait en outre de tenir compte du contact du siège sur une face du tronc et des cuisses. Ce modèle a été réalisé par la NASA à partir du modèle de Stolwijk (comme MARCL), mais nous n'avons pas encore réussi à nous le procurer, malgré l'intervention du CNES et de l'ESA. Dans l'attente éventuelle de l'obtention de ce modèle, nous avons entrepris - et terminé - la séparation des bras droit et gauche de MARCL (les autres parties du corps étant moins soumises à des conditions asymétriques).

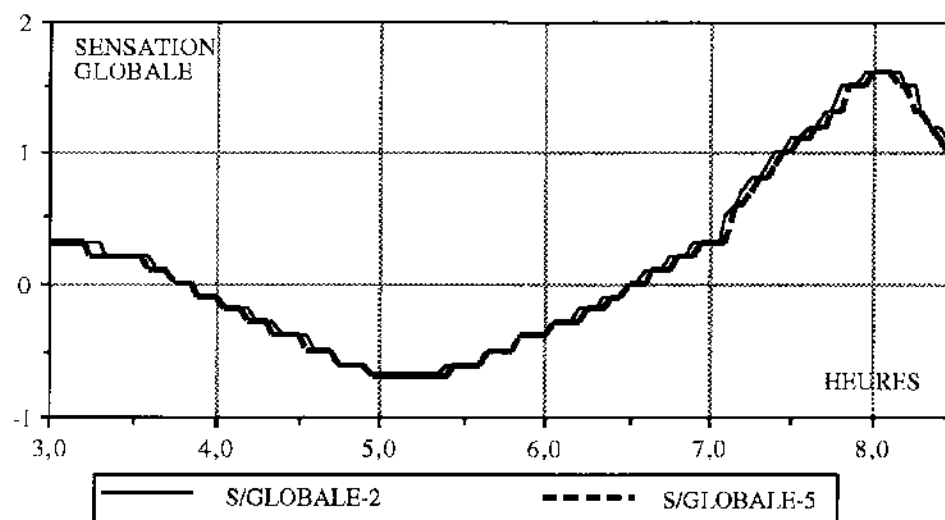
Pour cela, il a fallu intervenir sur le modèle MARCL lui-même, sur TRIM (qui traduit les températures en sensations) et sur le logiciel qui gère les échanges infra-rouges. Un nouveau tableau de paramètres physiologiques a été proposé

III.2. Résultats

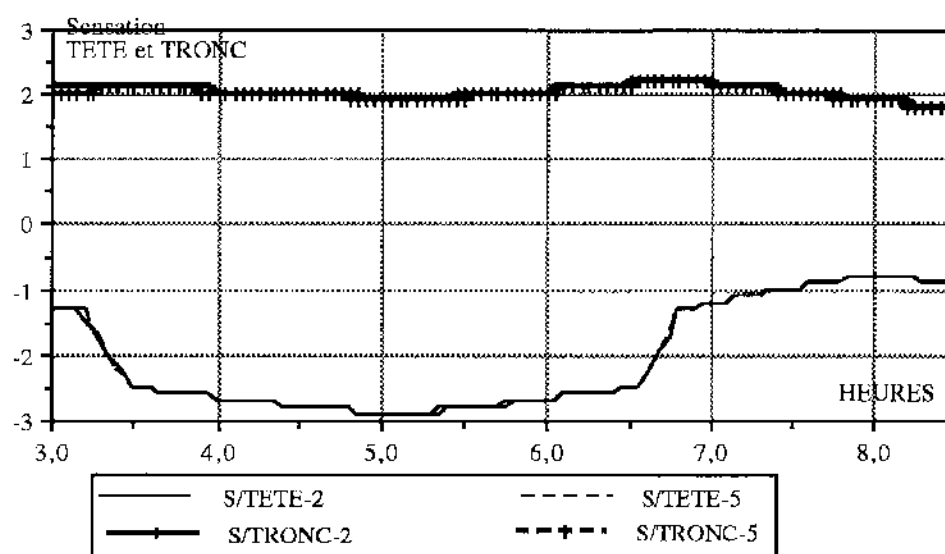
L'essai a été fait sur le même fichier de données que dans le Paragraphe II.4 (Variations de la température d'air). Il n'y a pas de rayonnement solaire (ce type de rayonnement n'est pas encore pris en compte dans le modèle), la température et la vitesse de l'air est la même sur les deux bras, mais le bras gauche étant plus près que le bras droit d'une vitre froide, on doit observer un écart sur les sensations des bras.

La Figure 5 montre les résultats de simulation. Les résultats indicés 2 correspondent au modèle d'origine, l'indice 5 se rapporte au modèle avec bras séparés. Les Figures 5-a et 5-b montrent que l'asymétrisation influe très peu sur les sensations globale et locales autres que les bras. Par contre, la Figure 5-c indique clairement que la séparation des bras est nécessaire pour une estimation correcte des sensations.

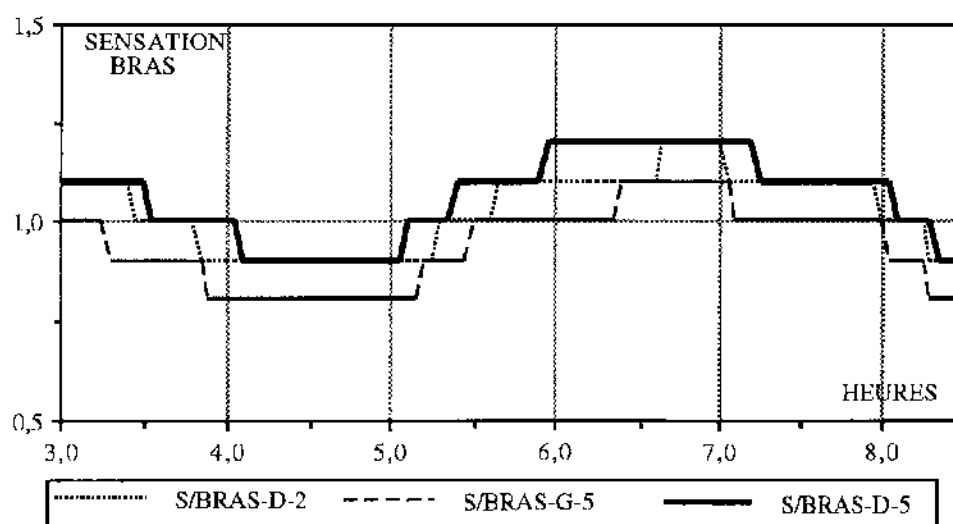
Le tableau de paramètres physiologiques qui a été proposé semble donner des résultats plausibles, compatibles avec ceux obtenus avec le logiciel d'origine. *On peut donc continuer avec ce nouveau tableau.* (Toutefois, le tableau utilisé pour passer des températures de peau aux sensations, adapté aux études sur l'habitat, est probablement inadapté au confort dans les voitures ; la modification de ce tableau reste nécessaire).



5.a : sensation globale



5.b : sensation sur la tête et le tronc



5.c : sensation sur les bras
Figure 5 : Résultats de simulation

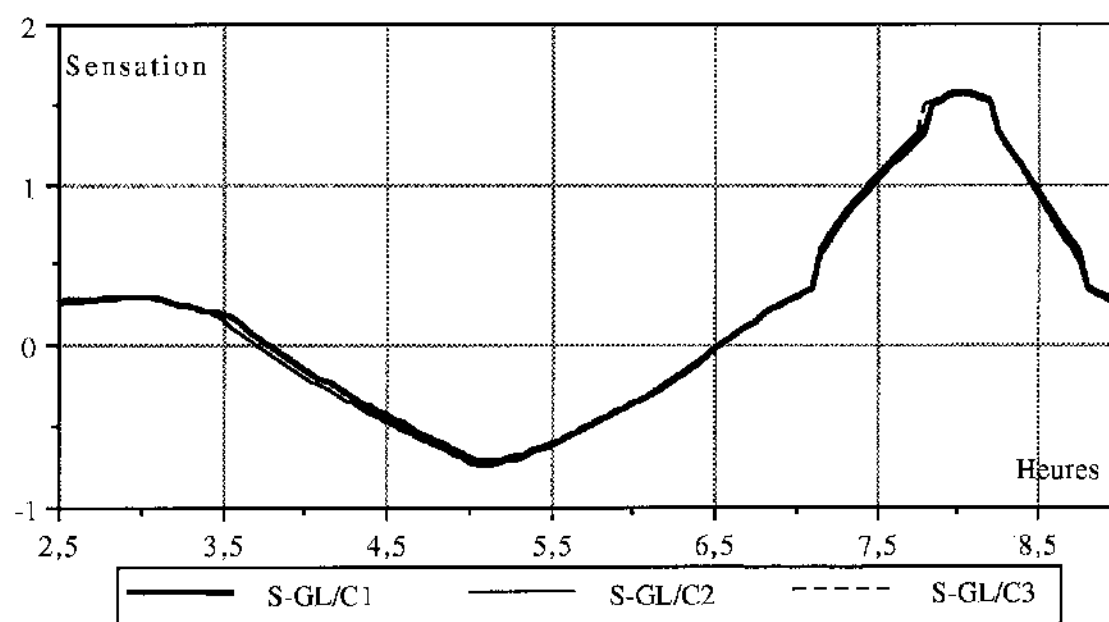
Influence de la vitesse d'air

Sans vouloir faire une étude exhaustive de l'influence des paramètres, on a repris la simulation précédente (C1) avec une vitesse d'air plus grande sur la tête (1 m/s au lieu de 0,4 m/s ; simulation C2), puis avec une vitesse de 1 m/s sur la tête et 0,2 m/s au lieu de 0,1 m/s sur le bras gauche (simulation C3). Les résultats sont donnés sur la Figure 6.

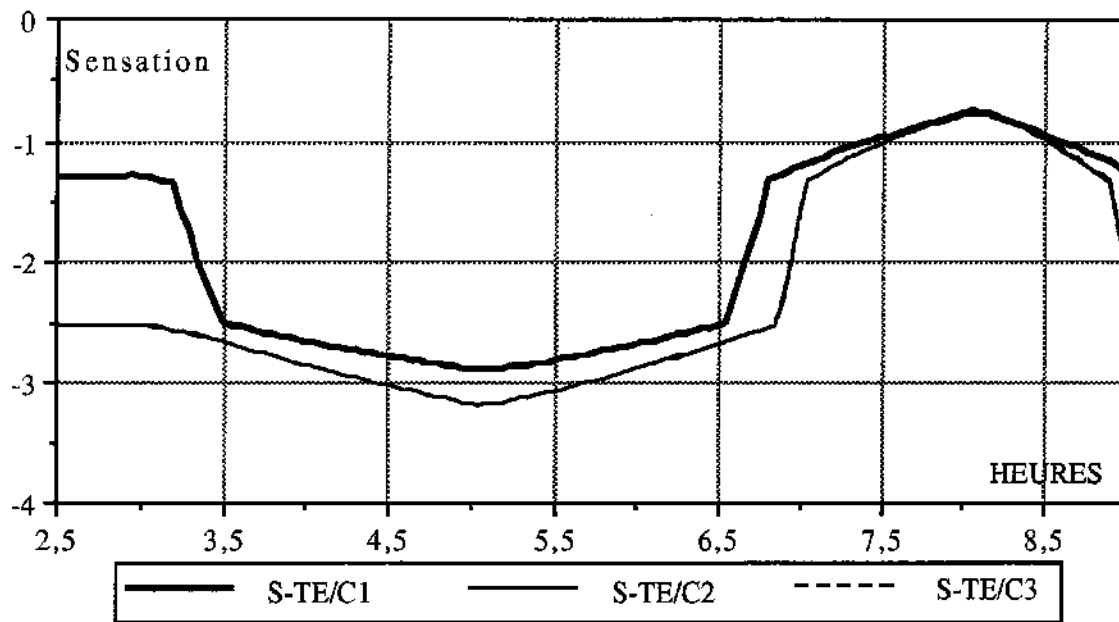
Seg.	tête	tronc	bras Dr.	Bras Ga.	mains	jambes	pieds
Sim C1	0,4	0,25	0,1	0,1	0,1	0,7	1,6
Sim. C2	1	0,25	0,1	0,1	0,1	0,7	1,6
Sim. C3	1	0,25	0,1	0,2	0,1	0,7	1,6

La sensation globale est peu modifiée (Figure 6a), alors que la sensation au niveau de la tête (Figure 6b) est nettement différente. Les courbes C2 et C3 sont confondues. Cette baisse des températures de la tête entraîne une réaction physiologique de vaso-constriction, ainsi que le montrent les valeurs ci-dessous.

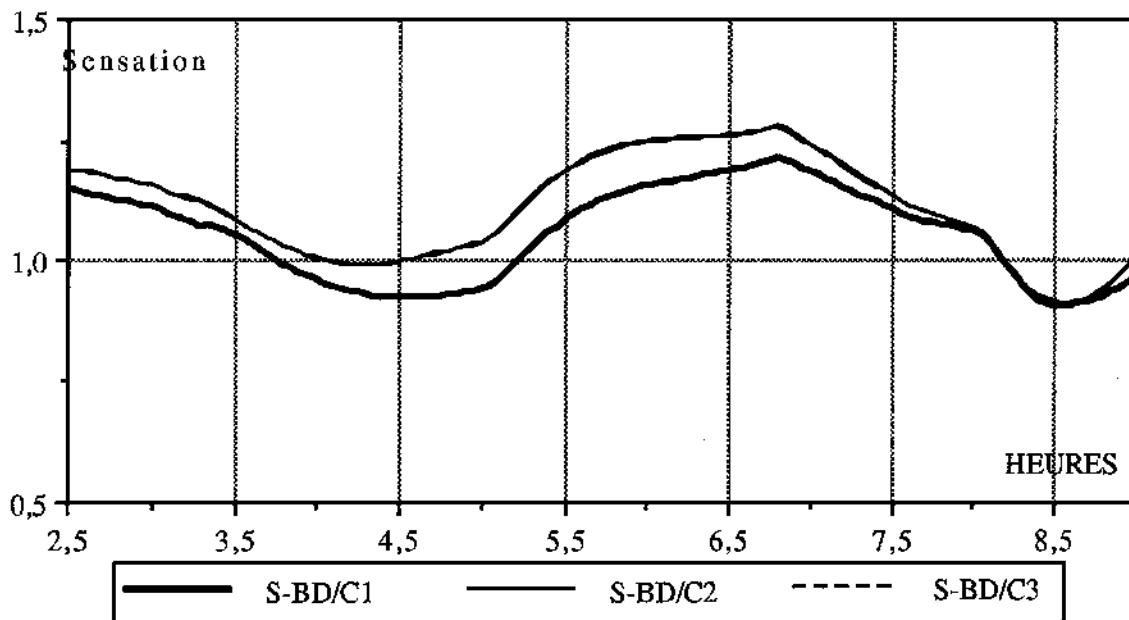
	SWEAT	DILAT	STRIC	CHILL	WARM(1)	WARMSK	COLD(1)	COLDSK
Sim. C1	0,0	0,0	10,216	4,330	0,02	1,646	0,0	2,042
Sim. C2	0,0	0,0	12,184	5,570	0,018	1,670	0,0	2,097



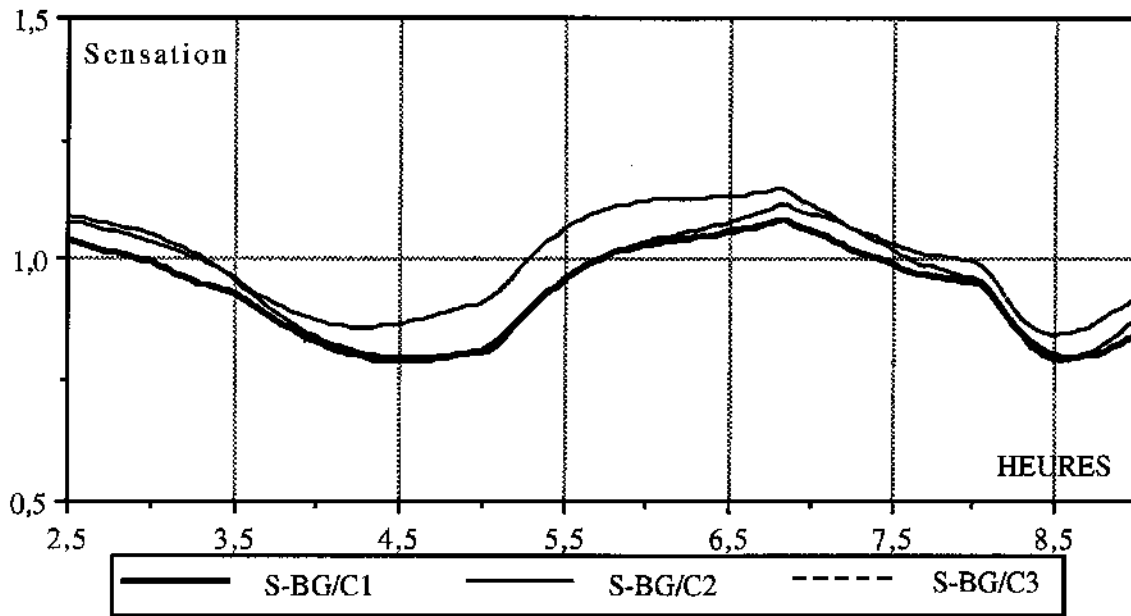
6a : sensation globale



6b : sensation sur la tête (C2 et C3 sont confondues)



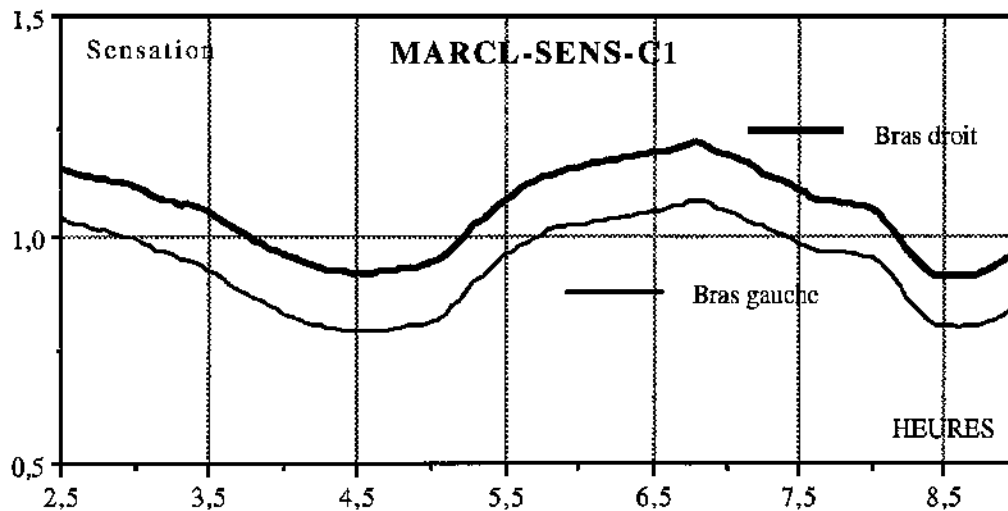
6 c : sensation sur le bas droit (C2 et C3 sont confondues)



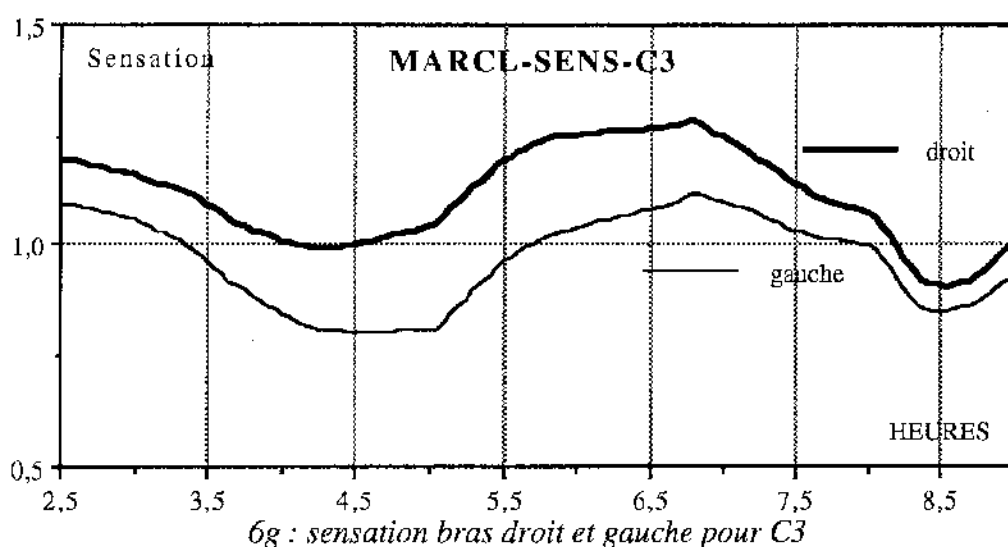
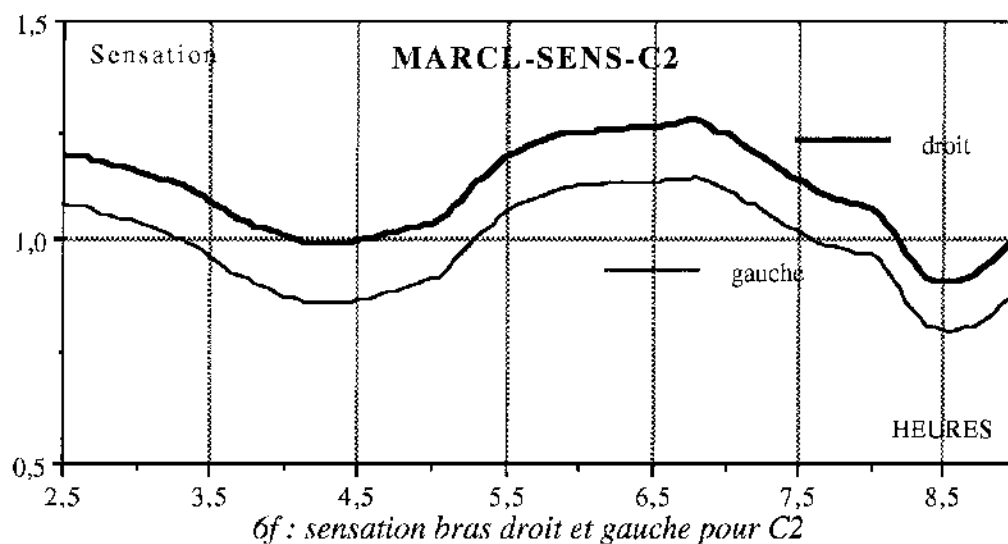
6.d. : sensation sur le bras gauche

Cela se ressent sur toutes les parties du corps. Par exemple, sur le bras droit (Figure 6c ; les courbes C2 et C3 sont confondues) et sur le bras gauche (Figure 6d). Si on compare la sensation globale (6a) et celle des bras (6c ou 6d), on s'aperçoit que les maxima n'arrivent pas au même moment : alors que la sensation globale arrive au maximum à 8 heures (heure où la température d'air est maximale), la sensation des bras culmine une heure plus tôt. De 7 h à 8 h, la sensation globale positive déclenche les mécanismes de lutte contre le chaud, dont l'effet au niveau des bras est manifeste. Ces réactions physiologiques sont également responsables du creux des courbes à 8 h 30 et du fait que la sensation des bras est accrue, alors que celle de la tête est diminuée, par le même courant d'air sur la tête.

Cette rapide analyse des phénomènes permet de saisir la complexité de phénomènes entraînant des sensations difficilement prévisibles sans simulation. Les Figures 6e, 6f et 6g comparent les deux bras pour les trois simulations.



6e : sensation bras droit et gauche pour C1



Conclusions

- L'étude bibliographique principale concernant le mannequin est terminée. Celle concernant les véhicules se poursuit
- Le LESETH essaye de se procurer le modèle de Kuznetz
- En attendant ce modèle et l'utilisation du logiciel de Valeo pour les échanges infra-rouge, on utilisera MARCL avec les bras séparés et le logiciel IR du LESETH qui n'autorise que 9 surfaces pour l'habitacle. Cet ensemble malgré les imperfections, permettra de déterminer les grandeurs importantes à mesurer lors des essais
- Les vêtements et les situations-types doivent être bien définis.



Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"

Rapport d'avancement n°2 : Février 1993

1^{ère} Partie - Préparation des expériences et des Simulations

I. DEFINITION DE LA TENUE VESTIMENTAIRE 2

2^{ème} Partie - Compte rendu des essais

I. GENERALITES 5

II. ESSAI DU MOI D'OCTOBRE

II.1. Description de la journée de travail	7
II.2. Variables enregistrées et traitements des données	8
II.3. Présentation des résultats	11
II.4. Premières conclusions	11

III. ESSAI DU MOI DE NOVEMBRE

III.1. Description des journées de travail	15
III.2. Variables enregistrées et traitements des données	16
III.3. Présentation des résultats	21
III.4. Premières conclusions	26

IV. TABLEAUX RECAPITULATIFS

V. RELEVES DE VITESSE D'AIR

V.1. Dispositif expérimental	29
V.2. Tableaux de résultats	31
V.3. Commentaires	33

ANNEXE 1 Courbes de résultats d'octobre

ANNEXE 2 Courbes de résultats de novembre

ANNEXE 3 Bibliographie mise à jour

1ère Partie - Préparation des expériences et des simulations

Dans ce rapport d'avancement, il s'agit de faire le point après la première série d'expériences. Tous les résultats expérimentaux sont donnés ainsi que tous les calculs intermédiaires.

I. DEFINITION DE LA TENUE VESTIMENTAIRE

Compte tenu des impératifs "réalistes" pour les expériences et des données disponibles dans la bibliographie, la tenue vestimentaire a été déterminée en trois temps.

- PSA/Valéo nous a fait parvenir la description de la "tenue classique" portée habituellement par les essayeurs.

- Nous avons calculé l'isolement thermique de cette tenue et d'après les études sur le confort, elle s'est avérée trop chaude et risquait de masquer les problèmes d'inconforts locaux. La "tenue classique" a donc été modifiée, une nouvelle tenue a été proposée.

- Les vêtements conformes à nos demandes ont été achetés, la seule différence notable est le pull qui n'a pas la même composition.

Les caractéristiques de chaque pièce de vêtements ont été déterminées à l'aide de la norme internationale ISO et les recommandations de l'ITF. Les caractéristiques manquantes sont complétées d'après les références de McCullough.

DESCRIPTION DU VETEMENT

Les noms en caractères gras correspondent aux données transmises par PSA/Valéo, et en caractères normaux les descriptions données, dans les normes, qui s'en rapprochent le plus.

- **Slip** : Coton
- **Maillot de corps** : Sous-Vêtements, haut, T-shirt, jersey tricot trame, 100% coton
- **chemise** : chemise manches longues, avec col, sergé coton
- **pull pas trop gros en laine** : manches longues, ras de cou, jersey tricot tramé, 85% laine-15% nylon
- **veste** :
 - 1- veston droit, tissu uni, 80 % laine- 20% nylon
 - ou 2- veston droit, sergé coton
 - ou 3- veston droit, tweed, 50% laine-50% polyester
- **pantalon** :
 - 1-droit ajusté, tissu uni, 80 % laine- 20% nylon
 - ou 2-droit ajusté, sergé coton
 - ou 3-droit ajusté, tweed, 50% laine-50% polyester
- **chaussettes** :
 - mi-chaussettes de ville, 75% acrylic-25% nylon
 - ou chaussettes épaisses, tricot trame 80% acrylic-20% nylon
- **chaussures** :
 - en daim, semelle en caoutchouc
 - ou de ville, à semelle rigide en vinyle

PARAMETRES DES VETEMENTS

Tous les paramètres sont donnés dans la description ci-dessous; la plupart ne sont pas utiles pour les expériences elles mêmes, mais seront indispensables lors de la modélisation ou pour retrouver facilement dans les normes à quel tissus ils correspondent exactement.

Nomenclature du tableau :

n°	numéro de la forme du vêtement dans la liste ISO	
T*-%	type de coupe et pourcentage de surface couverte qui correspond à T*	
tissus n°	numéro du tissu,	
M _{VET}	masse totale du vêtement en g	
Icl	isolement thermique intrinsèque en clo	
Xe	épaisseur du tissu en mm	
Rcl	résistance thermique du tissu (m ² °C/W)	données utiles pour le
m _t	masse du tissu par m ² (g/m ²)	modèle
Pe	perméabilité à l'air (l/m ² .s)	

vêtement	n°	T*-%	tis n°	M _{VET}	Icl	Xe	Rcl	m _t	Pe
Slip	1	T4-10%	25	27	0,03	0,95			1067
Maillot	30	T2-40%	27	105	0,08	0,95			1097
chemise	54	T2-51%	91	362	0,33	0,70	0,04	206	241
pull	142	T6-45%	7	424	0,36	3,55			1031
1	171	T1-50%	95	699	0,45	1,50	0,056	306	973
veste	2	T1-50%	92	794	0,46	1,00	0,038	322	84
3	156	T1-50%	10	652	0,44	1,27	0,04	310	899
1	87	T1-45%	95	433	0,22	1,50	0,056	306	973
pantalon	2	T1-45%	92	446	0,18	1,00	0,038	322	84
3	100	T1-45%	10	404	0,24	1,27	0,04	310	899
chaussettes	1	T2-14%	32	53	0,03	2,00			
2	267	T3-20%	29	68	0,06	2,50			
chaussures	1	T6-7%			0,02				
2	260	T6-7%		1006	0,03				

DETERMINATION DE L'ISOLEMENT THERMIQUE GLOBAL :

L'isolement thermique (Icl_T) de la tenue complète peut être estimée en additionnant les Icl des différents vêtements composant la tenue, il en est de même pour la masse totale M_{tenue}.

$$M_{tenue} = \sum M_{vet(i)}$$

$$Icl_T = \sum Icl(i)$$

Si on suppose : que les sous-vêtements (slip, maillot de corps), la chemise et le pull sont toujours les mêmes, et en choisissant les chaussettes et chaussure de ville. On peut définir 3 tenues, en fonction du type de tissu de la veste et du pantalon, en supposant qu'ils ont la même matière.

- Tenue 1 (tissu 95): $M_{tenue,1} = 3109 \text{ g}$ $Icl_{T,1} = 1,52 \text{ clo}$
- Tenue 2 (tissu 92): $M_{tenue,2} = 3217 \text{ g}$ $Icl_{T,2} = 1,49 \text{ clo}$
- Tenue 3 (tissu 10): $M_{tenue,3} = 3033 \text{ g}$ $Icl_{T,3} = 1,53 \text{ clo}$

Ces Tenues sont trop chaudes, nous avons donc décidé de retirer le veston. Par ailleurs le pull acheté n'a pas la même composition que celui prévu, (il est composé de 20% laine-80% nylon), nous avons tout de même été obligé de garder les même caractéristiques thermiques car cette composition de tissu n'est pas répertoriée dans les normes.

Les Paramètres de la tenue finalement adoptée et qui restera la même pour toutes les expériences, a les caractéristiques suivantes :

- **Slip et Maillot de corps** : jersey tricot trame, 100% coton
- **chemise** : chemise manches longues, avec col, sergé coton
- **pull** : manches longues, ras en V, jersey tricot tramé, 20% laine-80% nylon
- **pantalon** : droit ajusté, tweed, 50% laine -50%polyester
- **chaussettes** : mi-chaussettes de ville, 75% acrylic, 25% nylon
- **chaussures de ville**, à semelle rigide en vinyle

• Masse de la tenue : $M_{tenue} = 2381 \text{ g}$

Isolement thermique total : $I_{clT} = 1,10 \text{ clo}$

vêtement	n°	T*- %	tis n°	M_{VET}	Icl	Xe	Rcl	m_t	Pe
Slip	1	T4-10%	25	27	0,03	0,95			1067
Maillot	30	T2-40%	27	105	0,08	0,95			1097
chemise	54	T2-51%	91	362	0,33	0,70	0,04	206	241
pull	142	T6-45%	7	424	0,36	3,55			1031
pantalon	100	T1-45%	10	404	0,24	1,27	0,04	310	899
chaussettes	265	T2-14%	32	53	0,03	2,00			
chaussure	260	T6-7%		1006	0,03				

I - GENERALITES SUR LES EXPERIENCES EN SOUFFLERIE

Dans cette partie il s'agit de faire un récapitulatif des essais effectués en soufflerie du 29 octobre et du 24-25 novembre 1992, soit 11 configurations au total, d'en tirer les premières conclusions au niveau expérimental et de prévoir les essais à venir.

Les deux séries d'essais en soufflerie sont présentés de la façon suivantes :

Presque tous les essais sont décomposés en 3 phases : I - Equilibre thermique, II- première variation, III - deuxième variation. En général un seul paramètre est modifié à la fois, mais entraîne le plus souvent la variation de beaucoup d'autres.

- Description de la journée de travail, les essais finalement effectués ne correspondent pas toujours à ceux prévus. Il est donc indispensable de donner une description la plus précise possible du déroulement des expériences.

- Variables enregistrées et traitements des données Pour chaque essai les données enregistrées n'étant pas toujours les mêmes, il faut donc en faire un récapitulatif.

Les données sont enregistrés par pas de temps de 30 secondes, il est impensable de garder un pas de temps aussi faible pour analyser les résultats et les comparer aux simulations.

- La première étape est de noter les données défectueuses, de rectifier si possible les erreurs d'enregistrement, (les données défectueuses ont systématiquement été remplacées par 0). Si il s'agit d'une donnée défectueuse pour un seul pas de temps on prendra la valeur moyenne entre les deux pas de temps d'avant et d'après.
- Deuxième étape : regrouper les données semblables (par exemples, calcul de la température moyenne des jambes à partir de celles de la cuisse et du tibia)
- Troisième étape : obtenir deux fichiers de données plus réduits.
 - un fichier regroupant les conditions thermiques dans la veine et la voiture, qui sont les conditions auxquelles est soumis l'essayeur, et sera donc le fichier d'entrée des simulations.
 - un fichier regroupant les données physiologiques et les jugements et qui représenteront les sorties du programme.

Dans les fichiers d'origine les temps sont réels (en heure, minute, seconde), afin d'avoir des fichiers comparables entre eux. Tous les temps sont donnés avec pour origine ($t=0$), le début de la phase I.

• Présentation graphique des résultats : Toutes les données importantes ont été représentées sous forme graphique afin de mieux voir les sens de variations et les corrélations existantes.

• Premières conclusions : Ce premier groupe d'expériences étant complexe et les simulations pas encore faites, des conclusions très sommaires sont données pour l'instant.

A la fin de ce chapitre un tableau récapitulatif donne une vue d'ensemble des 11 types d'essais.

• Dispositif expérimental commun aux deux séries d'essais

Les essais ont été réalisés dans la soufflerie de Valéo thermique sur une Citroën ZX.

- Le système de chauffage est raccordé sur une chaudière extérieure avec mesure de la température d'entrée et de sortie de l'eau et du débit (Qv).

Le pulseur d'air est raccordé à une alimentation extérieure dont la tension (Upulseur) peut être fixée à 12, 8 ou 4 volts. un indicateur donne la répartition de soufflage $I_i = 0$ (aération supérieure); $I_i = 5$ (soufflage bilevel); $I_i = 10$ (Soufflage sur les pieds).

- L'essayeur Francis participant à toutes les expériences, pèse 85 kg, et mesure 1,76m, ce qui nous permet de calculer sa surface cutanée d'après l'expression de Dubois

$$A_{du} = 0,203 P^{0,425} H^{0,725} = 2,02 \text{ m}^2 \quad (P : \text{poids}, H : \text{Taille})$$

Ce qui est supérieur à "l'individu standard" prévu dans le modèle ($1,89 \text{ m}^2$). Il faudra peut être envisager des modifications des paramètres morphologiques du modèle.

II. Essais du 29 octobre 1992

II.1. DESCRIPTION DE LA JOURNEE DE TRAVAIL

La voiture avait été instrumentée le 27 octobre.

La phase habillage de l'essayeur est plus longue que prévue : elle dure 1 h 25. Elle comporte la mise en place des 33 thermocouples (27 thermocouples sur la peau et 6 thermocouples au voisinage du corps)

Chambrage de la veine à -18°C

Début du travail : 6 h 30

Pendant la phase de mise en équilibre thermique de Francis et du véhicule (de 7 h 55 à 8 h 25), on procède à l'étalonnage de la boîte à sensation .

Pour chaque essai, les premières données sont celles qui ne varient pas au cours des phases suivantes



Photo de "Francis -l'essayeur"

1^{er} essai : Répartition du soufflage

Vveine = 10 km/h

Tveine = -18°C

Aérotherme : $T_e = 80^{\circ}\text{C}$

$q_v = 1000 \text{ l/h}$

pulseur : $U_{\text{pulseur}} = 12 \text{ V}$

I - 8 h 25 - 8 h 55 :

aération supérieure sans dégivrage

II - 8 h 55 - 9 h 25 :

bilevel ; $I_i = 5 \text{ V}$

III - 9 h 25 - 9 h 55 :

soufflage sur les pieds ; $I_i = 10 \text{ V}$

Pause jusqu'à 10 h 18

2^{ème} essai : Vitesse de soufflage

Vveine = 10 km/h

Tveine = -18°C

Soufflage, bilevel

$q_v = 500 \text{ l/h}$

I - 10 h 18 - 10 h 50 :

$U_{\text{pulseur}} = 12 \text{ V}$

II - 10 h 50 - 11 h 20 :

$U_{\text{pulseur}} = 8 \text{ V}$

III - 11 h 20 - 11 h 50 :

$U_{\text{pulseur}} = 4 \text{ V}$

Pause ; déjeuner léger jusqu'à 13 h 22. Le retard du matin est rattrapé par la suppression des phases déshabillage-habillage.

3ème essai : Puissance de chauffage

Vveine = 100 km/h Tveine = -18°C

U pulseur = 10 V bilevel

I - 13 h 22 - 13 h 52 : Mise en équilibre $q_v = 500$ l/h

II - 13 h 52 - 14 h 22 : $q_v = 300$ l/h

II - 14 h 22 - 15 h 22 : $q_v = 150$ l/h

4ème essai : Effet du rayonnement

Vveine = 100 km/h

U pulseur = 10 V bilevel $q_v = 300$ l/h

I - 15 h 07 - 15 h 37 : Mise en équilibre Tveine = -18°C

II - 15 h 37 - 17 h 37 : Tveine passe de -18°C à +15°C linéairement

Fin des essais. Déshabillage.

II.2. VARIABLES ENREGISTREES ET TRAITEMENT DES DONNEES

Au cours des essais 69 variables ont été enregistrées toutes les 30 secondes. Elles se repartissent de la façon suivantes :

- 3 variables sur les conditions extérieures
- 7 variables pour le système de chauffage
- 3 conditions moyennes dans le véhicule (température et humidité)
- 20 températures de surface du véhicule
- 8 températures d'air dans le véhicule, (température de soufflage)
- 6 températures d'air près du corps
- 10 températures cutanées
- 8 sensations thermiques

Les données qui ne nous sont pas utiles, ne sont pas citées, tels que : numéro de la rafale de mesure, température de l'huile, etc.

• Conditions extérieures dans la veine

Vveine : vitesse du vent Tveine : Température d'air HRveine : Humidité relative

• Données sur le système de chauffage

q_v : débit d'eau dans le système de chauffage

I_{puls} : intensité électrique pour le pulseur

U_{puls} : tension aux bornes du pulseur

P_{puls} : puissance du pulseur ($P = U.I$)

I_i : Indicateur de répartition du soufflage

E_{aero} : température de l'eau à l'entrée de l'aérotherme

S_{aero} : température à la sortie

• Données à l'intérieur du véhicule

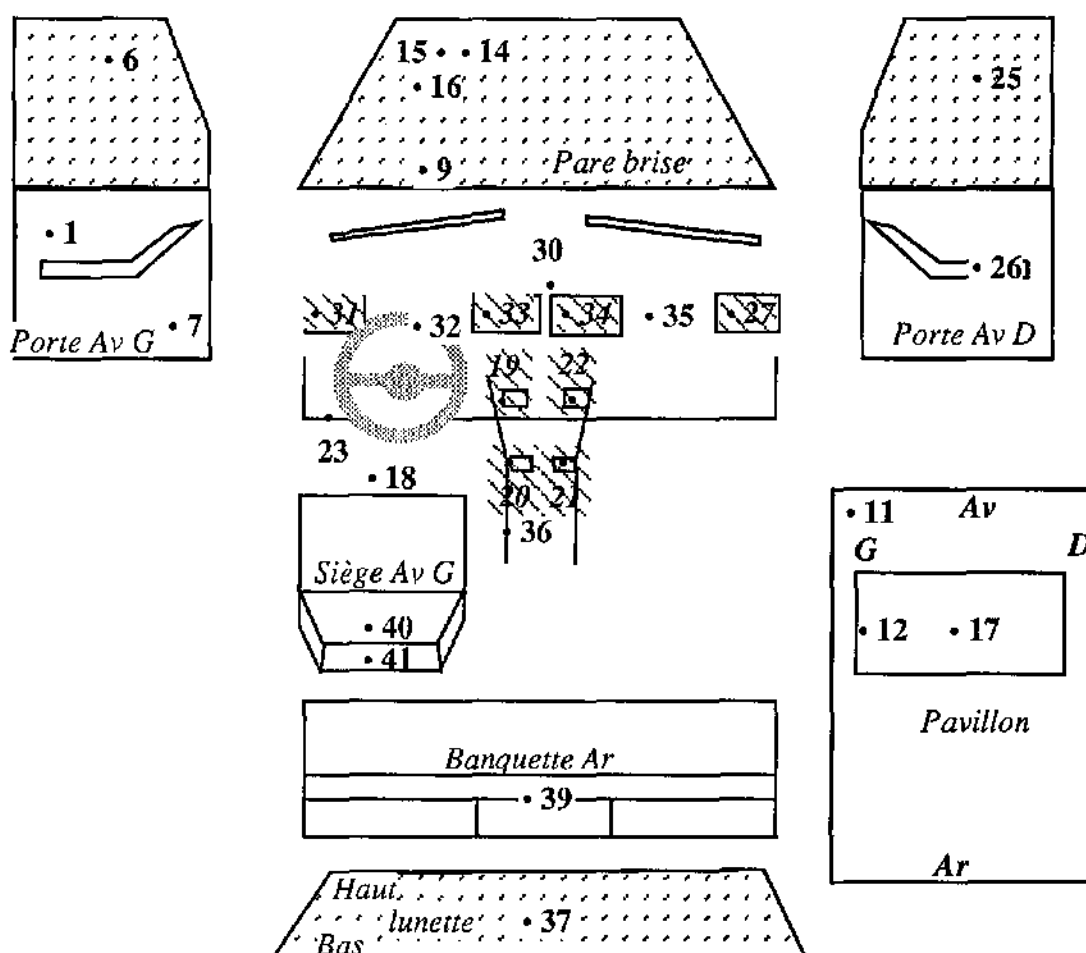
Temhab : température moyenne de l'air dans l'habitacle

Moy air : " " " " " relevée plus près du sujet

HR vehi: humidité relative dans l'habitacle

• Températures de surface et d'air dans le véhicule

Toutes les températures relevées sont données ci-dessous, soit : 20 Températures de surfaces et 8 températures d'air (Hachurées sur la figure et en italique dans la liste)



Position des thermocouples dans le véhicule lors des essais d'octobre

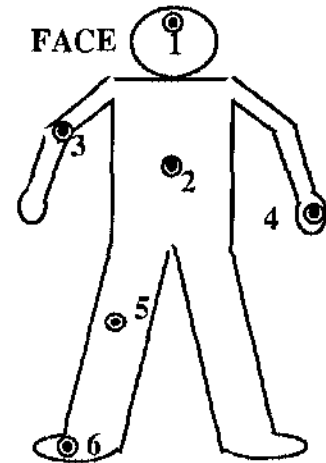
1	PANneau AVant Gau (haut arrière)	25	25	VITre AVant Droite	54
6	VITre AVant Gauche (haut avant)	53	26	ACCoudoir AVant Droit	16
7	PANneau AVant Gauche (bas avant)	7	27	AERateur Latéral Droit	39
9	PARe BRise Bas	52	30	Dessus PLAnche Centre	57
11	PAVillon AVant Gauche	55	31	AERateur Latéral Gauche	36
12	PAVillon ARrière Gauche	56	32	VOLant	17
14	PARe BRise Haut Droit	51	33	AERateur Centre Gauche	37
15	PARe BRise Haut Gauche	59	34	AERateur Centre Droit	38
17	PAVillon Centre	58	35	Planche De Bord Droit	18
18	PIEds Avant Gauche	24	36	CONSOLE Bas Gauche	19
19	Sortie PIEds Avant Gauche	12	37	LUNette MILieu	22
20	Sortie PIEds ARrière Gauche	14	39	Banquette ARrière	23
21	Sortie PIEds ARrière Droit	15	40	DOSSier AVant	26
22	Sortie PIEds Avant Droit	13	41	DOSSier ARrière	27
23	Sous Planche Gauche	22			

La numérotation est incomplète car en fait elle correspond aux numéros utilisés dans les essais de novembre, étant donné que les mesures ont été par la suite plus complètes. Les numéros en fin de colonne correspondent aux numéros des voies utilisées, et par conséquent aux colonnes des fichiers de données.

• Températures d'air à proximité du sujet

Six températures d'air sont mesurées à proximité du corps, les thermocouples sont à environ 2 cm de la surface. Les points de mesure sont les suivants :

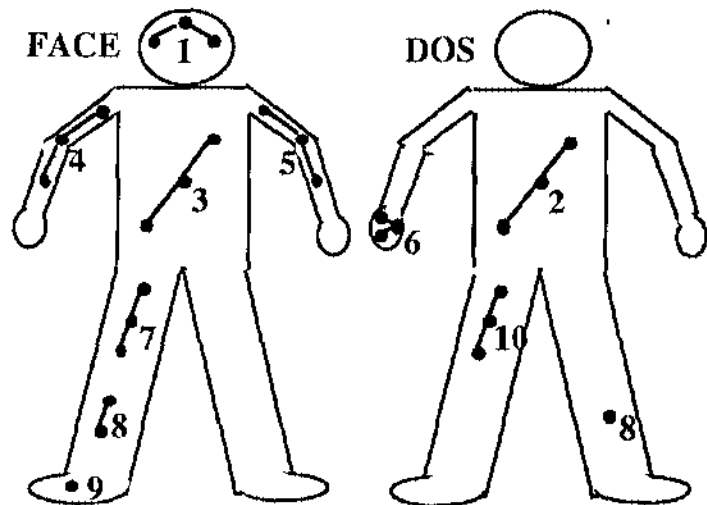
- 1 Air Tête
- 2 Air Buste
- 3 Air Biceps
- 4 Air Main Gauche
- 5 Air genou droit
- 6 Air Dessus Pieds



• Températures cutanées

27 thermocouples sont sur la peau, ils sont regroupés par 3 en parallèle (thermocouples K 0,1mm).

- 1 Tête ($T_{t\hat{a}}$)
- 2 Moyenne dos ($T_{m,D}$)
- 3 Moyenne Buste ($T_{m,B}$)
- 4 Bras Droit ($T_{B,d}$)
- 5 Bras Gauche ($T_{B,g}$)
- 6 Mains (T_{ma})
- 7 Cuisse Droite ($T_{C,d}$)
- 8 Tibia (T_{tib})
- 9 Dessus Pieds droit (T_{pi})
- 10 ARrière Cuisse Gauche ($T_{C,g}$)



Les températures mesurées ne correspondent pas aux 7 segments du modèle, il faut donc faire des moyennes; de plus une variable supplémentaire doit être calculée, la température moyenne cutanée (T_{sk})

$$T_{tronc} = \frac{T_{m,D} + T_{m,B}}{2}$$

$$T_{jam} = \frac{0,65}{2} (T_{C,d} + T_{C,g}) + 0,35 T_{tib}$$

$$T_{sk} = 0,0674 T_{t\hat{a}} + 0,3604 T_{tronc} + 0,0652 (T_{B,d} + T_{B,g}) + 0,0475 T_{ma} + 0,3283 T_{jam} + 0,0659 T_{pi}$$

• Sensations

Les sensations sont enregistrées à travers une boîte munie de 8 potentiomètres délivrant une tension entre 0 et 8 volts par paliers de 1 volt. Les Huit jugements thermiques correspondent aux 7 segments (tête, tronc, bras droit, bras gauche, mains, jambes, et pieds) plus le jugement global.

II.3. PRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS

Les principales variables sont données sous forme graphique en annexe I, et sont structurées de la façon suivante.:

- **Pour chaque essai :**

- CONDITIONS DE L'ESSAI**

- Température extérieure et vitesse du vent dans la veine
 - Humidité relative intérieure et extérieure
 - Tension aux bornes du pulseur et débit d'eau dans la chaudière
 - Températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'aérotherme

- TEMPERATURES D'AIR**

- Températures de l'air aux sorties des aérateurs latéraux et centraux
 - Températures de l'air aux sorties des aérateurs aux pieds
 - Températures près du conducteur
 - Températures dans l'habitacle

- TEMPERATURES DE SURFACE**

- Températures des vitres des portes avant.
 - Températures du pare-brise et de la lunette arrière
 - Températures du pavillon
 - Températures des portes avant et du sol avant gauche
 - Températures de la planche de bord
 - Températures des sièges et du tissu de porte avant gauche

- TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATION**

- 7 Températures cutanées locales plus cutanée moyenne
 - 7 Sensations thermiques locales plus la Globale

- **Tous les essais**

- pour chaque segment la sensation en fonction de la température cutanée.

II.4. PREMIERES CONCLUSIONS

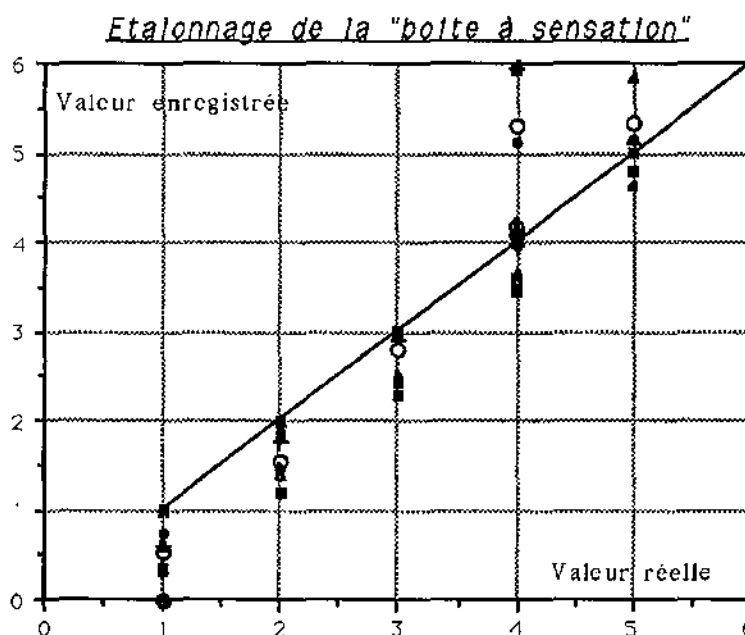
- Les conclusions sur la journée d'expériences**

- **Instrumentation** : Il faut augmenter le nombre des capteurs sur les vitres, afin de déterminer les surfaces que l'on considèrera isothermes dans le calcul des échanges IR.

- **Températures cutanées** : Pour les essais de novembre il faut aussi augmenter le nombre de prises de température sur la peau, en n'utilisant qu'un seul thermocouple par point de mesure au lieu de 3. Il est décidé de prévoir 20 thermocouples pour la peau et 12 pour l'air au voisinage du corps. Le LESETH fournira ces thermocouples (K ; 100 μ m), ainsi que leur emplacement. Ces thermocouples se termineront au niveau de la ceinture, à droite ; ils seront regroupés en 4 blocs de 8 connecteurs mâles. PSA préparera le câble reliant ces connecteurs à la soufflerie ; les prises mâles et femelles seront fournies par le LESETH.

- La "boîte à sensations" doit être modifiée. Il semble après étalonnage qu'il y ait une assez grande dispersion entre la sensation exprimée et celle indiquée par le potentiomètre. Une nouvelle boîte sera mise au point au LESETH.

La courbe ci-dessous a été établie lors de la séance d'étalonnage; en abscisse les valeurs réelles fixées sur les boutons gradués et en ordonnées les valeurs enregistrées. On peut voir une assez grande dispersion. Il faut noter aussi que les enregistrements ne semblent pas être reproductibles, c'est à dire que pour la même sensation exprimée, si l'on vient par valeur inférieure ou supérieure, on n'obtient pas le même résultat en valeur enregistrée. Il sera donc difficile de tenir compte de ces enregistrements par la suite.



Courbe de réponse de la boîte à sensation

Conclusions sur les résultats

Etant donné le grand nombre de variables, certaines conclusions sont évidentes soit sur les courbes soit dans le tableau récapitulatif. Nous ne donnons ici que des conclusions assez générales sur l'ensemble des 4 essais réalisés.

- Essai 1: la soufflage bilevel donne une température cutanée de la tête plus basse que les deux autres types de soufflage testés (tête et pieds).

- Essai 3: La configuration finalement réalisée ne donne pas le résultat escompté. En effet, le but était de faire varier les températures des surfaces internes du véhicule en faisant varier la température de la veine, mais en fait dans ce cas la température de soufflage varie aussi. Au lieu d'avoir "effet du rayonnement" nous avons en réalité "effet du rayonnement et de la convection", ce qui rend l'analyse des résultats beaucoup plus difficile.

• Températures de soufflage : On peut écrire un bilan thermique très sommaire du système de chauffage. Etant donné que l'air n'est pas recyclé, on peut considérer qu'il entre à Tveine et sort à Tsouf

$$qv. Ce (Ts,aero - Te,aero) = Da.Ca (Tsouf - Tveine)$$

Ce et Ca capacité calorifique de l'eau et de l'air

Da débit d'air pulsé dans le véhicule, dépend de Upuls

La température de l'air soufflée ,Tsouf, est liée au débit d'eau dans la chaudière (qv) et au débit du pulseur (donc Upuls), si qv diminue à Upuls constant Tsouf diminue, si Upuls diminue à qv constant, Tsouf augmente (cf. tableau récapitulatif ΔTAero)

Upuls influence indirectement les vitesses d'air sur le sujet. Notre but est de faire varier Tsouf, on peut alors uniquement agir sur Te,aero ou qv. Le réglage de qv n'est pas assez précis pour permettre des variations fines de Tsouf. C'est pourquoi dans certains essais nous n'avons pas obtenu le résultat désiré. Par ailleurs le temps de réponse de Te,aero , (eau venant de la chaudière) est trop long pour pouvoir réellement l'utiliser.

La température à la sortie des bouches de soufflage dépend aussi du type de répartition; lorsqu'on se trouve en position de soufflage Bilevel, les températures de soufflage sur les pieds et des aérateurs sont les mêmes. En position "soufflage pieds" les températures de soufflage des aérateurs n'ont pas réellement de signification, il s'agit plutôt d'une température d'air moyenne à cette endroit, Inversement lorsqu'on est en "soufflage tête"

• Températures cutanées : dans presque tous les essais, toutes les températures cutanées évoluent de la même façon, sauf les pieds qui ont tendance à varier de manière différente Il semblerait que nous n'ayons pas réalisé dans cette série d'expériences des configurations ayant entraîné des résultats très hétérogènes au niveau confort thermique.

Dans toutes les configurations, les mains et les pieds ont une plus grande amplitude de variation, ce qui est normal pour plusieurs raisons, tout d'abord ce sont les segments les plus sensibles aux variations climatiques, de plus ces variations y sont plus importantes qu'ailleurs (voir répartition des vitesses d'air § V).

Le tronc a en général la température la plus haute, ceci est probablement dû a l'isolement vestimentaire qui est important.

• Sensations : Il est difficile de tirer des conclusions très précises sur les sensations étant donné les erreurs dues à la boîte. Certains points peuvent être mis en évidence :

- Il existe quelques points aberrants qu'il faut éliminer.
- même si les températures locales évoluent en même temps, il peut y avoir presque une demi heure de décalage entre les variations des sensations de différents segments.

- les corrélations entre température et sensation sont beaucoup plus nettes pour certains segments. Par exemple pour la tête. Par contre pour le tronc , il parait difficile de tirer une loi; ceci est peut être dû au fait que le tronc est très couvert, et que la vitesse d'air est assez faible.

- La zone de sensation neutre est de loin la plus étendue, il faut tout de même noter que c'est la zone pour laquelle nous avons le plus de points.

III. ESSAIS DU 24 ET 25 NOVEMBRE 1992

Les 7 essais suivants ont été effectués sur deux jours.

III.1. DESCRIPTION DES JOURNEES DE TRAVAIL

Après des difficultés, les essais ont débutés à 9^h15, par 30 mn de mise à l'équilibre thermique.

Vveine = 50 km/h Tveine = 18,5°C HRveine = 19,2 %
Aérotherme : Te = 60°C q_v = 0 l/h U pulseur = 4 V Soufflage: Bilevel

1^{er} essai : Rôle de l'humidité

Vveine = 50 km/h Tveine = 18,5°C
Aérotherme : Te = 60°C q_v = 0 l/h U pulseur = 4 V Soufflage : Bilevel

- | | | |
|-------|---|--|
| I - | 9 ^h 45 - 10 ^h 15 : | HRveine = 19,2 % |
| II - | 10 ^h 15 - 10 ^h 45 : | HRveine = 50 % |
| III - | 10 ^h 45 - 11 ^h 15 : | HRveine = 90% |
| IV - | 11 ^h 15 | Upuls= 4 V, HRveine = 90%, q _v = passe de 40 l/h à 60 l/h |
| | 11 ^h 25 | Upuls= 6 V |
| | 11 ^h 45 | adjonction d'humidité |
| | 10 ^h 02 | Réglage de HRveine minimum 10% |

2^{ème} essai : Influence du Soleil : Cet essai n'a finalement pas été réalisé mais nous avons décidé de garder les numéros fixés dans le planning d'origine.

Pause repas

3^{ème} essai : Variation continue des températures d'air et de surface

Vveine = 10 km/h Aérotherme : Te = 80°C U pulseur = 4 V

- | | | |
|-------|---|--|
| I - | 14 ^h 25 - 14 ^h 55 : | Equilibre thermique , T veine = 14°C q _v = 1000 l/h |
| II - | 14 ^h 55 - 15 ^h 25 : | Diminution progressive de q _v (q _v = 0 à 15 ^h 15)
diminution progressive de Tveine jusqu'à 7 °C |
| III - | 15 ^h 30 - 16 ^h 25 : | augmentation progressive de Tveine jusqu'à 21°C q _v = 0l/h |

16^h 25 Pause de 30 minutes

4^{ème} essai : Variation continue des températures de surfaces

Vveine = 10 km/h HRveine = 50%
Aérotherme : Te = 80°C q_v = 0 l/h U pulseur = 0 V

- | | | |
|-------|---|--|
| I - | 16 ^h 55 - 17 ^h 25 : | Equilibre thermique , Tveine = 21 °C |
| II - | 17 ^h 25 - 17 ^h 55 : | diminution progressive de Tveine jusqu'à 14 °C |
| III - | 17 ^h 55 - 18 ^h 55 : | augmentation progressive de Tveine jusqu'à 29 °C |

Fin de la première journée.

25 Novembre

5^{ème} essai : Variation continue de la température d'air seule

Vveine = 100 km/h HRveine = 50% T veine = -18 °C
Aérotherme : Te = 80°C U pulseur = 8 V

- I - 8^h 13 - 8^h 43 : Equilibre thermique, $q_v = 600$ l/h
II - 8^h 43 - 9^h 13 : diminution progressive de q_v vers 0 l/h en 30 minutes
III - 9^h 15 - 10^h 13 : augmentation progressive de q_v vers 1000 l/h en 60 minutes

Pause de 30 minutes

6^{ème} essai : Effet de l'ensoleillement Prévu au départ pour être l'essai n°2

Vveine = 100 km/h HRveine = 50% Tveine = -18 °C
Aérotherme : Te = 80°C $q_v = 600$ l/h U pulseur = 8 V

- I - 10^h 44 - 11^h 14 : Equilibre thermique, Soleil = 0
II - 11^h 14 - 11^h 44 : Soleil = 560 W
III - 11^h 44 - 12^h 14 : Soleil = 1000 W

Pause repas

7^{ème} essai : Chauffage progressif

Vveine = 100 km/h HRveine = 90 % Soleil = 0
Aérotherme : Te = 66°C $q_v = 60$ l/h Upulseur = 8 V

- I - 13^h 39 - 14^h 09 : Equilibre thermique , Tveine = 0 °C
II - 14^h 09 - 15^h 09 : montée de Tveine de 0 à 20°C en 60 minute
ajustage de HRveine pour que HRvehi reste constant

Pause de 30 minutes

8^{ème} essai : Variation continue des température d'air et de surface

Cet essai est le symétrique de l'essai n°3.

Vveine = 100 km/h HRveine = 50% Soleil = 0
Aérotherme : Te = 80°C $q_v = 0$ l/h Upulseur = 8 V

- I - 15^h 48 - 16^h 18 : Equilibre thermique , Tveine = 20 °C $q_v = 0$ l/h
II - 16^h 18 - 16^h 44 : Tveine monte à 27 °C en 30 minutes
 q_v passe de 0 à 43 en 15 min puis de 43 à 85 en 15 min
III - 16^h 48 - 17^h 38 Tveine descend à 13°C en 30 minutes
 q_v passe de 85 à 0 en 30 min

fin de la deuxième journée d'essai.

III.2. VARIABLES ENREGISTREES ET TRAITEMENTS DES DONNEES

Au cours des essais, 104 variables ont été enregistrées toutes les 30 secondes. Les données qui nous intéressent sont réparties de la façon suivante :

- 3 variables sur les conditions extérieures
- 7 variables pour le système de chauffage
- 2 conditions moyennes dans le véhicule (températures et humidité)
- 31 températures de surface du véhicule
- 10 températures d'air dans le véhicule, (températures de soufflage)
- 12 températures d'air près du corps
- 20 températures cutanées
- 11 sensations thermiques

• Conditions extérieures dans la veine

Vveine : vitesse du vent *Tveine* : Température de l'air *HRveine* : Humidité relative

• Données sur le système de chauffage

qv : débit d'eau dans le système de chauffage

Ipuls : intensité électrique pour le pulseur

Upuls : tension au borne du pulseur

Ppuls : puissance du pulseur ($P = U.I$)

Ii : Indicateur de répartition du soufflage

Eaero : température de l'eau à l'entrée de l'aérotherme

Saero : température à la sortie

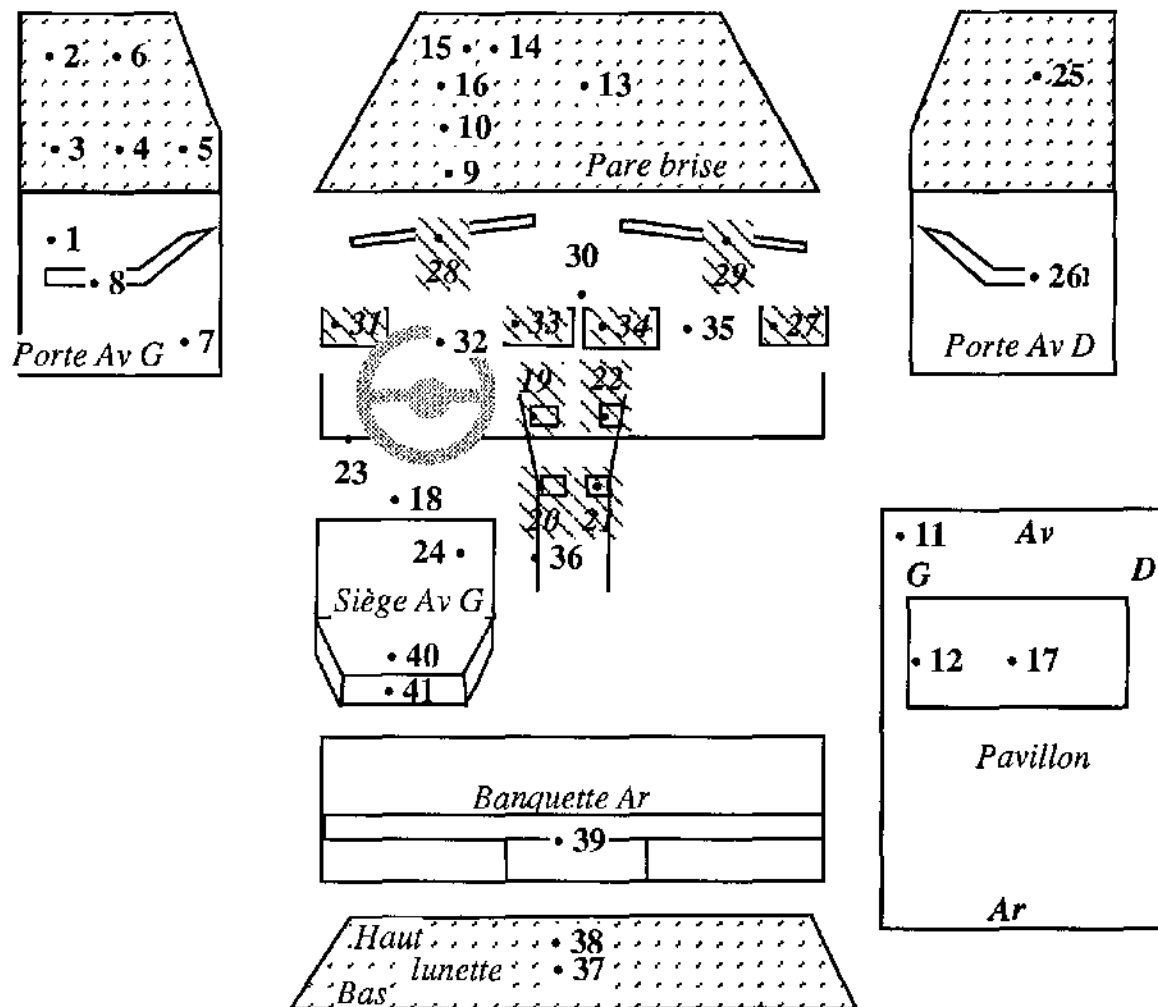
• Données à l'intérieure du véhicule

Temhab : température moyenne de l'air dans l'habitacle

HR vehi : humidité relative dans l'habitacle

• Températures de surfaces et d'air dans le véhicule

Les températures relevées sont données ci-dessous, soit : 31 Températures de surfaces et 10 températures d'air (Hachurées sur la figure et en italique dans la liste)



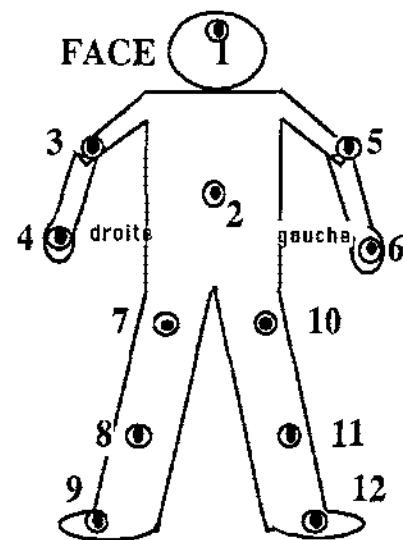
Position des thermocouples dans le véhicule lors de essais de novembre

1	PANneau AVant Gauche (haut arrière)	22	Sortie PIEDs Avant Droit
2	VITre AVant Gauche (haut arrière)	23	Sous Planche Gauche
3	VITre AVant Gauche (bas arrière)	24	ASSise AVant Gauche
4	VITre AVant Gauche (bas milieu)	25	VITre AVant Droite
5	VITre AVant Gauche (bas avant)	26	ACCoudoir AVant Droit
6	VITre AVant Gauche (haut avant)	27	AERateur Latéral Droit
7	PANneau AVant Gauche (bas avant)	28	DEGIvrage Gauche
8	accoudoir AVant Gauche	29	DEGIvrage Droit
9	PARe BRIsE Bas	30	Dessus PLAnche Centre
10	PARe BRIsE Milieu Bas	31	AERateur Latéral Gauche
11	PAVillon AVant Gauche	32	VOLant
12	PAVillon ARrière Gauche	33	AERateur Centre Gauche
13	PARe BRIsE Centre	34	AERateur Centre Droit
14	PARe BRIsE Haut Droit	35	Planche De Bord Droite
15	PARe BRIsE Haut Gauche	36	CONSOLE Bas Gauche
16	PARe BRIsE MILieu Haut	37	LUNette MILieu
17	PAVillon Centre	38	LUNette Haut
18	PIEDs Avant Gauche	39	Banquette ARrière
19	Sortie PIEDs Avant Gauche	40	DOSSier AVant (Siège conducteur)
20	Sortie PIEDs ARrière Gauche	41	DOSSier ARrière (Siège conducteur)
21	Sortie PIEDs ARrière Droit		

• Températures d'air à proximité du sujet

Les points de mesure des 12 températures d'air sont les suivants :

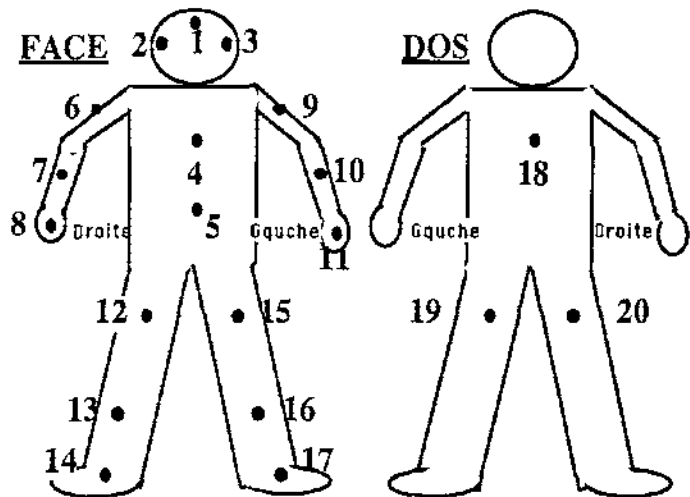
- 1 Tête
- 2 Poitrine
- 3 coude droit
- 4 main droite
- 5 coude gauche
- 6 mains gauche
- 7 cuisse droite
- 8 tibia droit
- 9 pied droit
- 10 cuisse gauche
- 11 tibia gauche
- 12 pied gauche



• Températures cutanées

- 1 Front (T_{FRont})
- 2 Tempe droite ($T_{T,d}$)
- 3 Tempe gauche ($T_{T,g}$)
- 4 Poitrine (T_{po})
- 5 Abdomen (T_{abd})
- 6 Biceps droit ($T_{Bi,d}$)
- 7 Avant bras droit ($T_{AB,d}$)
- 8 Mains droite ($T_{Ma,d}$)
- 9 Biceps gauche ($T_{Bi,g}$)
- 10 Avant bras gauche ($T_{AB,g}$)
- 11 Mains gauche ($T_{Ma,g}$)
- 12 Cuisse droite Avant ($T_{Cu,d,Av}$)
- 13 Mollet droit ($T_{MO,d}$)
- 14 Pieds droit ($T_{PI,d}$)
- 15 Cuisse gauche Avant ($T_{Cu,g,Av}$)
- 16 mollet gauche ($T_{MO,g}$)
- 17 Pieds gauche ($T_{PI,g}$)
- 18 Dos (T_{DOs})
- 19 Cuisse Gauche ARrière ($T_{Cu,g,Ar}$)
- 20 Cuisse droite ARrière ($T_{Cu,d,Ar}$)

Les 20 points de mesure pour les températures cutanées sont les suivants.



Il a fallu calculer 11 températures cutanées pour les mêmes localisations que les sensations, puis 7 températures compatibles avec le modèle.

$$T_{Tête} = \frac{T_{FRont} + T_{T,d} + T_{T,g}}{3}$$

$$T_{Tro} = \frac{T_{po} + T_{abd} + T_{DOs}}{3}$$

$$T_{Bras,d} = 0,6 T_{Bi,d} + 0,4 T_{AB,d}$$

$$T_{Bra,g} = 0,6 T_{Bi,g} + 0,4 T_{AB,g}$$

$$T_{mains} = \frac{T_{MA,d} + T_{MA,g}}{2}$$

$$T_{pieds} = \frac{T_{PI,d} + T_{PI,g}}{2}$$

$$T_{jam,d} = \frac{0,65}{2} (T_{Cu,d,Av} + T_{Cu,d,Ar}) + 0,35 T_{MO,d}$$

$$T_{jam} = \frac{T_{jam,d} + T_{jam,g}}{2}$$

$$T_{jam,g} = \frac{0,65}{2} (T_{Cu,g,Av} + T_{Cu,g,Ar}) + 0,35 T_{MO,g}$$

$$T_{sk} = 0,0674 T_{tête} + 0,3604 T_{Tro} + \frac{0,1304}{2} (T_{B,d} + T_{B,g}) + 0,0475 T_{ma} + 0,3283 T_{jam} + 0,0659 T_{pi}$$

Lors des essais, certaines voies, essentiellement des relevés de températures cutanées, sont tombées en panne. Dans ce cas lors du calcul des températures moyennes nous avons remplacé la mesure défectueuse par sa symétrique ou nous n'en avons pas tenu compte dans les calculs. Certaines de ces voies étaient nécessaires: nous les avons obtenues en sacrifiant une voie moins nécessaire.

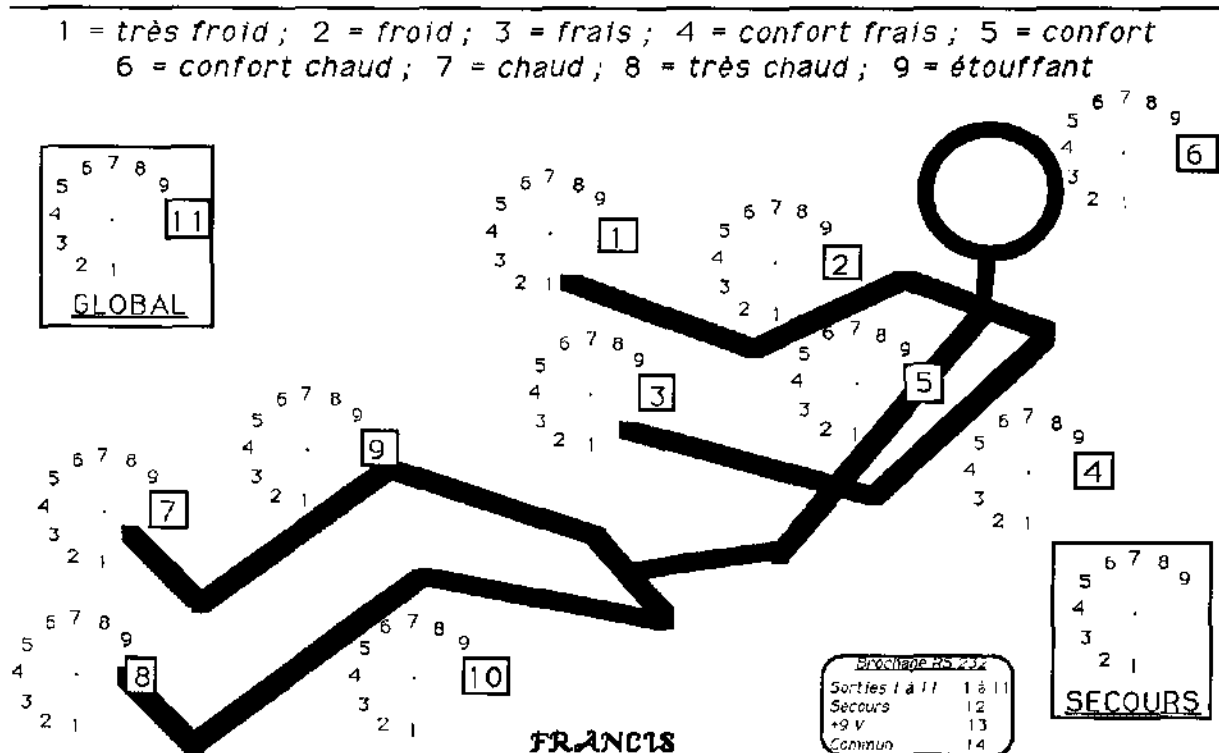
Le tableau ci-contre est un récapitulatif des voies défectueuses et du mode de substitution utilisé pour les calculs.

Lors de toutes les expériences les relevés pour le front et la cuisse arrière gauche n'ont pas pu être utilisés.

<i>n° de l'essai</i>	<i>Voie défectueuse</i>	<i>remplacée par ...</i>
1	mollet gauche Abdomen	mollet droit rein
3	mollet gauche pied gauche	mollet droit rein
4	mollet gauche avant bras droit pied gauche	mollet droit rein rein
5	mollet gauche poitrine	mollet droit rein
6	mollet gauche poitrine mains gauche	mollet droit rein rein
7	poitrine mains gauche	rein rein
8	mollet gauche mains gauche	mollet droit rein

• Sensations

Les sensations sont enregistrées grâce au nouveau boîtier mis au point au LESETH, représenté ci-dessous, muni de contacteurs rotatifs gradués de 1 à 9. Les 11 jugements thermiques correspondent aux 10 emplacement locaux donnés ci-dessous plus le jugement global. Une voie de secours est prévu en cas de problème.



Dessin de la plaque avant du nouveau boîtier.

III.3. PRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS

Toutes les courbes des résultats sont données en Annexe II

- **Pour chaque essai :**

- CONDITIONS DE L'ESSAI

- Température extérieure et vitesse du vent extérieur
 - Humidité relative intérieure et extérieure
 - Tension aux bornes du pulseur et débit de la chaudière
 - Température de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'aérotherme

- TEMPERATURES D'AIR

- Température de l'air à la sortie des aérateurs latéraux et centraux
 - Température de l'air à la sortie des aérateurs aux pieds
 - Températures près du conducteur
 - Températures dans l'habitacle

- TEMPERATURES DE SURFACE

- Températures des vitres des portes avant.
 - Températures du pare-brise et de la lunette arrière
 - Températures du pavillon
 - Températures des portes avant et du sol avant gauche
 - Températures de la planche de bord
 - Températures des sièges et du tissu de porte avant gauche

- TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS

- 6 Températures cutanées locales plus la cutanée moyenne
 - 6 Sensations thermiques locales plus la Globale

- **Tous les essais**

- pour les 11 parties du corps : la sensation en fonction de la température cutanée.

III.4. PREMIERES CONCLUSIONS

Conclusion des essais de novembre 1992

- ESSAI 1 : Cet essai aurait dû nous permettre d'apprécier l'effet de l'humidité sur les sensations du conducteur. L'humidité relative maximum atteinte dans le véhicule est de 66 % au temps $t = 1,7$ h. sur un laps de temps court, de plus la température d'air soufflé dans le véhicule augmente à partir du temps $t = 1,8$ h. . Il est donc difficile de se rendre compte de l'importance de l'hygrométrie sur les sensations car au moment où la température augmente l'hygrométrie diminue.

- ESSAI 3 : On a variation de deux effets en même temps : les échanges convectifs dûs au chauffage de l'air soufflé dans la voiture, et les échanges radiatifs dûs aux variations des

températures de parois. La température extérieure et la température de l'air soufflé baissent en même temps pendant une première phase puis remontent pendant une deuxième phase.

La variation de la température extérieure agit directement sur les températures de parois, alors que la variation des températures de l'air soufflé agit directement sur les températures de l'air au voisinage du conducteur.

Afin de déceler un décalage entre les divers variables, on prend comme repère le passage sur le minimum de température extérieure et de celle de l'air soufflé. Les minimums des températures de surface de la voiture ne sont pas décalées pour les vitrages, par contre pour les intérieurs de portes, le pavillon, la planche de bord et les sièges on a un décalage de 5 à 6 minutes. Les minimums des températures de peau sont décalées d'environ 15 minutes et le décalage des sensations varie entre 5 à 20 minutes.

• **ESSAI 4 :** Pour déterminer l'importance de la convection par rapport au rayonnement il faut essayer de faire varier un seul paramètre à la fois. Dans cet essai on fait varier uniquement le rayonnement en agissant sur la température extérieure. Du fait qu'il n'y a pas de soufflage qui maintiendrait la température de l'habitacle constant, et que la température de l'air dans l'habitacle varie entre 19°C et 29°C les variations des sensations du conducteur ne sont pas liées qu'aux seules variations du rayonnement. Ce phénomène a déjà été noté pour les essais d'octobre.

On ne remarque pas de dissymétrie entre les températures cutanées du côté droit et gauche du conducteur malgré la présence rapprochée des parois du côté gauche.

La variation de la température extérieure n'affecte pas directement le conducteur; il commence à sentir qu'il a chaud un quart d'heure après la remontée en température de la veine.

• **ESSAI 5 :** On fait intervenir ici uniquement la convection. On a une température extérieure constante faible ($T_{\text{veine}} = -18^{\circ}\text{C}$) et une température de soufflage qui passe de 60°C à -10°C puis remonte à 60°C.

Ce soufflage d'air chaud entraîne une dispersion des températures de paroi suivant quelles soient proches ou non des courants d'air chauds provenant des aérateurs.

La température à la sortie des aérateurs baisse brutalement au temps $t = 0,7 \text{ h}$, on remarque que les températures cutanées commencent à baisser également au même pas de temps; par contre les sensations baissent environ 5 mm plus tard.

La température d'air soufflé remonte au temps $t = 1,1 \text{ h}$, on remarque qu'il en est de même pour les températures cutanées et les sensations, il n'y a donc pas de décalage lors de la remontée en température.

• ESSAI 6 : Cet essai sur le rayonnement solaire s'effectue à température extérieure de -18°C , uniquement pour des problèmes de planning et d'inertie de la soufflerie.

Etant donné que la température extérieure est basse, on est amené à souffler de l'air chaud dans la voiture pour que le conducteur soit au confort thermique avant que l'on allume les lampes pour simuler le soleil. Ce réchauffement par convection va s'ajouter au réchauffement par rayonnement dès que les lampes sont allumées.

Pour les surfaces vitrées on voit très bien que les sauts en température correspondent au moment où les lampes s'allument ; les thermocouples n'ayant pas été protégés du rayonnement par une couche d'aluminium, il est donc difficile de faire confiance à ces mesures de températures de surface .

Pour les surfaces qui ne sont pas soumises au rayonnement solaire, ainsi que pour la température de l'air, on constate une élévation régulière de la température.

Les courbes des températures cutanées montrent dans l'ensemble une élévation régulière, sauf pour la tête où on remarque une pente plus forte aux temps $t = 0,5 \text{ h.}$ et $t = 1 \text{ h.}$, les deux instants où le rayonnement des lampes augmente. Mais il faut relativiser ces résultats car les thermocouples placés sur le front et sur les tempes ne sont pas non plus isolés du rayonnement des lampes.

• ESSAI 7 : Ici le paramètre que l'on veut fixer est l'humidité relative dans le véhicule (aux alentours de 30%). La température de la veine augmente en début de phase I ($t = 0,5 \text{ h.}$), les températures de soufflage des aérateurs et les températures de paroi augmentent également en même temps. Les températures cutanées augmentent 5 à 15 minutes plus tard suivant les différentes parties du corps, par contre les sensations augmentent environ 20 minutes plus tard.

• ESSAI 8 : Cet essai est le même que l'essai 3 avec le sens de variation des températures inversé. Ici contrairement à l'essai 3 on ne remarque pas de décalage sur les sensations en fonction des variations des températures extérieures et soufflées.

Les variations dans les deux essais (3 et 8) ne sont pas symétriques ces variations passent par des paliers; il est donc difficile de comparer les résultats obtenus contrairement à nos intentions de départ, qui ont motivées ces deux configurations.

Détermination des surfaces isothermes en vue du calcul des facteurs de formes

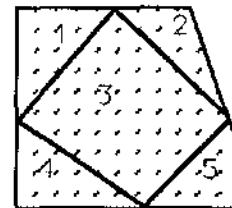
Les mesures effectuées en octobre et en novembre 92 permettent de mettre en valeur certaines inhomogénéités dans les températures d'une même surface, notamment sur les surfaces vitrées. Le changement de position de soufflage modifie également les températures de paroi.

Toutefois lorsque l'air soufflé dans le véhicule n'est pas réchauffé ($qv. = 0$), les surfaces ont des températures homogènes

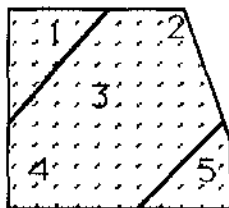
D'après les résultats obtenus on découpe les surfaces en différentes parties isothermes, ces parties devront être adapté par la suite au logiciel de la C.A.O.

Vitre de la porte

La vitre de la porte avant gauche est découpée en 5 surfaces. Suivant le mode de soufflage on pourra regrouper plusieurs de ces surfaces en une seule surface isotherme:



soufflage en bilevel

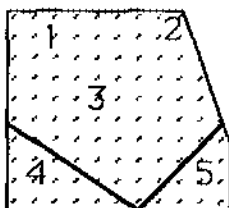


On peut regrouper les surfaces 2, 3 et 4 en une seule surface isotherme. La surface 5 est la partie la plus froide les surfaces 2, 3 et 4 ont une températures moyenne et la surface 1 est une surface chaude.

$$T5 < T2 < T1$$

$$\text{avec } T2 = T3 = T4$$

soufflage pied-de-gi



On pourra considérer 3 autres surfaces en regroupant cette fois les surfaces 1, 2 et 3. La surface 4 est la plus froide, la surface 5 est la plus chaude et les surfaces 1, 2, 3 on une température intermédiaire.

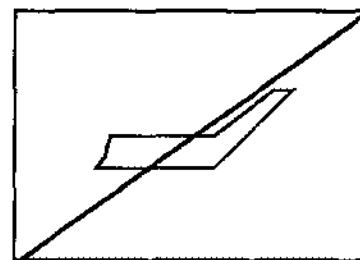
$$T4 < T2 < T5$$

$$\text{avec } T1 = T2 = T3$$

Le bas de la porte

On peut partager le bas de porte uniquement en trois parties:

Un triangle en haut à gauche, un triangle en bas à droite et l'accoudoir



Pare-brise:

La température du pare-brise varie beaucoup, il est généralement plus chaud en bas (3) surtout lorsque le dégivrage est en marche. En position bilevel on peut regrouper la zone 1 et 2 en une seule

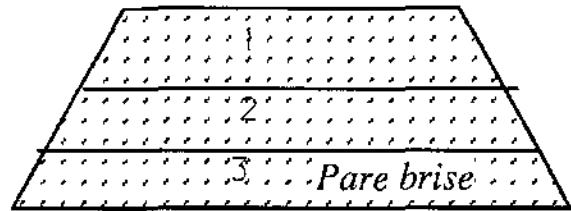
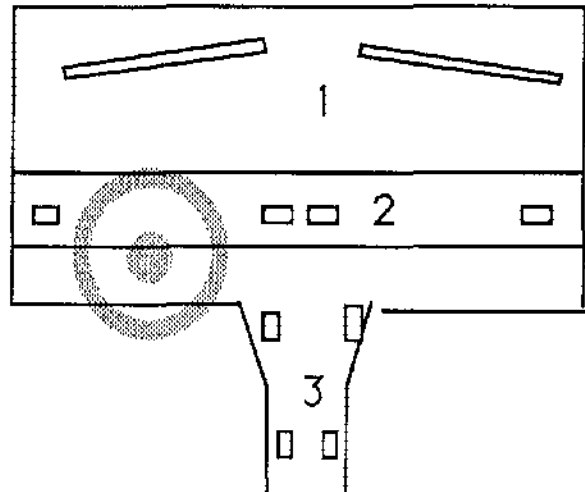


Planche de bord:

Toute une partie de la planche de bord est très près des bouches de sortie d'air ; si on a un grand débit d'air on aura de grande variation de température de surface.

- On découpe cette partie en trois zones:
- a partie horizontale de la planche de bord (1) qui contient les aérateurs du dégivrage
 - la partie verticale (2) qui contient les aérateurs du soufflage tête
 - la partie inférieure (3) et la console basse qui contient les aérateurs des pieds

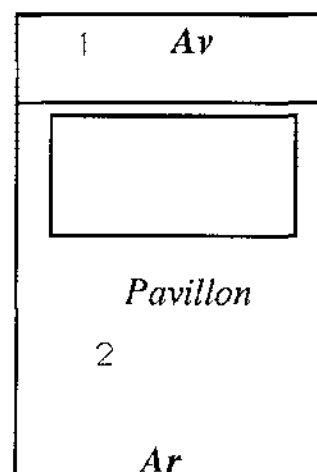


Pour la position bilevel on pourra réunir les deux premières zone en une seule.

Pavillon:

On note une dissymétrie dans les températures avant du pavillon, la partie avant est plus chaude que le milieu et la partie arrière. De plus on constate une plus grande inertie de la partie 1 lors des variations importantes de température. On considère donc deux zones:

la zone avant (1) et la zone arrière et milieu (2).



Lunette arrière:

Entre la mesure de la température du milieu et du haut de la lunette on obtient dans certain cas une différence de 2°C maximum on pourra donc considérer la lunette isotherme.

Sièges:

Les températures des sièges non occupés sont identiques on pourra donc regrouper les sièges "vides" en un seul groupe.

V. TABLEAUX RECAPITULATIFS

Sur les deux pages suivantes, deux tableaux donnent un récapitulatif des 11 essais (4 pour octobre et 7 pour novembre).

Ce tableau donne les sens de variations, et les ordres de grandeur.

En caractères gras les variables sur lesquelles on a agi

→ contante ↗. augmente \ diminue

les notations utilisées sont les suivantes :

- Pour chaque essai apparaissent les trois phases, le titre de l'essai ; toutes les phases font 1/2 heure sauf notation particulière.

- Les quatres premières lignes regroupent les conditions d'essai

Tveine (°C), Vveine (km/h), Hrveine (%) et ensoleillement (W)

- 3 variables du système de chauffage

Souf position du soufflage,

Upul Tension du pulseur (V)

Qv débit d'eau dans la chaudière (l/h)

- 2 températures de soufflage,

Ts,pi température moyenne de soufflage des quatres points au niveau des pieds (°C),

Ts,ae température moyenne de soufflage des aérateurs latéraux et centraux(°C).

- A,e/s températures d'entrée (TAe) et de sortie (TAs) de l'eau dans l'aérotherms (°C),

- ΔTA écart de température entrée-sortie dans l'aerotherme $\Delta TA = (TAs - TAe)$ (°C)

- Thab température moyenne dans l'habitacle (°C)

- HR hab humidité relative dans l'habitacle (%)

- VTsk tendance de variations des températures cutanées

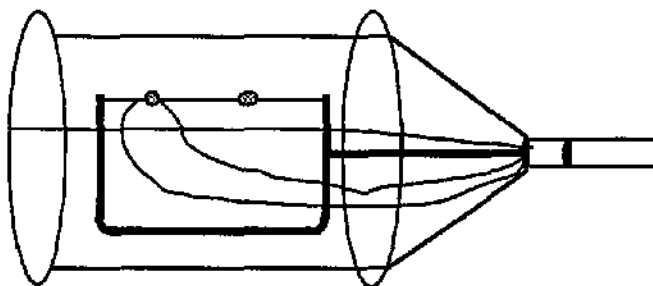
- Exept températures des segments qui ne suivent pas la tendance de variation générale.

V COMPTE RENDU DES RELEVES DE VITESSE D'AIR

Nous avons mesuré les vitesses d'air au voisinage du conducteur dans les différentes configurations de soufflage d'air des expériences d'octobre et de novembre 1992, afin de compléter les données nécessaires à l'étude des transferts thermiques entre l'habitacle et le conducteur.

V.1. DISPOSITIF

Les mesures de vitesse d'air ont été effectuées à l'aide d'un anémomètre à thermocouple provenant du C.E.T.I.A.T. Cet anémomètre est composé de deux thermocouples montés en série, chacun étant recouvert d'une sphère de diamètre de 5 mm environ. L'un des deux thermocouples est chauffé par un courant continu de 1746 mA.



Du fait de la protection de l'anémomètre, les sphères se trouvent à une distance de 2 à 2,5 cm des habits du conducteur. De plus la sonde étant montée au bout d'une tige de 60 cm il n'a pas toujours été facile de la positionner sur le conducteur.

- La voiture est dans une pièce close, sans vent et la température ambiante est d'environ 20°C. Il n'a pas été jugé nécessaire de placer le véhicule dans la soufflerie car celui-ci étant neuf les courants d'air parasites qui pourraient se produire avec un vent extérieur sont supposés négligeable.

- Le pulseur d'air de la voiture est alimenté par une alimentation stable de 12, 8 ou 4 volts.
- Le moteur de la voiture est éteint.

Pour chaque configuration de soufflage nous avons relevé la vitesse d'air en 12 points qui correspondent aux points de mesure des températures d'air relevées au voisinage du conducteur lors des essais de novembre 92.

Nous avons effectué les mesures suivantes :

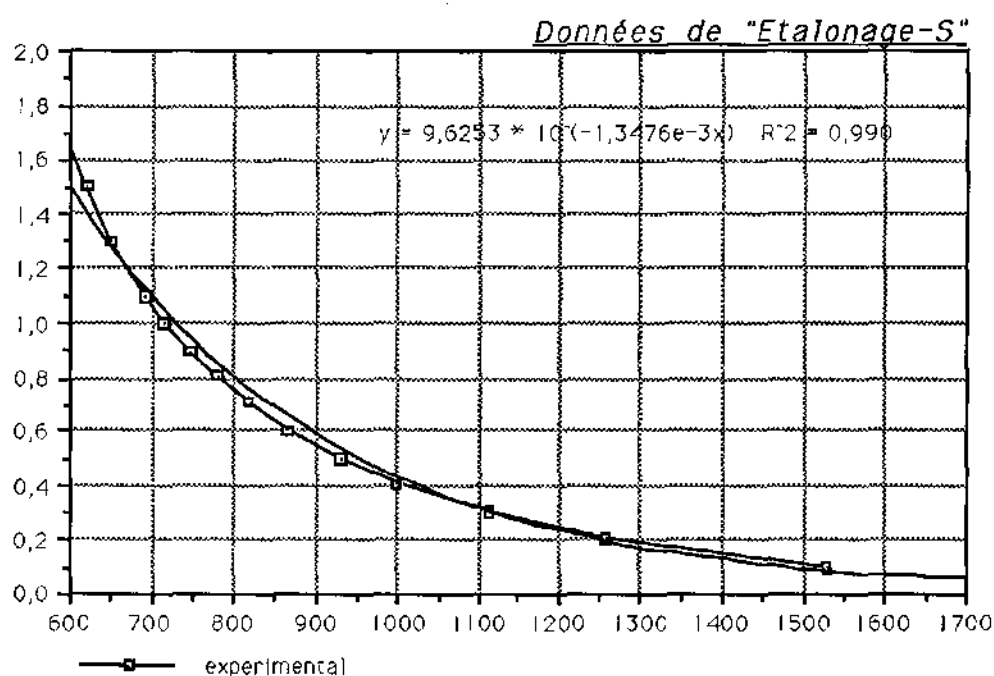
- soufflage bilevel à 4, 8 et 12V
- soufflage pied-déjà à 4, 8 et 12V
- soufflage tête à 4, 8 et 12V
- soufflage dégivrage à 12 V
- soufflage pied à 4 et 8V

Nous avons répété trois fois les mesures pour le soufflage bilevel et le soufflage pied-degi.

L'anémomètre délivre une tension proportionnelle à la vitesse. La courbe d'étalonnage fournie par le C.E.T.I.A.T. nous permet d'obtenir la correspondance en vitesse.

Pour chaque mesure la valeur de la tension fluctue. Nous avons pris la valeur moyenne de ces fluctuations, qui sont de l'ordre de 15 %.

Pour calculer plus rapidement les vitesses d'air nous avons interpolé les points d'étalonnage par la courbe d'équation donnée ci-dessous



Dans les tableaux ci-dessous nous avons reporté les tensions moyennes pour chaque mesure, puis les vitesses d'airs calculées (en cm/s) ainsi que ΔV : l'écart entre les mesures (en cm/s), et $\Delta V / V$ écart relatif.

V.2. Tableaux des résultats:

Bilevel 12V

	mesure,1	mesure,2	mesure,3	Moyenne	Vitesses	ΔV	$\Delta V / V$
front	1030	920	965	950	50	9	0,17
abdomen	1140	1505	1550	1525	8	2	0,28
coude_g	1138	1001	1012	1007	42	3	0,07
main_g	1018	1265	1148	1206	23	10	0,42
coude_d	1150	1010	1006	1055	36	2	0,05
main_d	995	1080	1046	1040	38	5	0,14
cuisse_g	894	928	962	928	54	7	0,13
tibia_g	1435	1112	1120	1116	30	2	0,07
pied_g	702	676	666	681	116	6	0,05
cuisse_d	1255	1195	904	1225	22	36	1,67
tibia_d	1130	1035	1075	1080	34	6	0,18
pied_d	973	682	749	715	105	24	0,23

Bilevel 8V

	mesure,1	mesure,2	mesure,3	Moyenne	Vitesses	ΔV	$\Delta V / V$
front	1270	1105	1385	1328	16	7	0,44
abdomen	1408	1565	1615	1487	10	2	0,24
coude_g	1323	1090	1160	1191	24	12	0,49
main_g	1100	1210	1155	1155	27	11	0,39
coude_d	1275	1155	1135	1188	24	3	0,13
main_d	1204	1155	1140	1166	26	3	0,10
cuisse_g	1060	1370	1200	1210	23	11	0,48
tibia_g	1645	1485	1440	1463	10	3	0,26
pied_g	847	787	823	819	76	11	0,14
cuisse_d	1170	1125	1125	1140	28	5	0,19
tibia_d	1390	1645	1395	1393	13	1	0,11
pied_d	657	1015	747	702	109	33	0,30

Bilevel 4V

	mesure,1	mesure,2	mesure,3	Moyenne	Vitesses	ΔV	$\Delta V / V$
front	1580	1440	1655	1558	7	7	0,86
abdomen	1615	1663	1660	1646	5	2	0,34
coude_g	1695	1450	1595	1645	5	3	0,51
main_g	1495	1330	1515	1446	10	7	0,69
coude_d	1405	1415	1355	1391	12	4	0,29
main_d	1425	1140	1375	1400	12	3	0,25
cuisse_g	1350	1355	1400	1368	13	3	0,24
tibia_g	1432	1625	1635	1630	6	1	0,22
pied_g	1045	1300	942	993	44	16	0,36
cuisse_d	1345	1265	1395	1335	15	8	0,49
tibia_d	1715	1715	1775	1735	4	2	0,44
pied_d	1335	1000	1150	1161	26	13	0,50

Pied-degi 12v

	mesure,1	mesure,2	mesure,3	Moyenne	Vitesses	ΔV	$\Delta V / V$
front	1172	1190	1115	1181	25	3	0,11
abdomen	1435	1605	1545	1528	8	6	0,69
coude_g	1005	1260	1295	1133	29	3	0,12
main_g	1220	1160	1255	1212	22	8	0,36
coude_d	1012	1015	1075	1034	39	8	0,22
main_d	1132	1060	1075	1068	35	3	0,09
cuisse_g	1095	1030	1030	1052	37	1	0,04
tibia_g	1433	1200	1425	1429	11	1	0,13
pied_g	644	598	587	593	153	8	0,05
cuisse_d	1240	1010	1015	1013	42	2	0,05
tibia_d	1055	1065	1175	1060	36	3	0,07
pied_d	995	541	647	594	152	53	0,35

Pied-degi 8V

	mesure,1	mesure,2	mesure,3	Moyenne	Vitesses	ΔV	$\Delta V / V$
front	1653	1365		1509	9	9	1,06
abdomen	1655	1675		1665	5	1	0,15
coude_g	1325	1440		1382	13	6	0,45
main_g	1470	1371		1420	12	5	0,41
coude_d	1260	1265		1262	19	2	0,08
main_d	1231	1215		1223	22	2	0,11
cuisse_g	1222	1155		1188	24	6	0,26
tibia_g	1580	1340	1700	1540	8	11	1,40
pied_g	799	718		758	91	25	0,27
cuisse_d	1180	1310	1315	1268	19	9	0,51
tibia_d	1335	1218	1205	1252	20	8	0,40
pied_d	1236	607	752	679	117	55	0,47

Pied-degi 4 V

	mesure,1	mesure,2	mesure,3	Moyenne	Vitesses	ΔV	$\Delta V / V$
front	1625	1620		1622	6	1	0,20
abdomen	1645	1650		1643	6	1	0,18
coude_g	1554	1515		1535	8	2	0,27
main_g	1521	1555		1539	8	2	0,25
coude_d	1525	1445	1505	1515	9	2	0,20
main_d	1589	1535		1556	8	2	0,32
cuisse_g	1399	1405		1402	12	1	0,12
tibia_g	1695	1720		1718	5	2	0,33
pied_g	1015	965	803	990	45	8	0,19
cuisse_d	1445	1435		1440	11	2	0,14
tibia_d	1432	1607	1605	1606	7	1	0,18
pied_d	1305	583	949	946	51	35	0,69

Tête 12 V

	mesure,1	Vitesses
front	875	64
abdomen	1241	20
coude_g	1110	31
main_g	885	62
coude_d	902	59
main_d	887	61
cuisse_g	845	70
tibia_g	1250	20
pied_g	1240	21
cuisse_d	870	65
tibia_d	1395	13
pied_d	1710	5

Tête 8 V

	mesure,1	Vitesses
front	1007	42
abdomen	1425	12
coude_g	1095	32
main_g	1040	38
coude_d	1087	33
main_d	972	47
cuisse_g	972	47
tibia_g	1128	29
pied_g	1285	18
cuisse_d	1070	35
tibia_d	1442	11
pied_d	1815	3

Tête 4 V

	mesure,1	Vitesses
front	1442	11
abdomen	1547	8
coude_g	1405	12
main_g	1300	17
coude_d	1445	11
main_d	1405	12
cuisse_g	1257	19
tibia_g	1375	13
pied_g	1750	4
cuisse_d	1235	21
tibia_d	1675	5
pied_d	1672	5

Pied 8 V

	mesure,1	Vitesses
front	1565	7
abdomen	1515	9
coude_g	1695	5
main_g	1655	6
coude_d	1385	13
main_d	1250	20
cuisse_g	1330	16
tibia_g	1320	16
pied_g	612	144
cuisse_d	1491	9
tibia_d	1032	39
pied_d	656,5	126

Pied 4 V

	mesure,1	Vitesses
front	1645	6
abdomen	1660	6
coude_g	1715	5
main_g	1670	5
coude_d	1490	9
main_d	1605	7
cuisse_g	1550	8
tibia_g	1655	6
pied_g	768	89
cuisse_d	1440	11
tibia_d	1465	10
pied_d	641	132

Degi 12 V

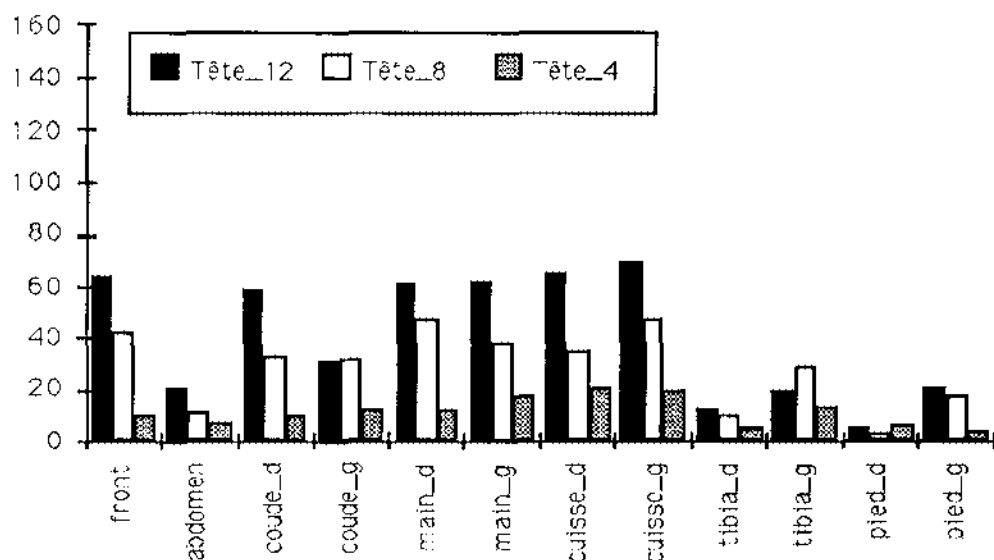
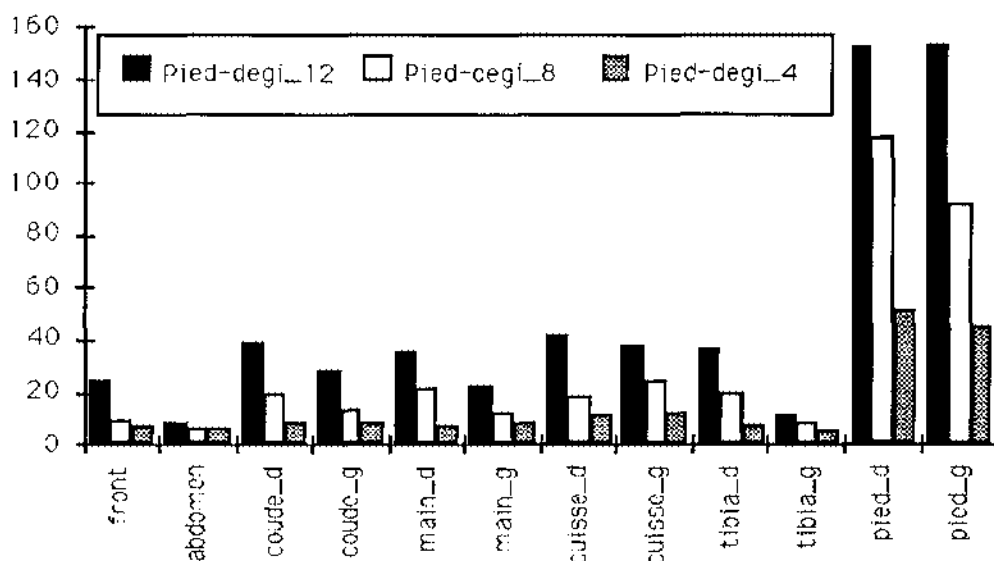
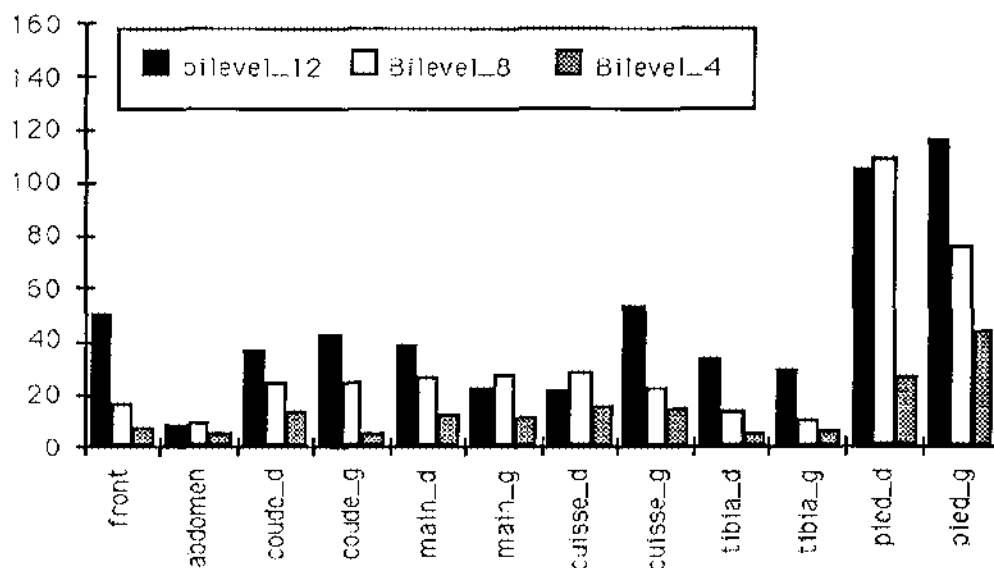
	mesure,1	Vitesses
front	1025	40
abdomen	1145	28
coude_g	1142	28
main_g	1005	43
coude_d	885	62
main_d	962	49
cuisse_g	1265	19
tibia_g	1505	9
pied_g	1440	11
cuisse_d	890	61
tibia_d	1485	10
pied_d	1005	43

V.3. Commentaires

Les mesures en bilevel et en pied-dégi ont été faites trois fois (essais 1,2,3). On constate un écart qui peut être important entre deux mesures, ce qui nous donne une variation sur les résultats qui peut atteindre 100% dans les cas où les vitesses sont faibles (10 cm/s).

Il y a peu de différence entre coté droit et gauche, compte tenu des incertitudes.

La vitesse d'air sur les pieds est toujours de loin la plus élevée, sauf dans la configuration dégivrage où les vitesses sont assez bien réparties.



ANNEXE II

RESULTATS DES ESSAIS DE NOVEMBRE

Essai 1	Rôle de l'humidité de l'air dans l'habitable
Essai 3	Variation continue de la convection et du rayonnement
Essai 4	Variation continue du rayonnement
Essai 5	Variation continue de la convection
Essai 6	Influence de l'ensoleillement
Essai 7	Chauffage progressif à hygrométrie du véhicule constante
Essai 8	Variation continue de la convection et du rayonnement (sens de variation opposé à l'essai 3)

• Pour chaque essai 7 pages de résultats :

1ère page <u>CONDITIONS DE L'ESSAI</u>	Température extérieure et vitesse du vent extérieur Humidité relative intérieure et extérieure Tension aux bornes du pulseur et débit d'eau dans la chaudière Températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'aérotherme
2ème et 3ème page <u>TEMPERATURES D'AIR</u>	Températures de l'air aux sorties des aérateurs latéraux et centraux Températures de l'air aux sorties des aérateurs au pieds Températures dans l'habitable
	Températures près du conducteur
5ème et 6ème page <u>TEMPERATURES DE SURFACE</u>	Températures des vitres des portes avant. Températures du pare-brise Températures de la lunette arrière
	Températures du pavillon Températures des portes avant et du sol avant gauche Températures de la planche de bord Températures des sièges avant et banquette arrière
7ème page <u>TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS</u>	Températures cutanées locales et cutanée moyenne Sensations thermiques locales plus la Globale

• Tous les essais

sur 3 pages	pour chaque segment la sensation en fonction de la température cutanée.
-------------	---

<p align="center">ANNEXE I</p> <p align="center">RESULTATS DES ESSAIS D'OCTOBRE</p>

Essai 1	Répartition du soufflage
Essai 2	Vitesse de soufflage
Essai 3	Puissance de chauffage
Essai 4	Effet au rayonnement

• Pour chaque essai 5 pages de résultats :

1ère page <u>CONDITIONS DE L'ESSAI</u>	Température extérieure et vitesse du vent extérieur Humidité relative intérieure et extérieure Tension aux bornes du pulseur et débit d'eau dans la chaudière Températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'aérotherme
2ème page <u>TEMPERATURES D'AIR</u>	Températures de l'air aux sorties des aérateurs latéraux et centraux Températures de l'air aux sorties des aérateurs au pieds Températures près du conducteur Températures dans l'habitacle
3ème et 4ème page <u>TEMPERATURES DE SURFACE</u>	Températures des vitres des portes avant. Températures du pare-brise et de la lunette arrière Températures du pavillon Températures des portes avant et du sol avant gauche
	Températures de la planche de bord Température des sièges et du tissu de porte avant gauche
5ème page <u>TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS</u>	Températures cutanées locales et cutanée moyenne Sensations thermiques locales plus la Globale

• Tous les essais

sur 2 pages	pour chaque segment la sensation en fonction de la température cutanée.
-------------	---

<p align="center">ANNEXE I</p> <p align="center">RESULTATS DES ESSAIS D'OCTOBRE</p>

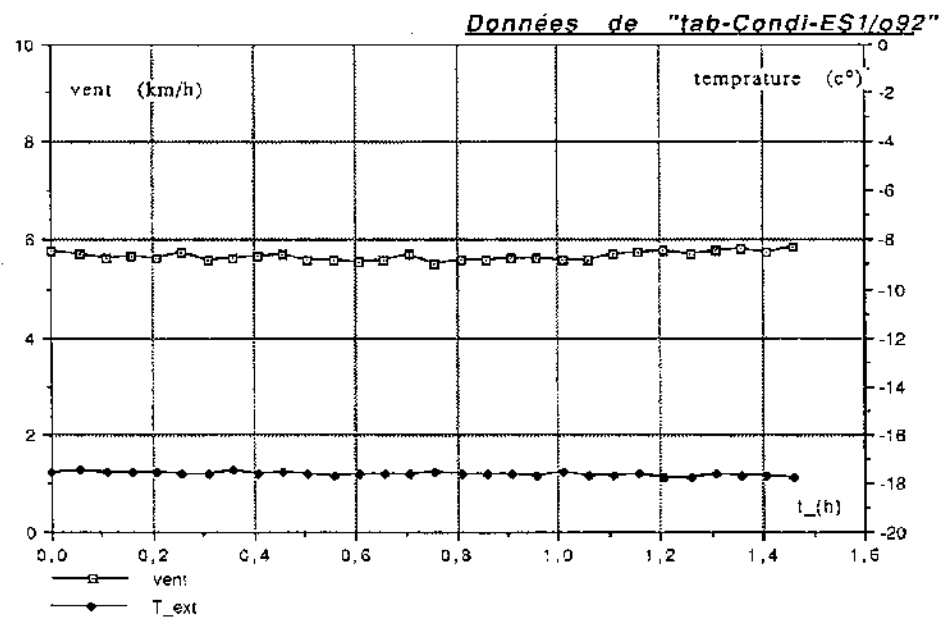
Essai 1	Répartition du soufflage
Essai 2	Vitesse de soufflage
Essai 3	Puissance de chauffage
Essai 4	Effet au rayonnement

- Pour chaque essai 5 pages de résultats :

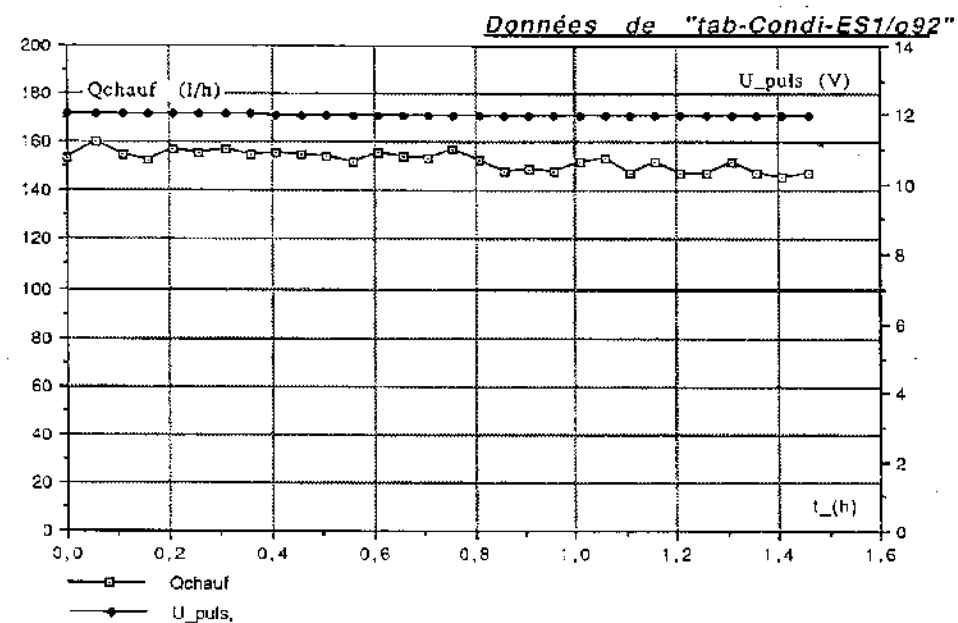
1ère page <u>CONDITIONS DE L'ESSAI</u>	Température extérieure et vitesse du vent extérieur Humidité relative intérieure et extérieure Tension aux bornes du pulseur et débit d'eau dans la chaudière Températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'aérotherme
2ème page <u>TEMPERATURES D'AIR</u>	Températures de l'air aux sorties des aérateurs latéraux et centraux Températures de l'air aux sorties des aérateurs au pieds Températures près du conducteur Températures dans l'habitacle
3ème et 4ème page <u>TEMPERATURES DE SURFACE</u>	Températures des vitres des portes avant. Températures du pare-brise et de la lunette arrière Températures du pavillon Températures des portes avant et du sol avant gauche
	Températures de la planche de bord Température des sièges et du tissu de porte avant gauche
5ème page <u>TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS</u>	Températures cutanées locales et cutanée moyenne Sensations thermiques locales plus la Globale

- Tous les essais

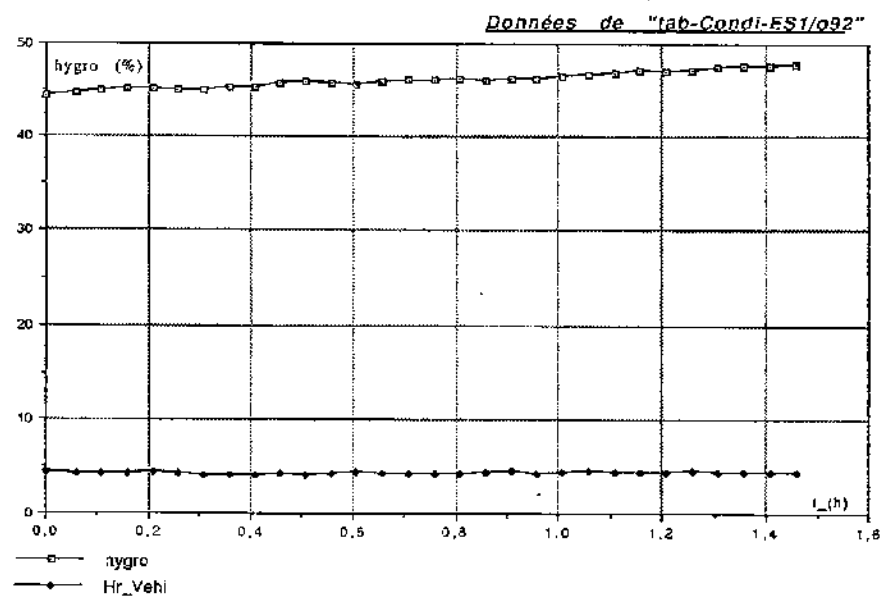
sur 2 pages	pour chaque segment la sensation en fonction de la température cutanée.
-------------	---



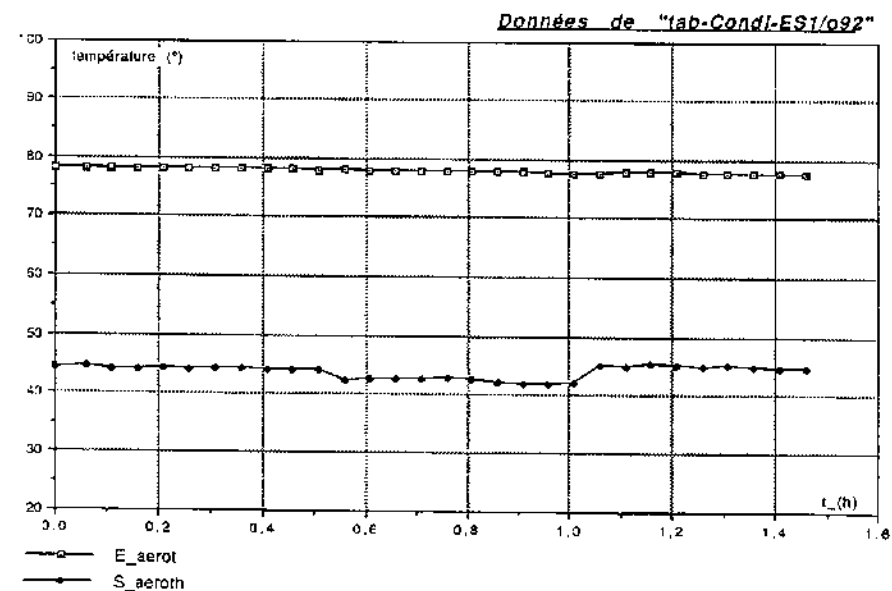
Température extérieure et vitesse du vent extérieur



Tension aux bornes du pulseur et débit d'eau dans la chaudière

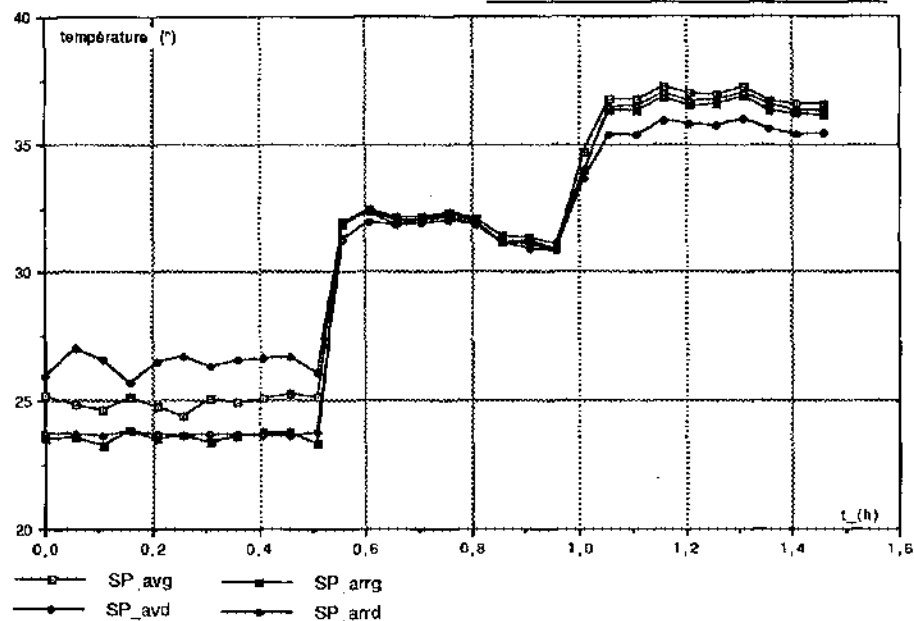


Humidité relative intérieure et extérieure



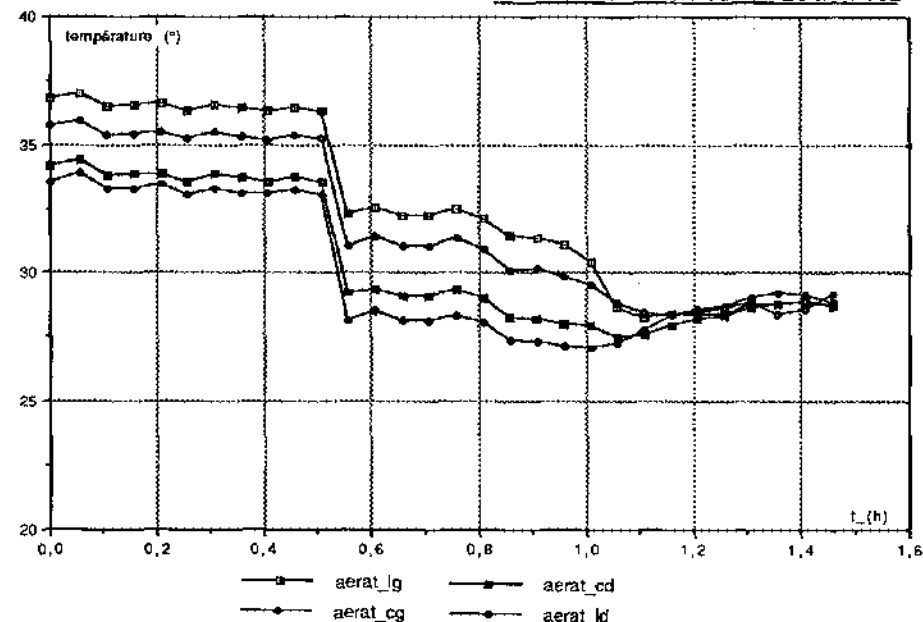
Températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'aérotherme

Données de "tab-TairV ES1/OCT92"



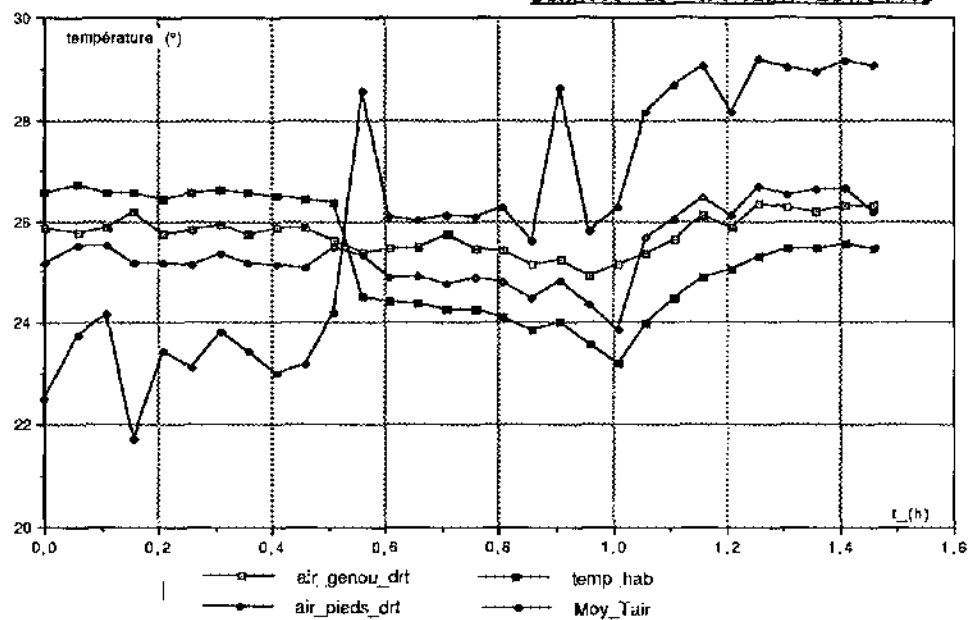
Températures de l'air aux sorties des aérateurs au pieds

Données de "tab-TairV ES1/OCT92"



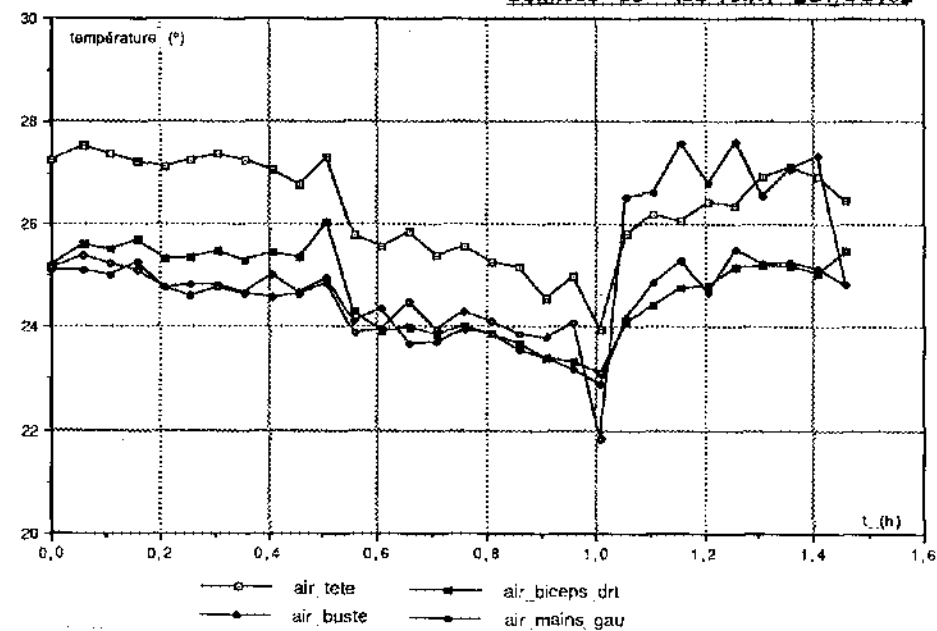
Températures de l'air aux sorties des aérateurs latéraux et centraux

Données de "tab-TairH ES1/OCT92"

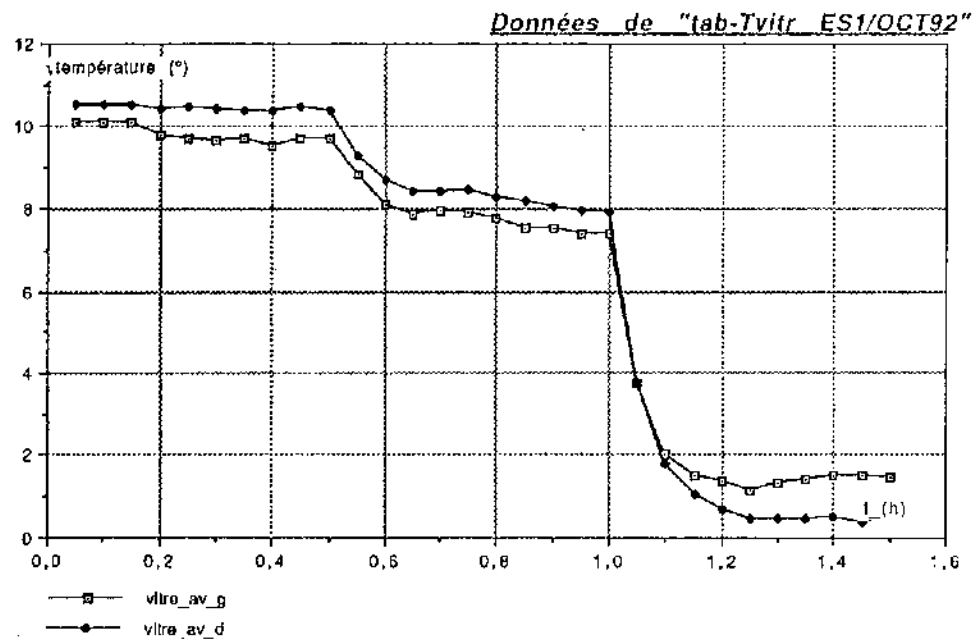


Températures dans l'habitacle

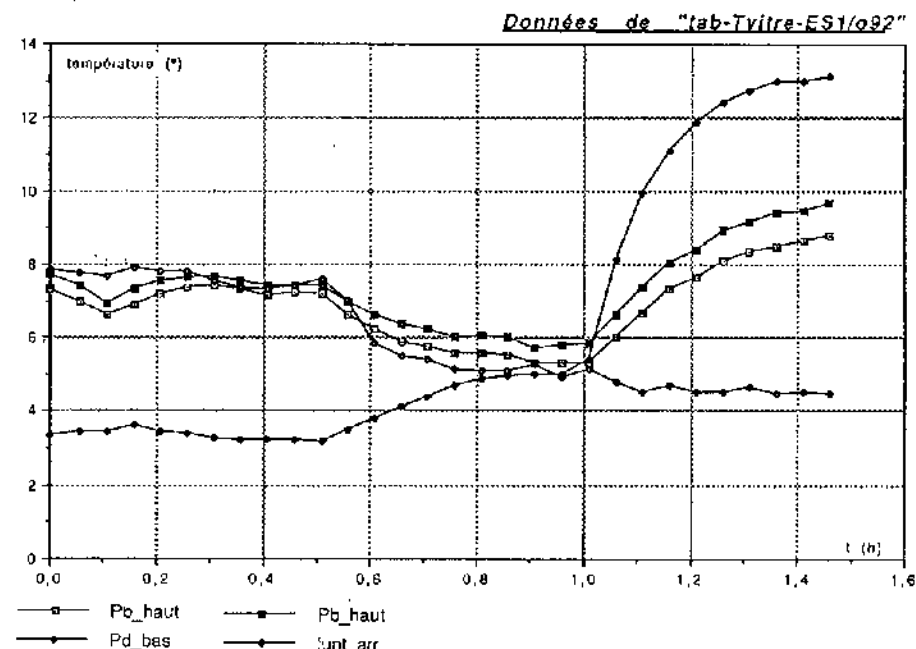
Données de "tab-TairH ES1/OCT92"



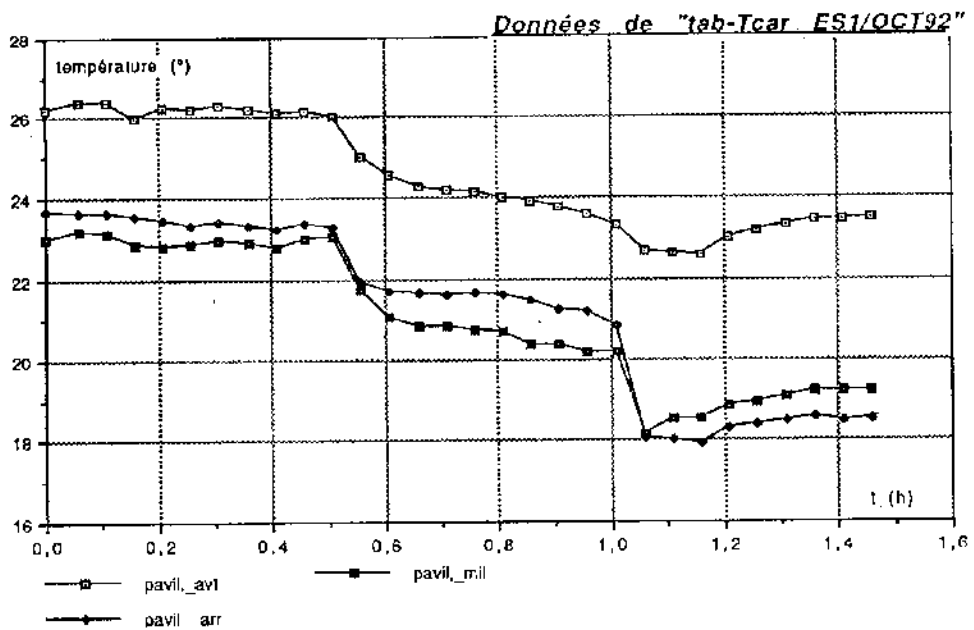
Températures près du conducteur



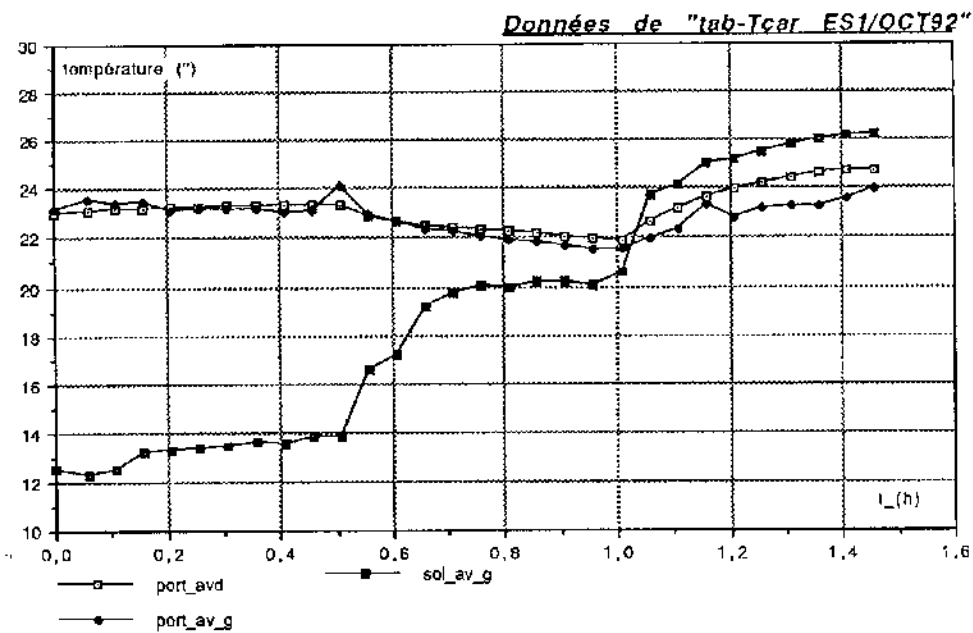
Températures des vitres des portes avant.



Températures du pare-brise et de la lunette arrière



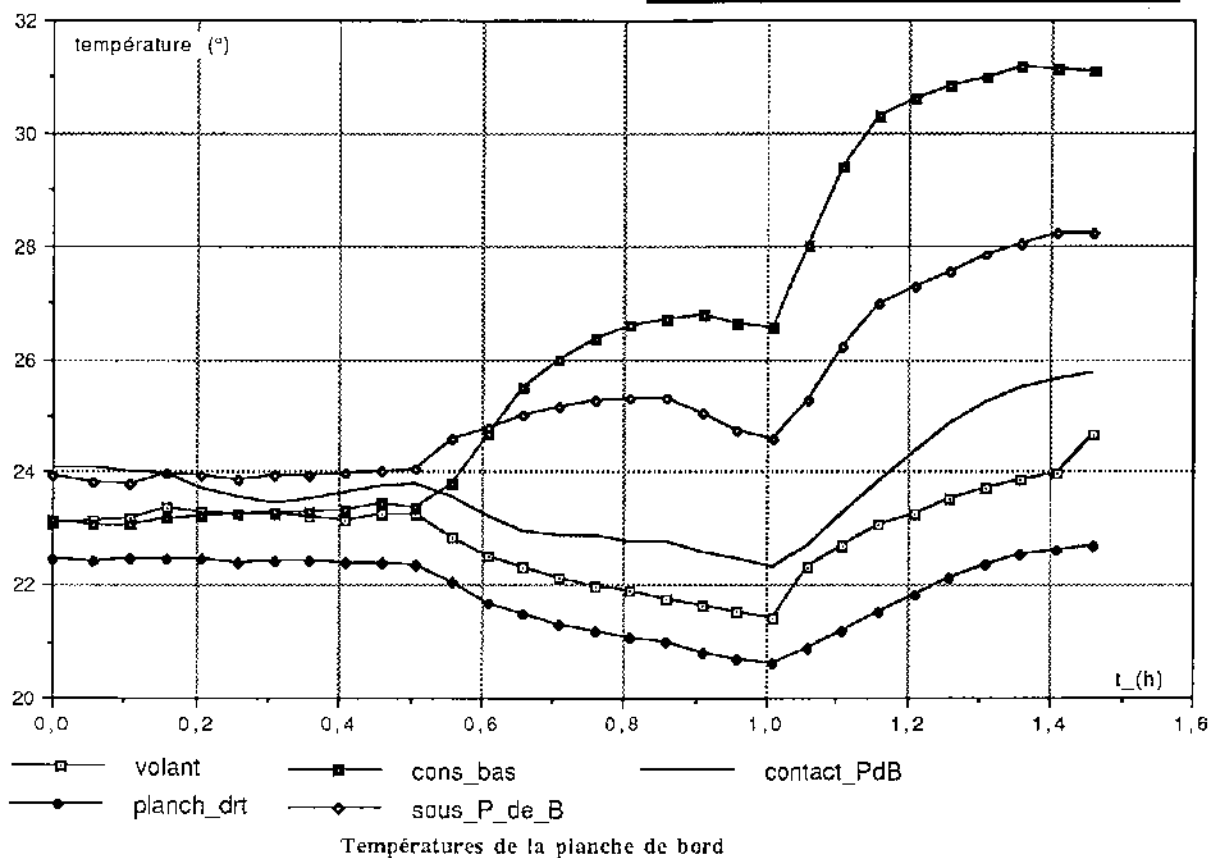
Températures du pavillon



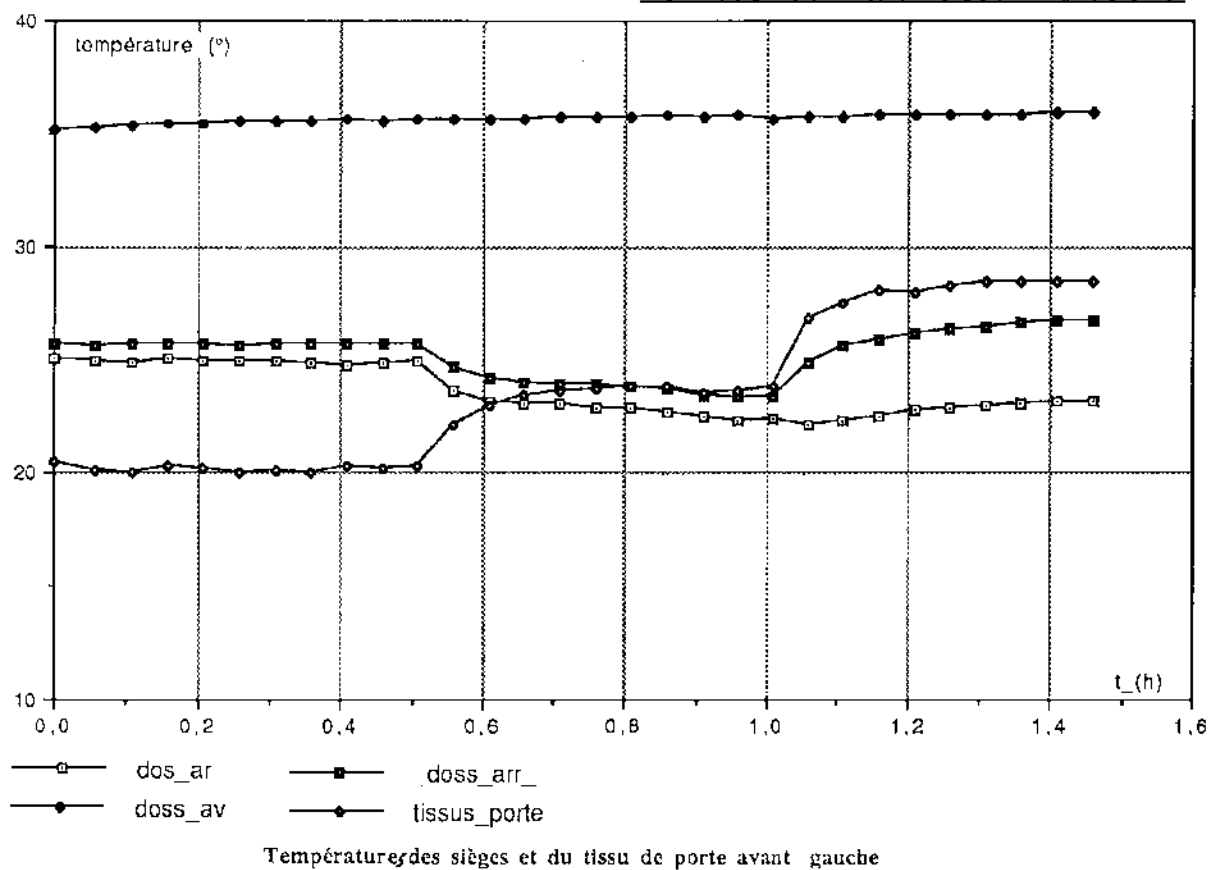
Températures des portes avant et du sol avant gauche

TEMPERATURES DE SURFACE

Données de "tab-Tbord ES1/OCT92"

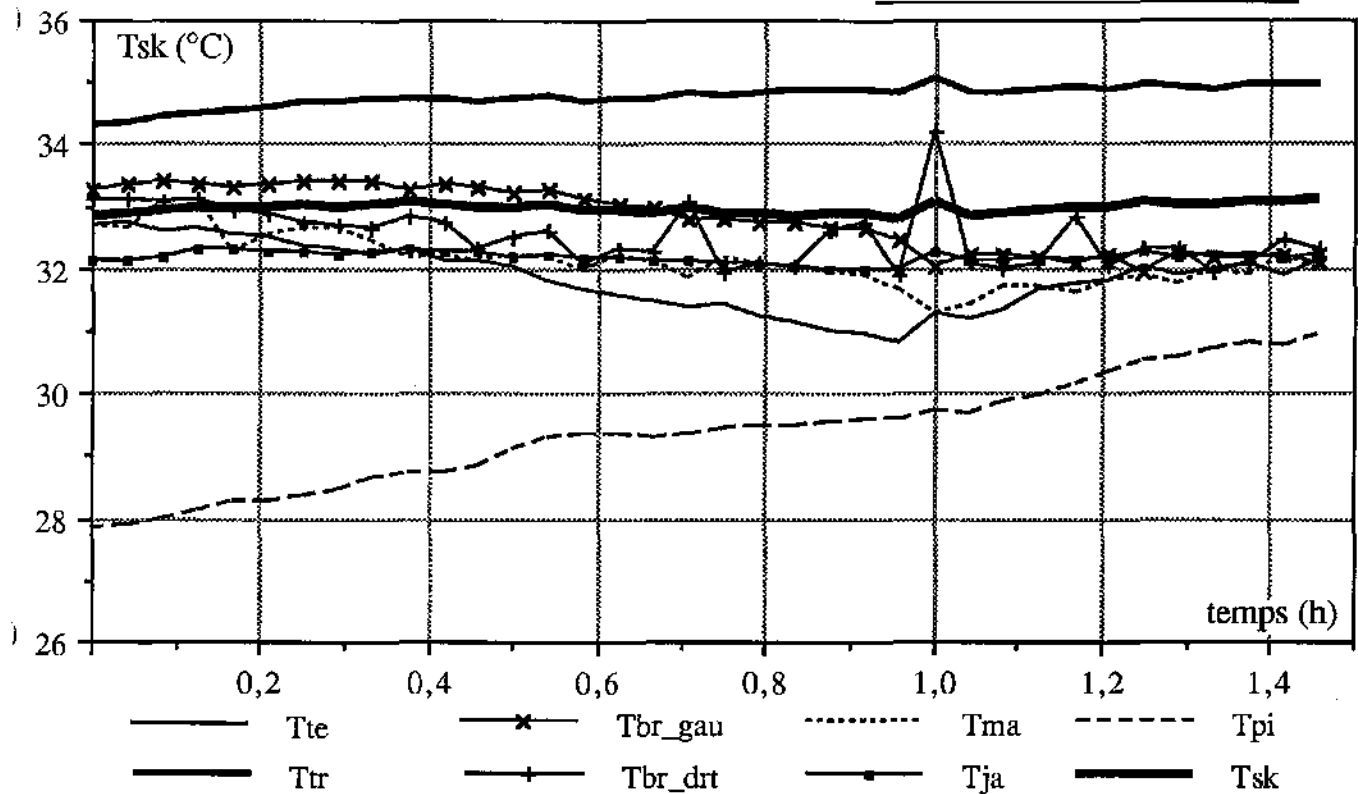


Données de "tab-Ttissu ES1/OCT92"

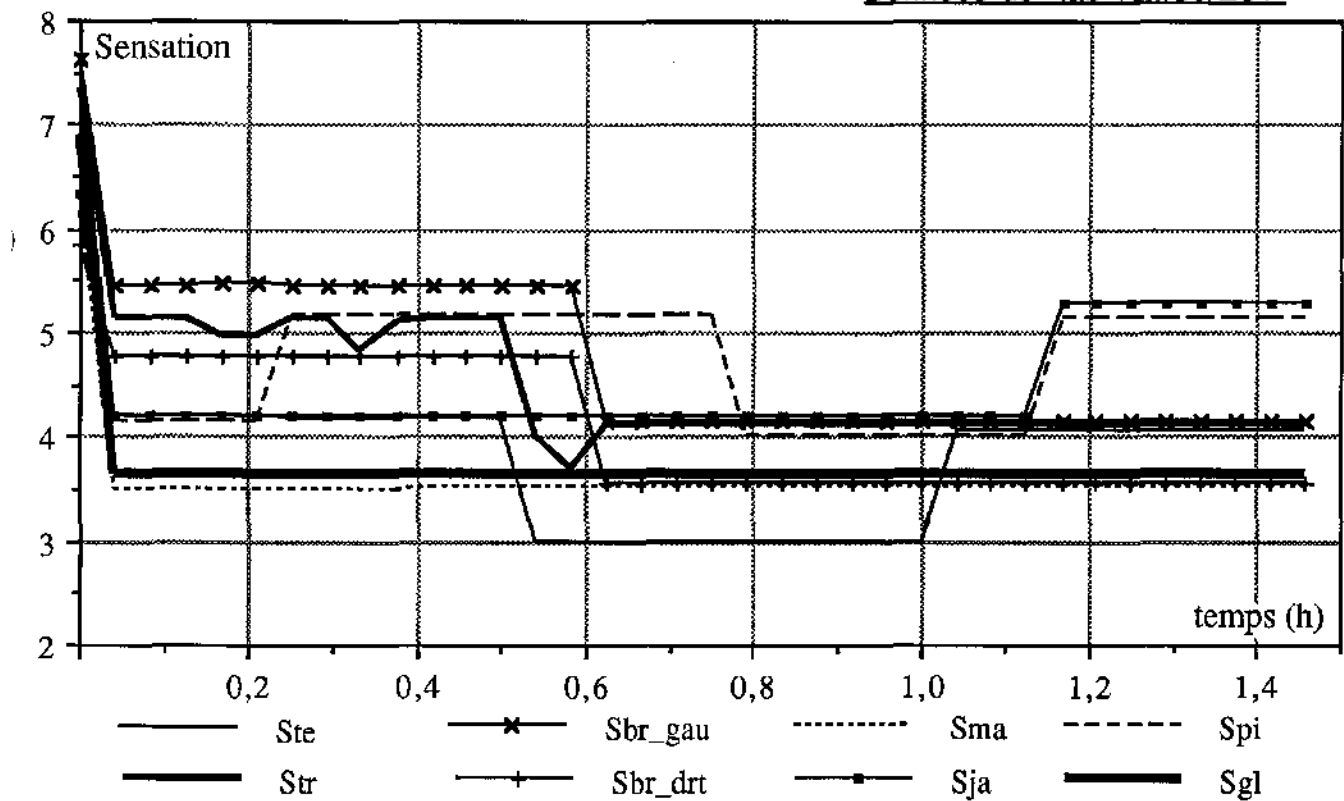


TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATION

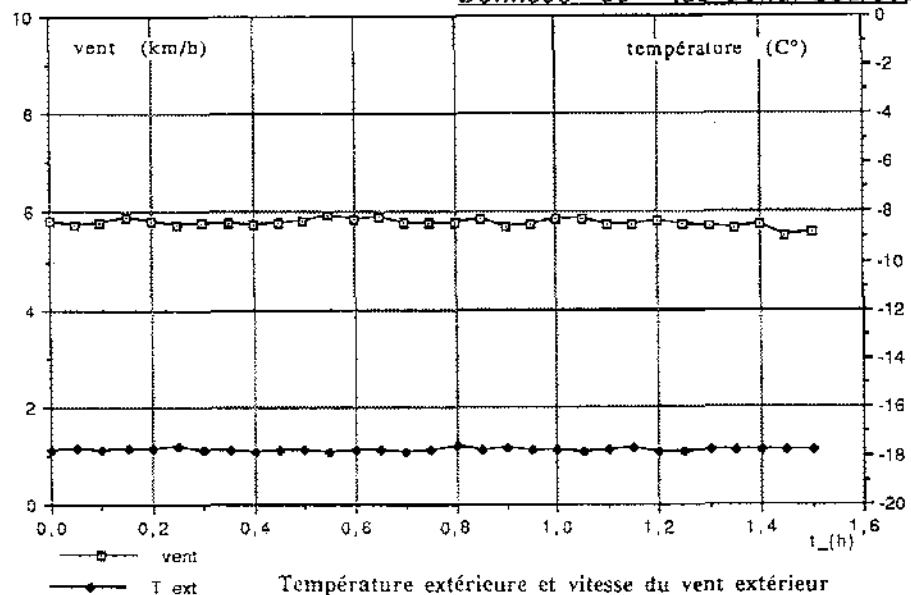
Données de "tab-Tsk.Se/ES1"



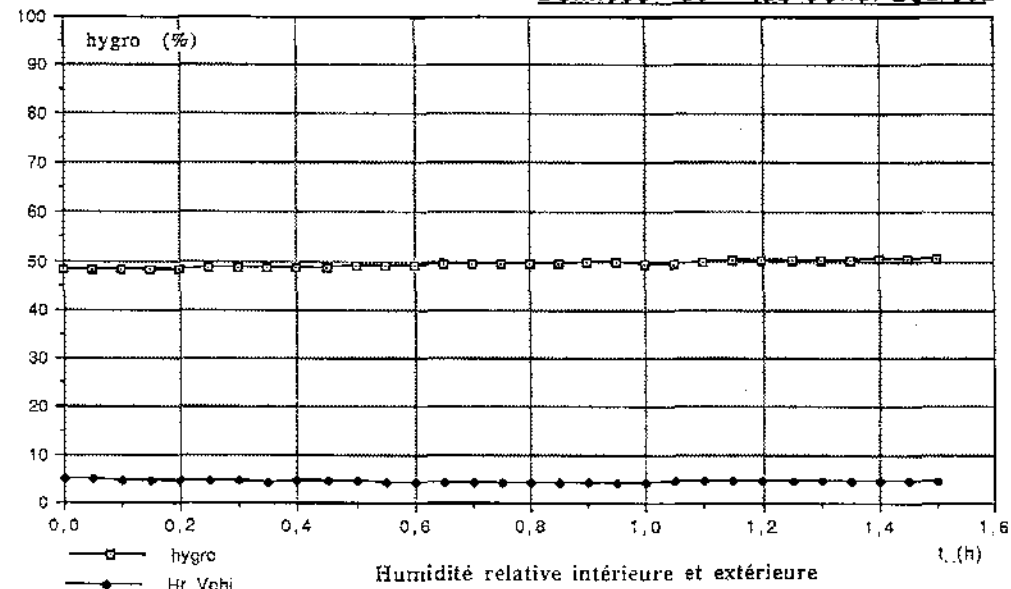
Données de "tab-Tsk.Se/ES1"



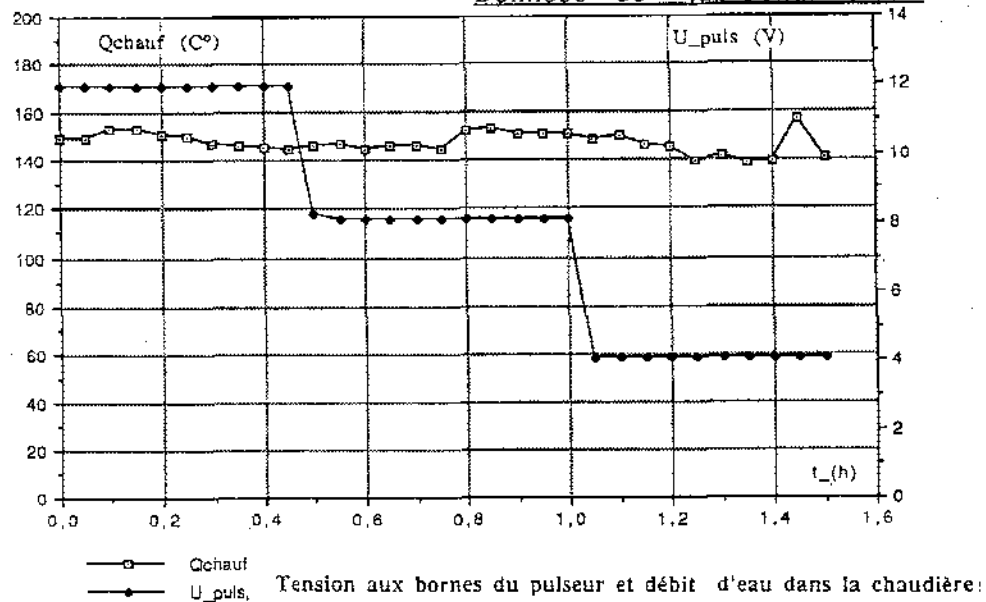
Données de "tab-Condi-ES2/o92"



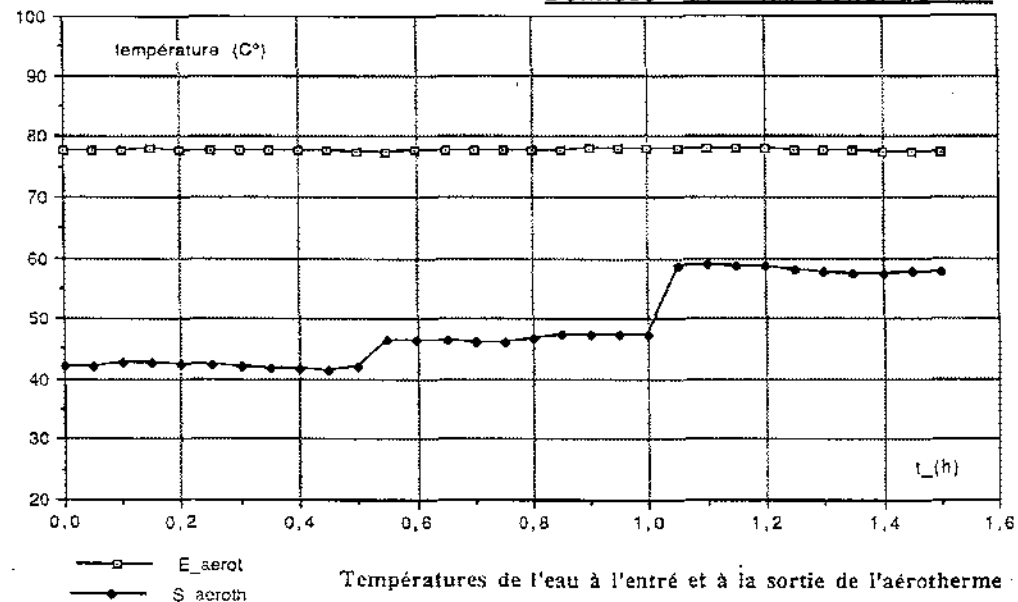
Données de "tab-Condi-ES2/o92"



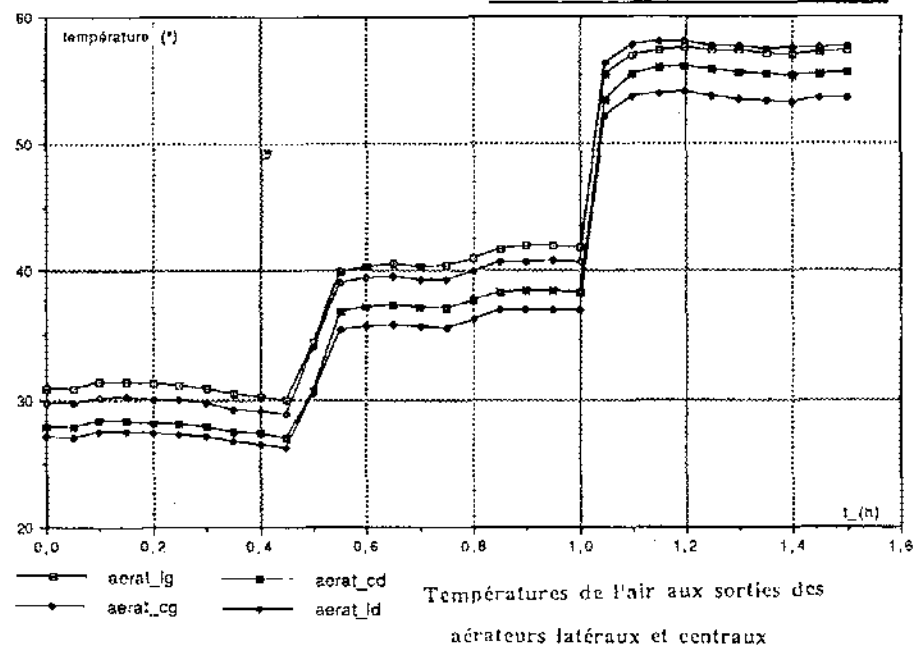
Données de "tab-Condi-ES2/o92"



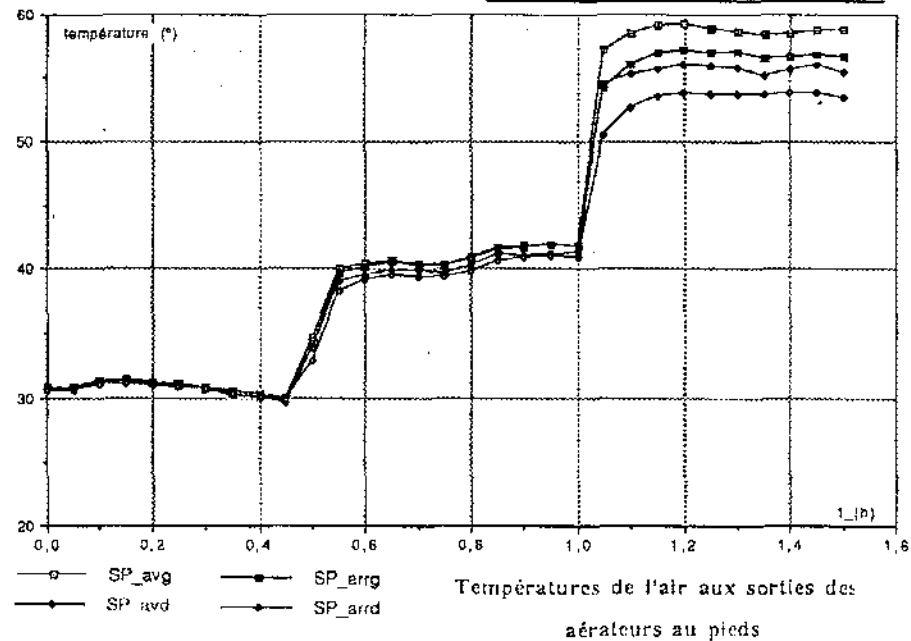
Données de "tab-Condi-ES2/o92"



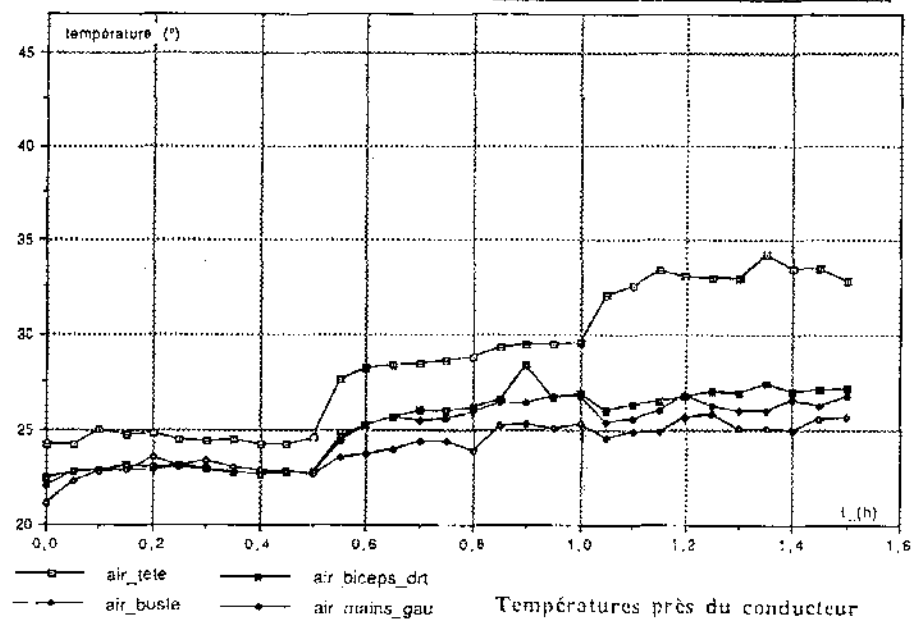
Données de "tab-TairV ES2/OCT92"



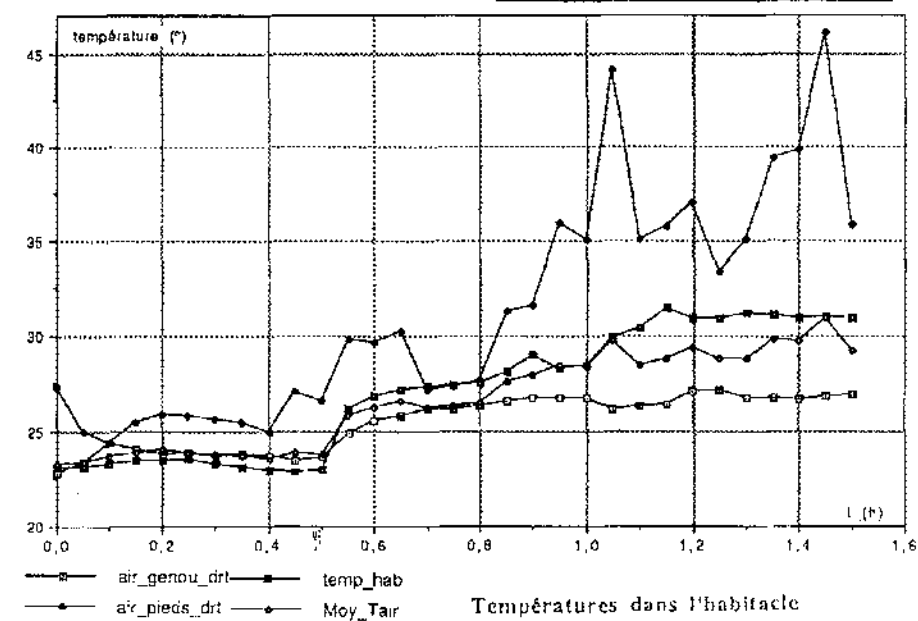
Données de "tab-TairV ES2/OCT92"



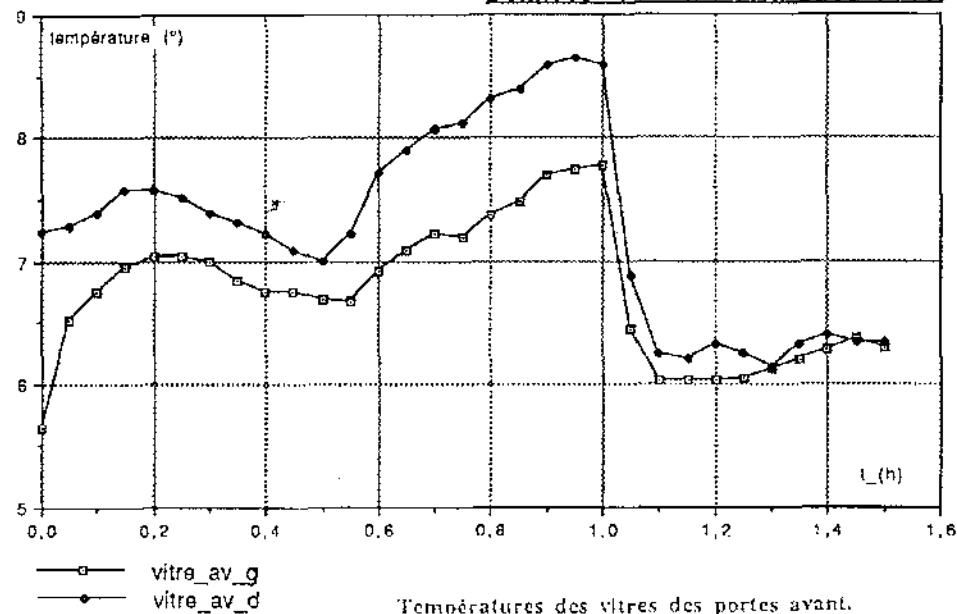
Données de "tab-TairH ES2/OCT92"



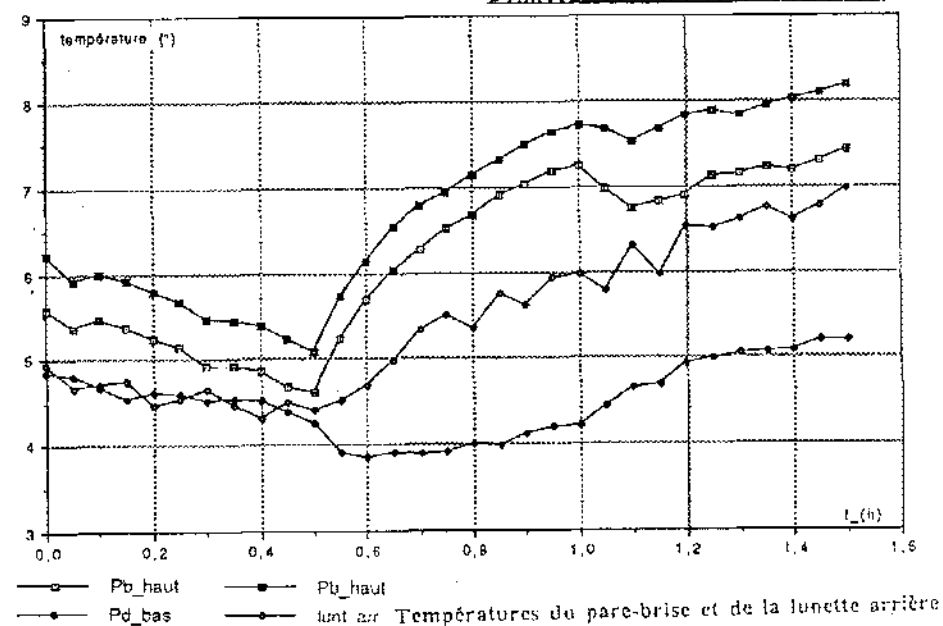
Données de "tab-TairH ES2/OCT92"



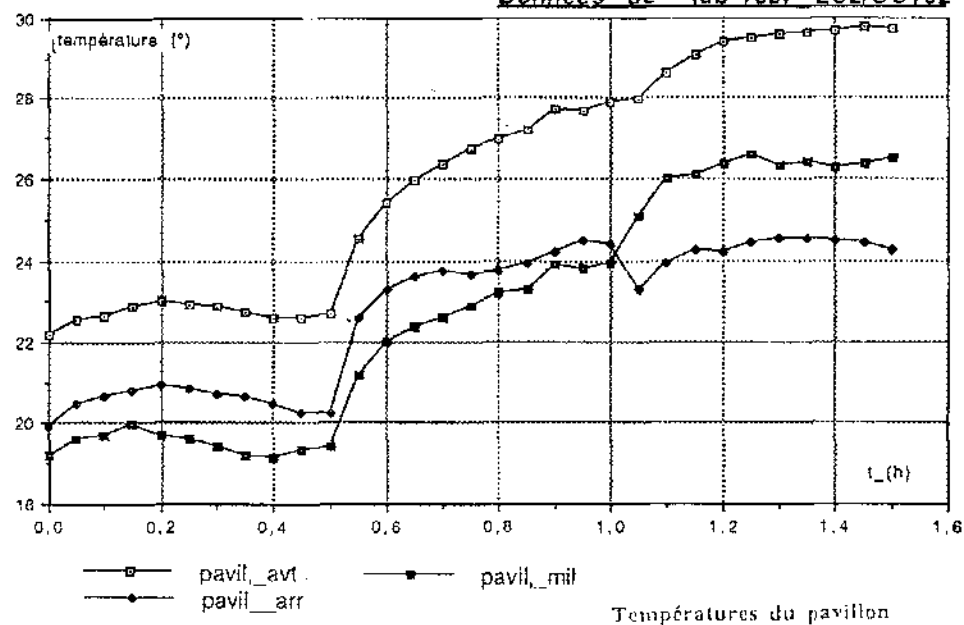
Données de "tab-Tvlr ES2/OCT92"



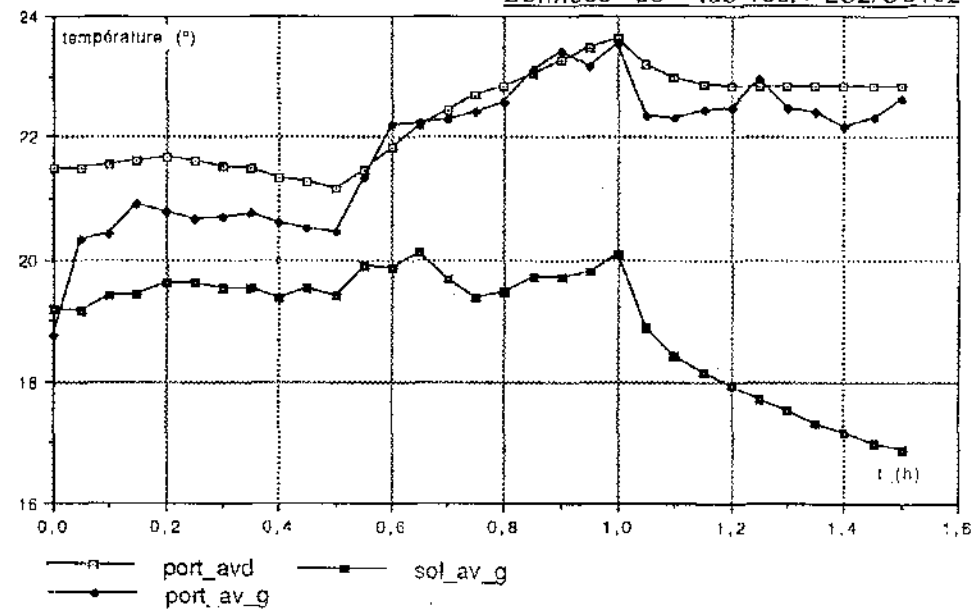
Données de "tab-Tvlr ES2/OCT92"



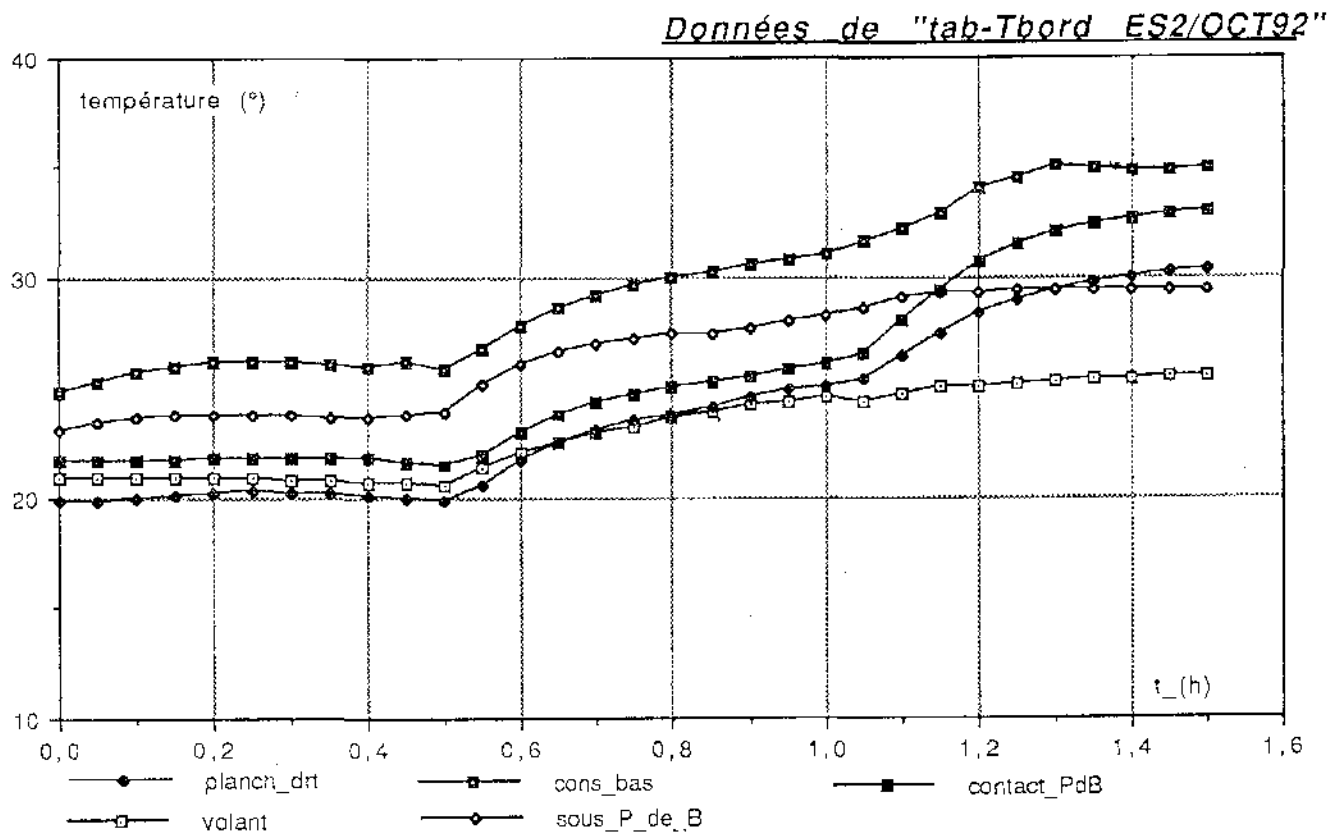
Données de "tab-Tcar ES2/OCT92"



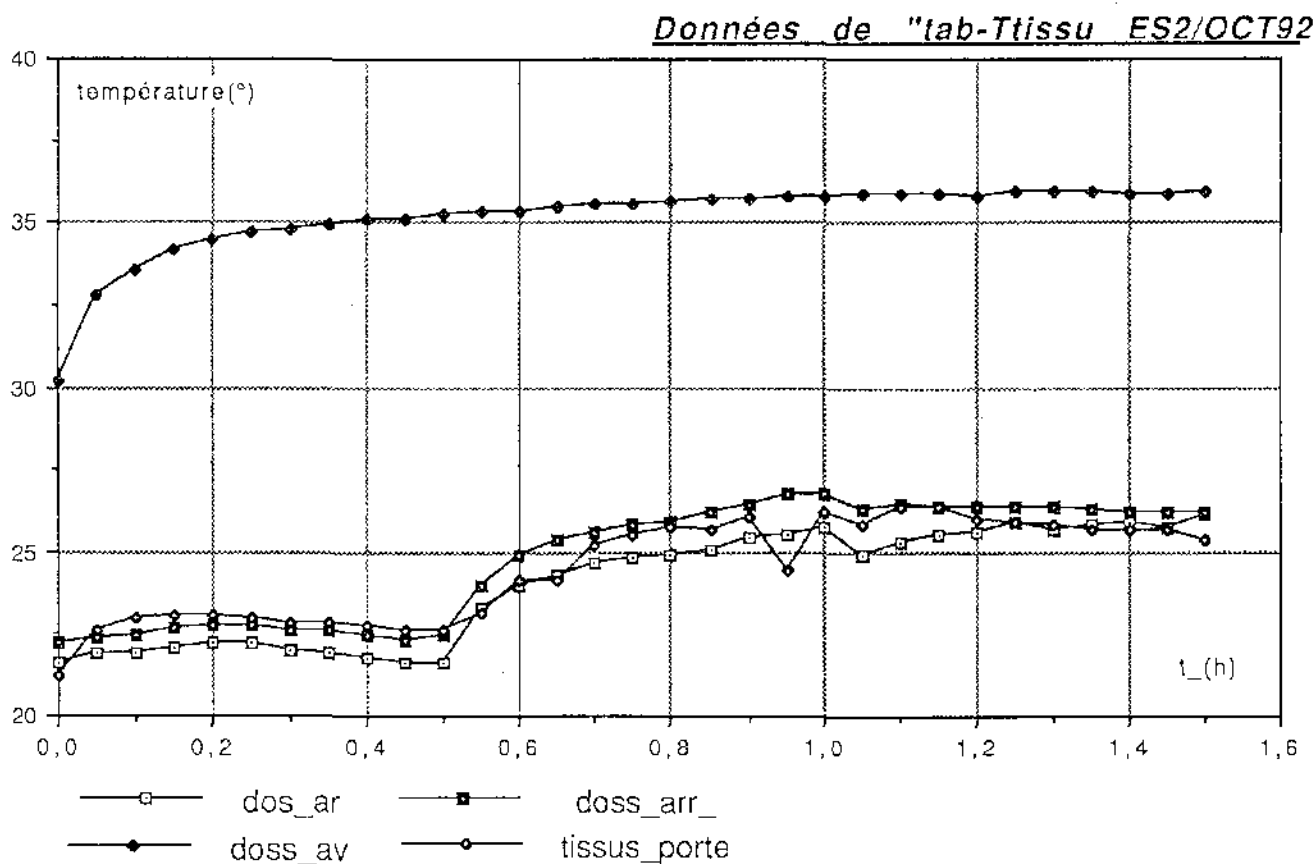
Données de "tab-Tcar ES2/OCT92"



TEMPERATURES DE SURFACE



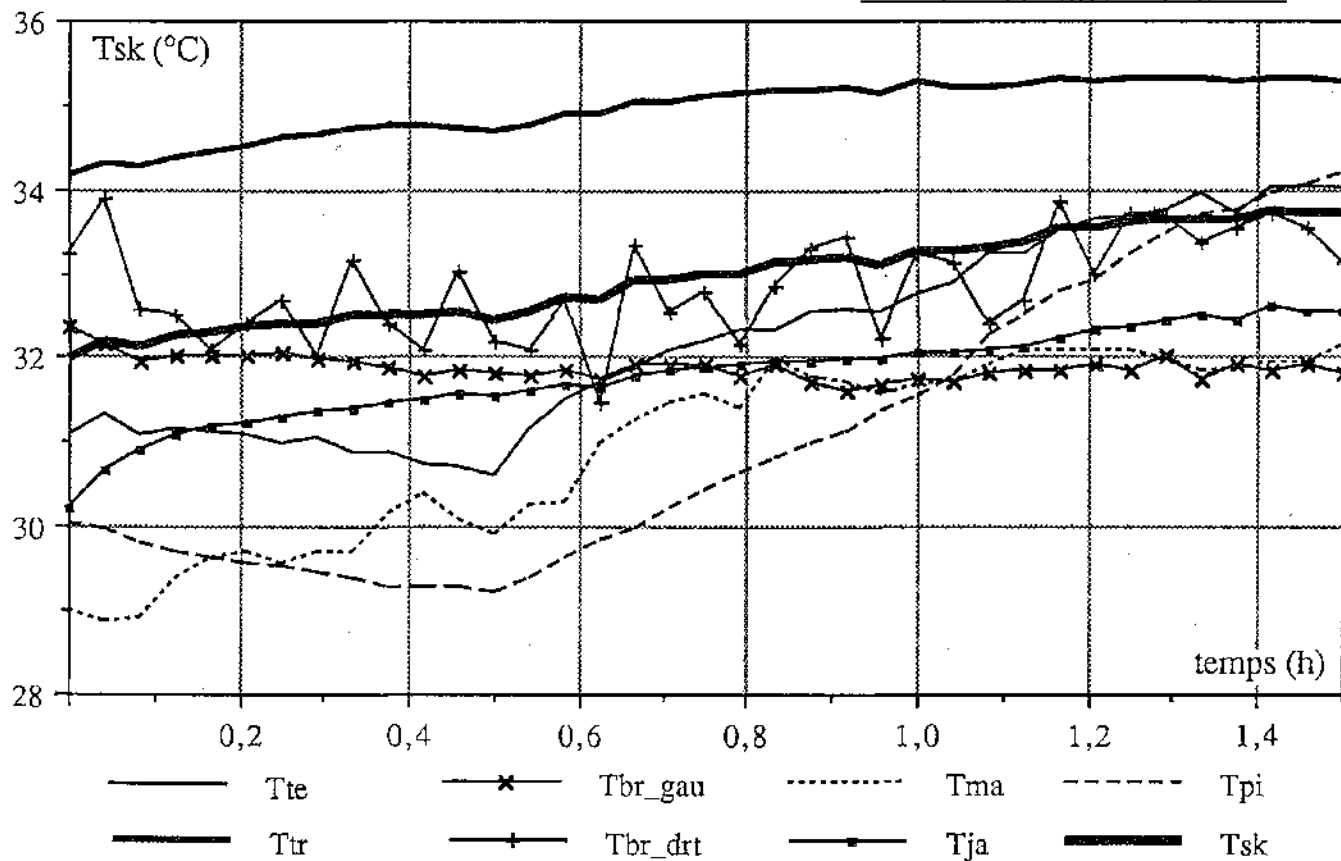
Températures de la planche de bord



Température des sièges et du tissu de porte avant gauche

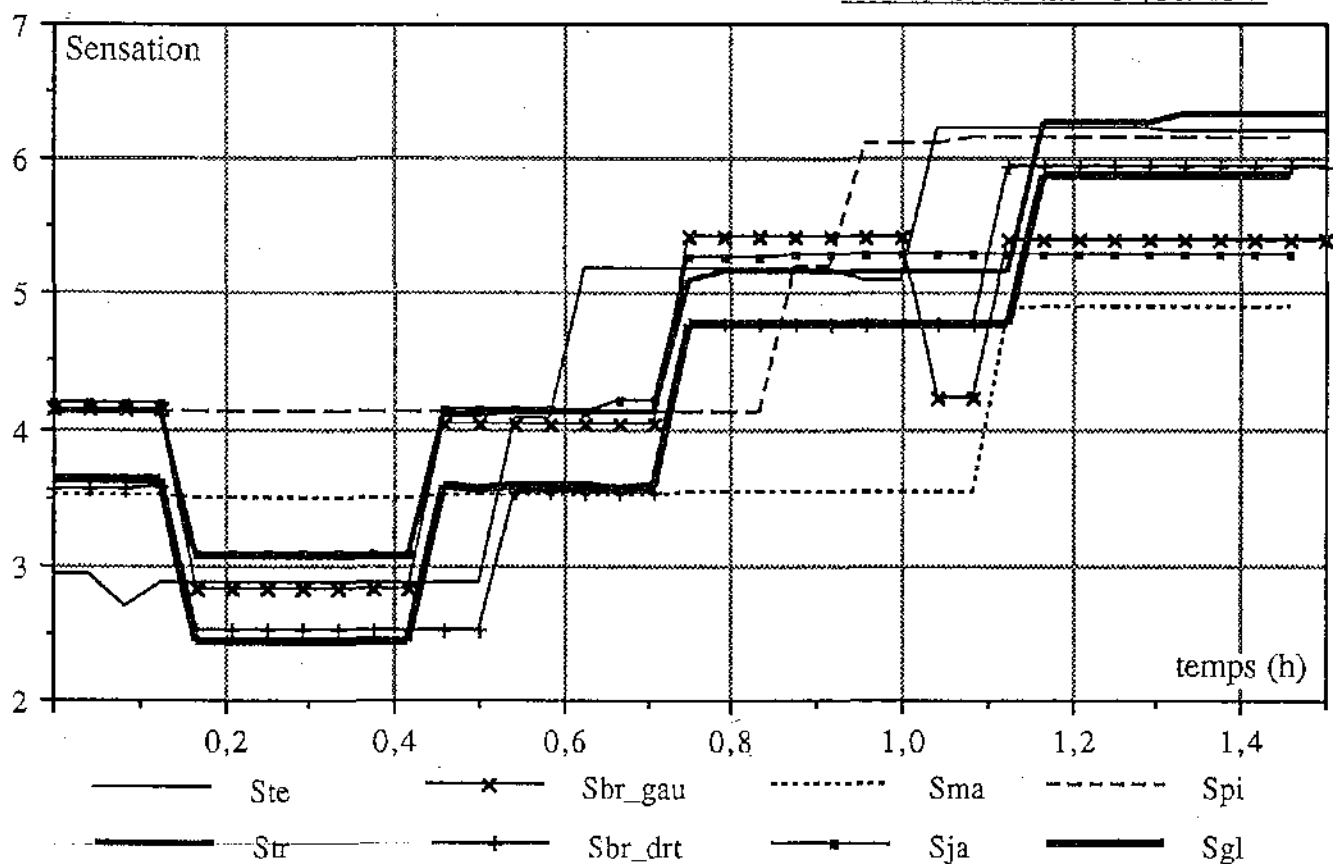
TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATION

Données de "tab-Tsk,Se/ES2"



Températures cutanées locales plus cutanée moyenne

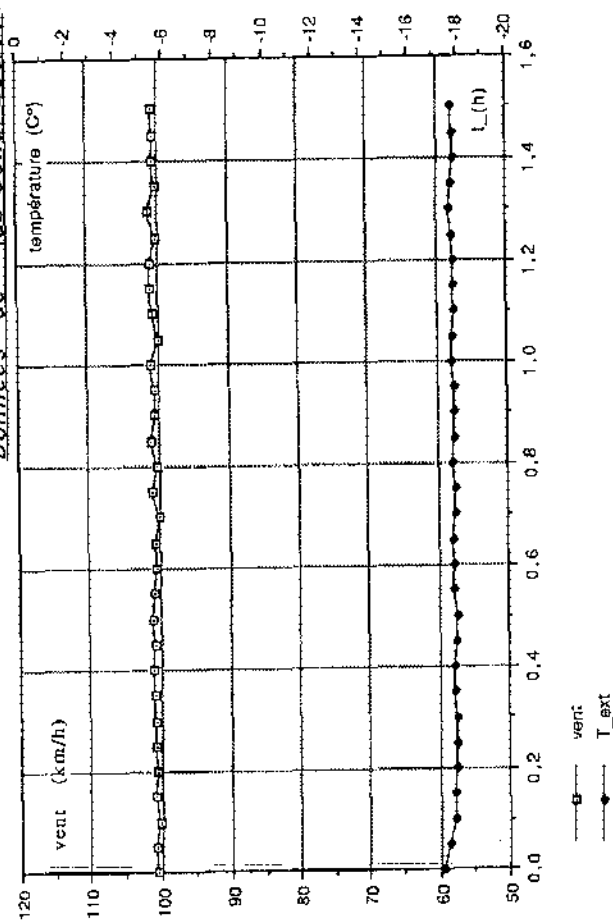
Données de "tab-Tsk,Se/ES2"



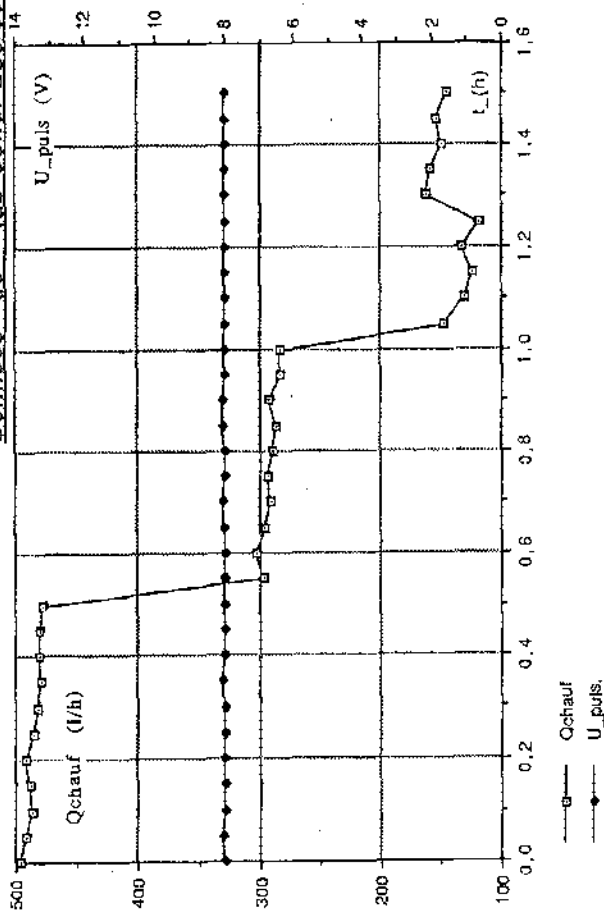
Sensations thermiques locales plus la Globale

CONDITIONS DE L'ESSAI

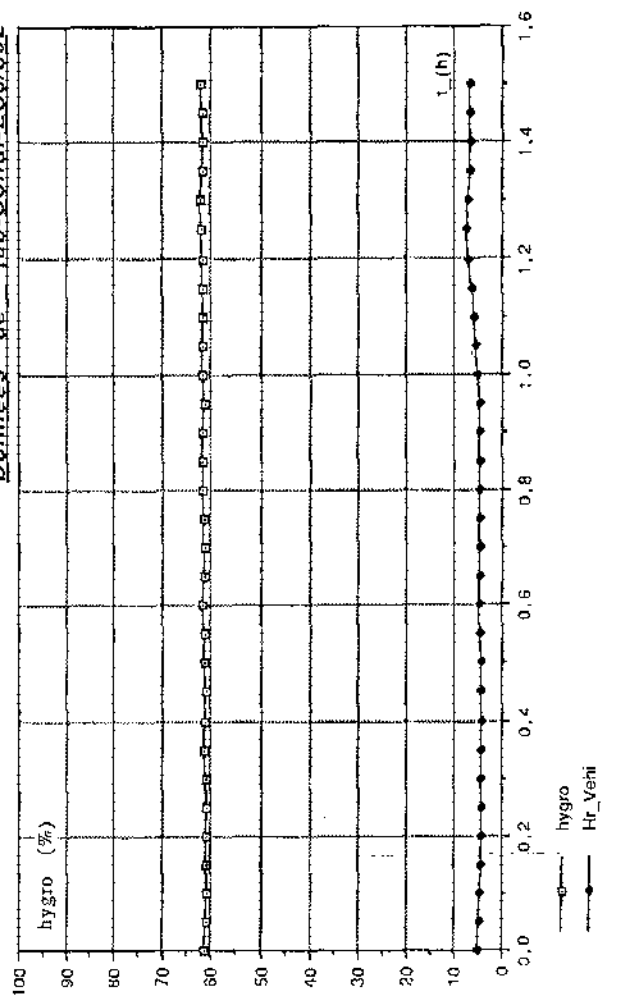
Données de "tab-Cond-ES3/092"



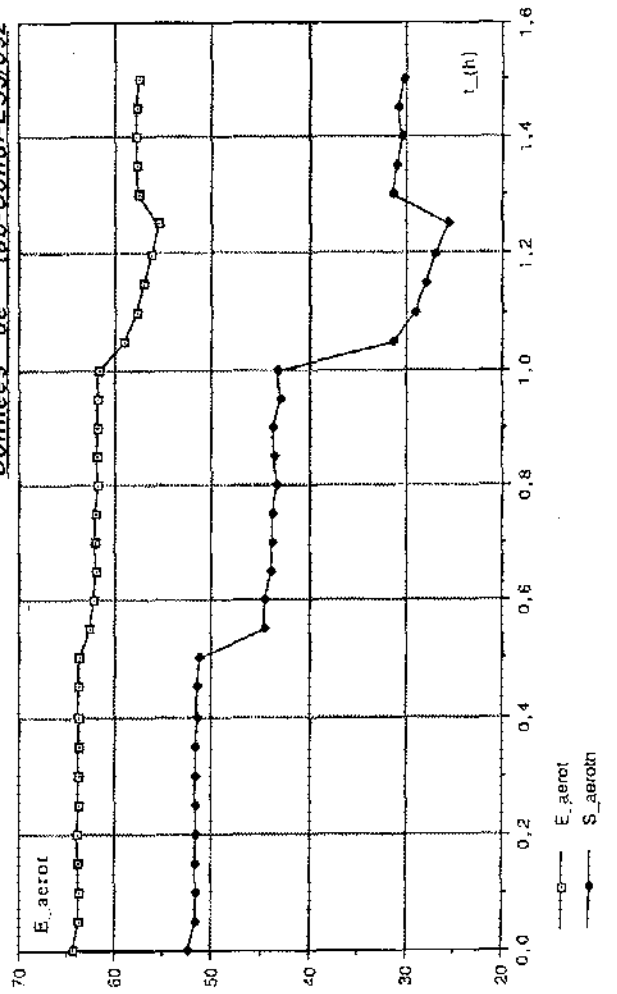
Données de "tab-Cond-ES3/092"



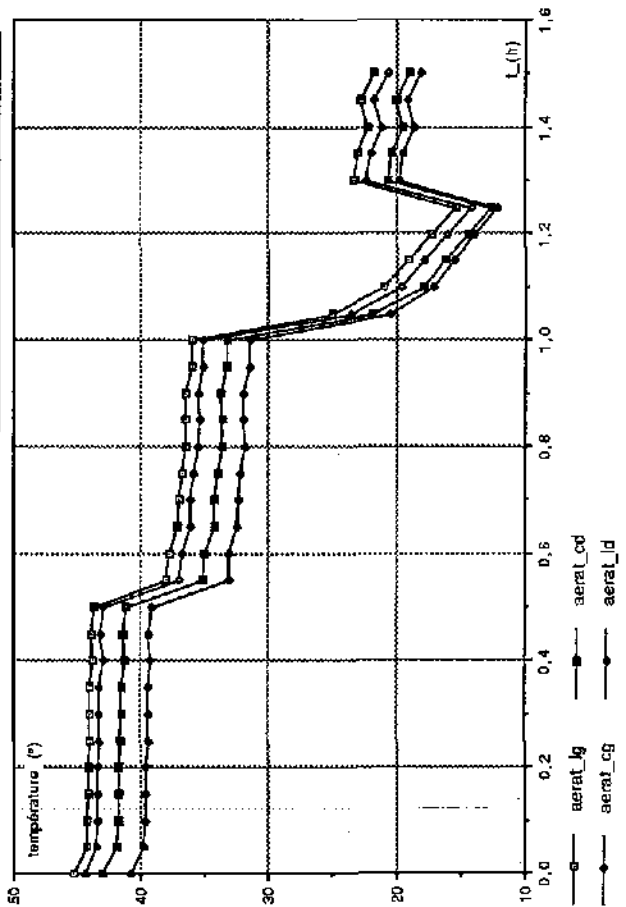
Données de "tab-Cond-ES3/092"



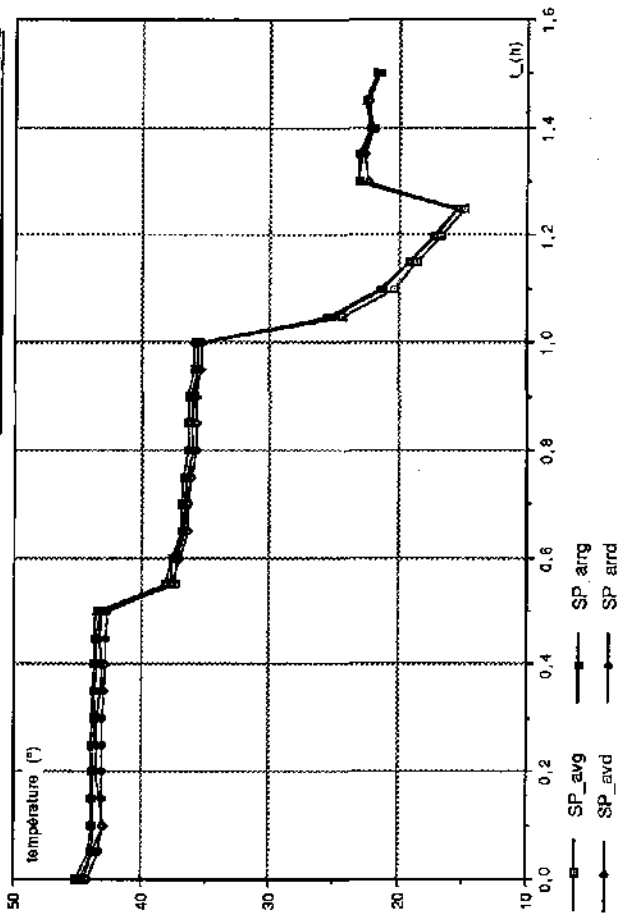
Données de "tab-Cond-ES3/092"



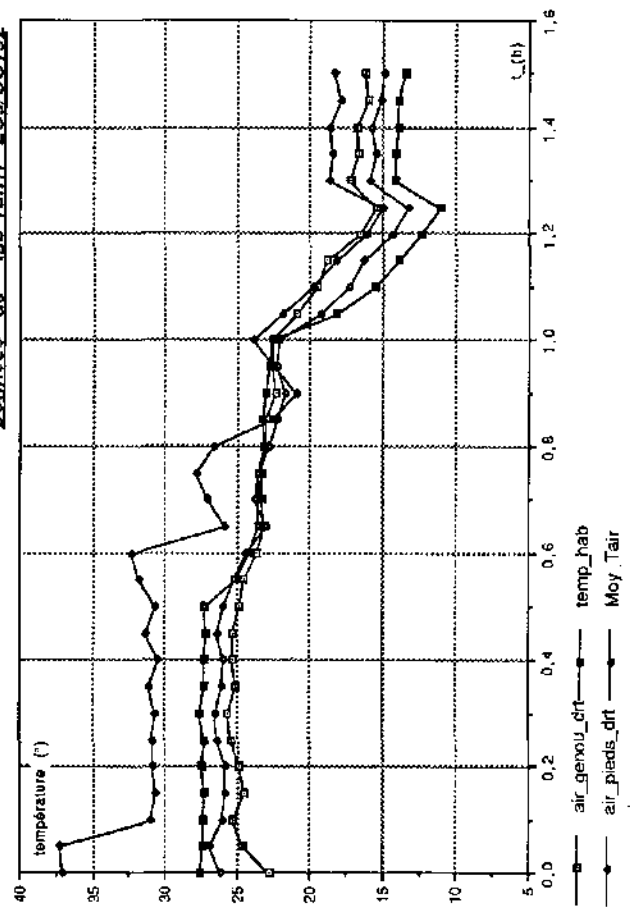
Données de "lab-TairV ES3/OCT92"



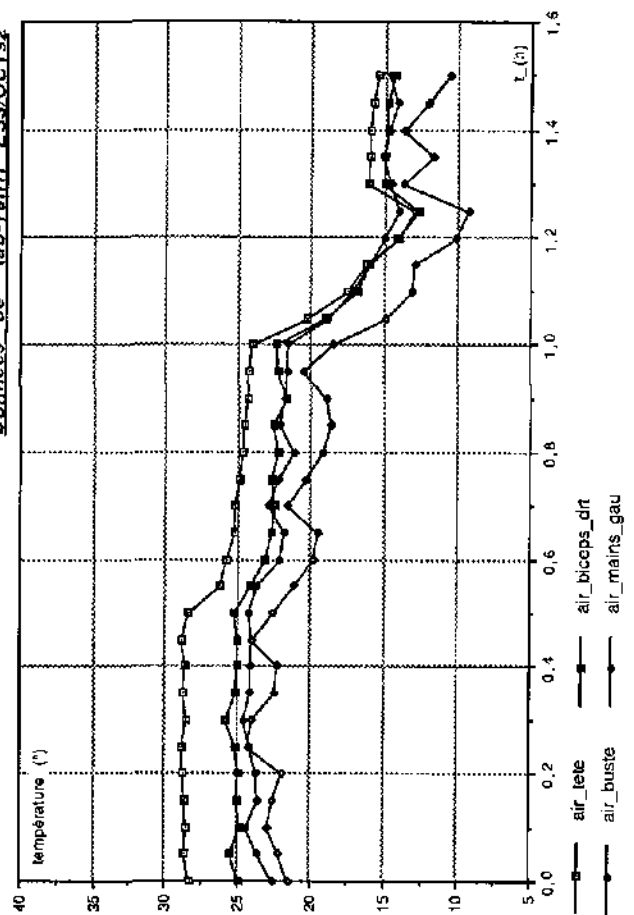
Données de "lab-TairV ES3/OCT92"



Données de "lab-TairH ES3/OCT92"

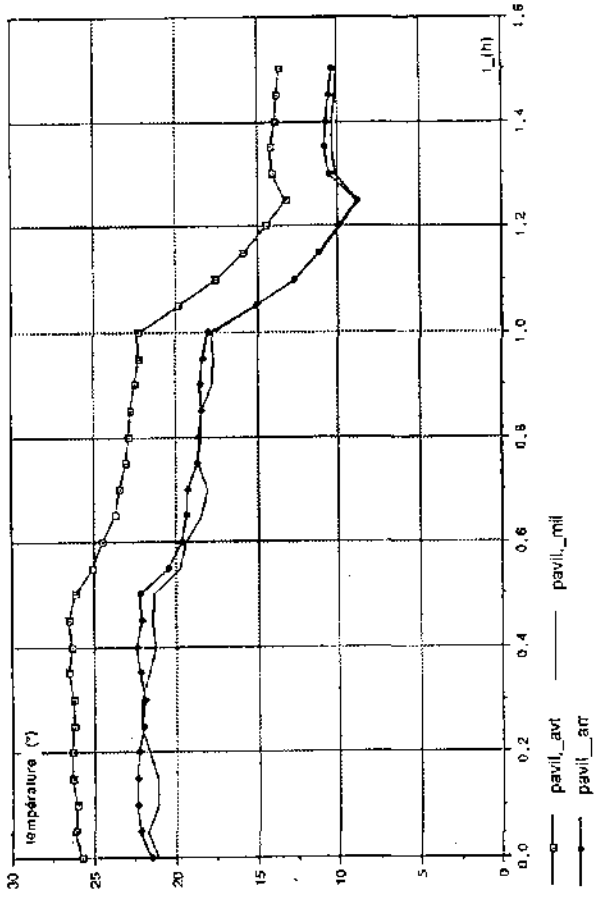


Données de "lab-TairH ES3/OCT92"

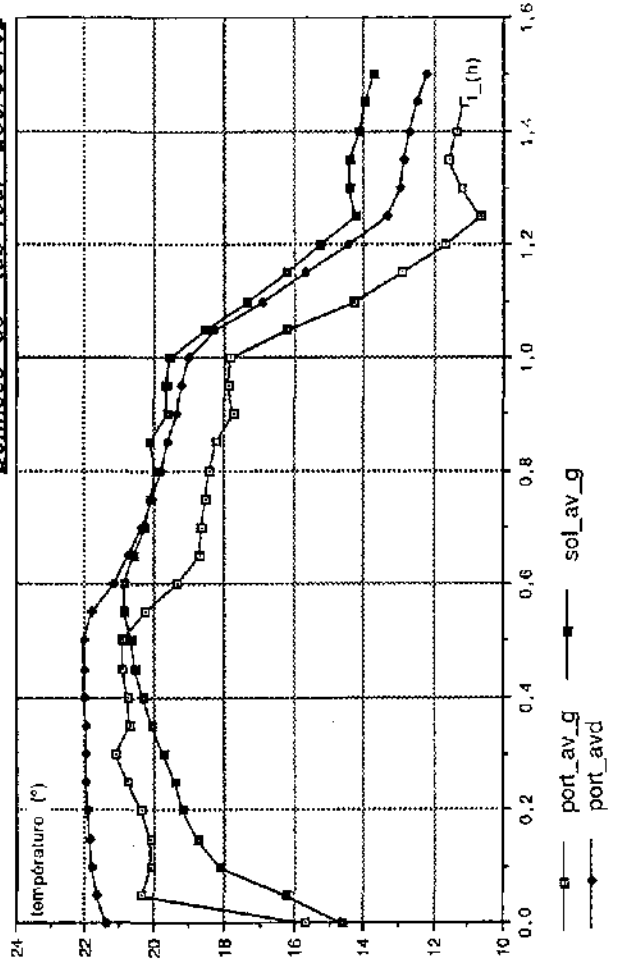


TEMPERATURES DE SURFACE

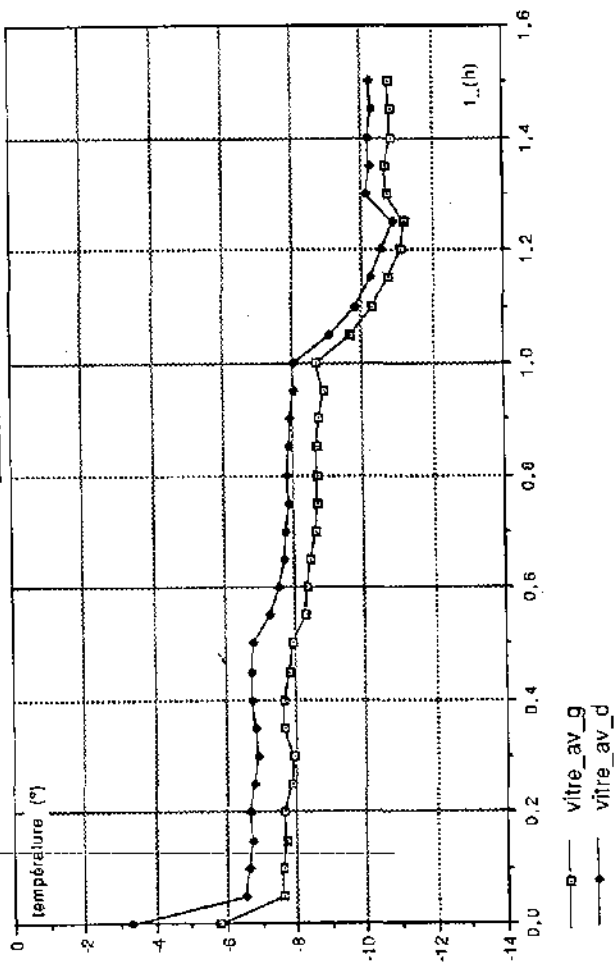
Données de "lab-Icar ES3/OCT92"



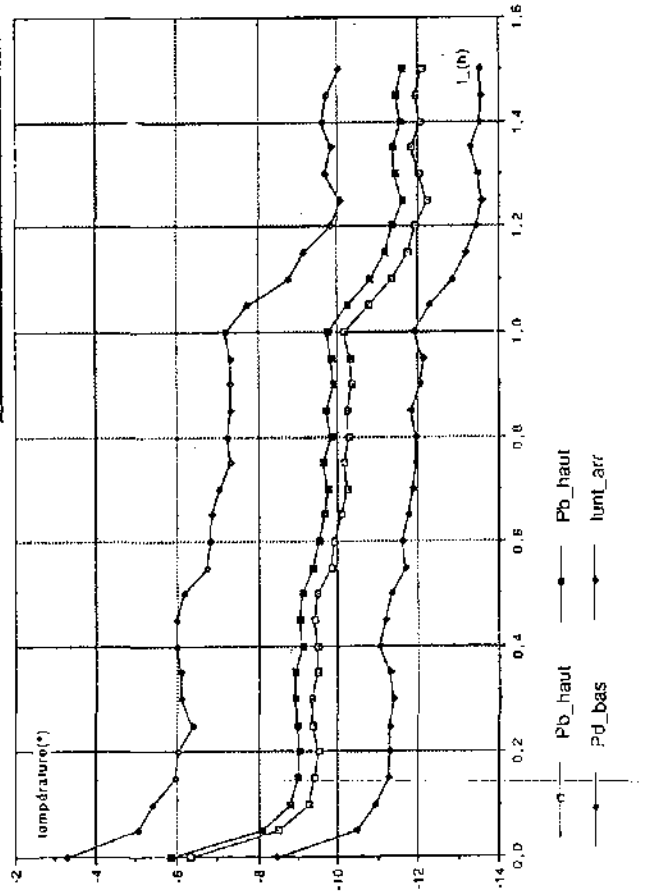
Données de "lab-Icar ES3/OCT92"



Données de "lab-Tvitr ES3/OCT92"

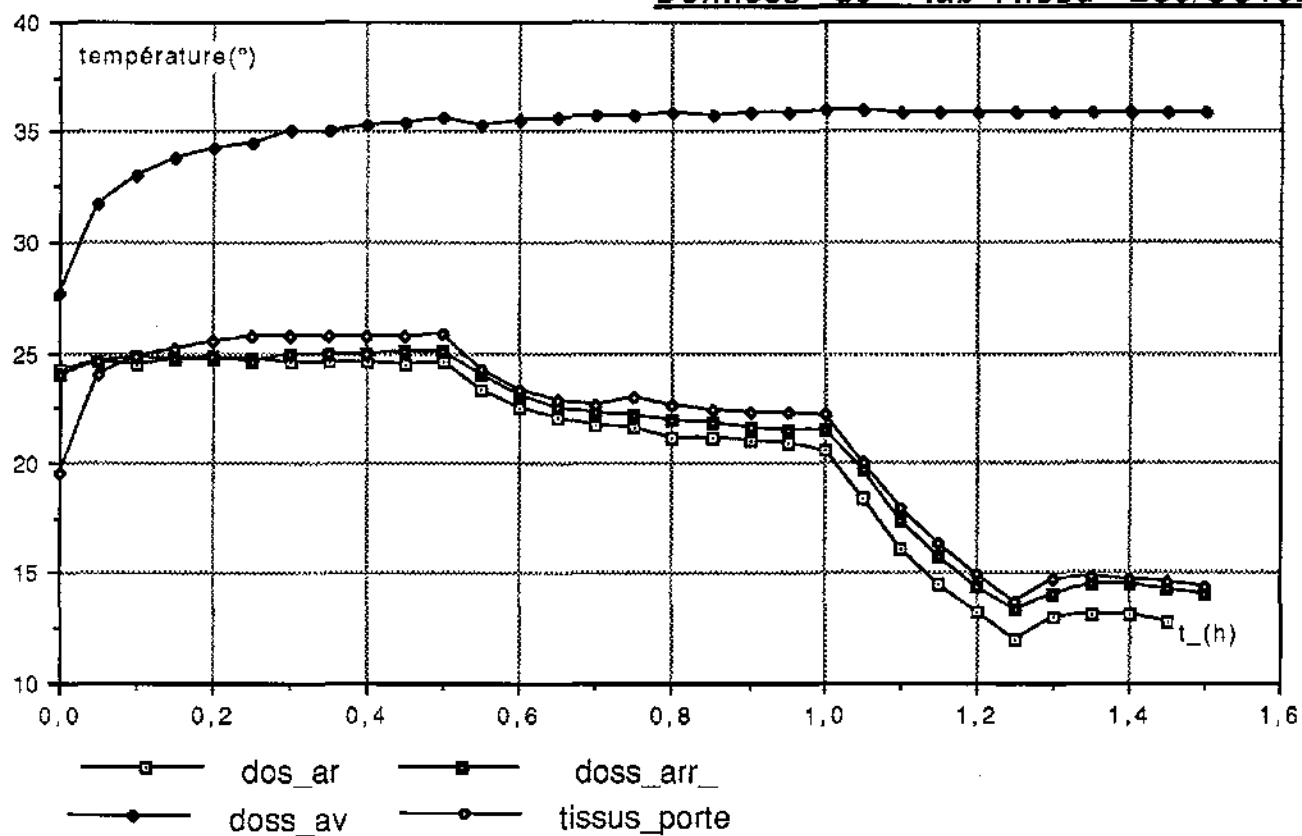


Données de "lab-Tvitr ES3/OCT92"

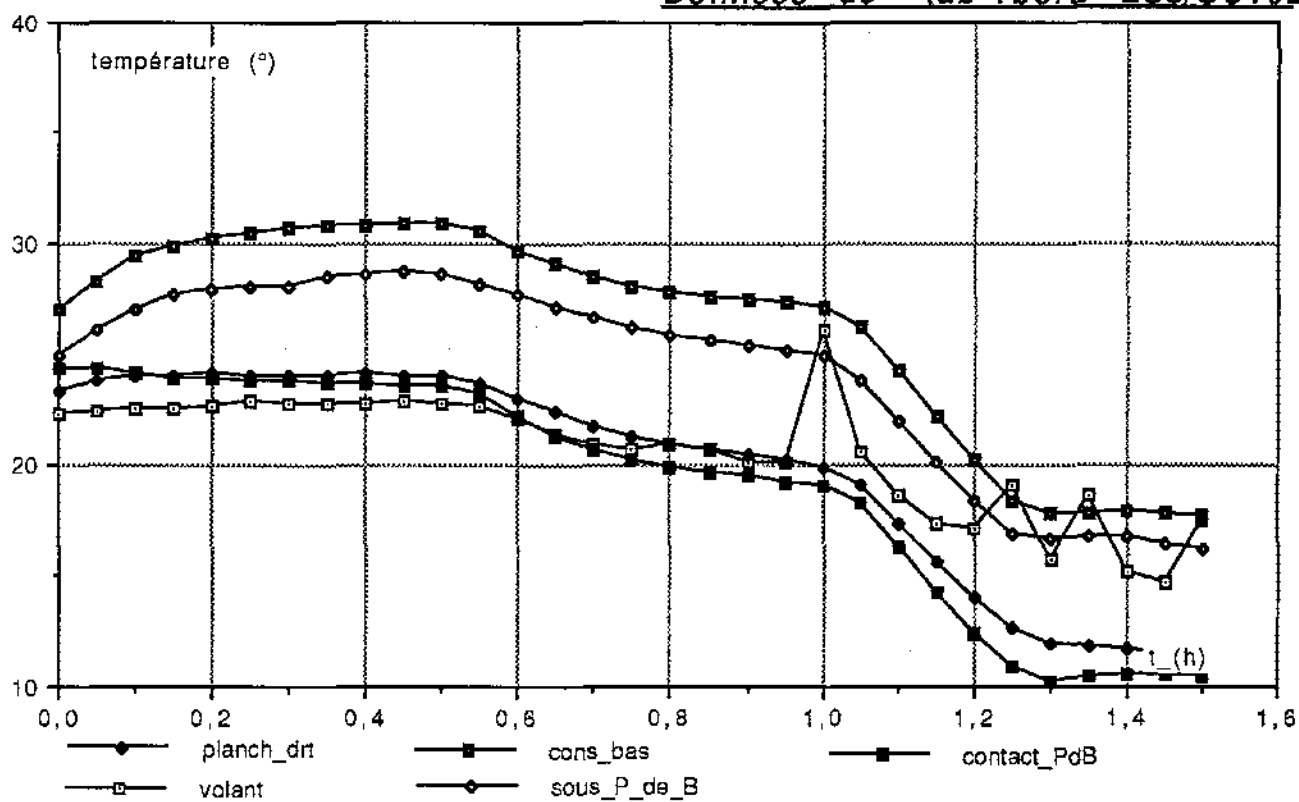


TEMPERATURES DE SURFACE

Données de "tab-Ttissu ES3/OCT92"

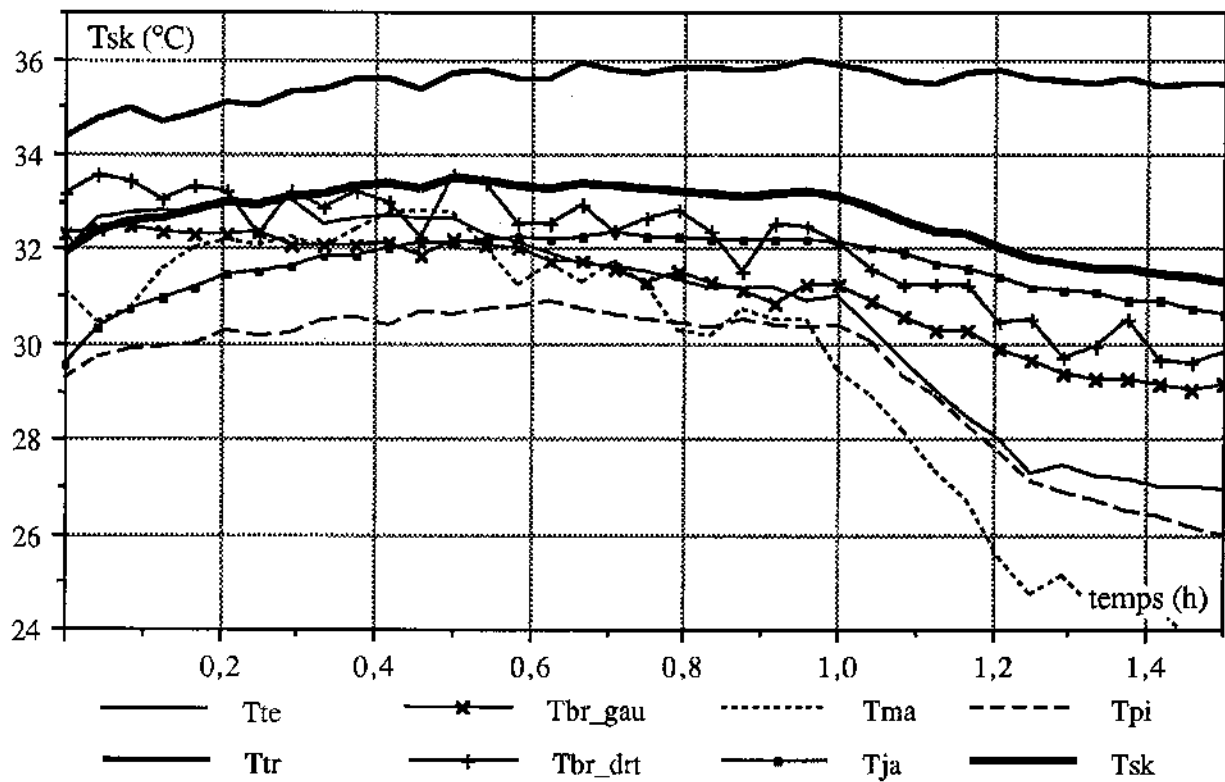


Données de "tab-Tbord ES3/OCT92"



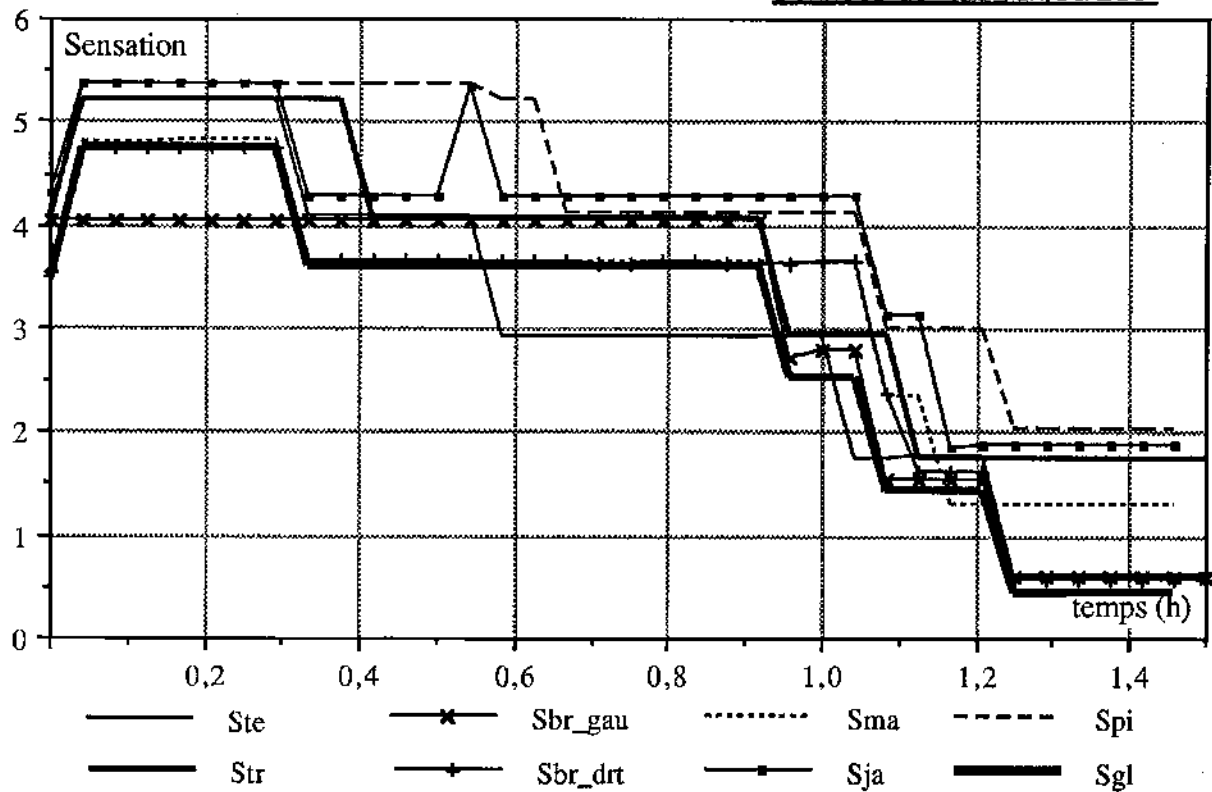
TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATION

Données de "tab-Tsk,Se/ES3"

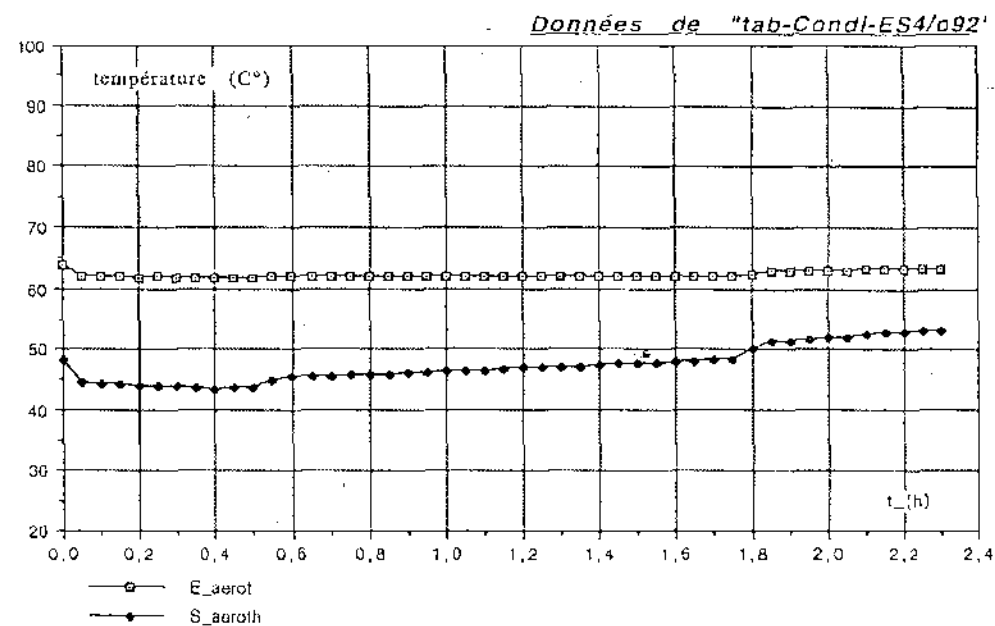
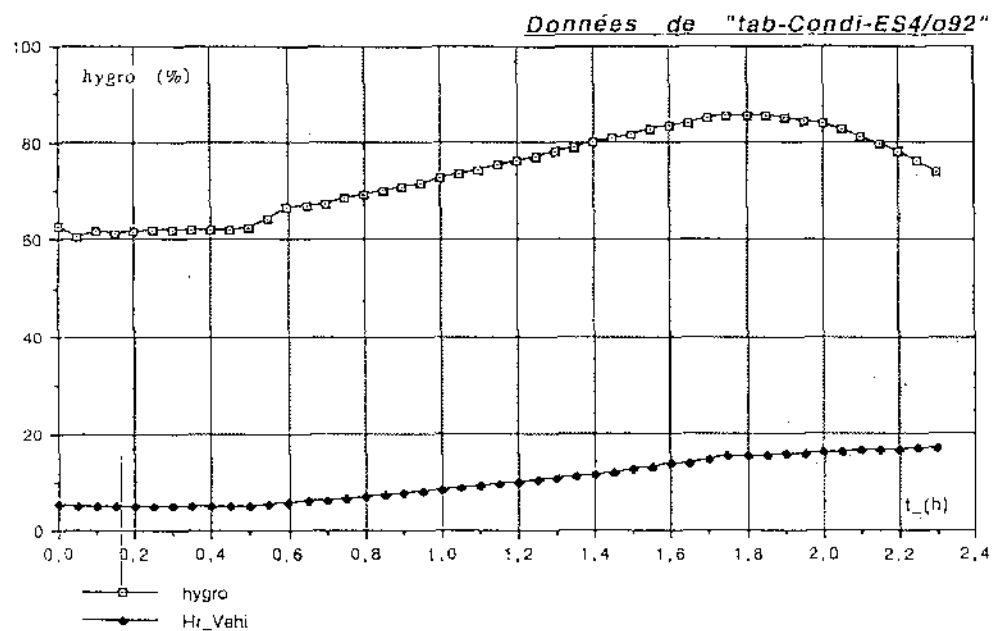
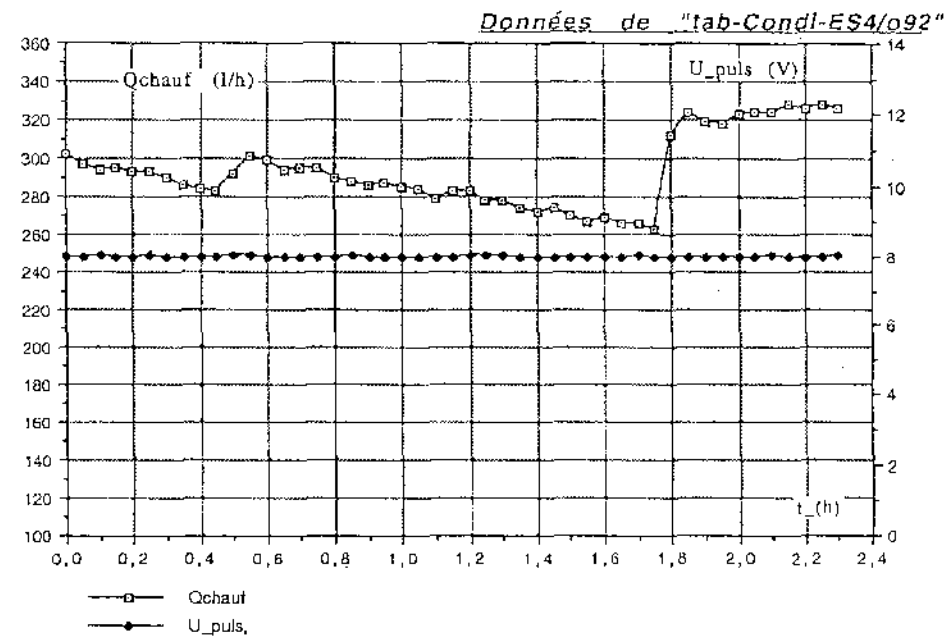
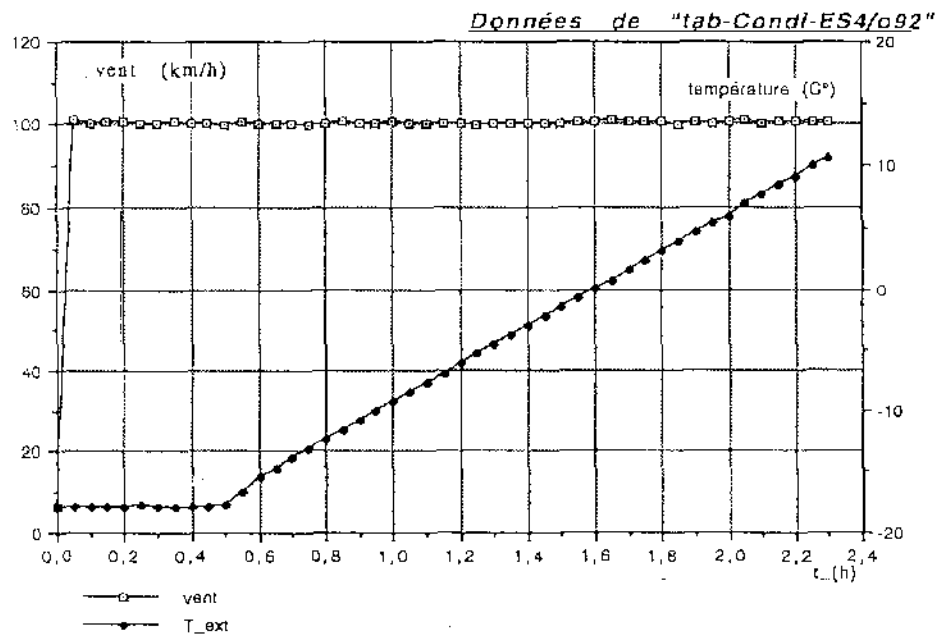


Températures cutanées locales plus cutanée moyenne

Données de "tab-Tsk,Se/ES3"

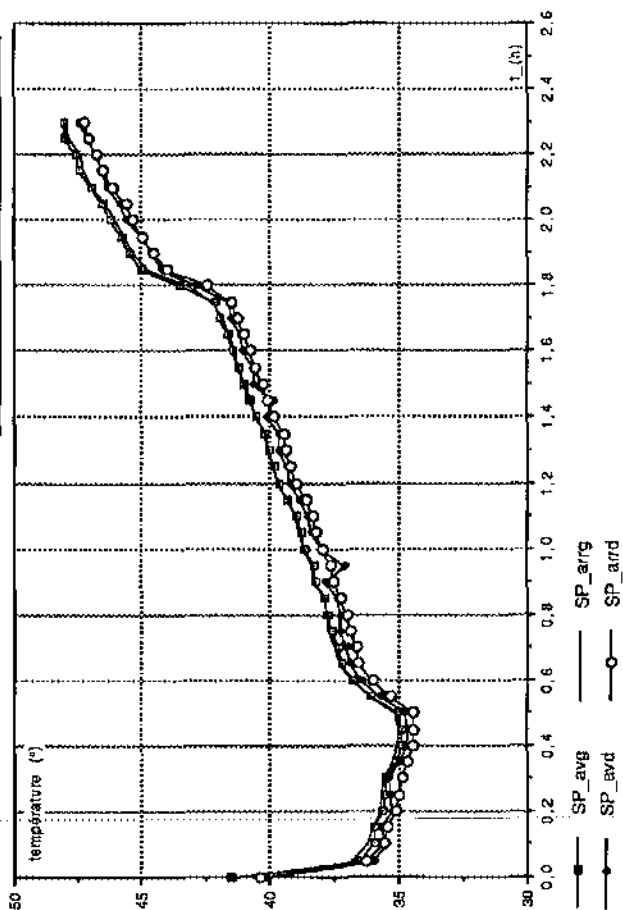


Sensations thermiques locales plus la Globale

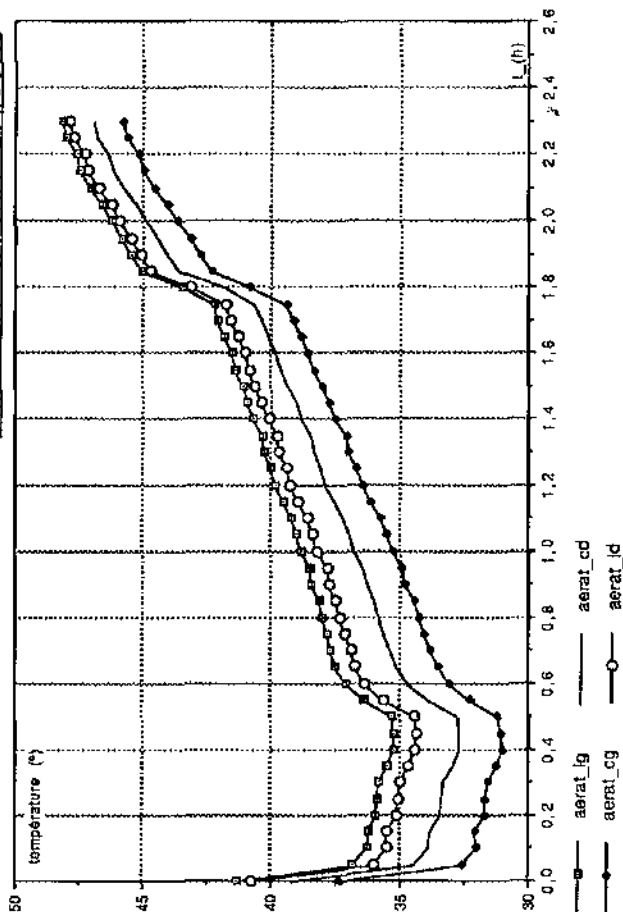


TEMPERATURES D'AIR

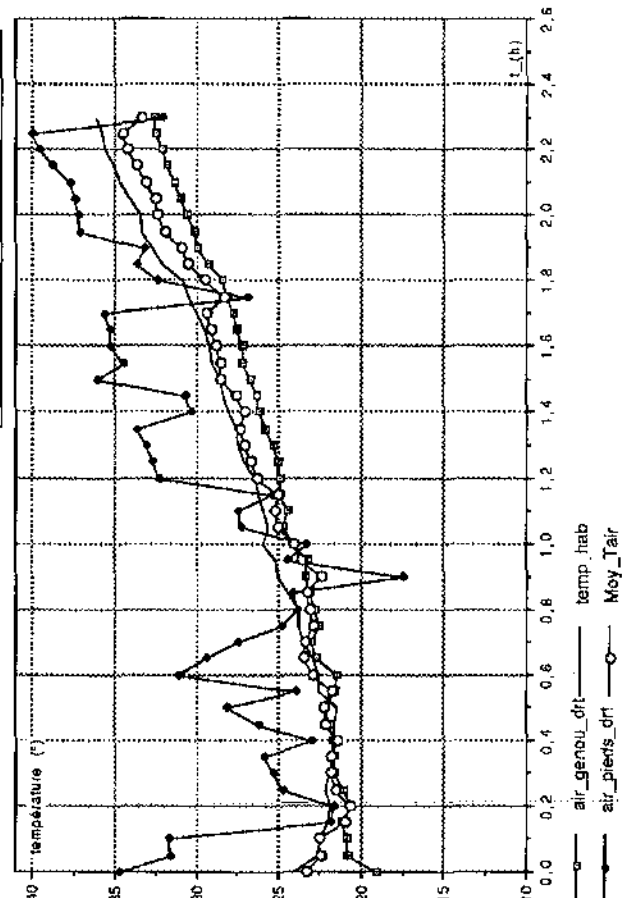
Données de "tab-TairV ES4/OCT92"



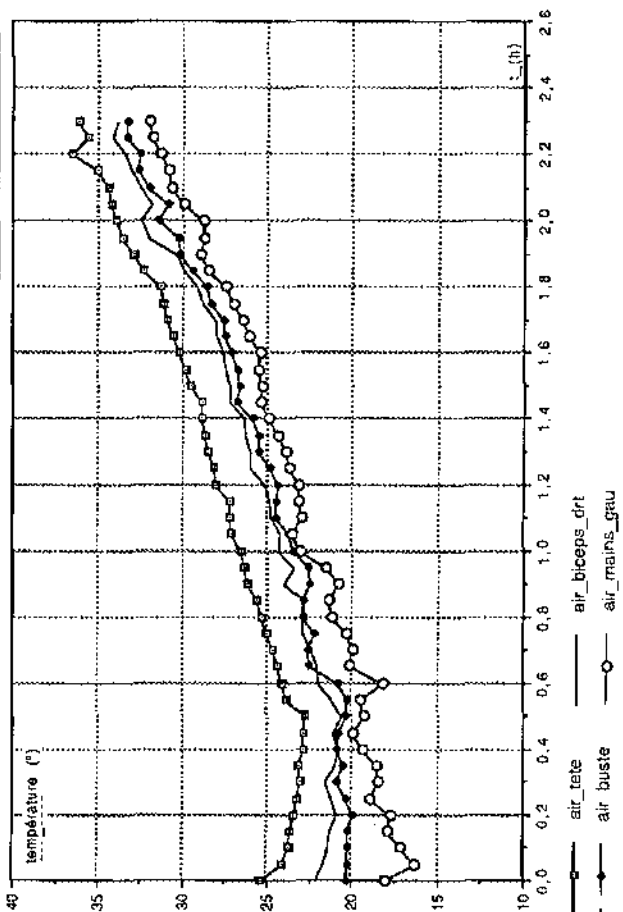
Données de "tab-TairV ES4/OCT92"



Données de "tab-TairH ES4/OCT92"

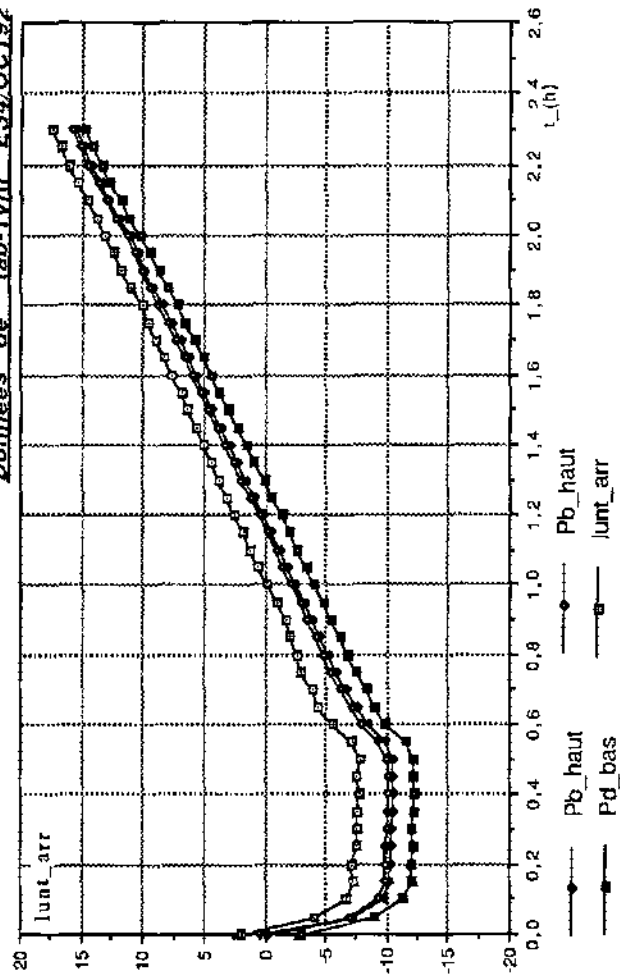


Données de "tab-TairH ES4/OCT92"

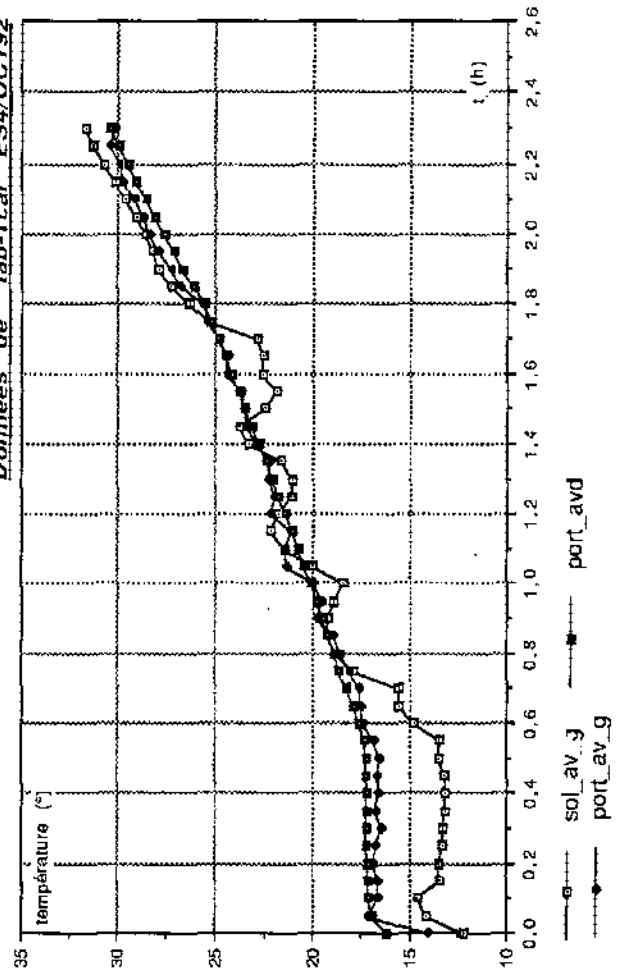


TEMPERATURES DE SURFACE

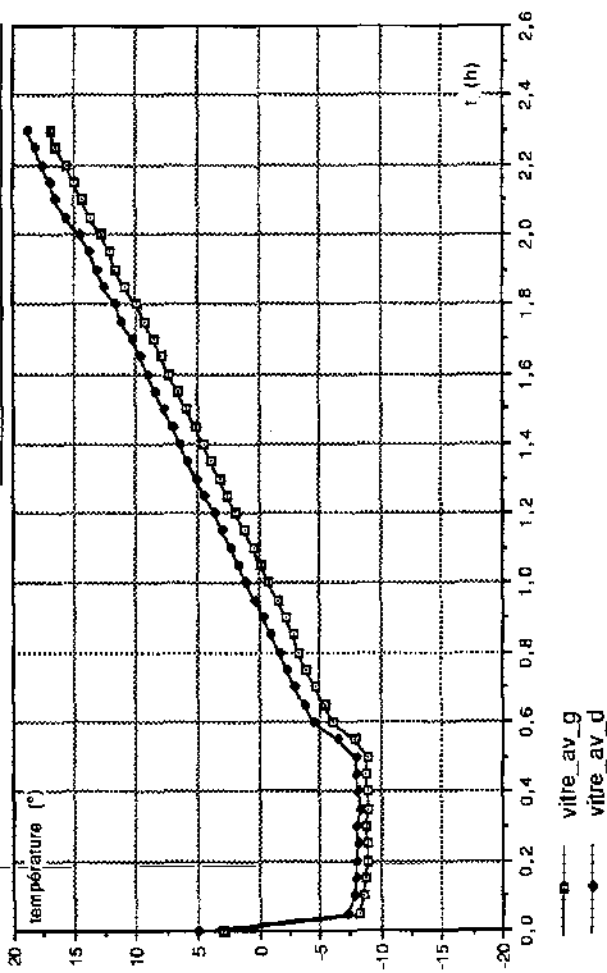
Données de "tab-Tvitr ES4/OCT92"



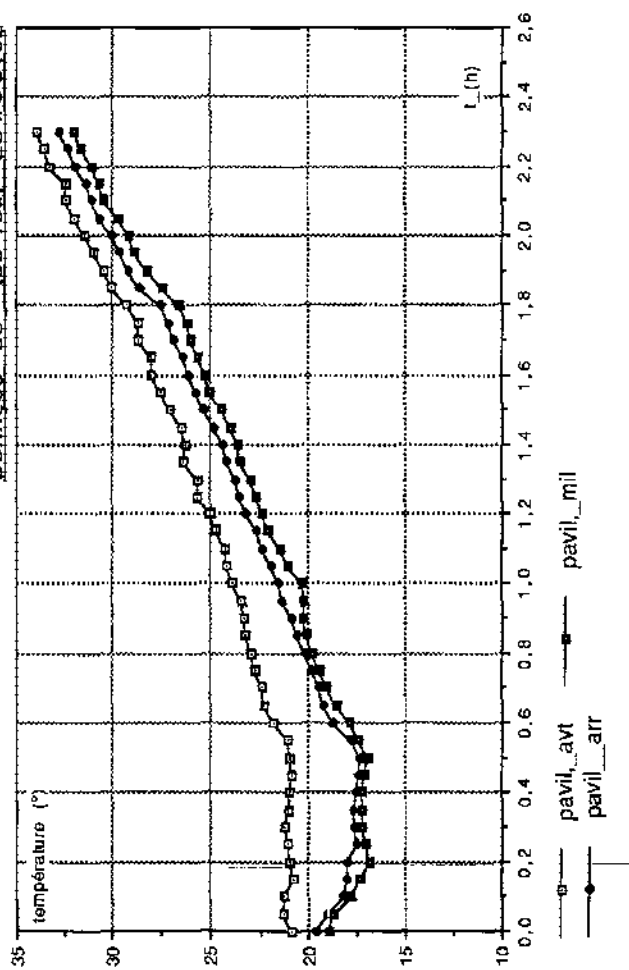
Données de "tab-Tcar ES4/OCT92"



Données de "tab-Tvitr ES4/OCT92"

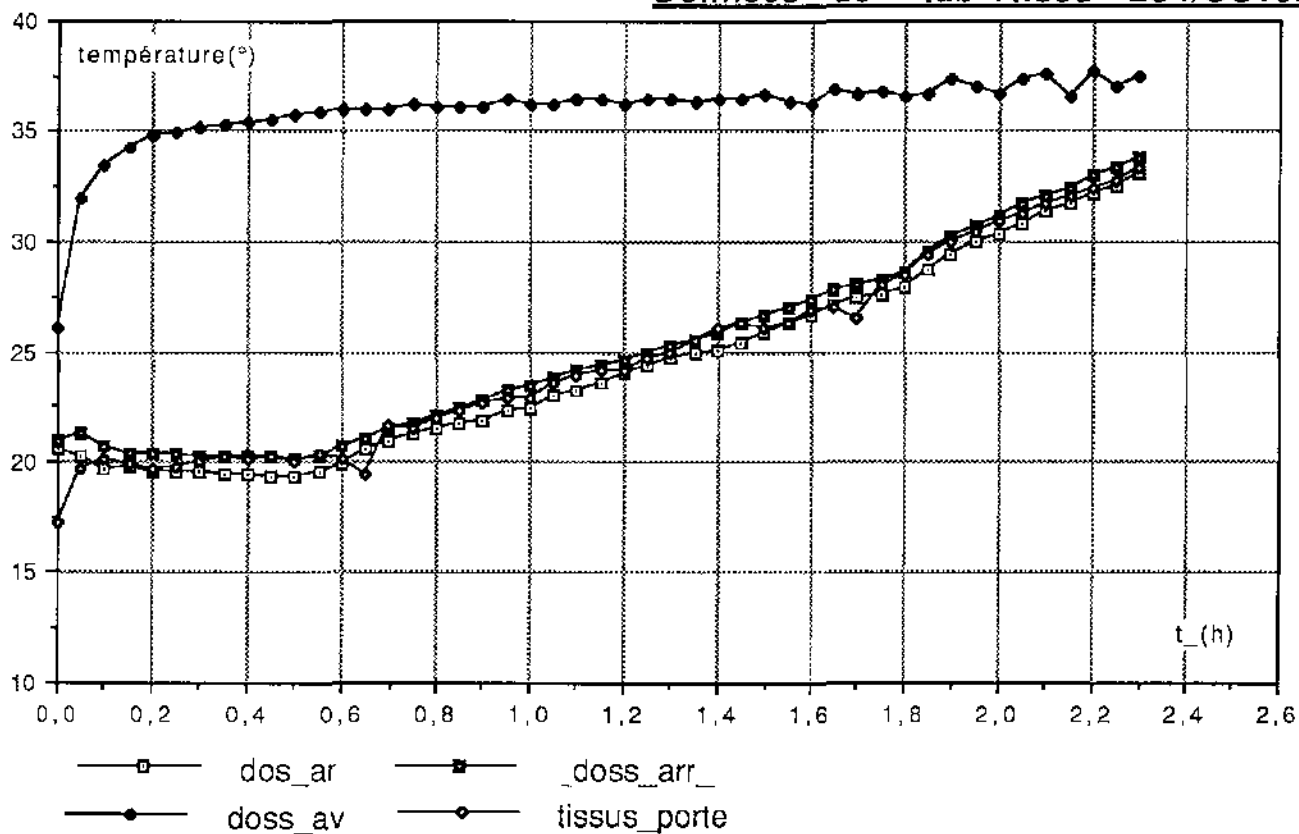


Données de "tab-Tcar ES4/OCT92"

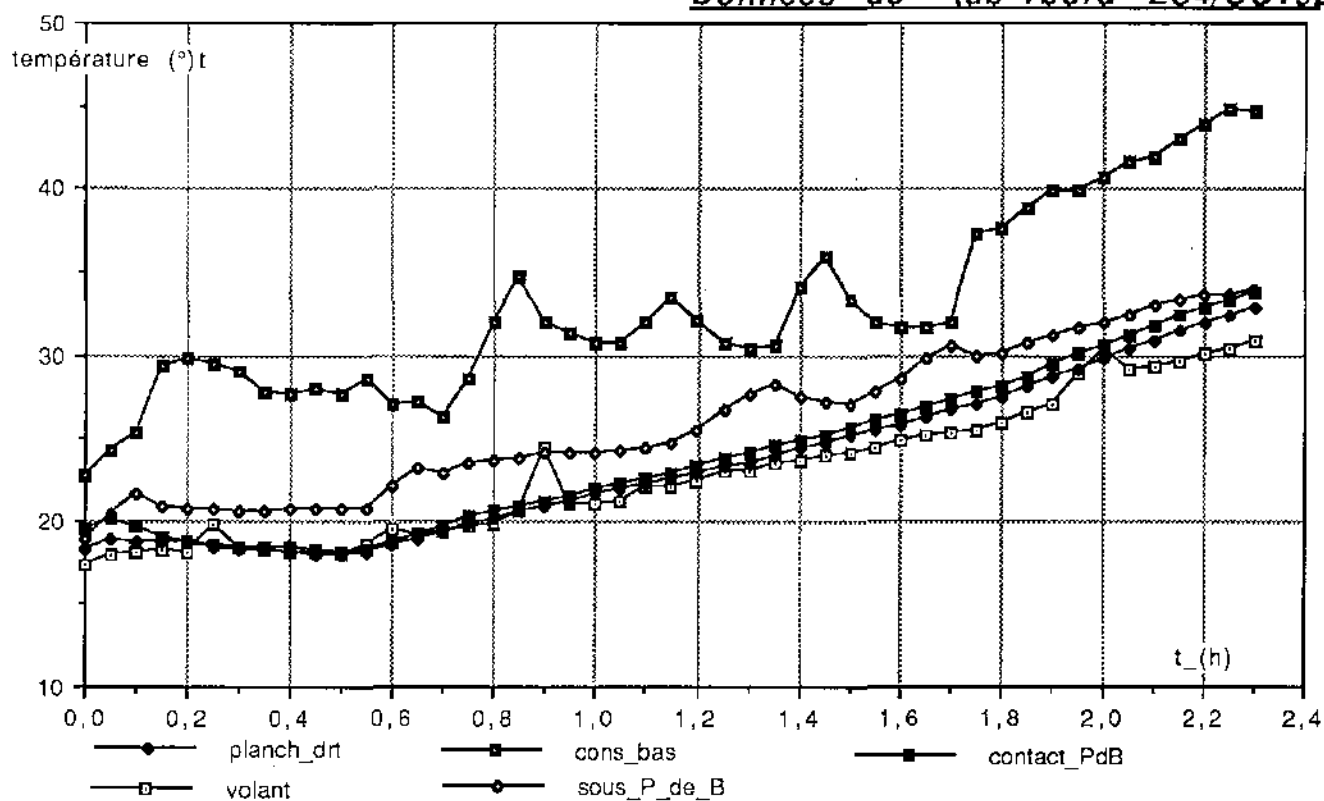


TEMPÉRATURES DE SURFACE

Données de "tab-Ttissu ES4/OCT92"

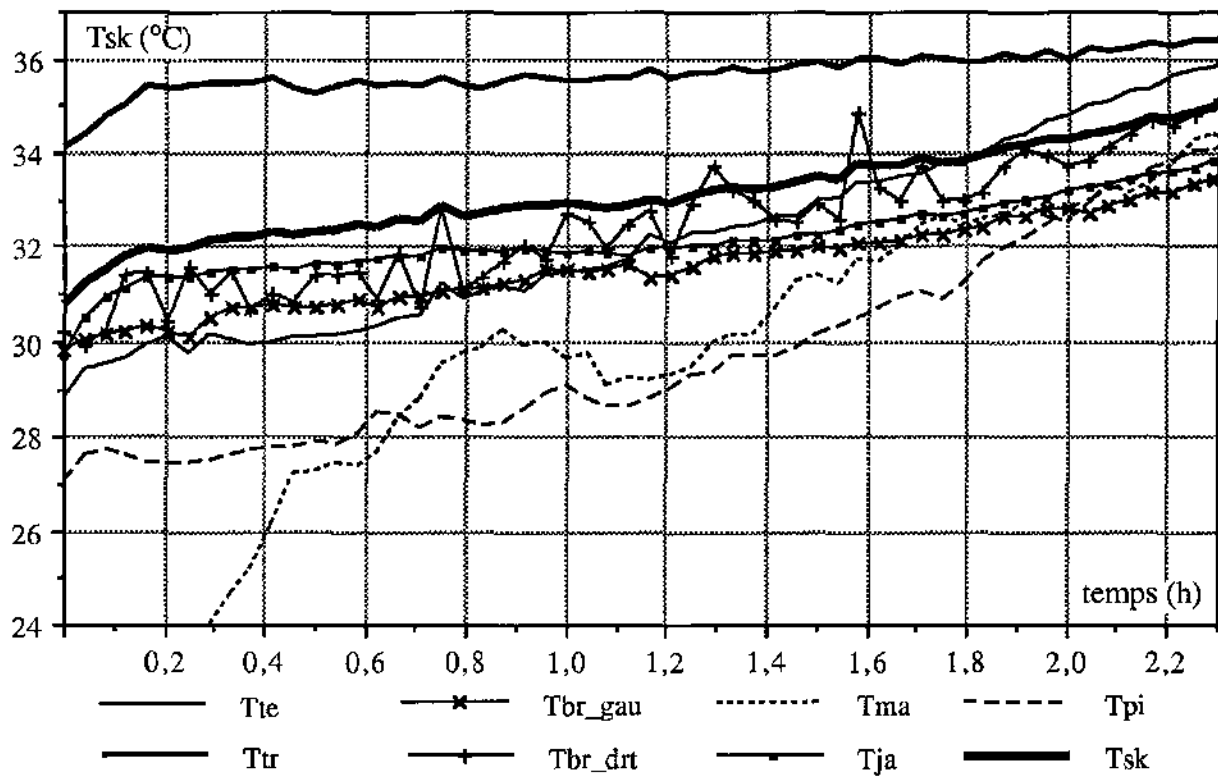


Données de "tab-Tbord ES4/OCT92"

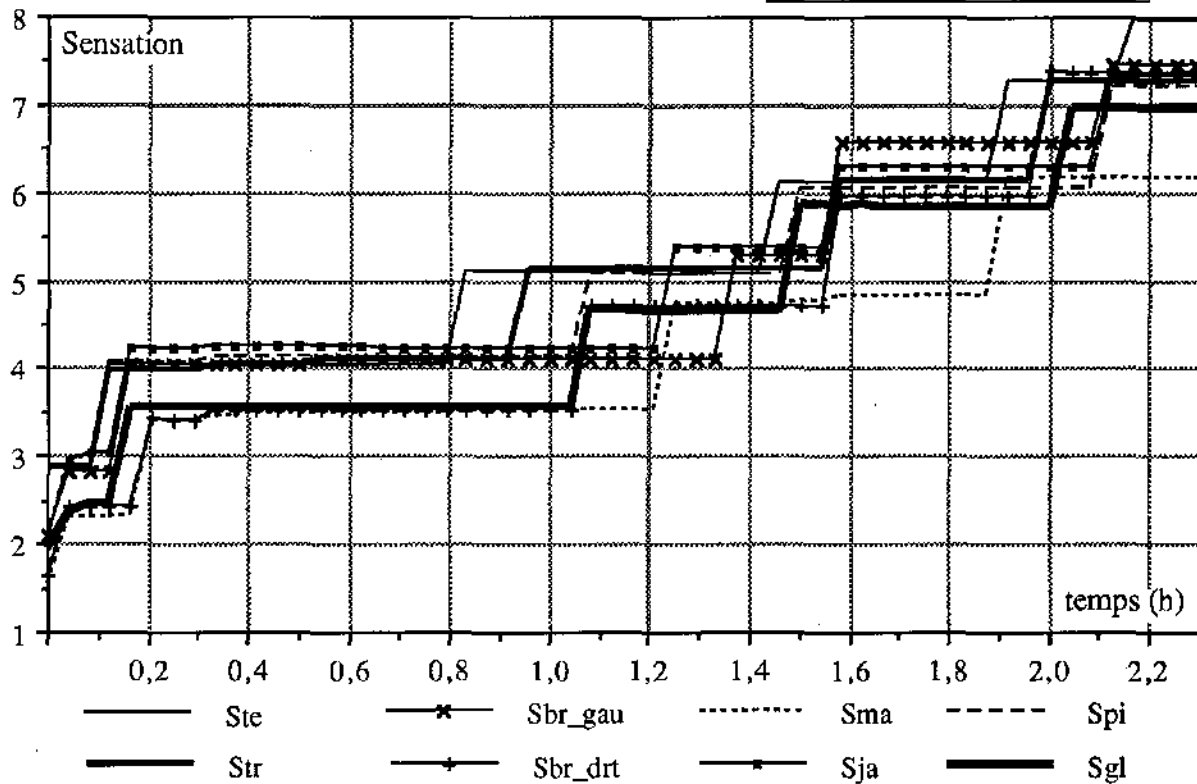


TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS

Données de "tab-Tsk.Se/ES4"

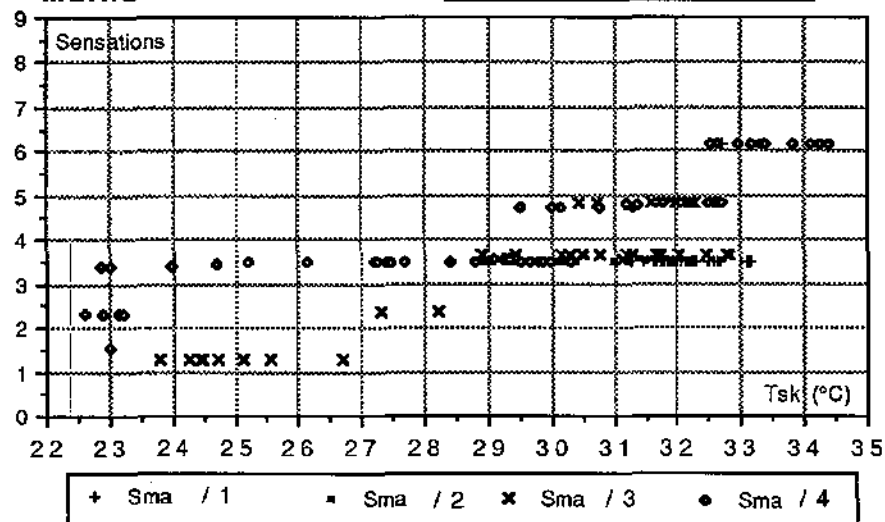


Données de "tab-Tsk.Se/ES4"



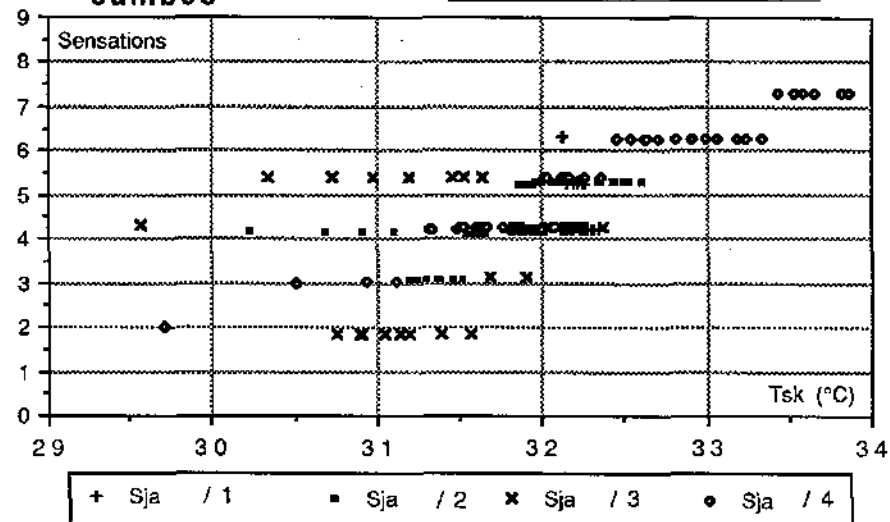
Mains

Données de "tab-Tsk,Se/ES1-2-3-4"



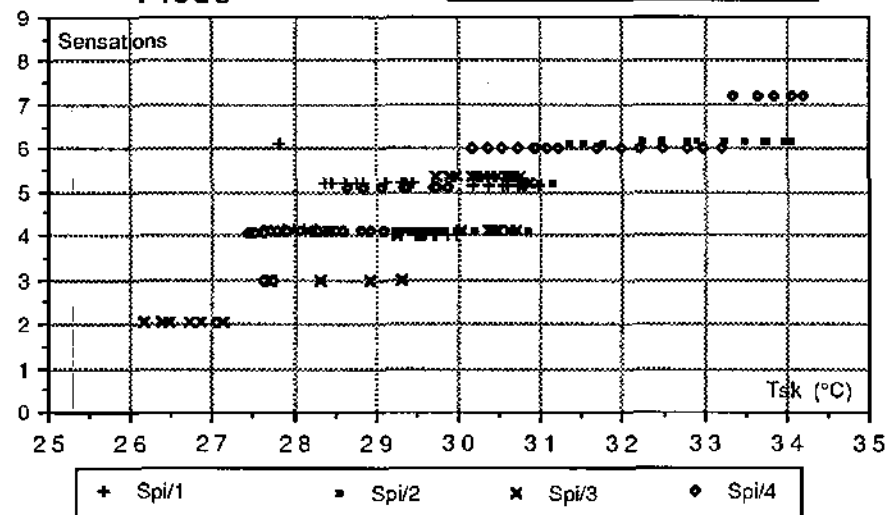
Jambes

Données de "tab-Tsk,Se/ES1-2-3-4"



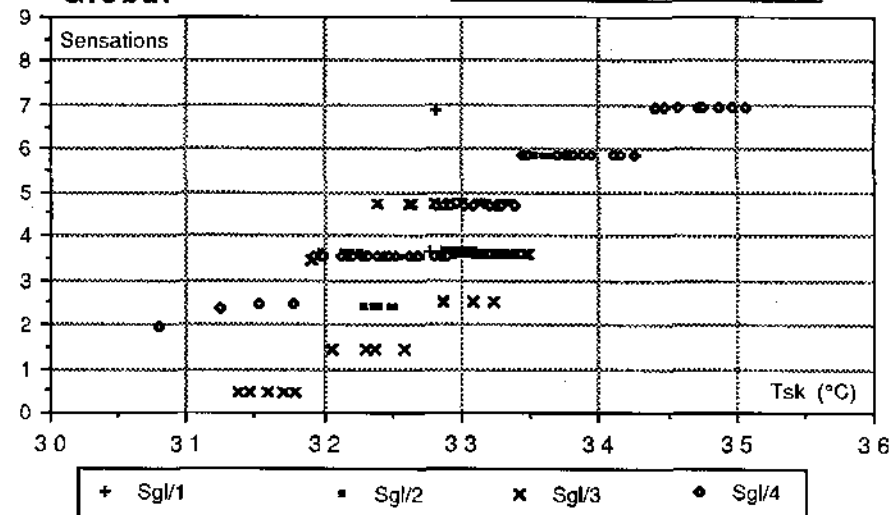
Pieds

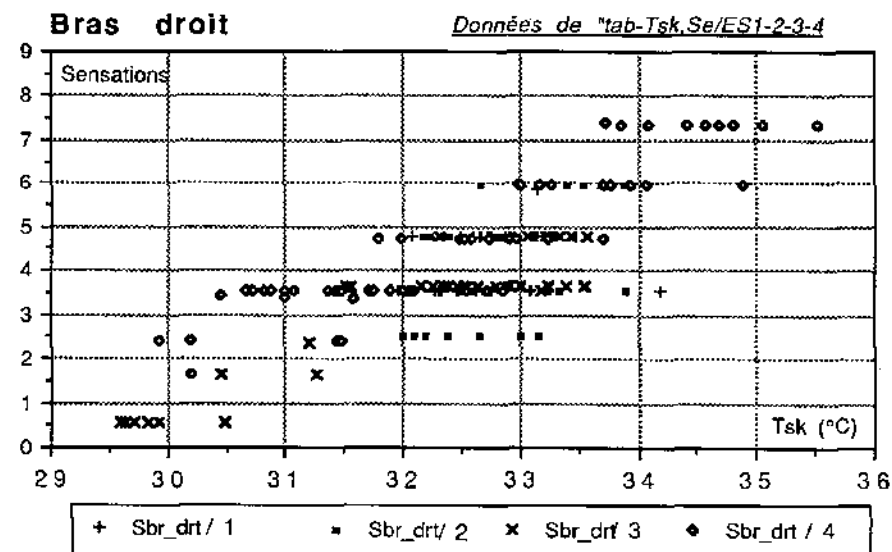
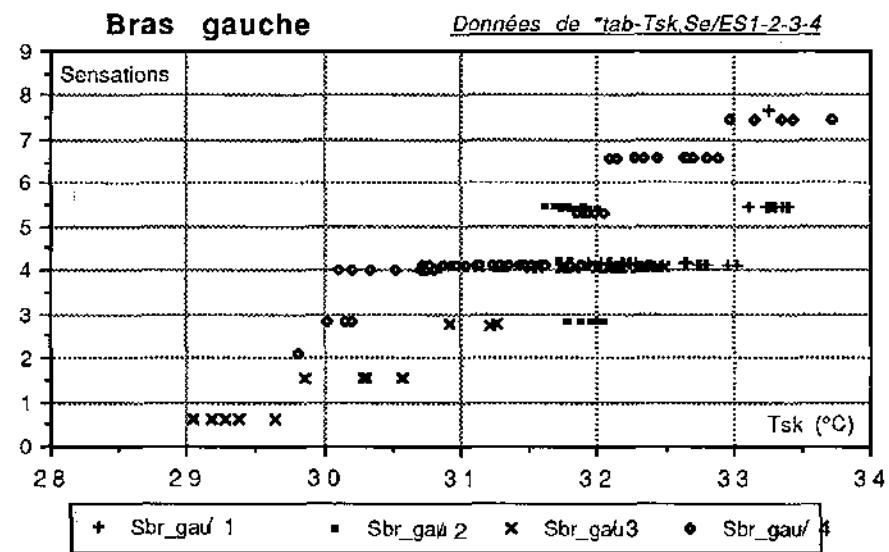
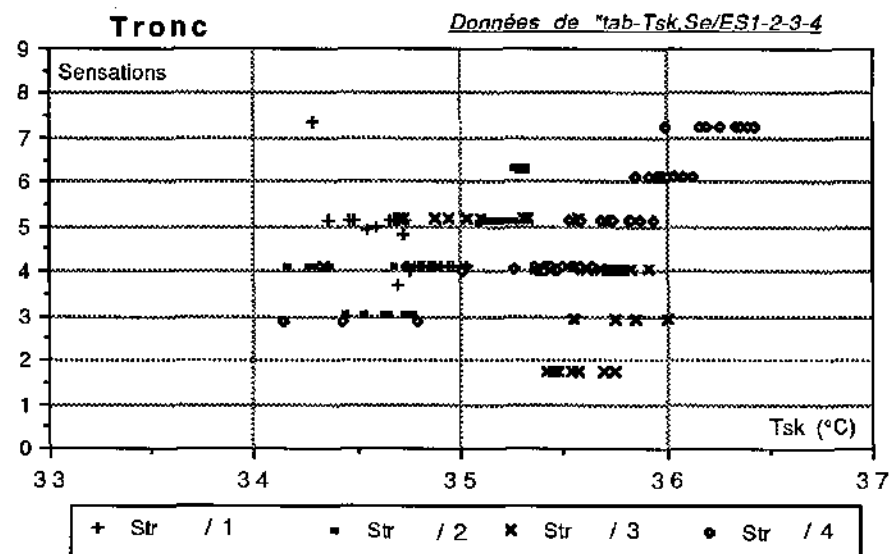
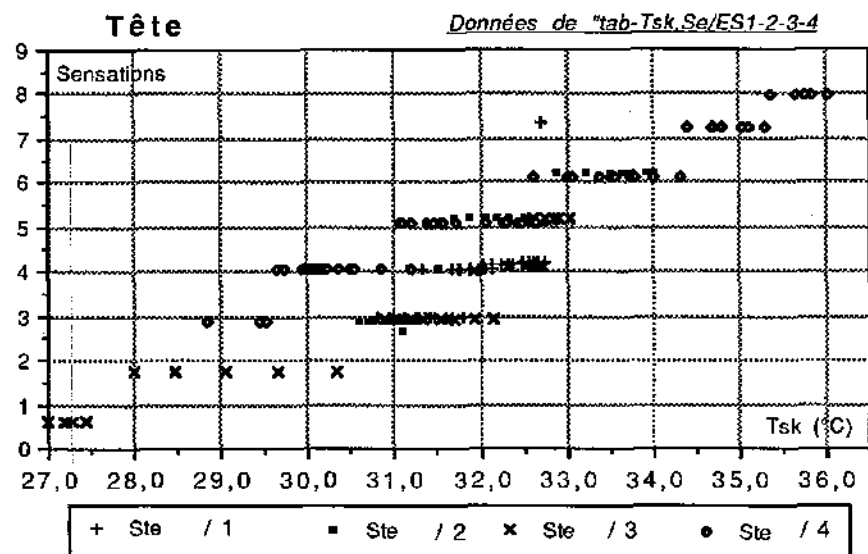
Données de "tab-Tsk,Se/ES1-2-3-4"

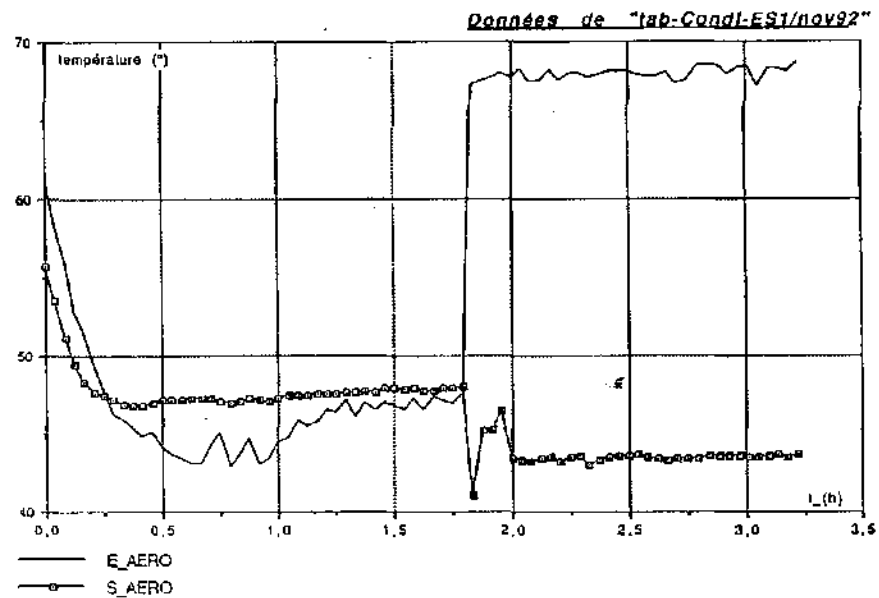
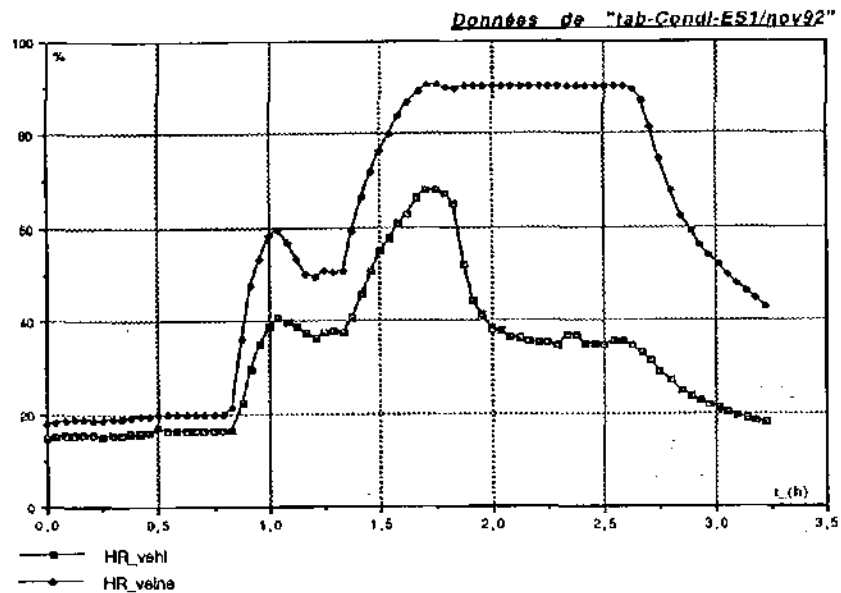
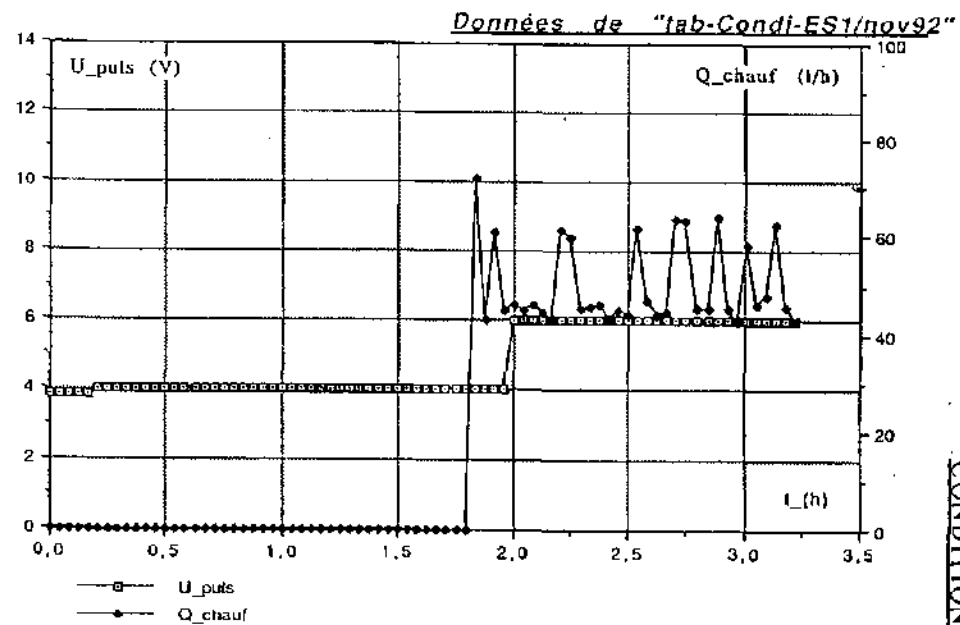
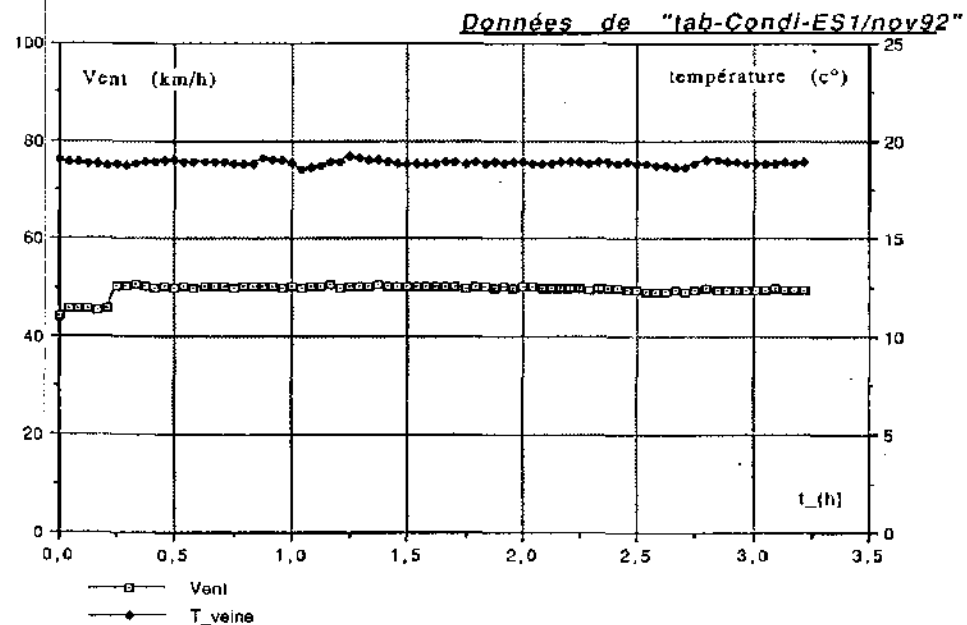


Global

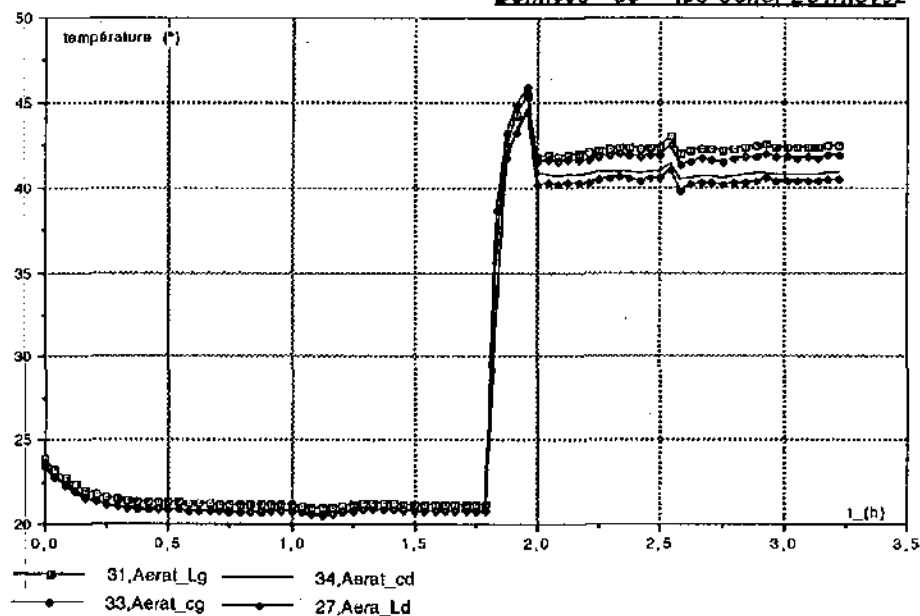
Données de "tab-Tsk,Se/ES1-2-3-4"



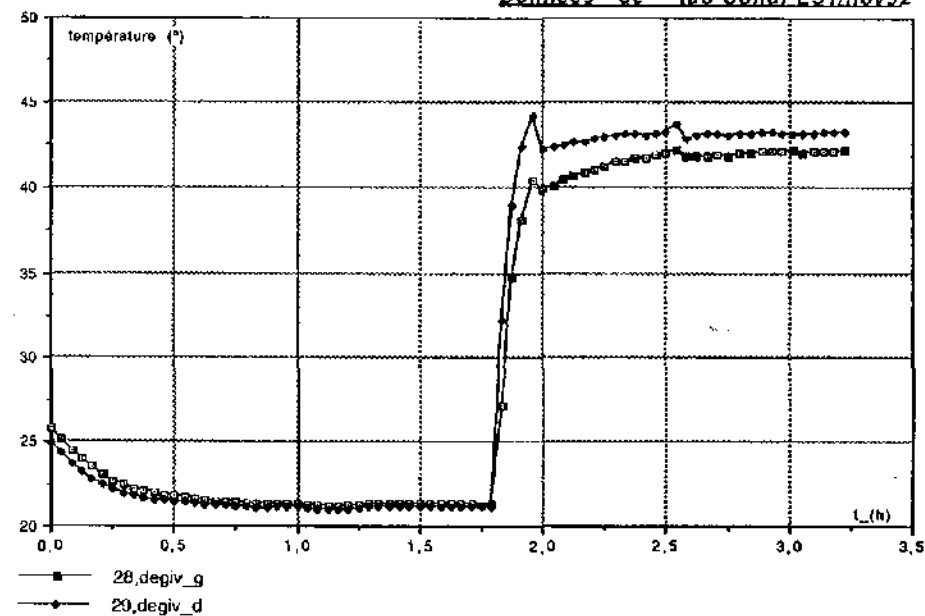




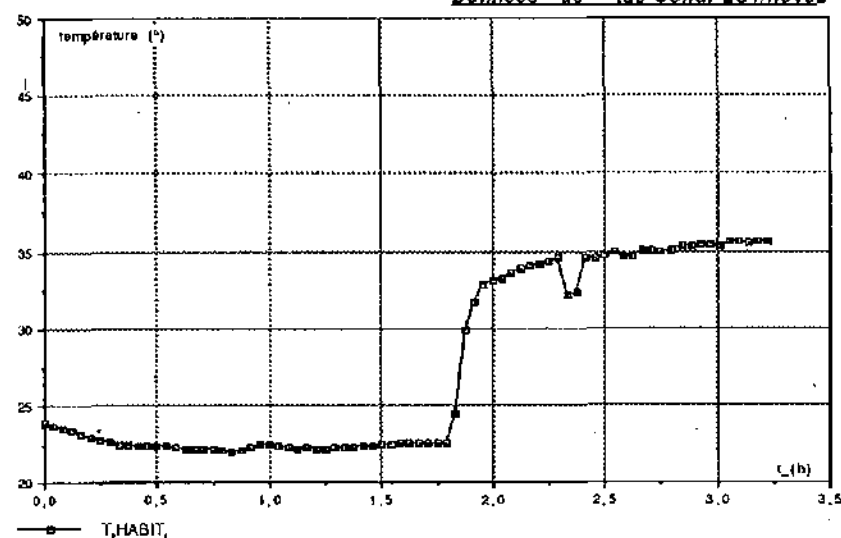
Données de "lab-Cond-ES1/nov92"



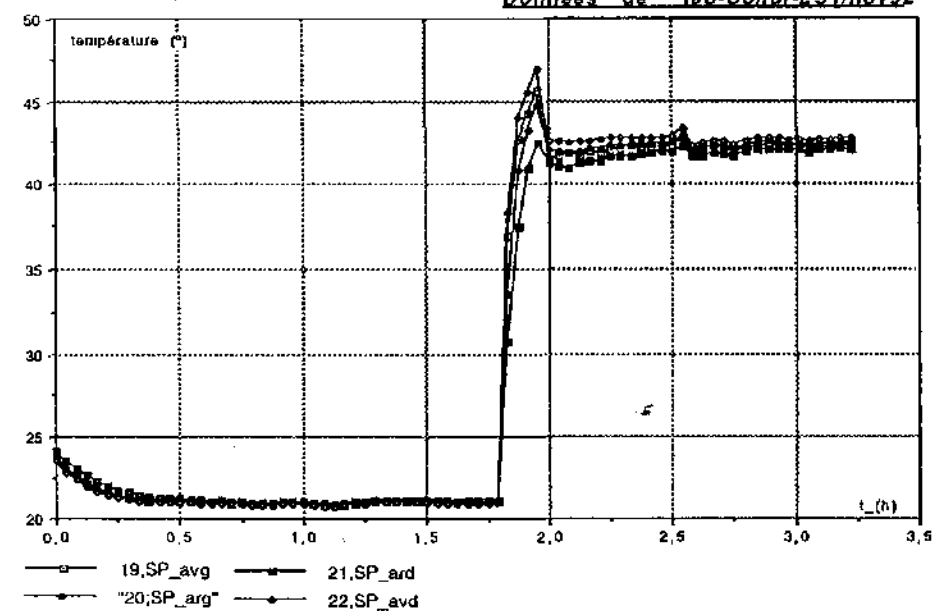
Données de "lab-Cond-ES1/nov92"



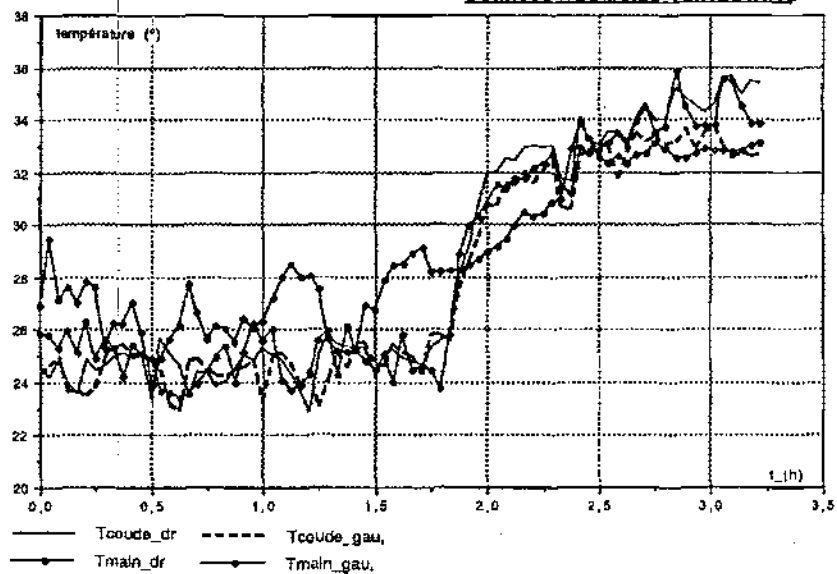
Données de "lab-Cond-ES1/nov92"



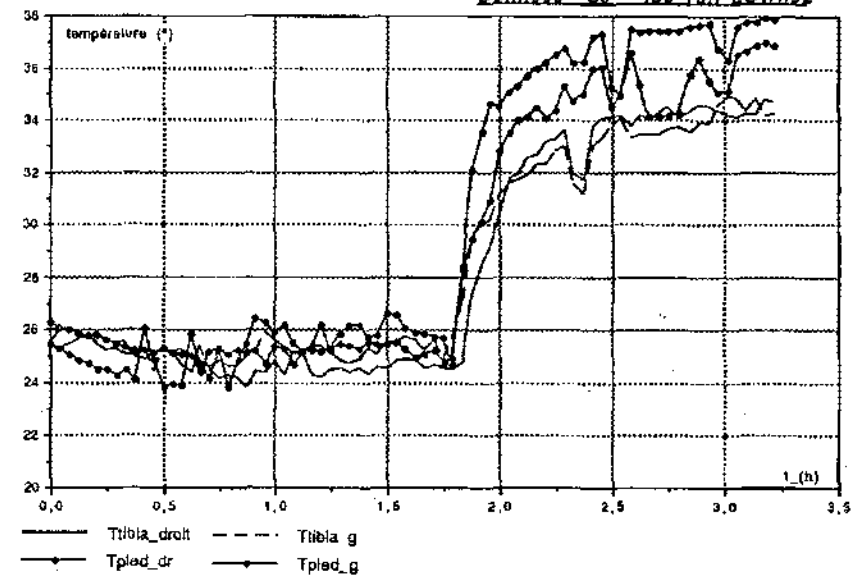
Données de "lab-Cond-ES1/nov92"



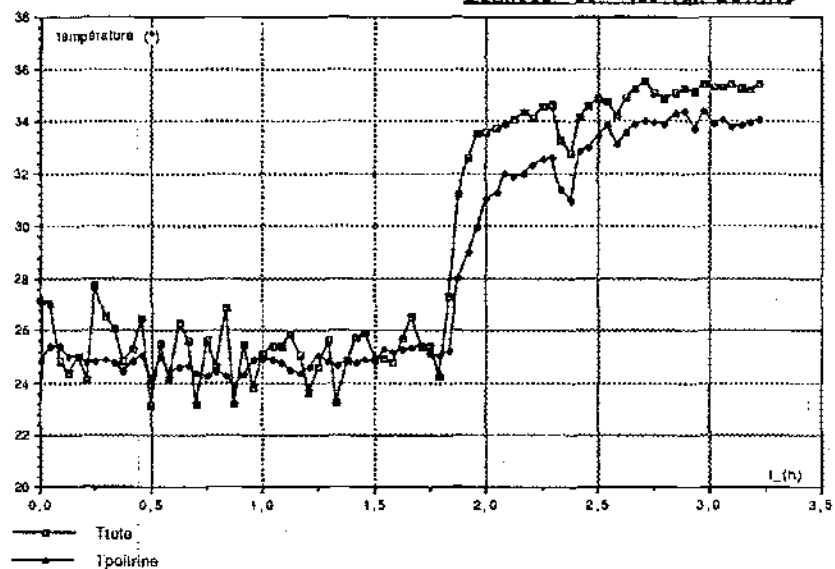
Données de "lab-Tair-ES1/n92"



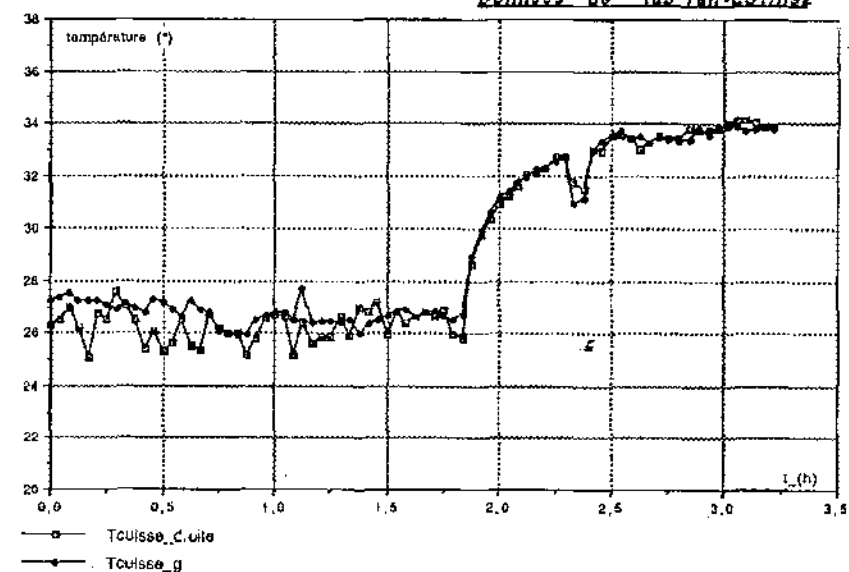
Données de "lab-Tair-ES1/n92"



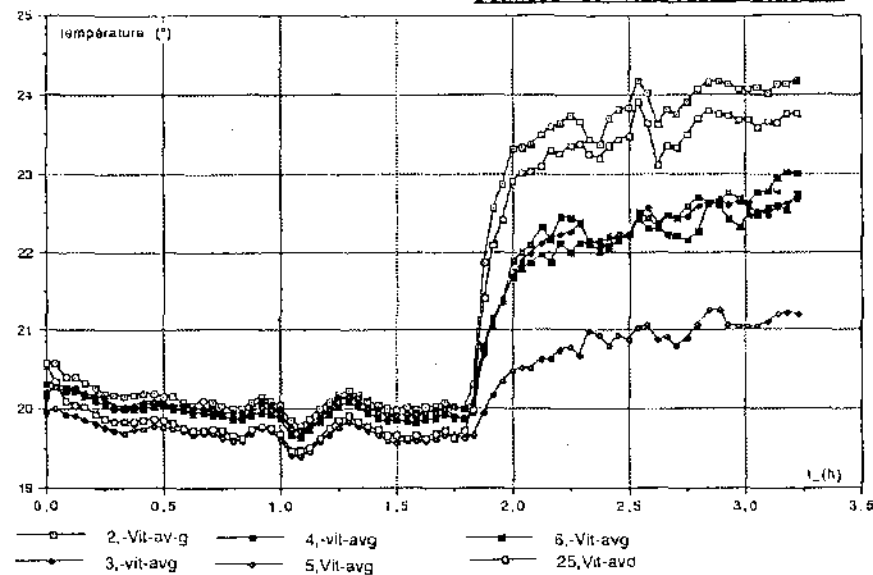
Données de "lab-Tair-ES1/n92"



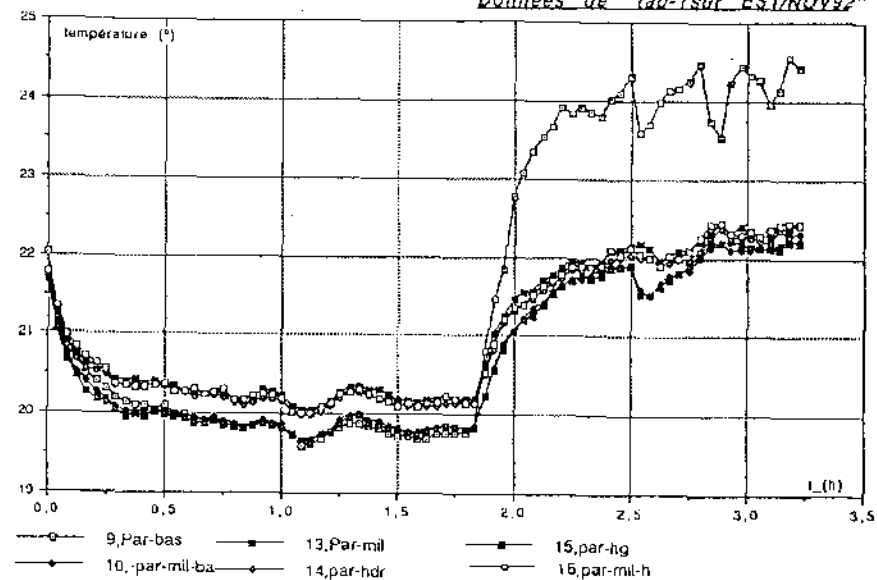
Données de "lab-Tair-ES1/n92"



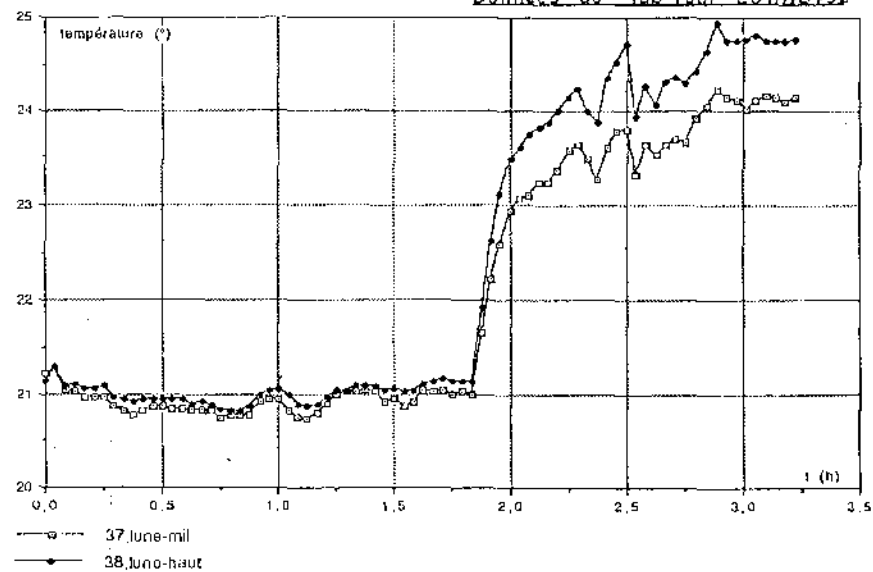
Données de "lab-Tsur ES1/NOV92"



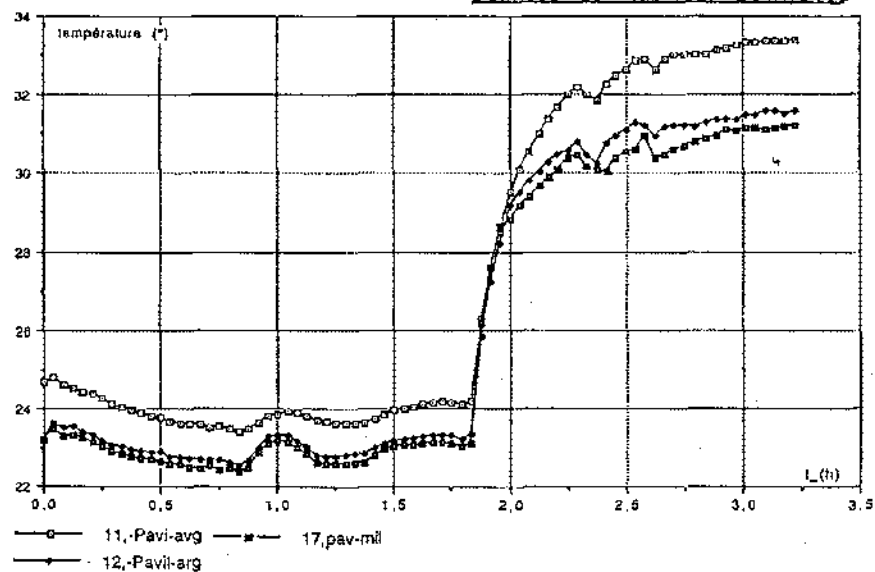
Données de "lab-Tsur ES1/NOV92"



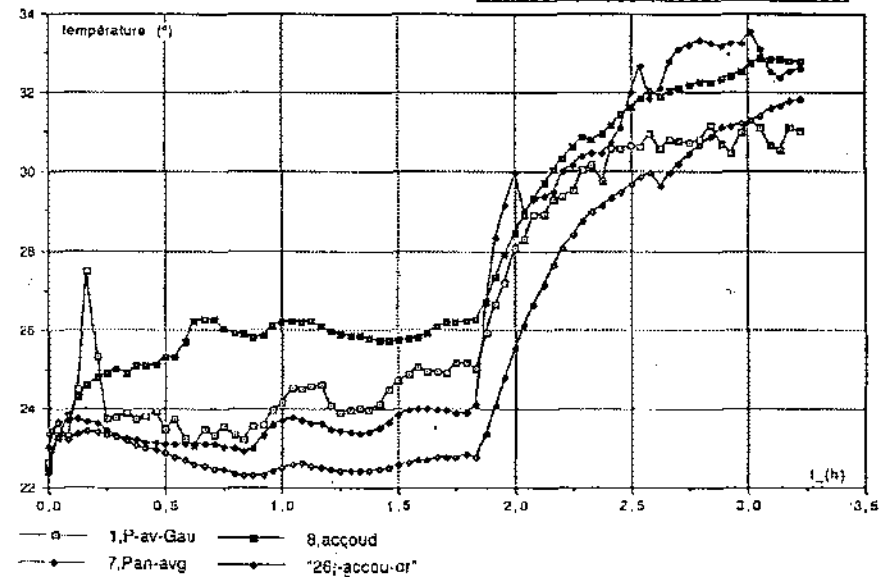
Données de "lab-Tsur ES1/NOV92"



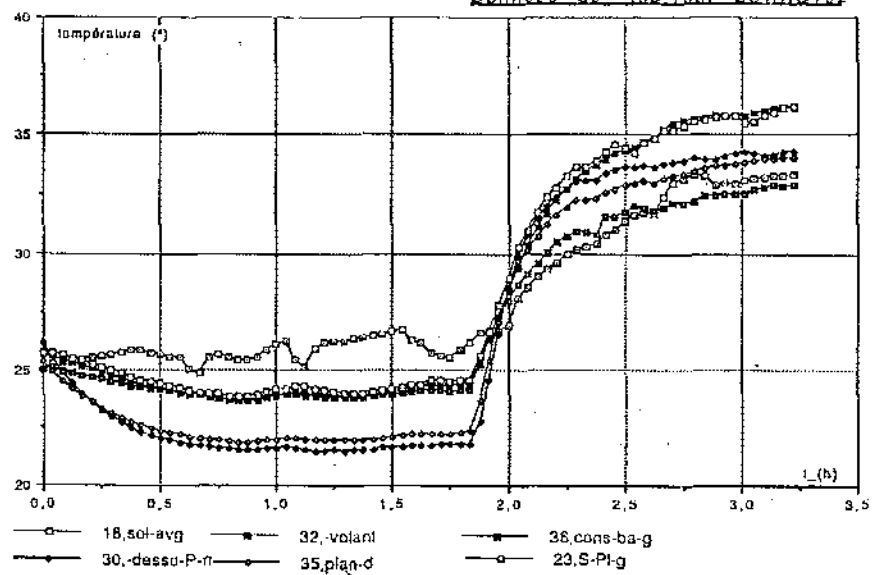
Données de "tab-Tsur ES1/NOV92"



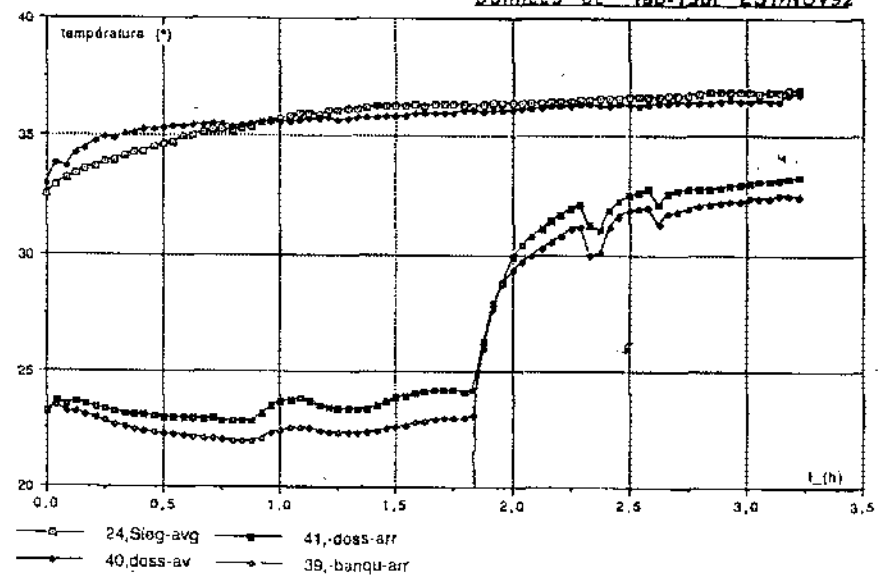
Données de "tab-Tsur ES1/NOV92"



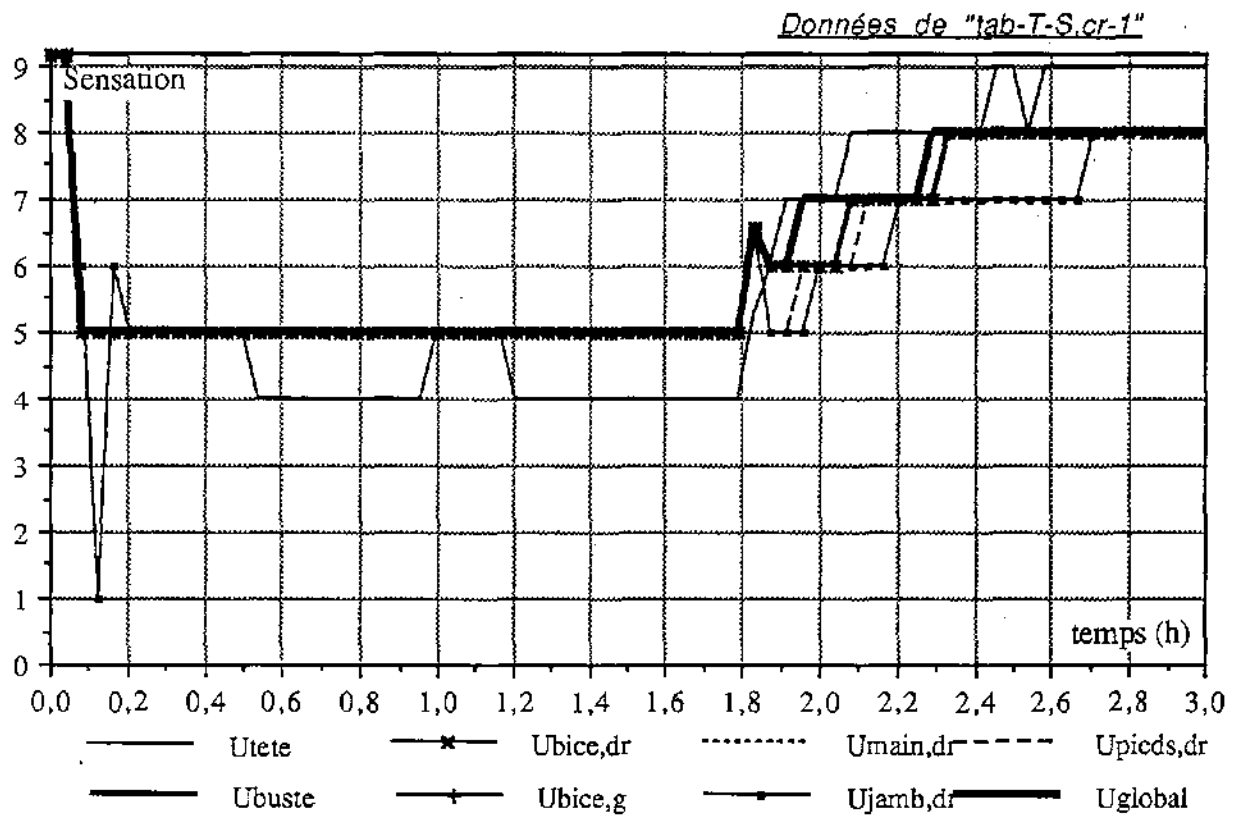
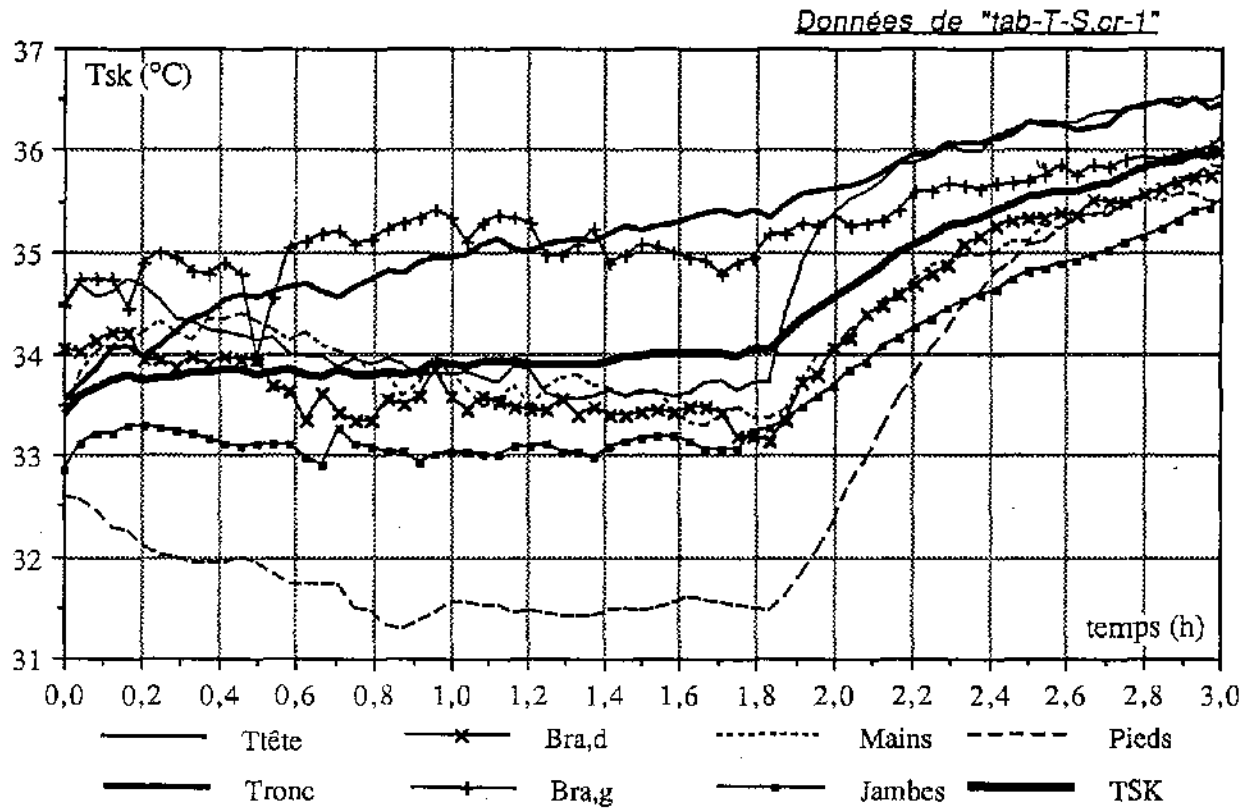
Données de "tab-Tsur ES1/NOV92"



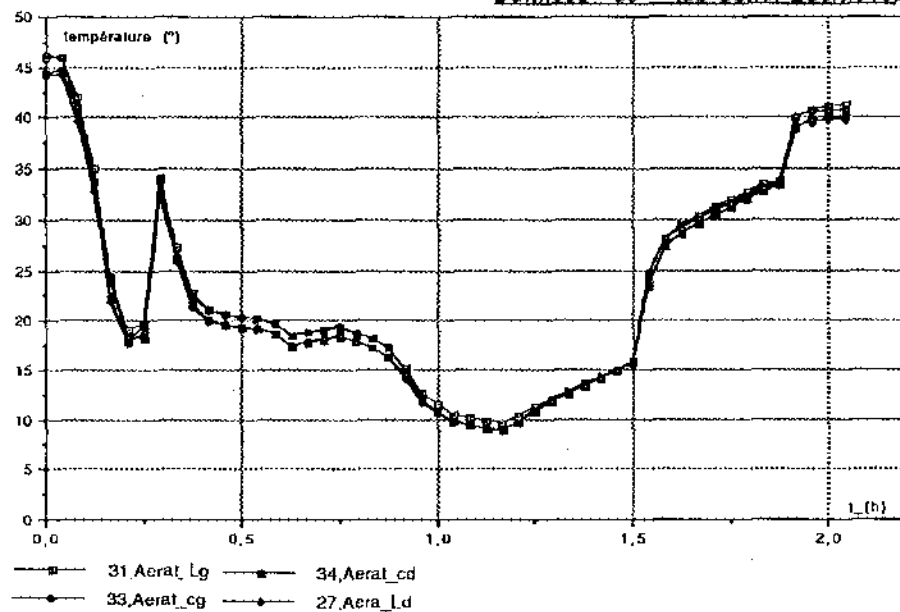
Données de "tab-Tsur ES1/NOV92"



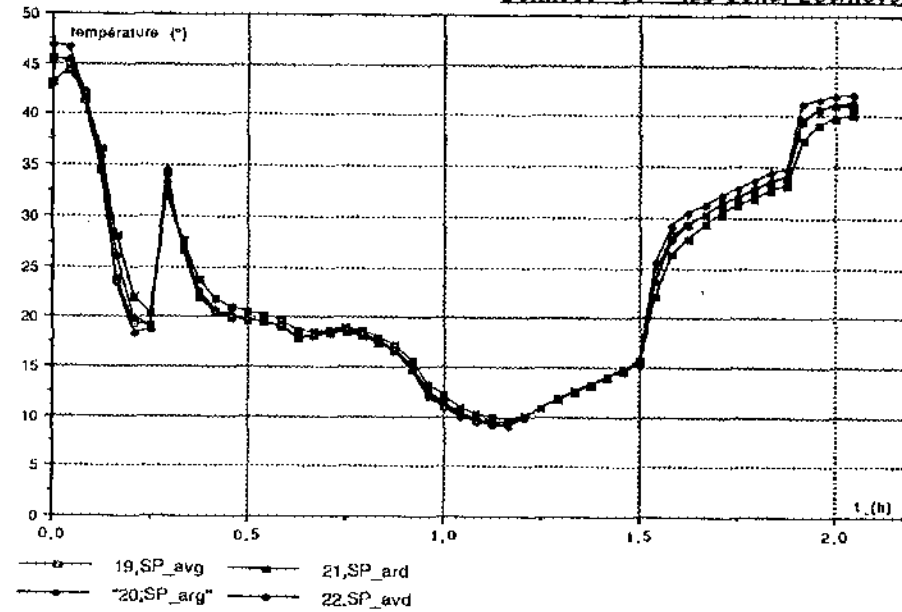
TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS



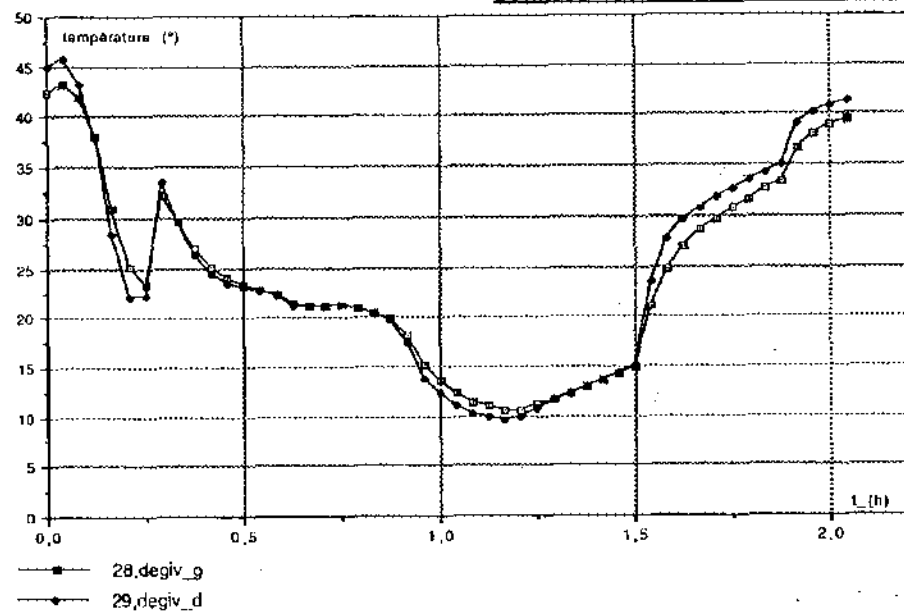
Données de "tab-Cond-ES3/nov92"



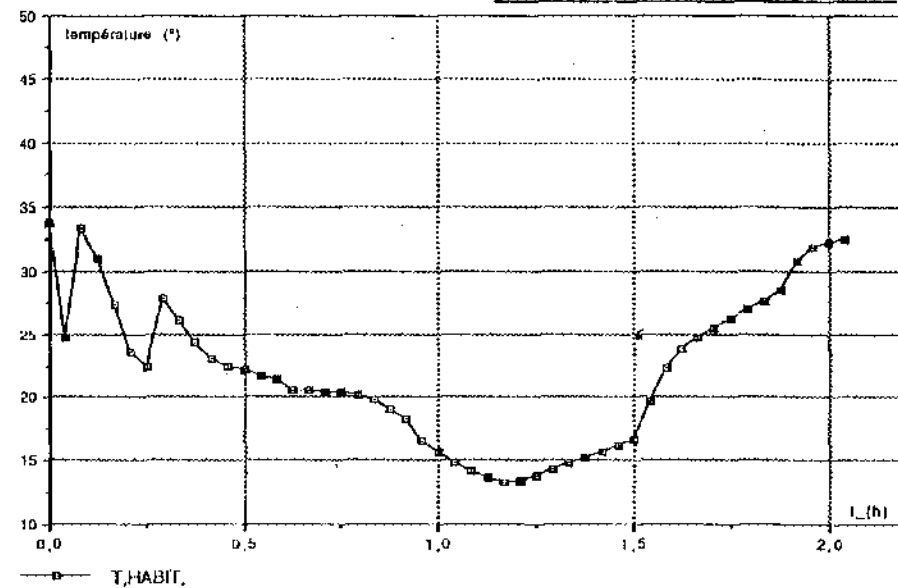
Données de "tab-Cond-ES3/nov92"

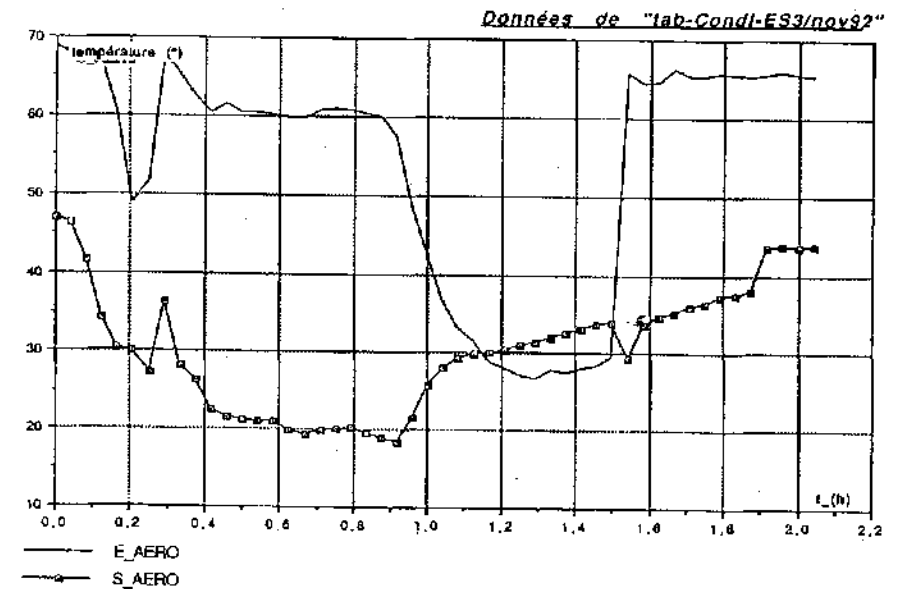
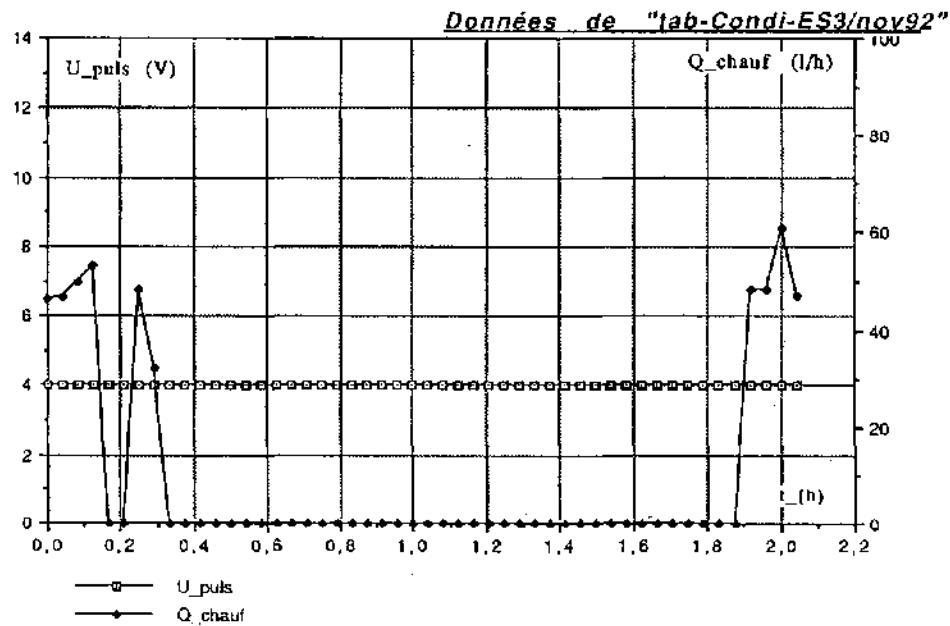
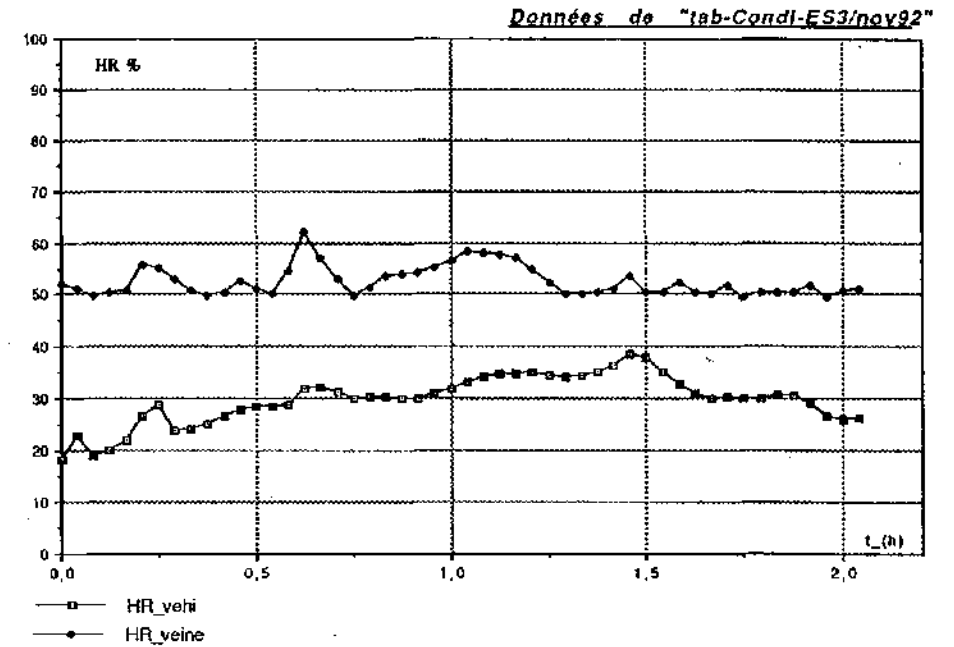
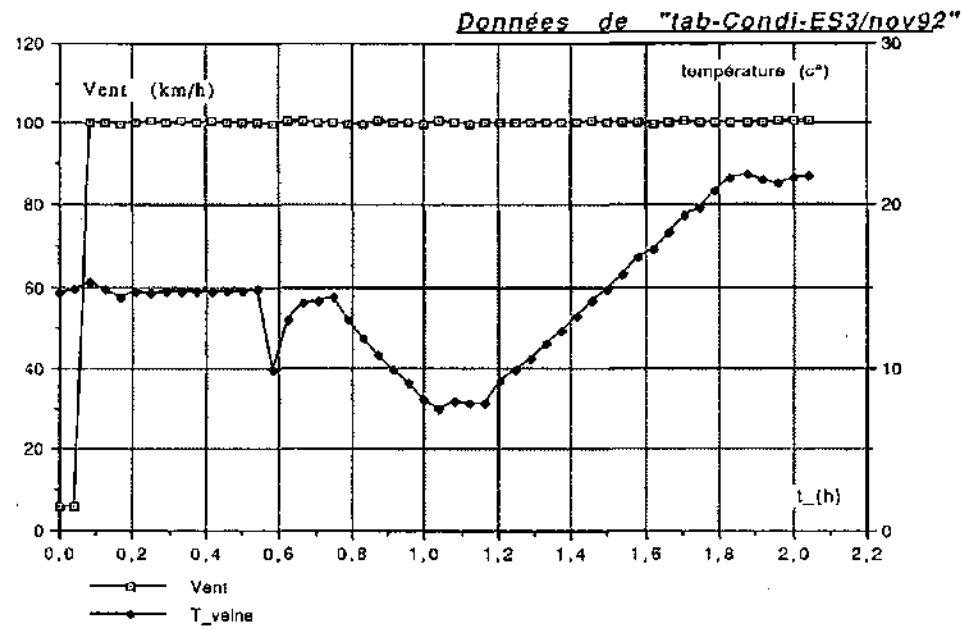


Données de "tab-Cond-ES3/nov92"

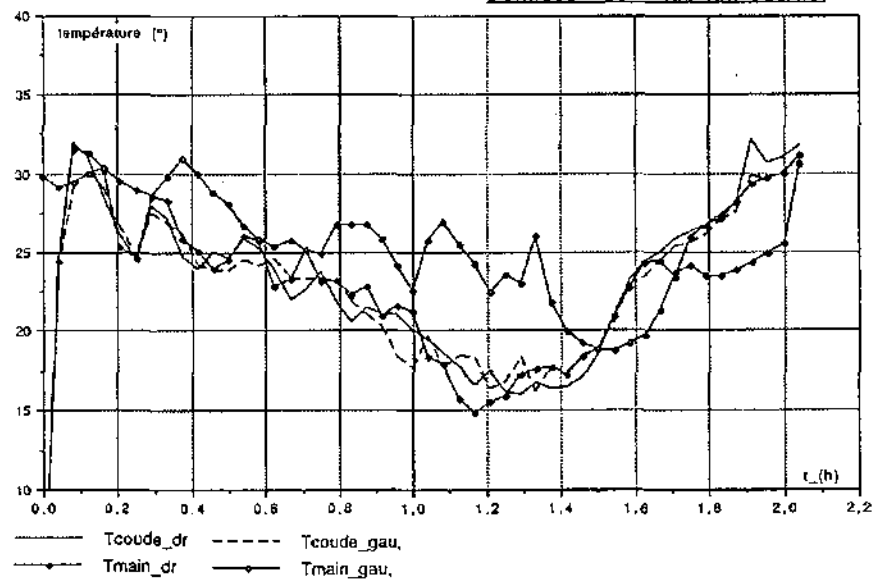


Données de "tab-Cond-ES3/nov92"

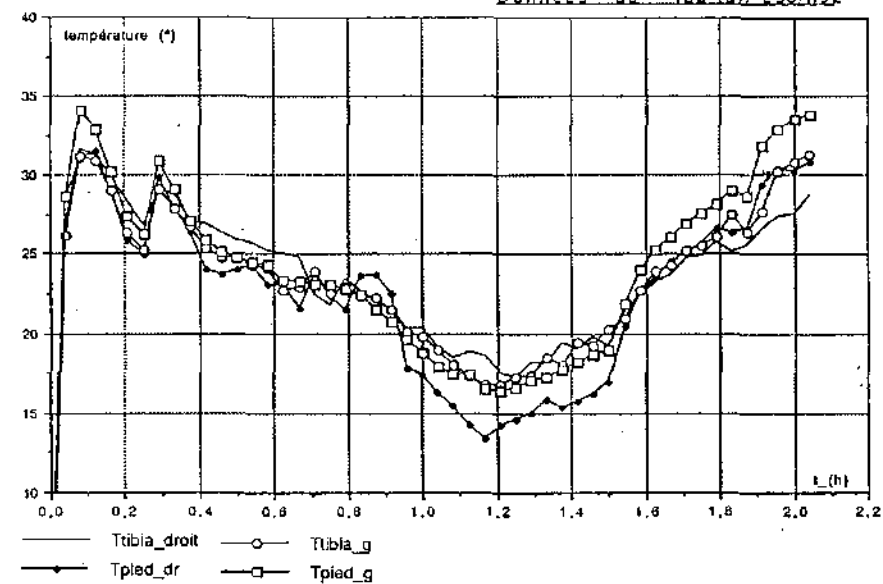




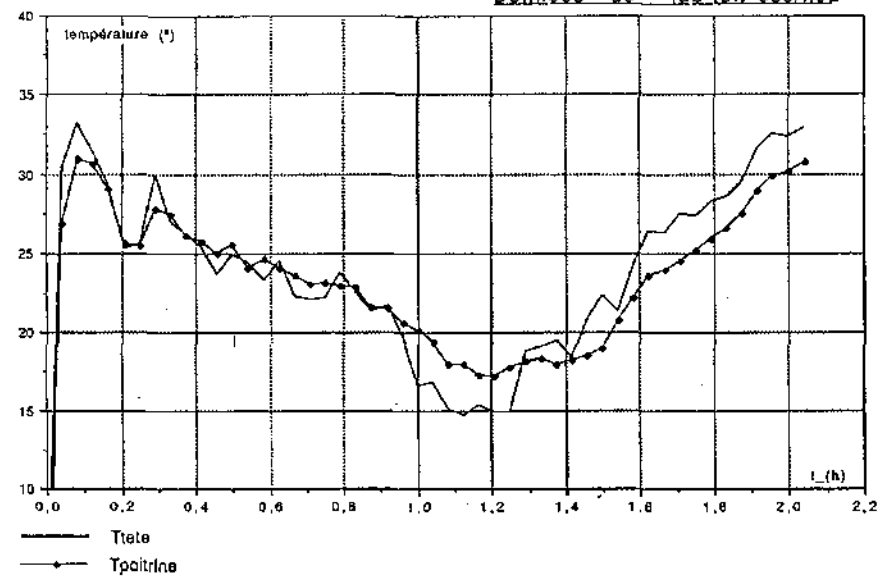
Données de "tab-tair-es3/n92"



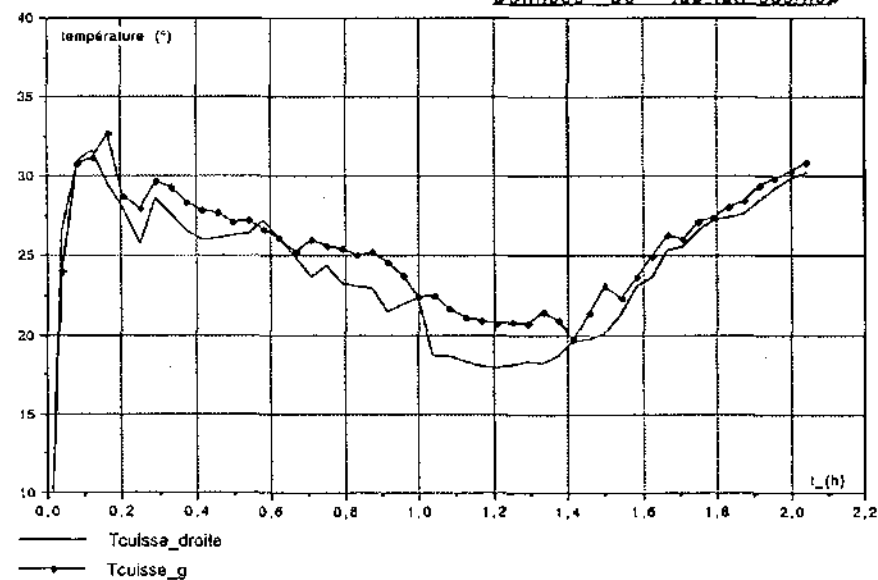
Données de "tab-tair-es3/n92"



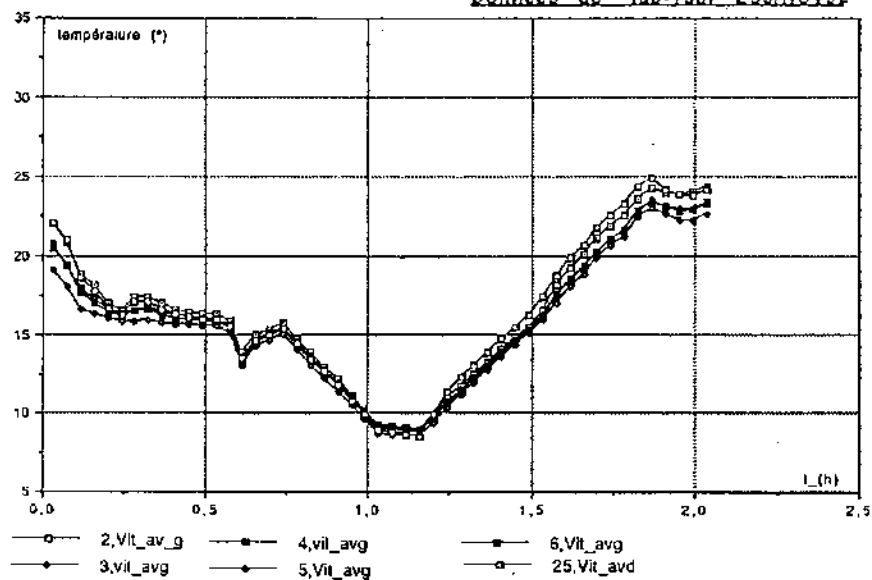
Données de "tab-tair-es3/n92"



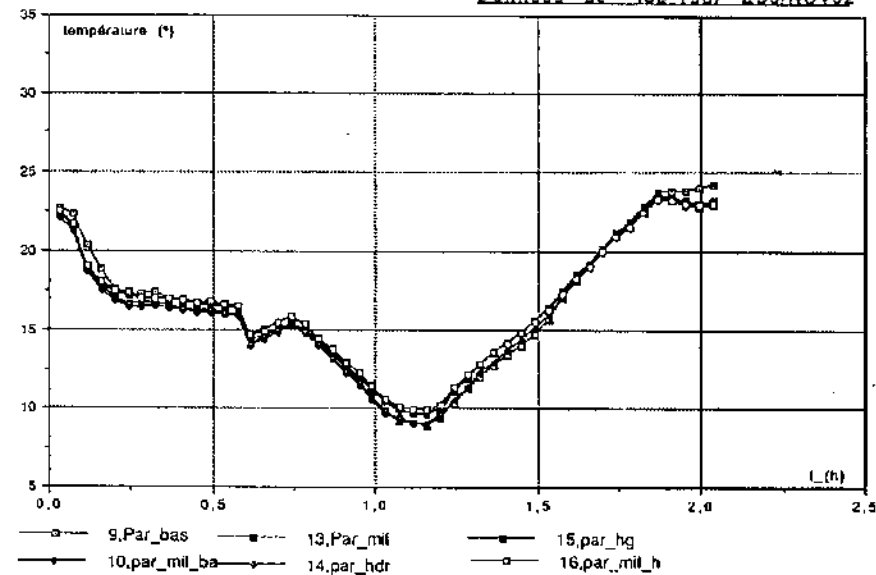
Données de "tab-tair-es3/n92"



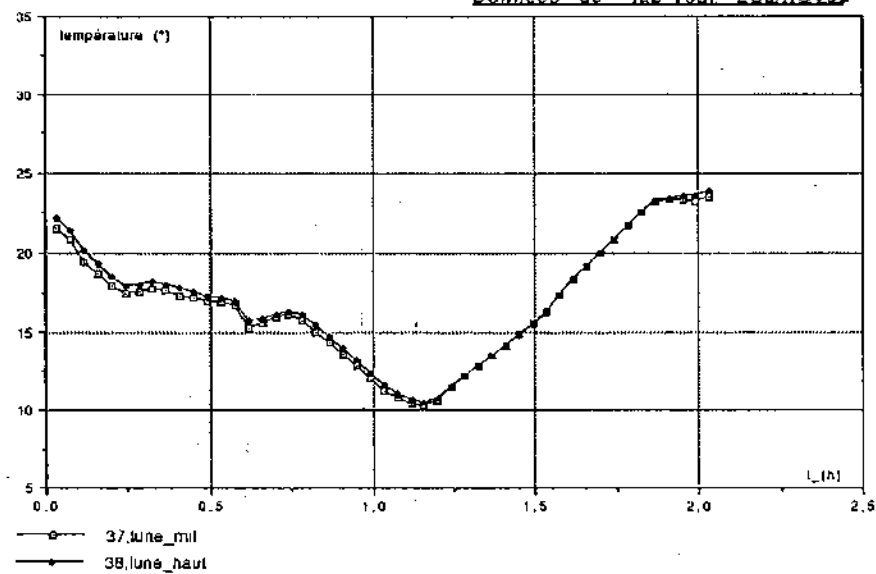
Données de "tab-Tsur ES3/NOV92"



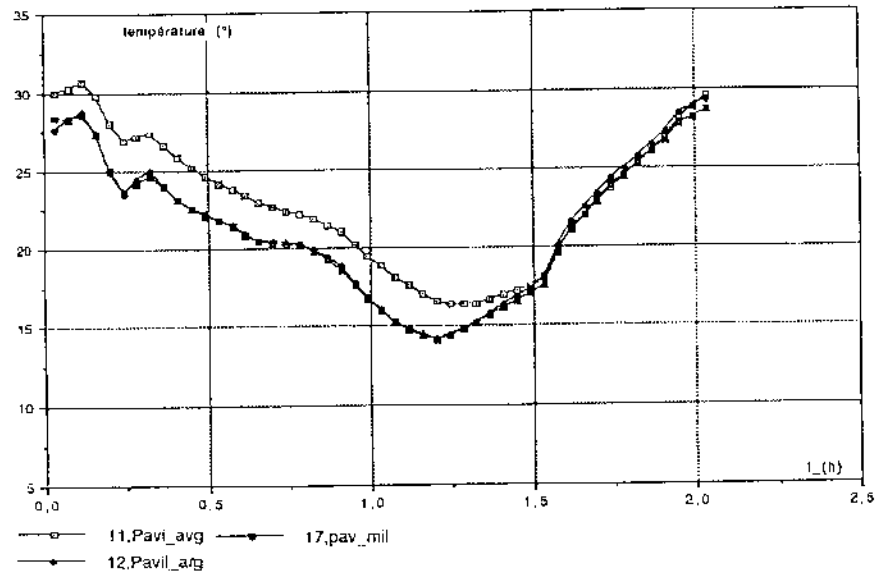
Données de "tab-Tsur ES3/NOV92"



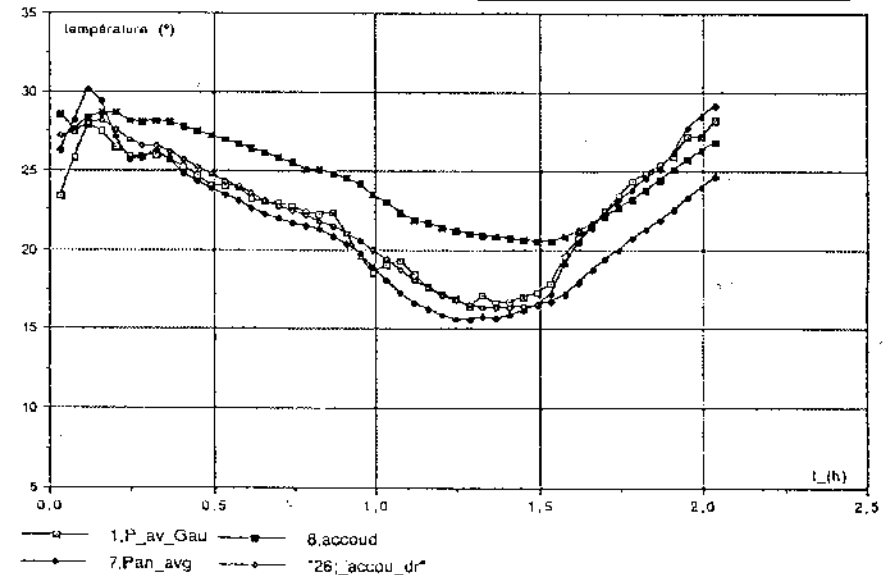
Données de "tab-Tsur ES3/NOV92"



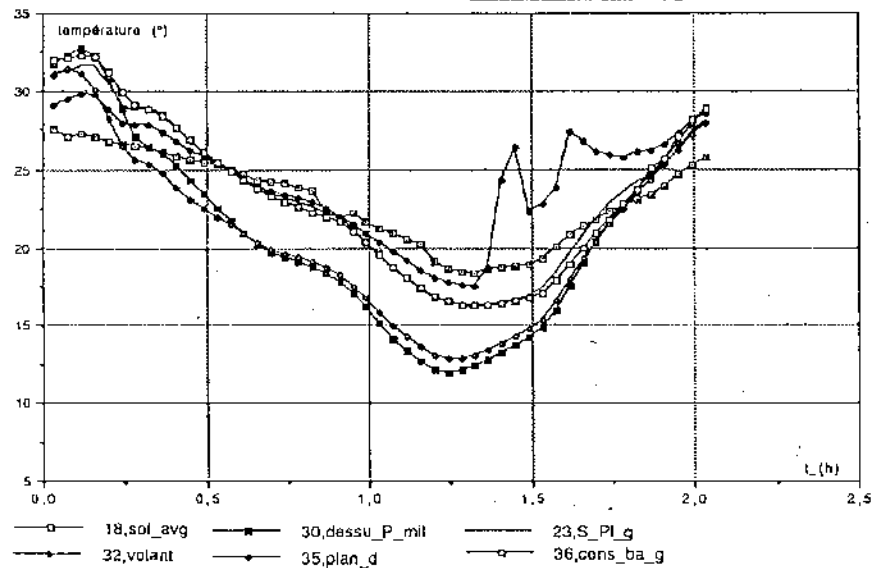
Données de "lab-Tsur ES3/NOV92"



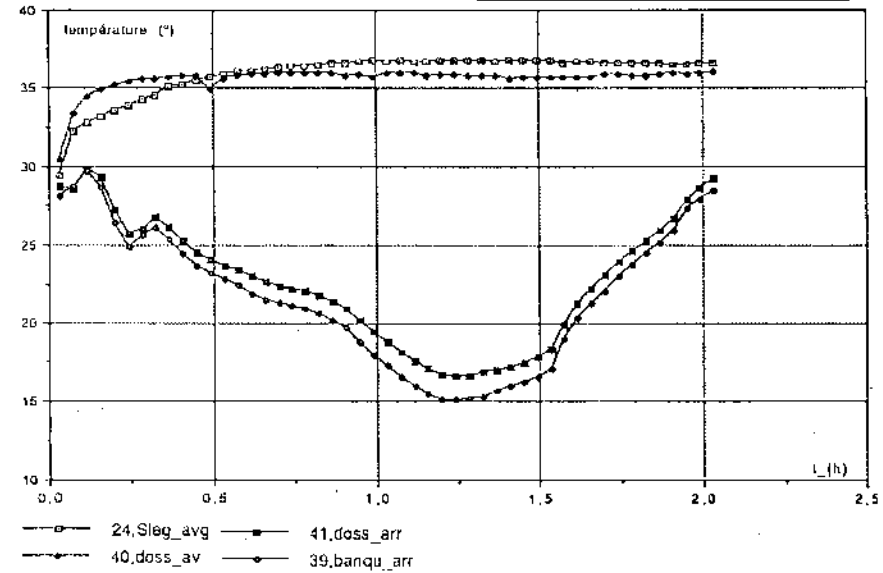
Données de "lab-Tsur ES3/NOV92"



Données de "lab-Tsur ES3/NOV92"

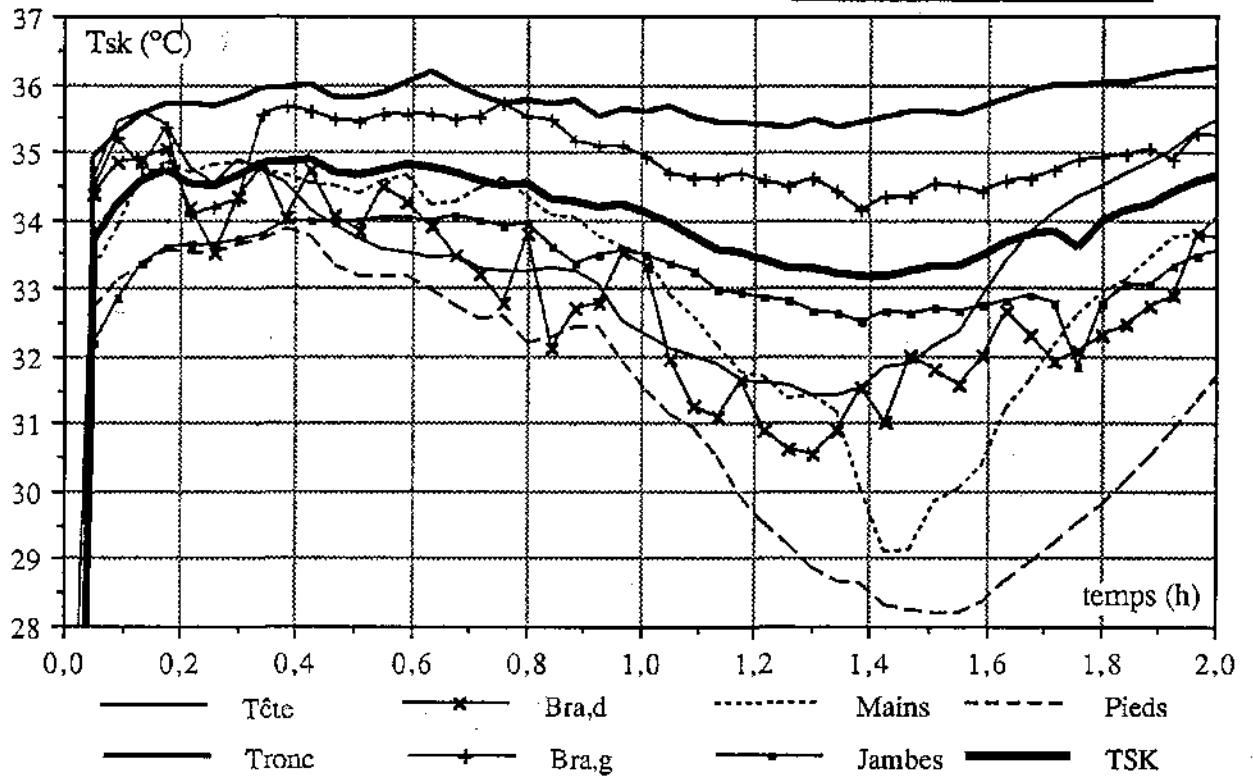


Données de "lab-Tsur ES3/NOV92"

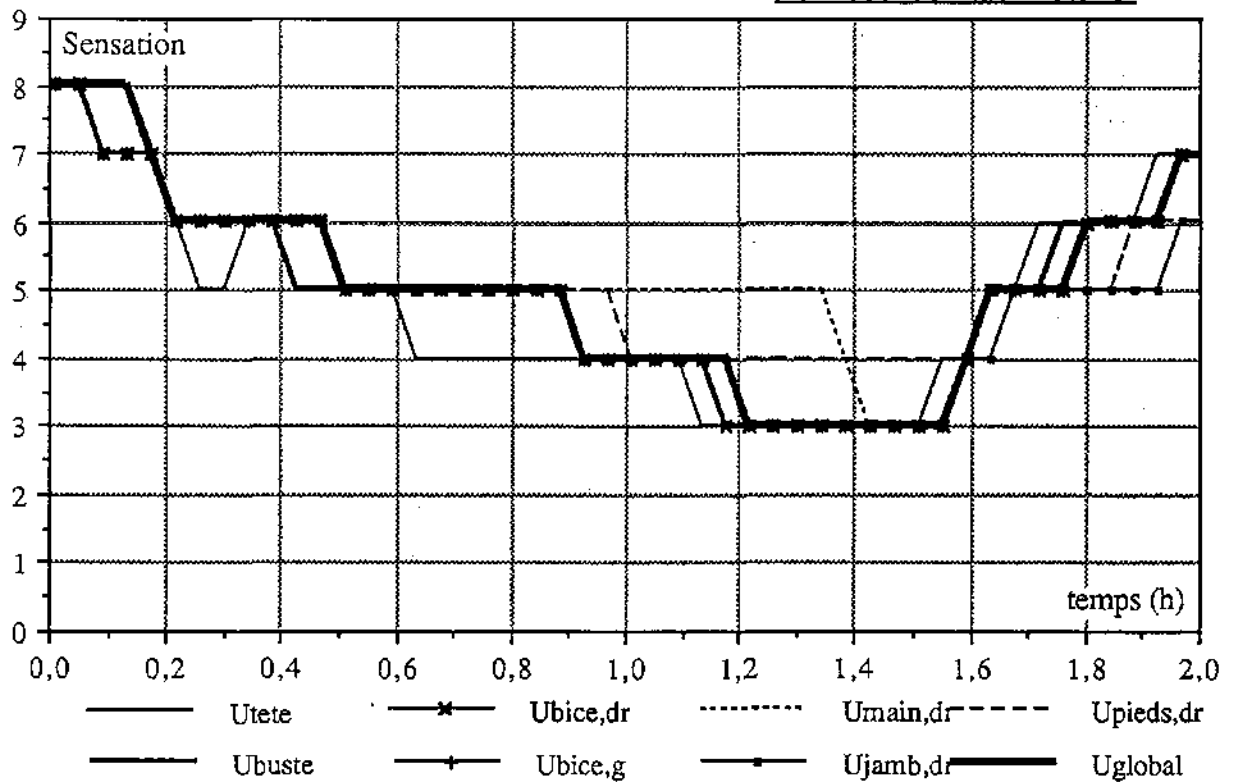


TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS

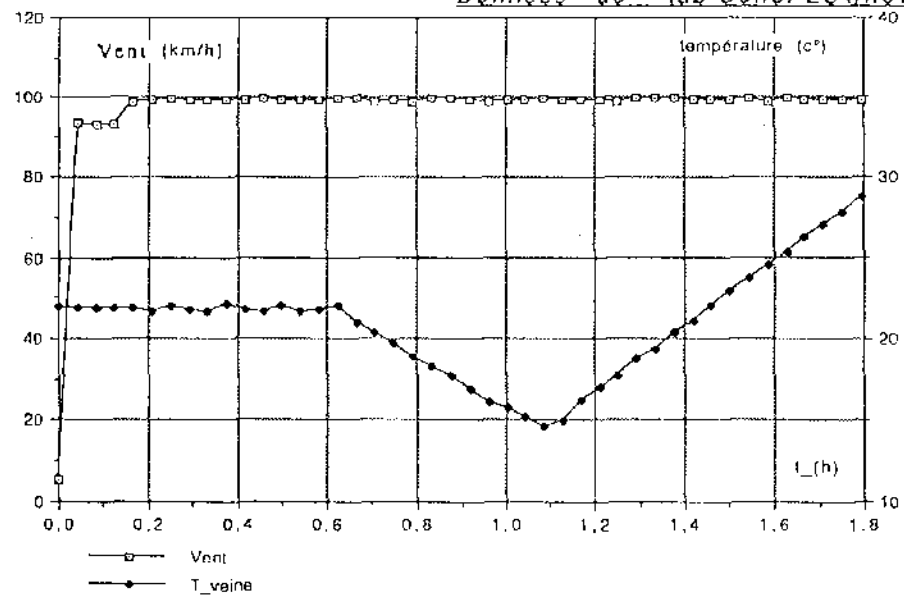
Données de "tab-T-S.cr-3"



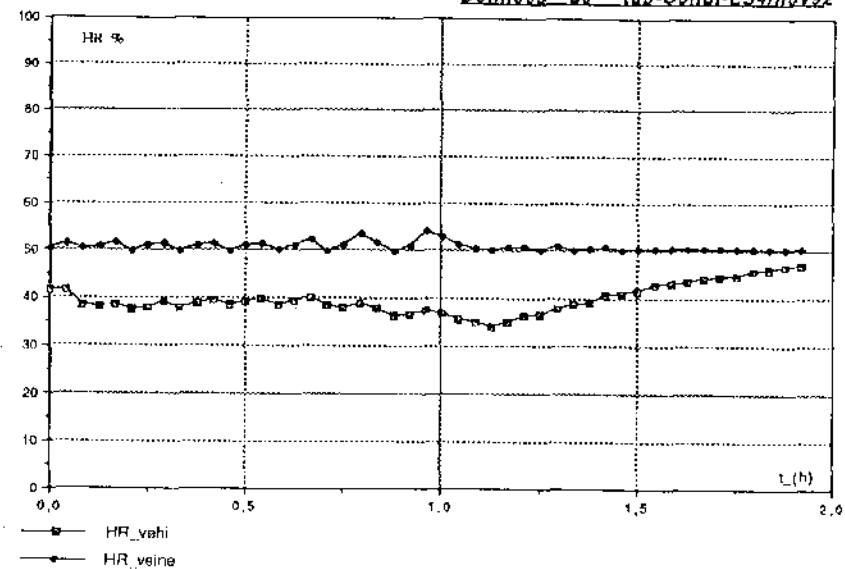
Données de "tab-T-S.cr-3"



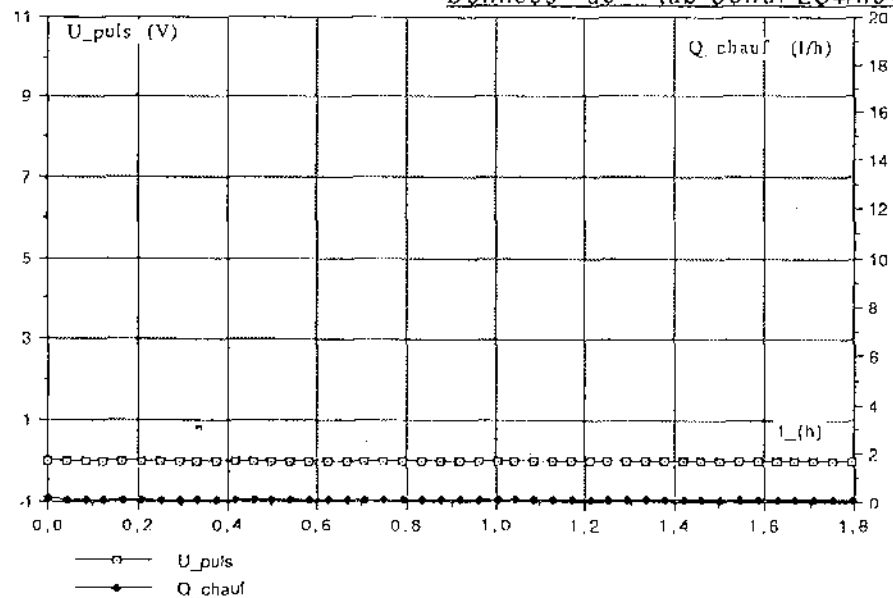
Données de "tab-Condi-ES4/nov92"



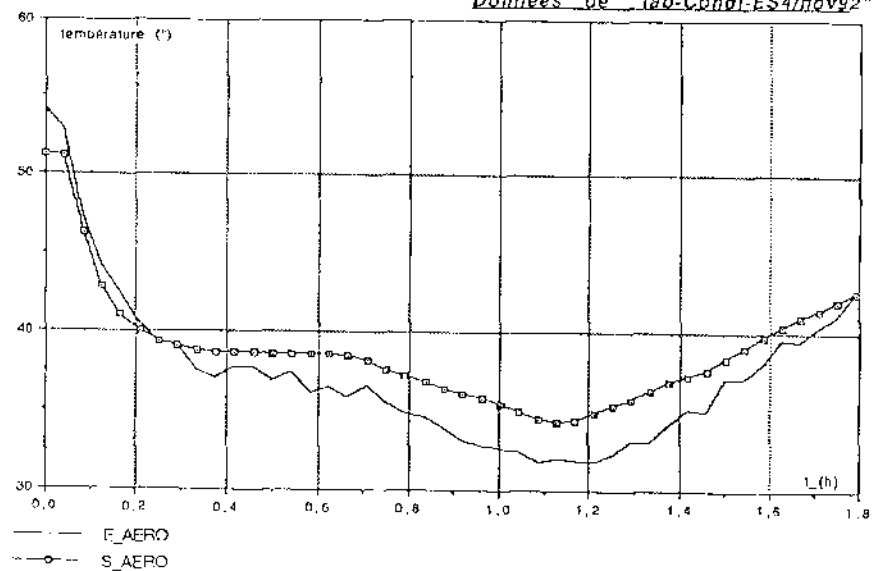
Données de "tab-Condi-ES4/nov92"



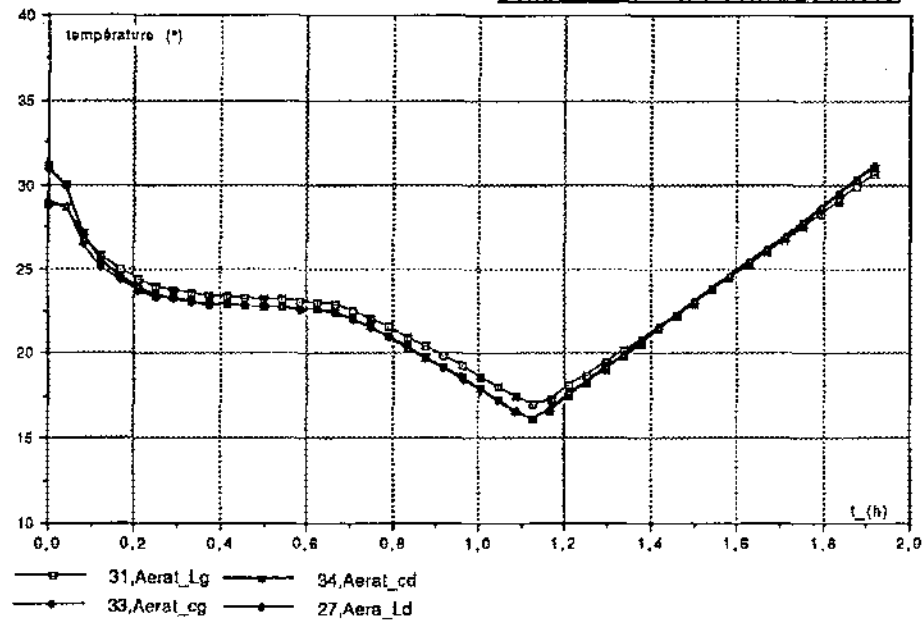
Données de "tab-Condi-ES4/nov92"



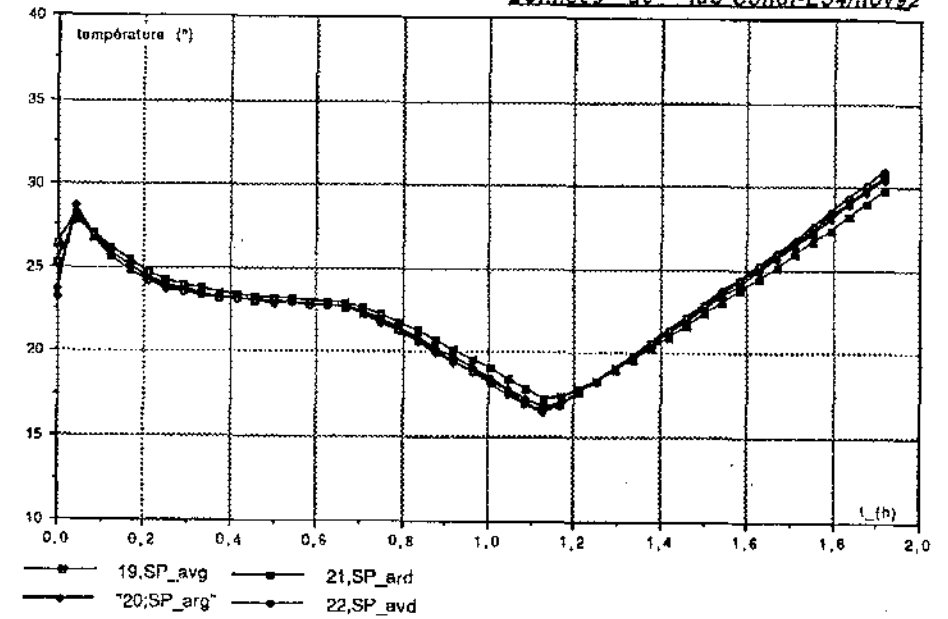
Données de "tab-Condi-ES4/nov92"



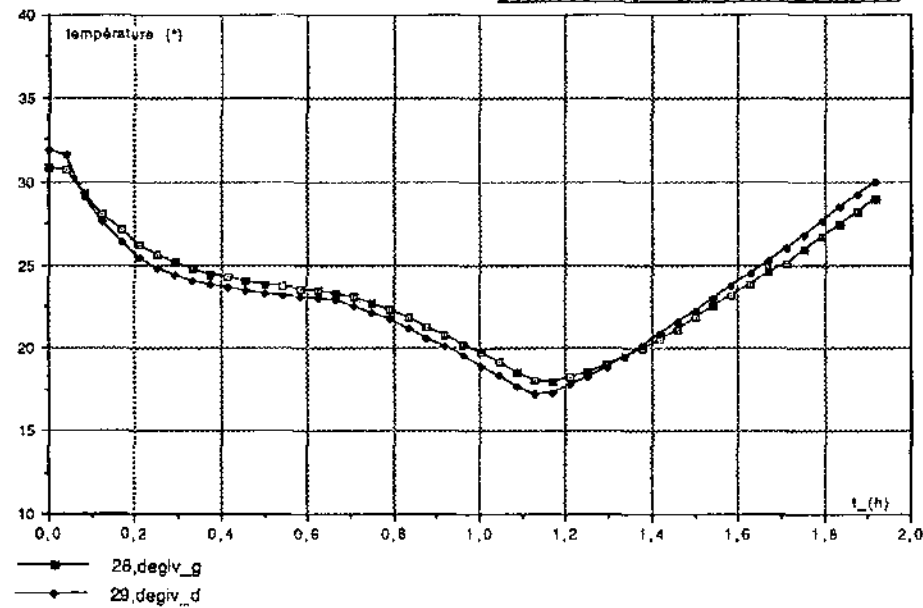
Données de "tab-Cond-ES4/nov92"



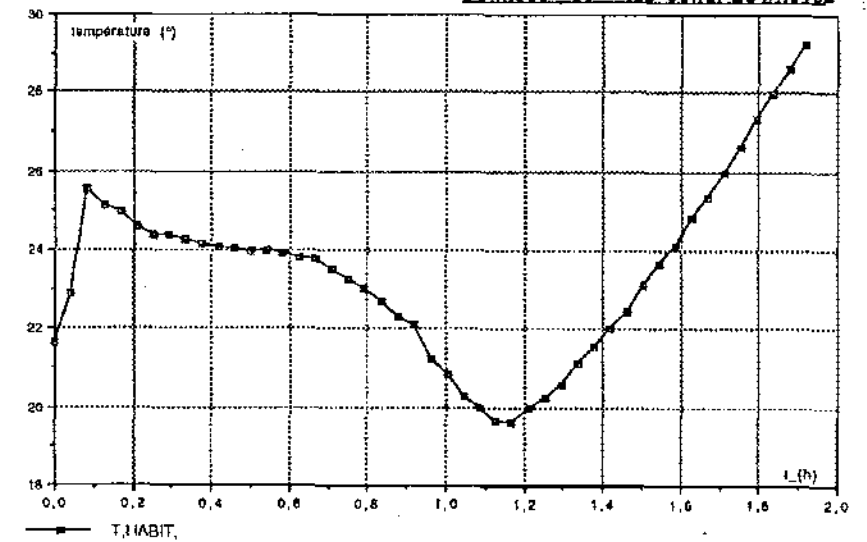
Données de "tab-Cond-ES4/nov92"



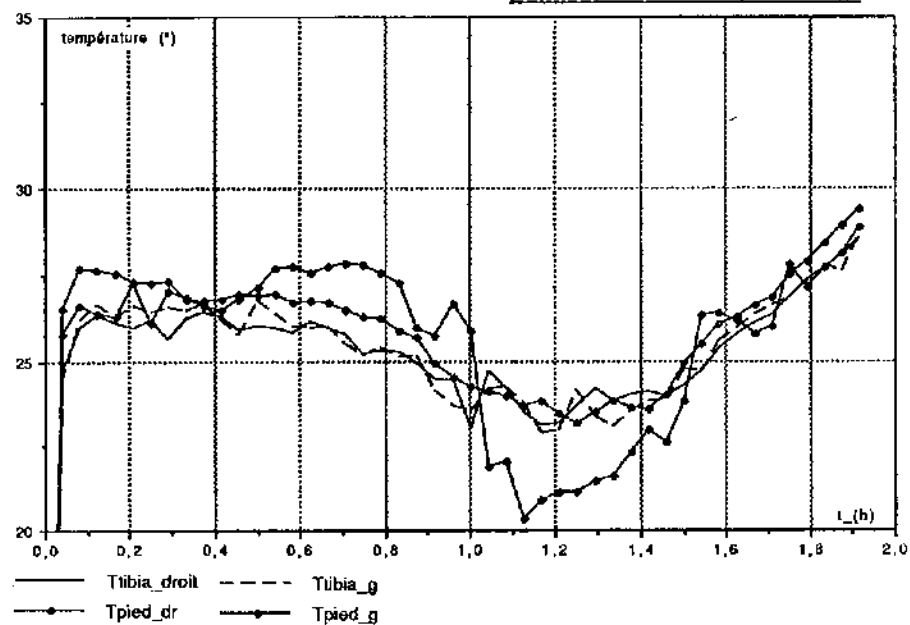
Données de "tab-Cond-ES4/nov92"



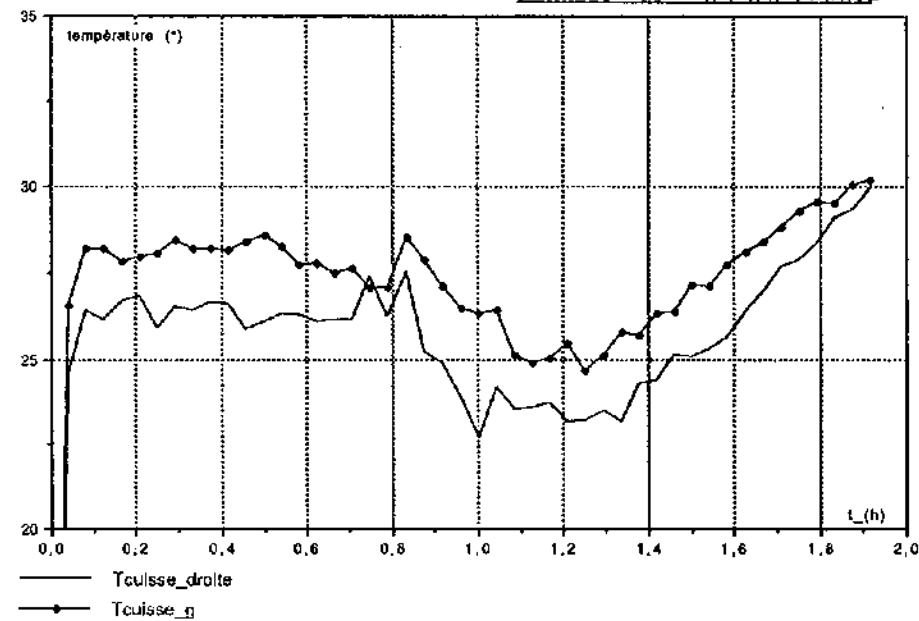
Données de "tab-Cond-ES4/nov92"



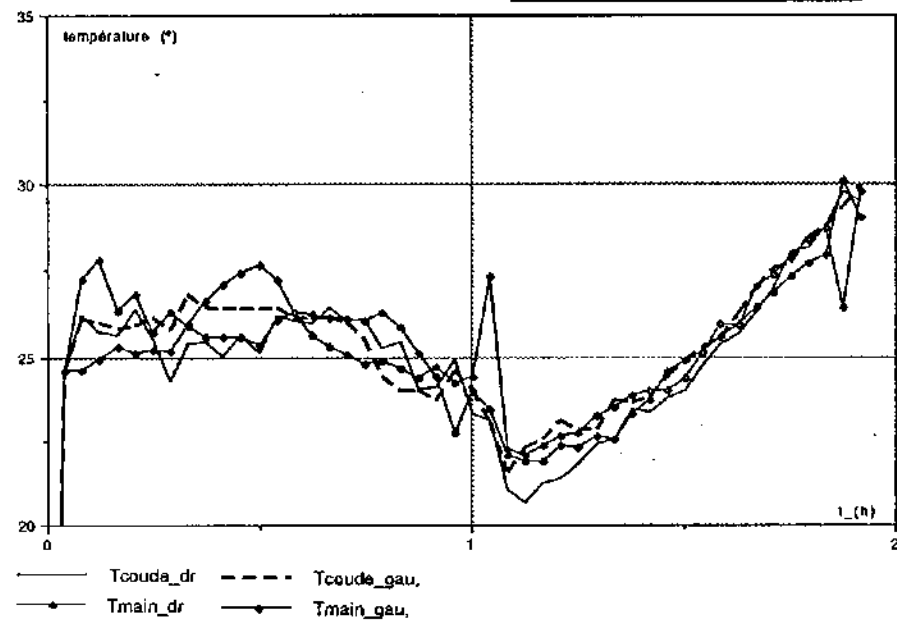
Données de "tab-tair-es4/n92"



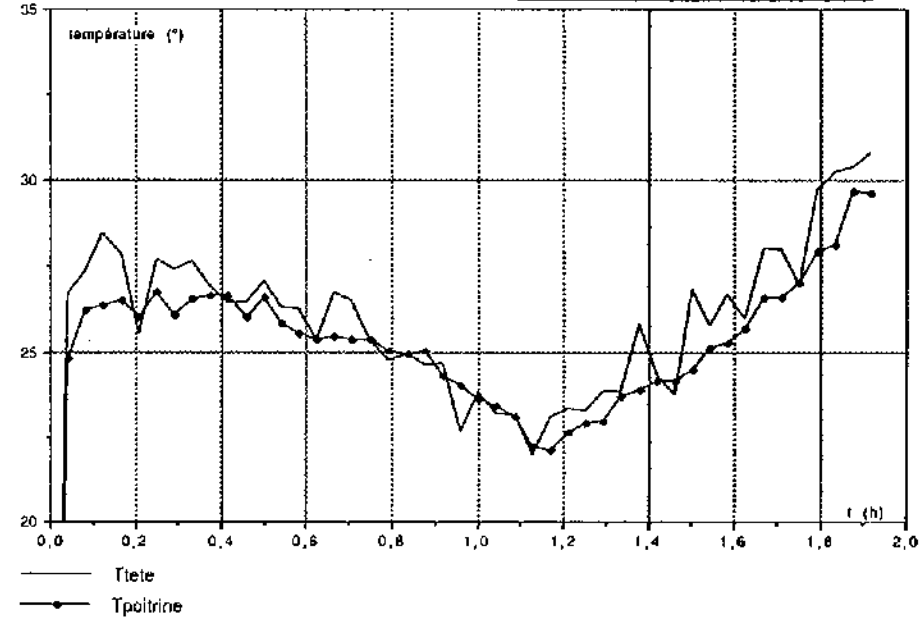
Données de "tab-tair-es4/n92"

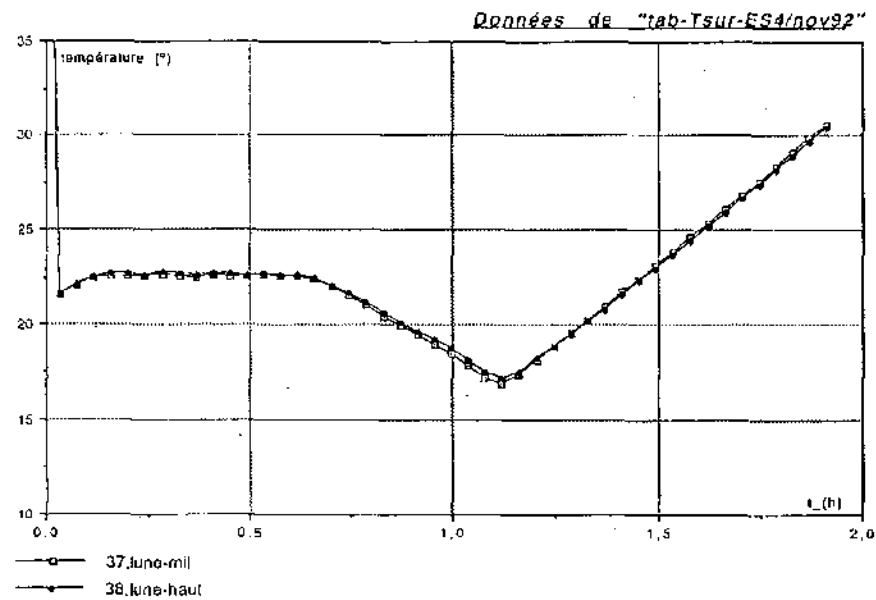
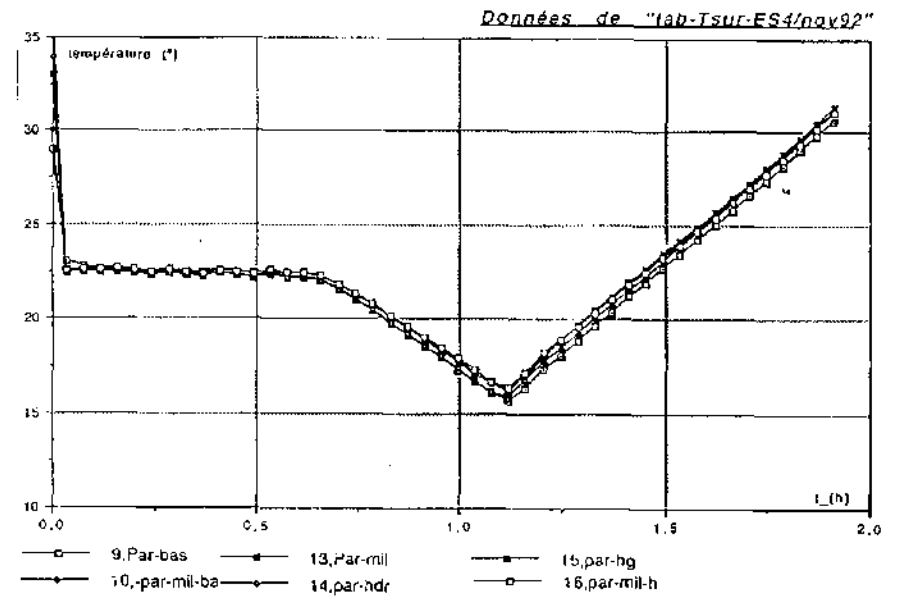
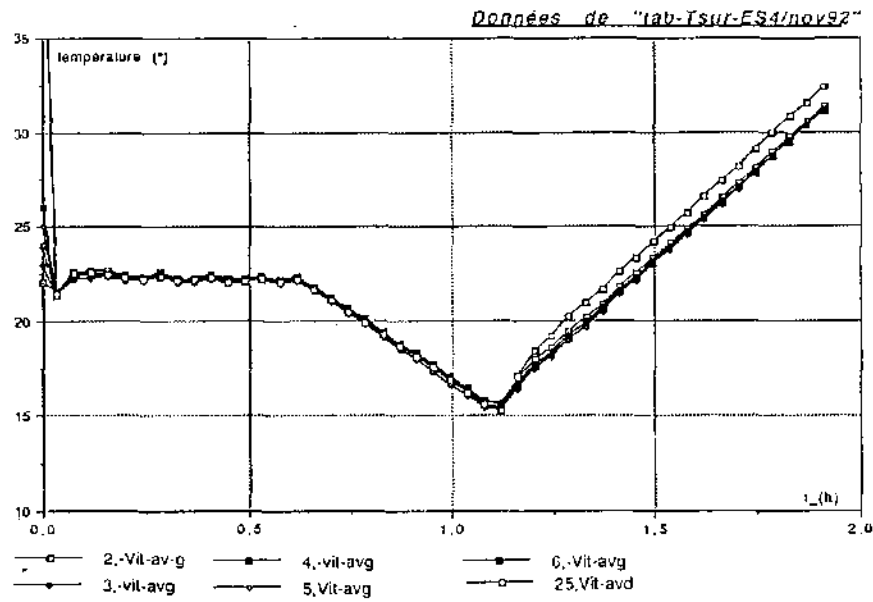


Données de "tab-tair-es4/n92"



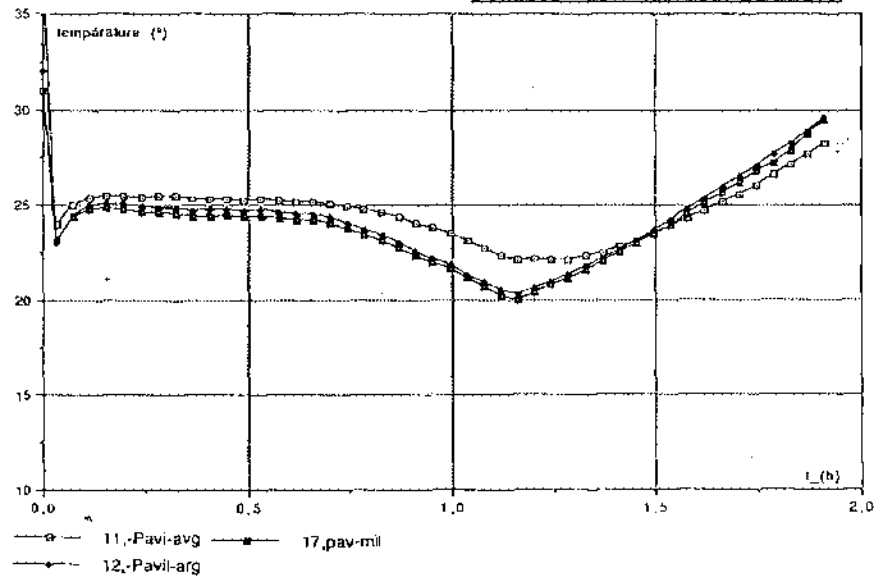
Données de "tab-tair-es4/n92"



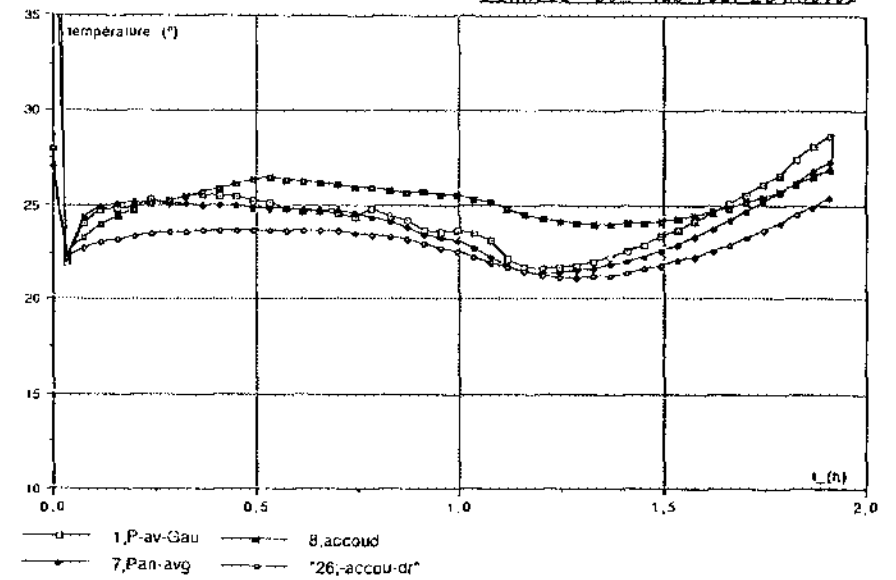


TEMPÉRATURES DE SURFACE

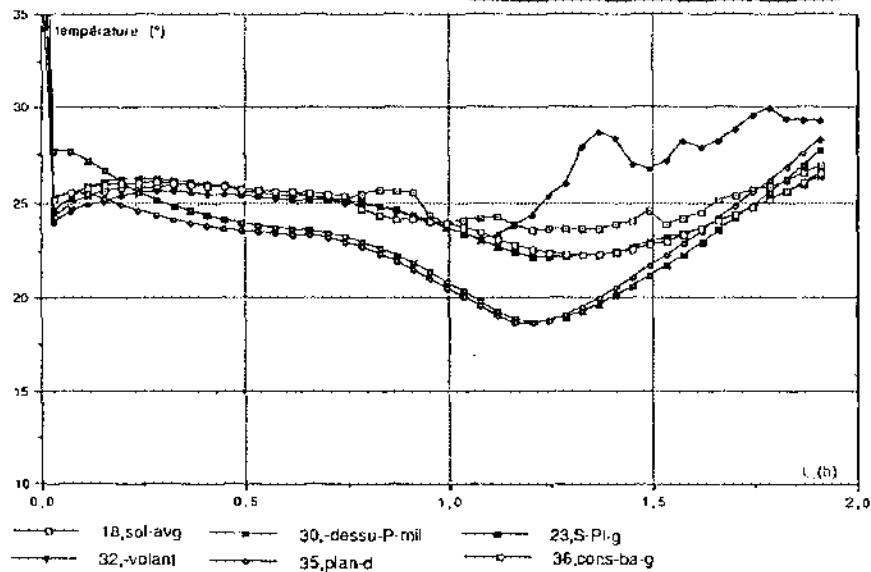
Données de "tab-Tsur-ES4/nov92"



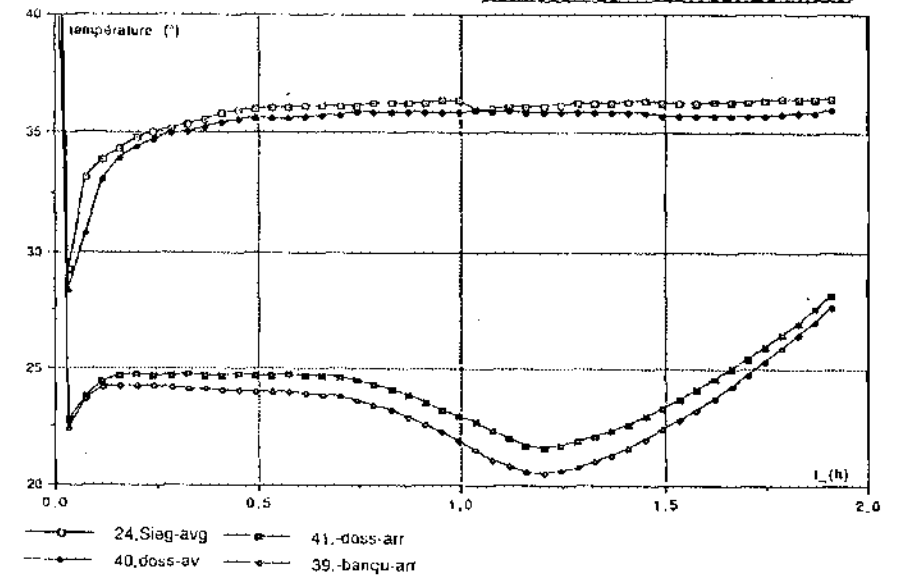
Données de "tab-Tsur-ES4/nov92"



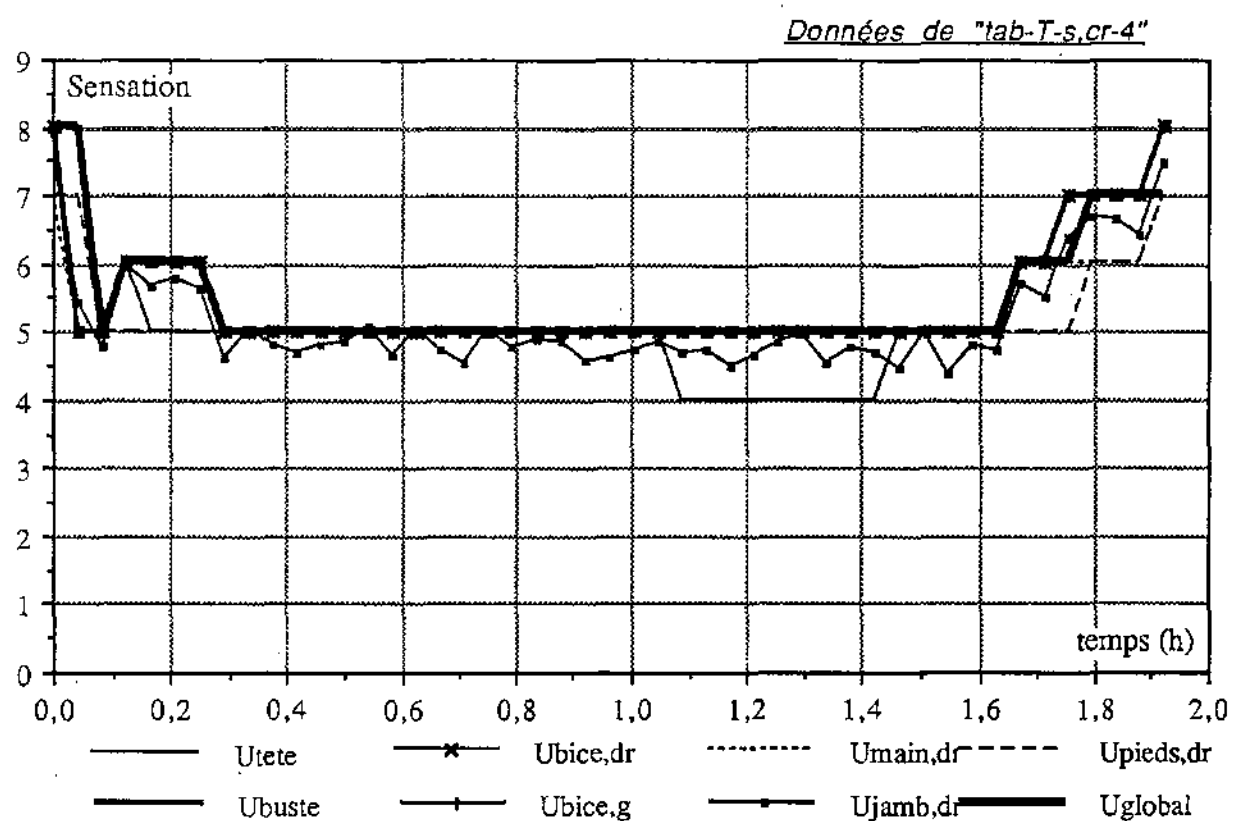
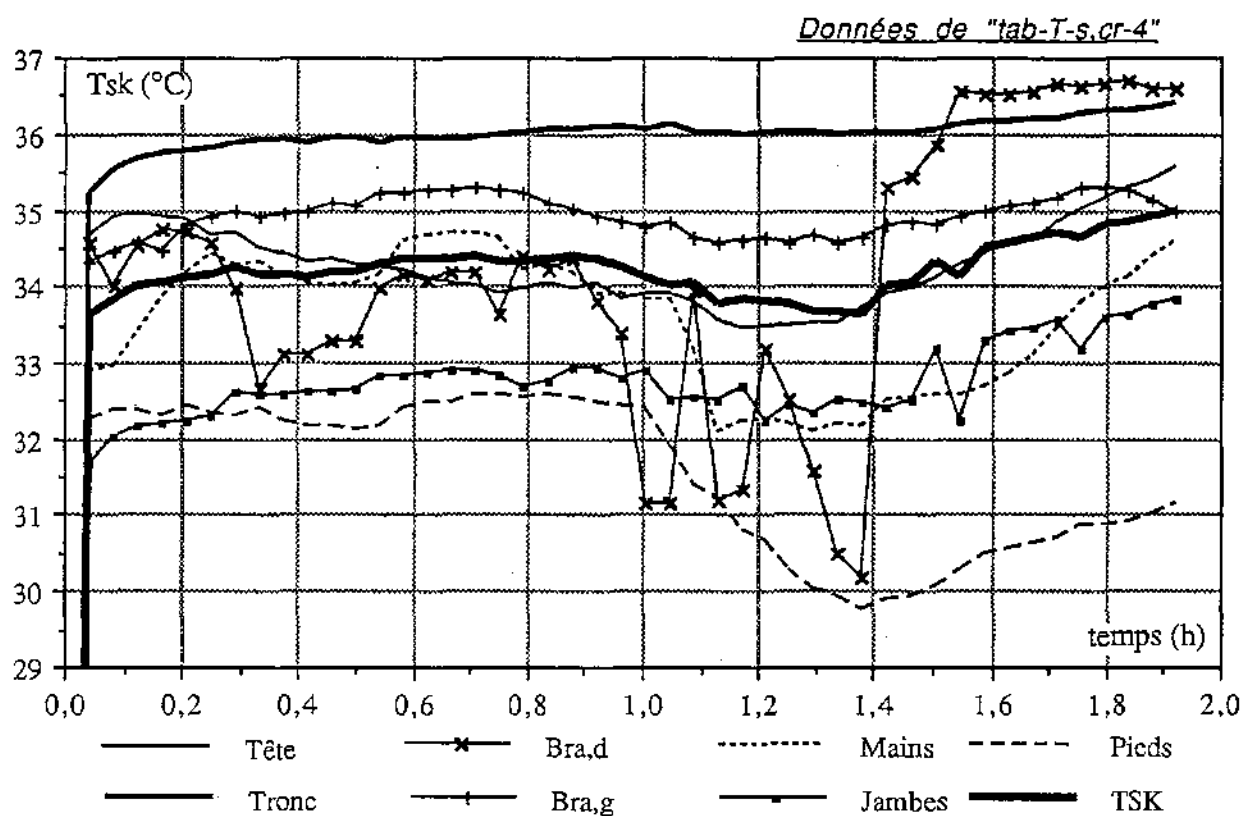
Données de "tab-Tsur-ES4/nov92"



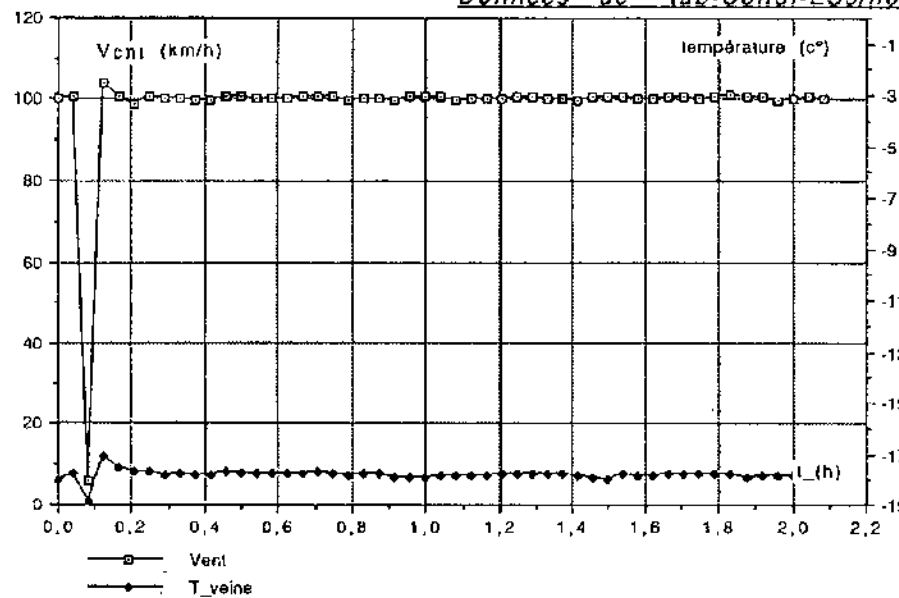
Données de "tab-Tsur-ES4/nov92"



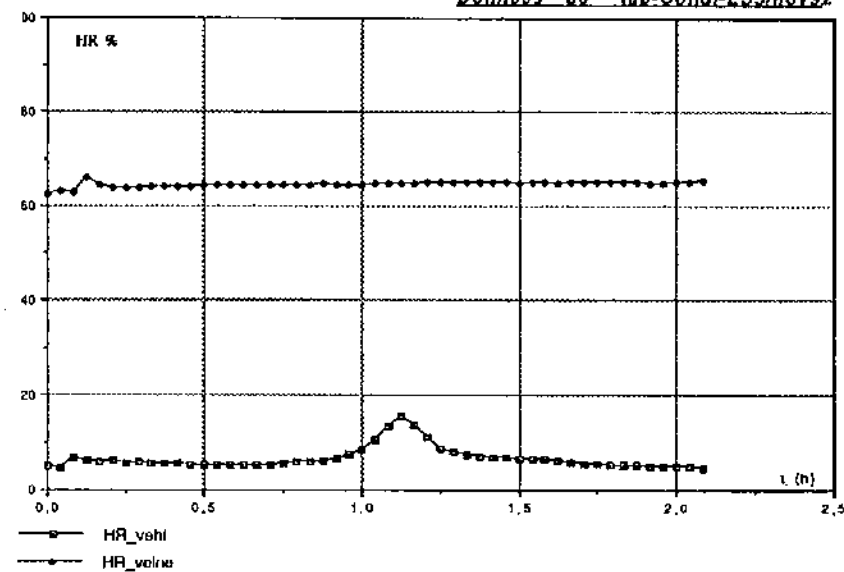
TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS



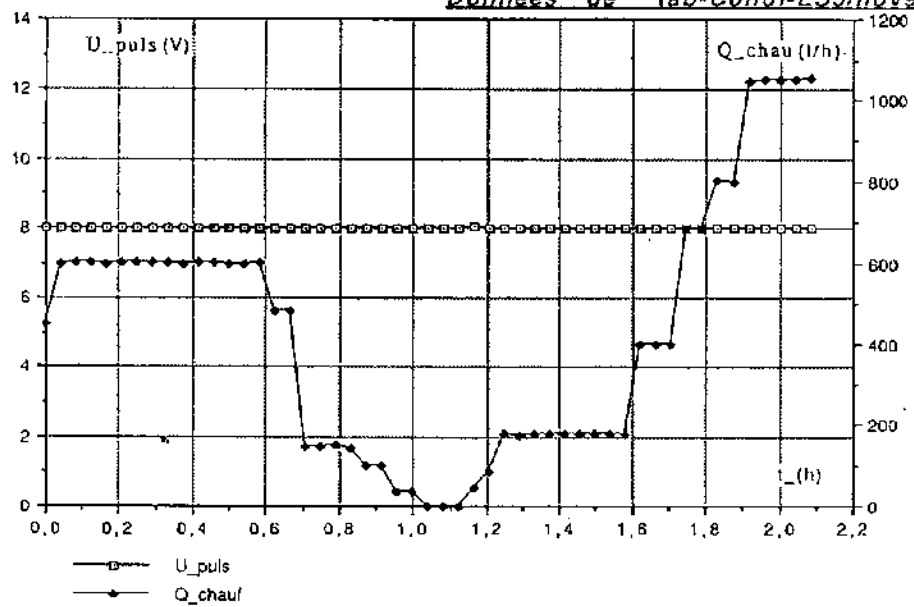
Données de "tab-Condi-ES5/nov92"



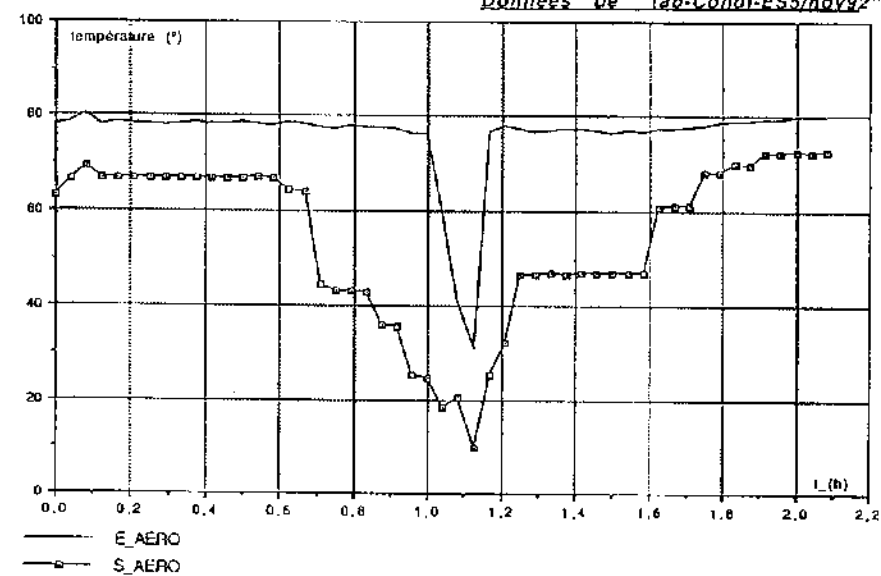
Données de "tab-Condi-ES5/nov92"



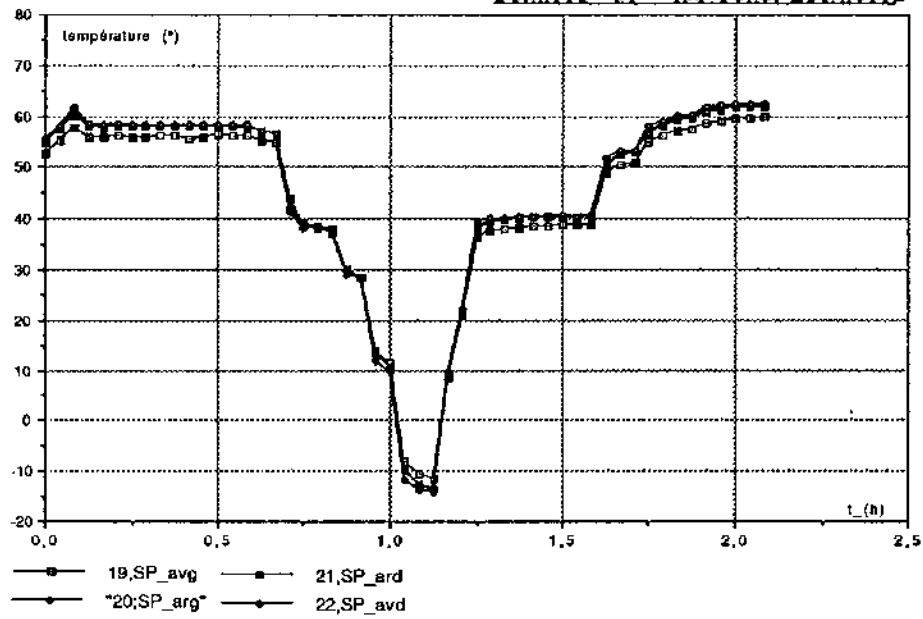
Données de "tab-Condi-ES5/nov92"



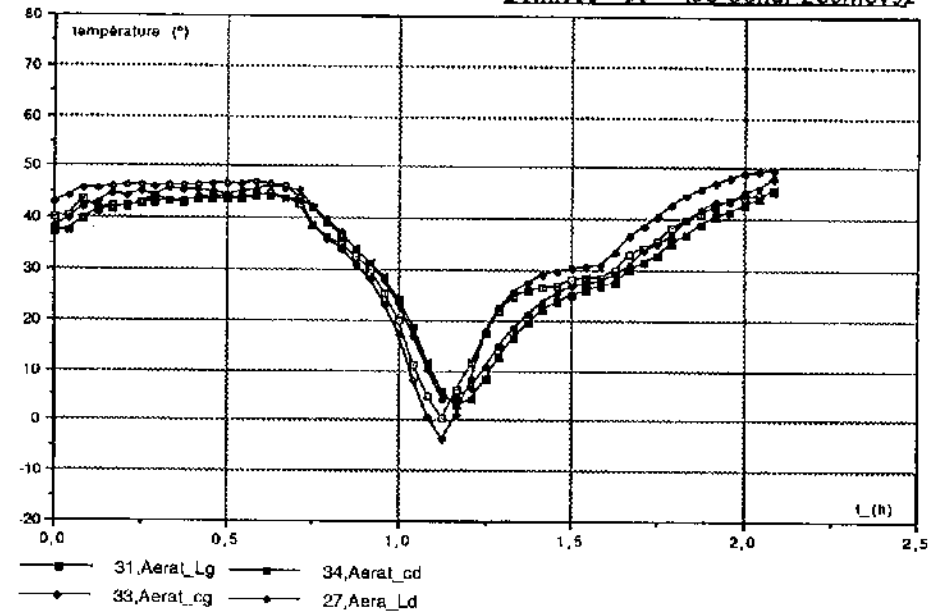
Données de "tab-Condi-ES5/nov92"



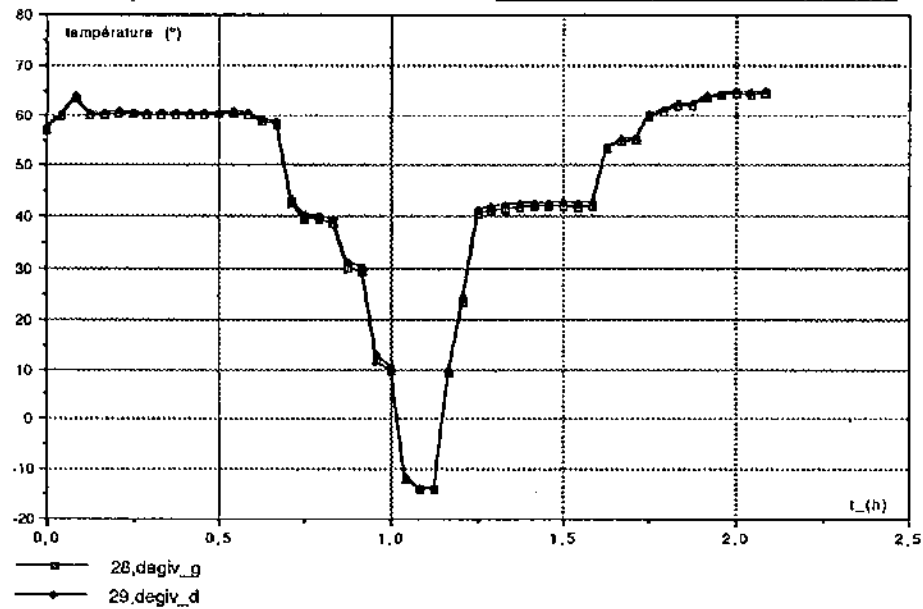
Données de "lab-Cond1-ES5/nov92"



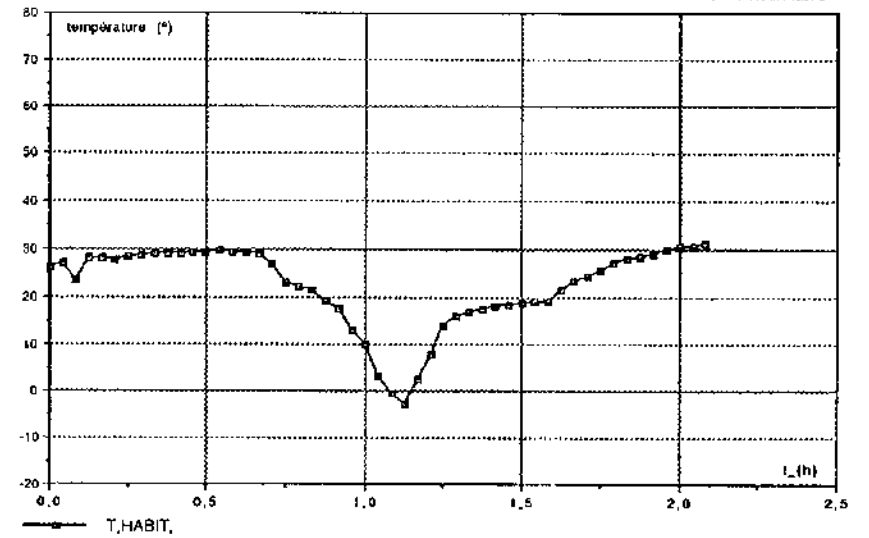
Données de "lab-Cond1-ES5/nov92"



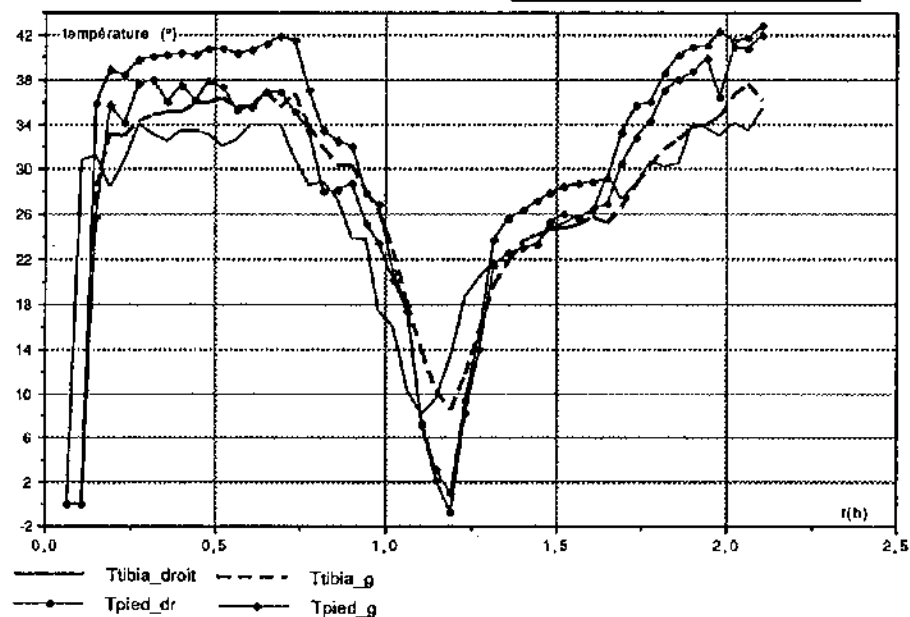
Données de "lab-Cond1-ES5/nov92"



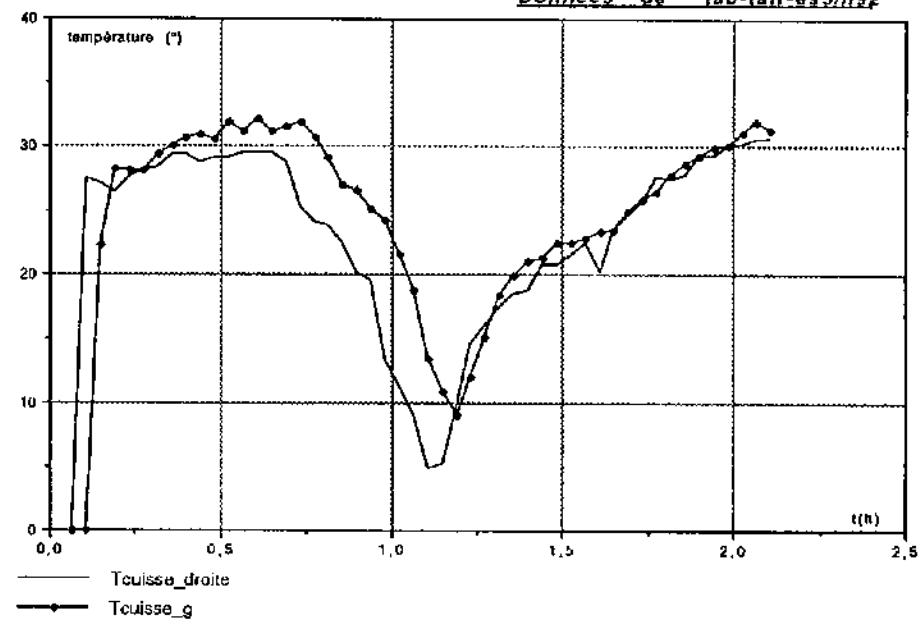
Données de "lab-Cond1-ES5/nov92"



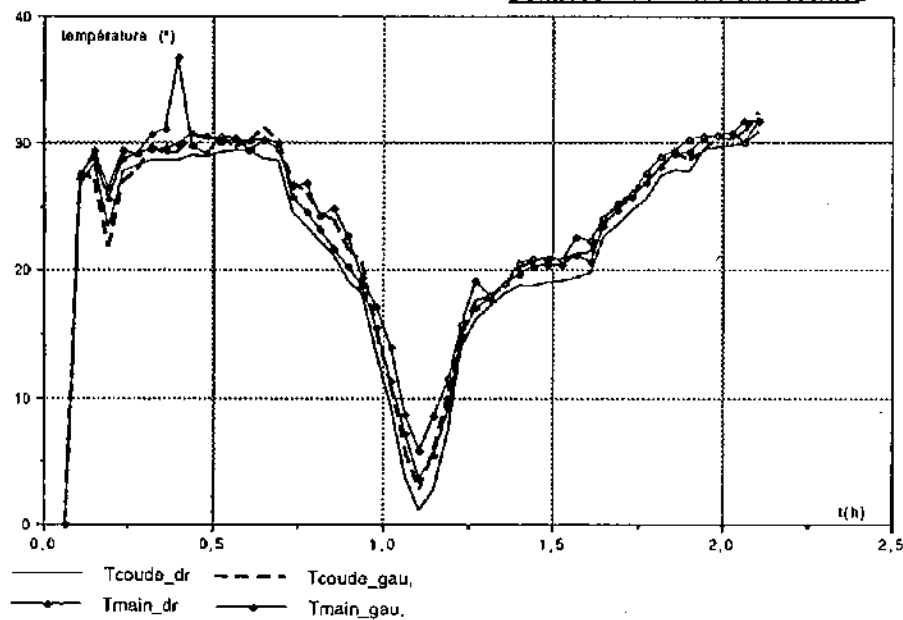
Données de "tab-tair-es5/n92"



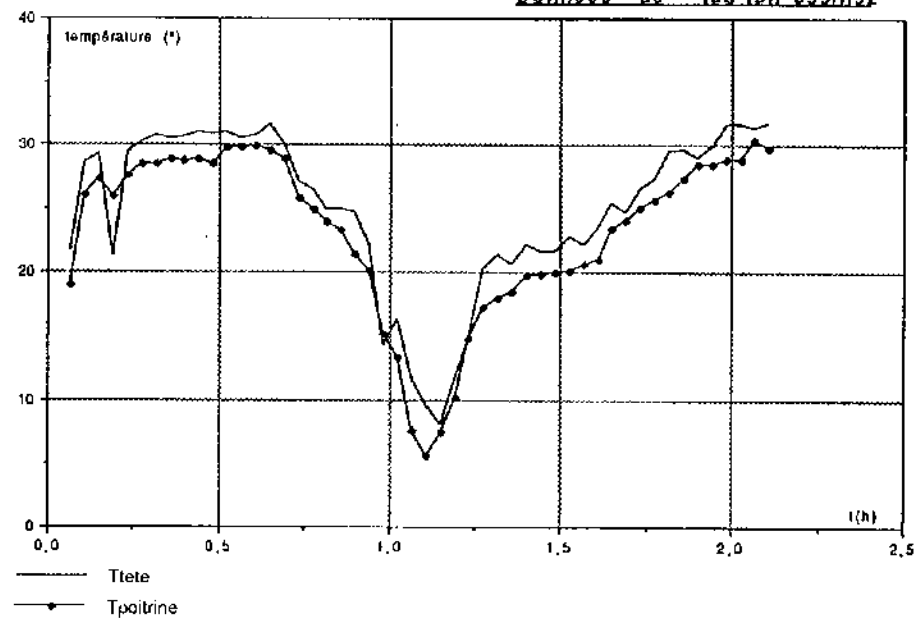
Données de "tab-tair-es5/n92"



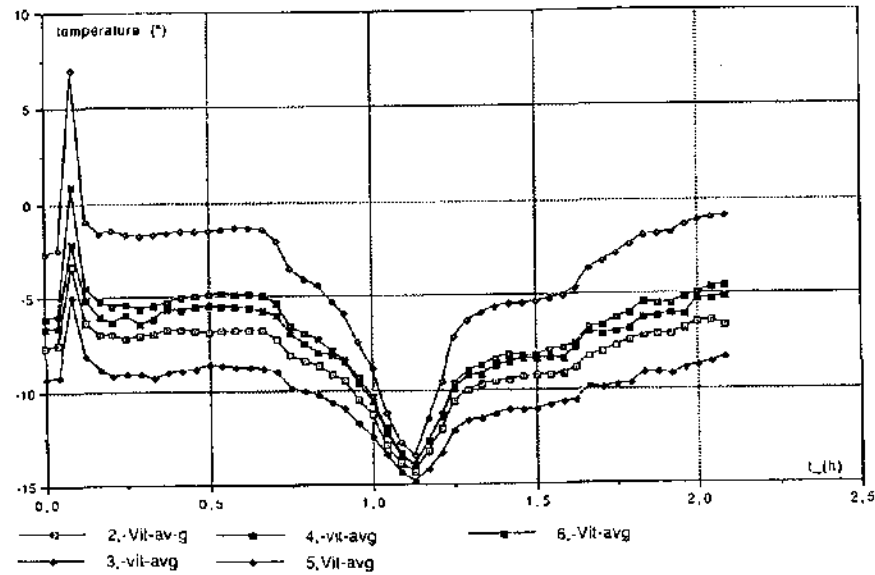
Données de "tab-tair-es5/n92"



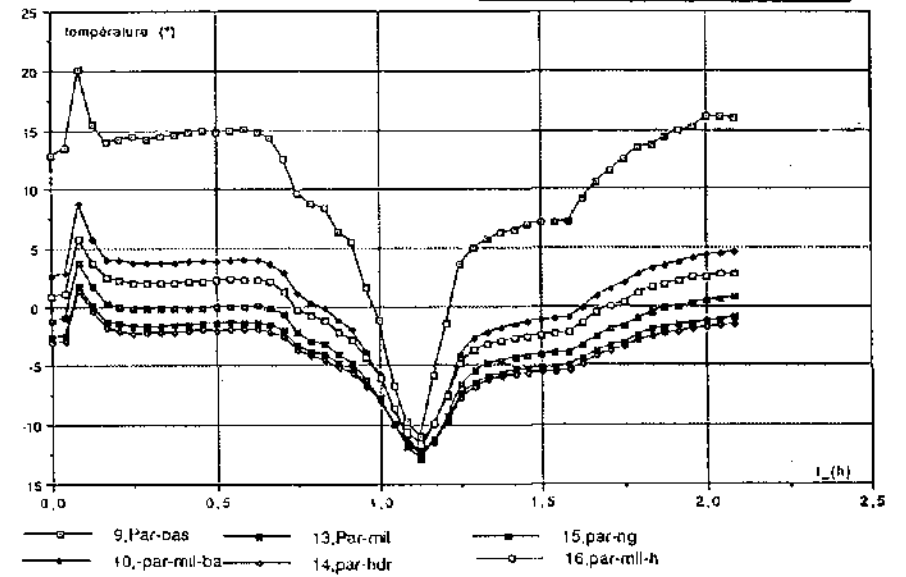
Données de "tab-tair-es5/n92"



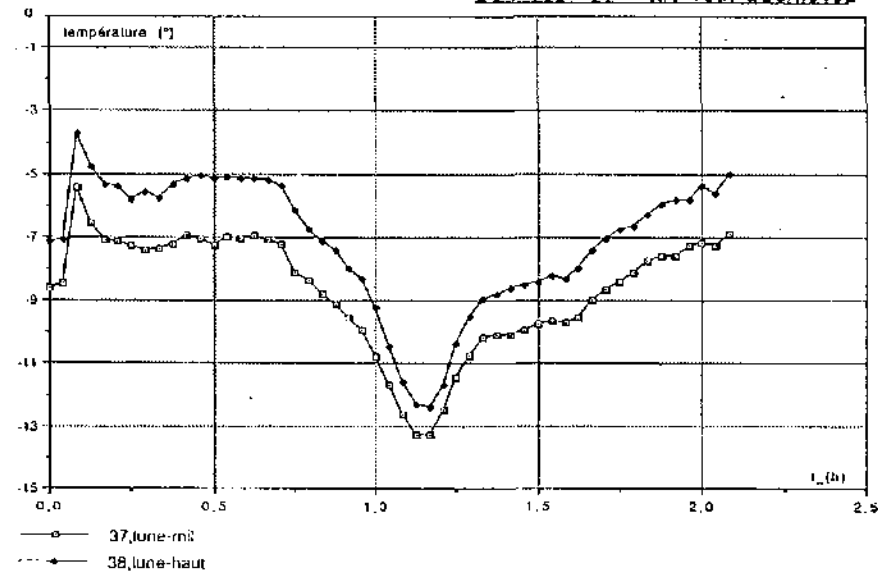
Données de "tab-Tsur-ES5/nov92"



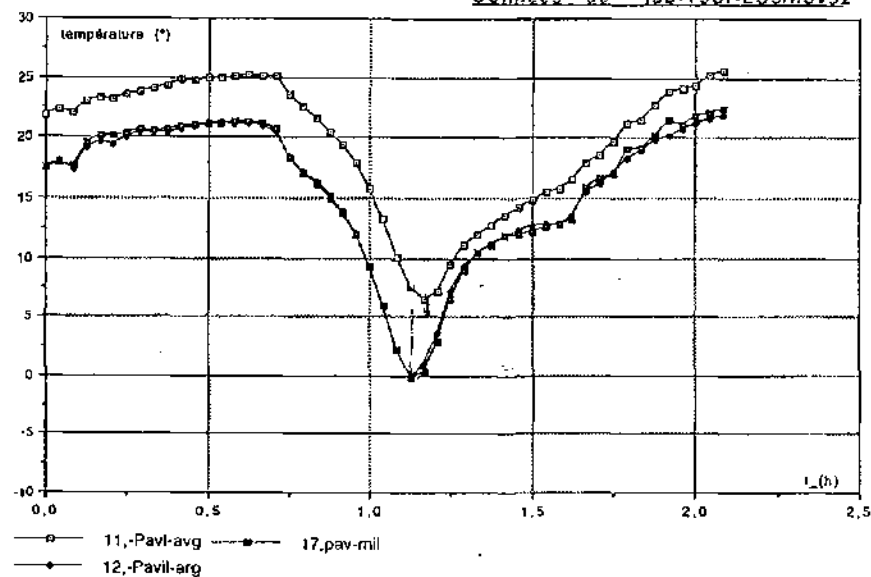
Données de "tab-Tsur-ES5/nov92"



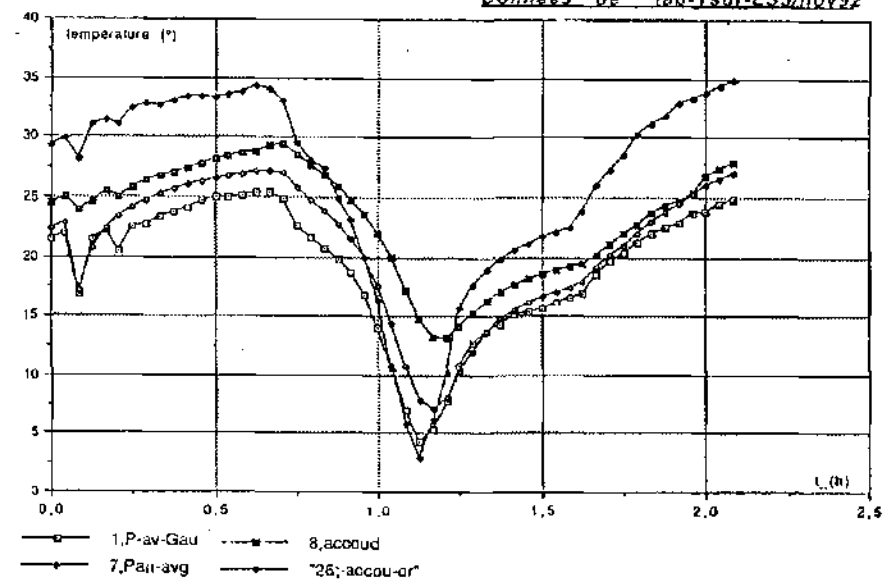
Données de "tab-Tsur-ES5/nov92"



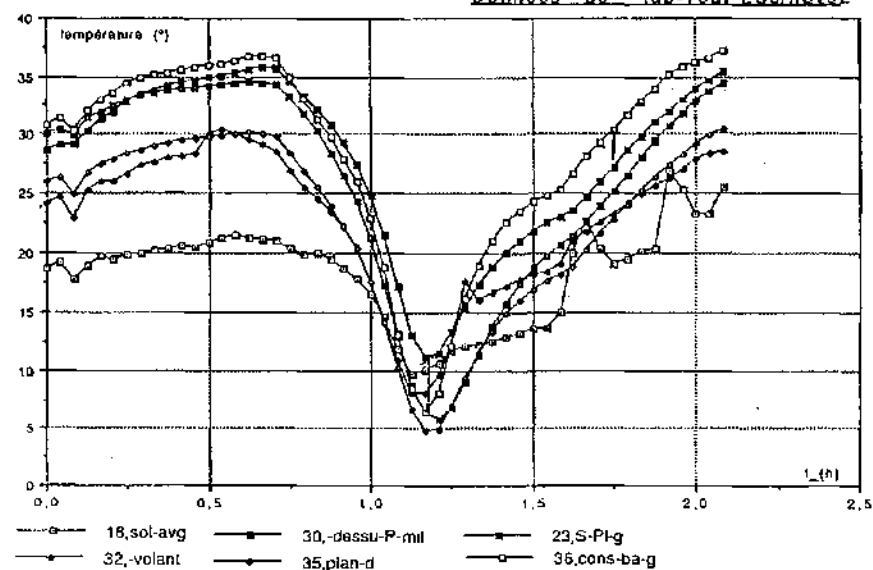
Données de "tab-Tsur-ES5/nov92"



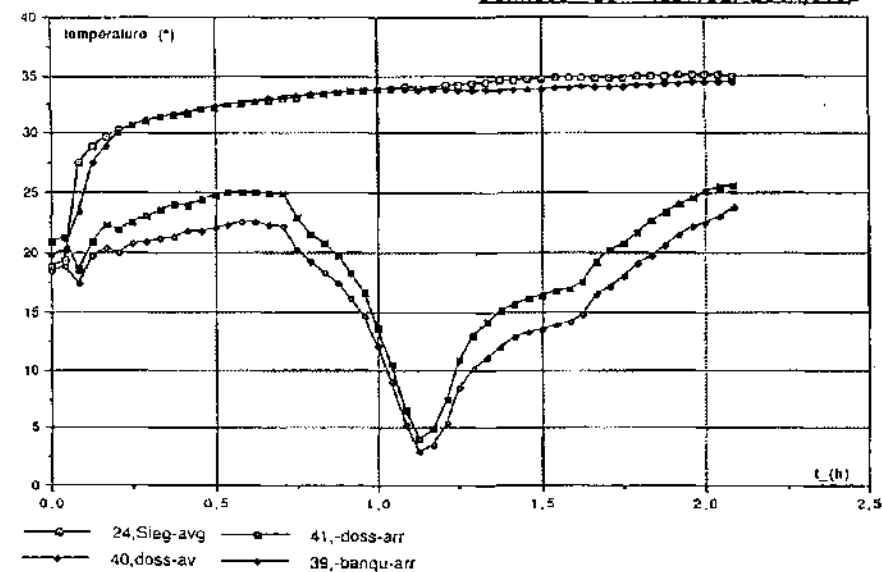
Données de "tab-Tsur-ES5/nov92"



Données de "tab-Tsur-ES5/nov92"

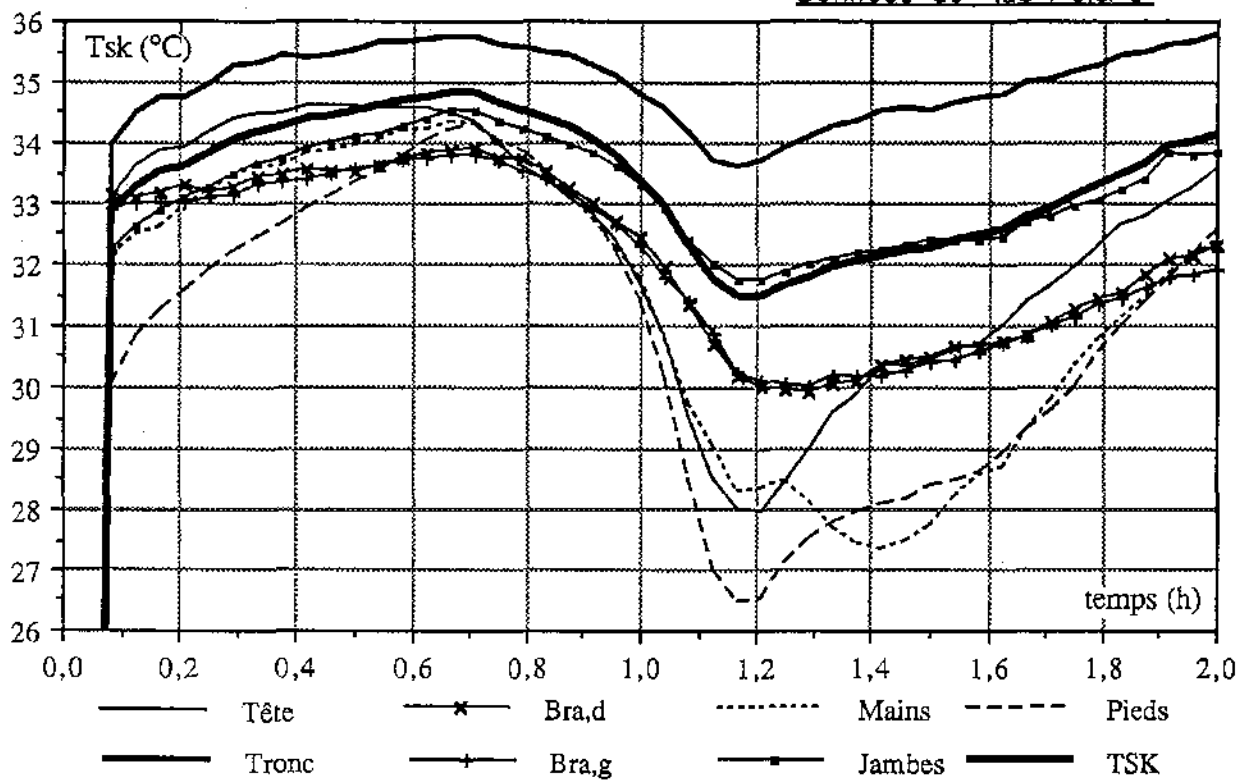


Données de "tab-Tsur-ES5/nov92"

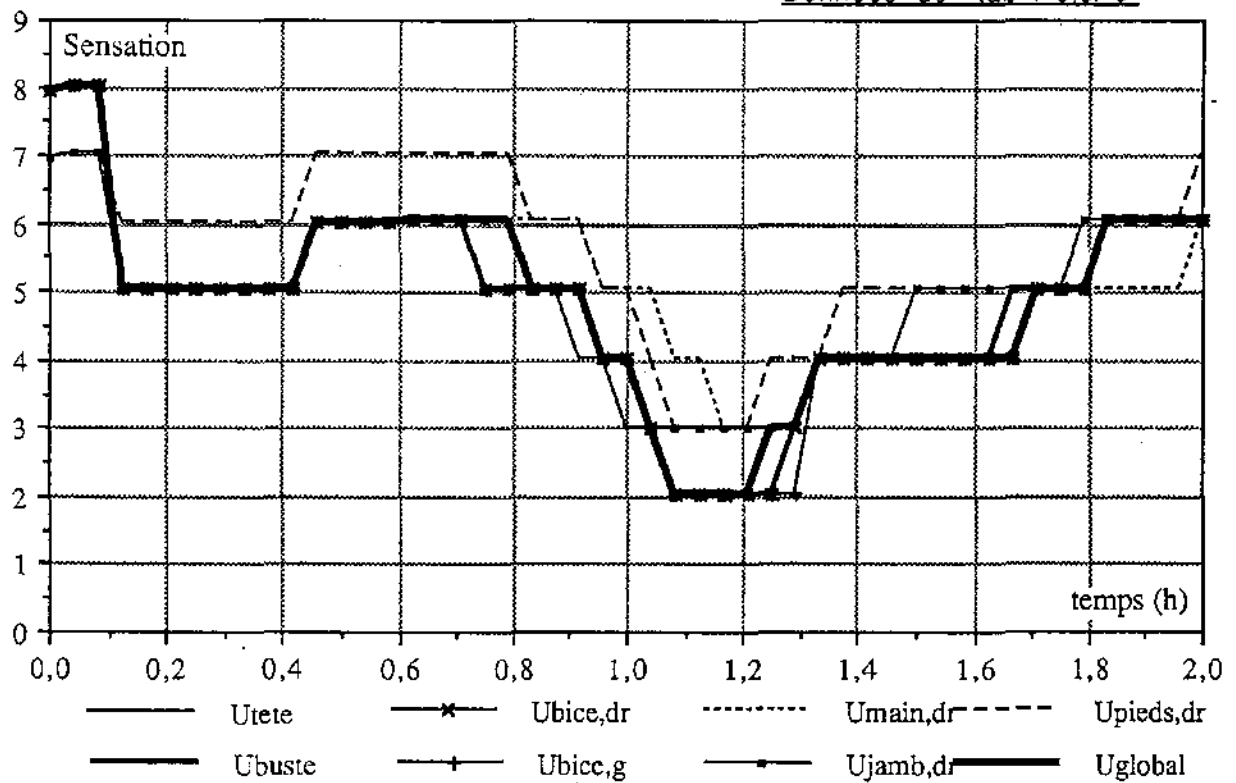


TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS

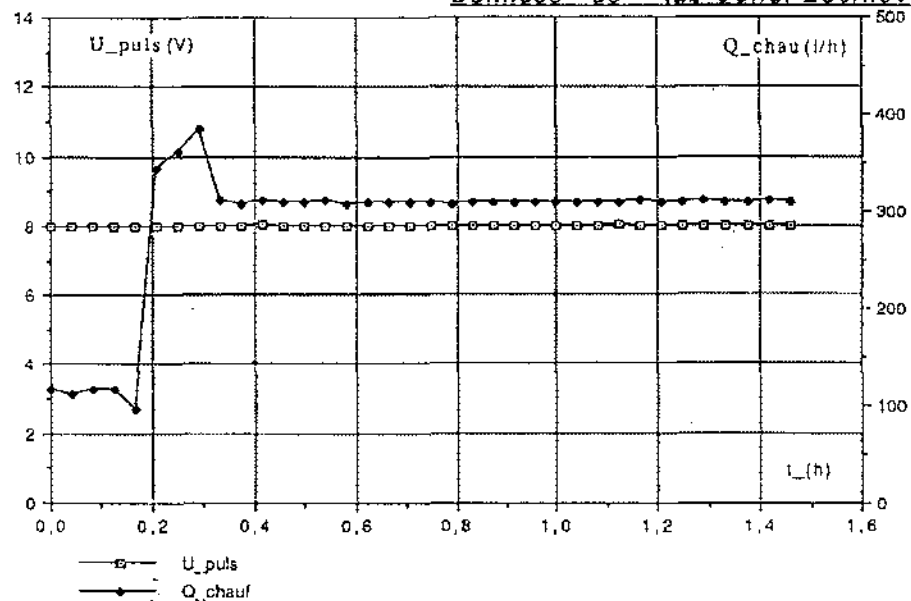
Données de "tab-T-s.cr-5"



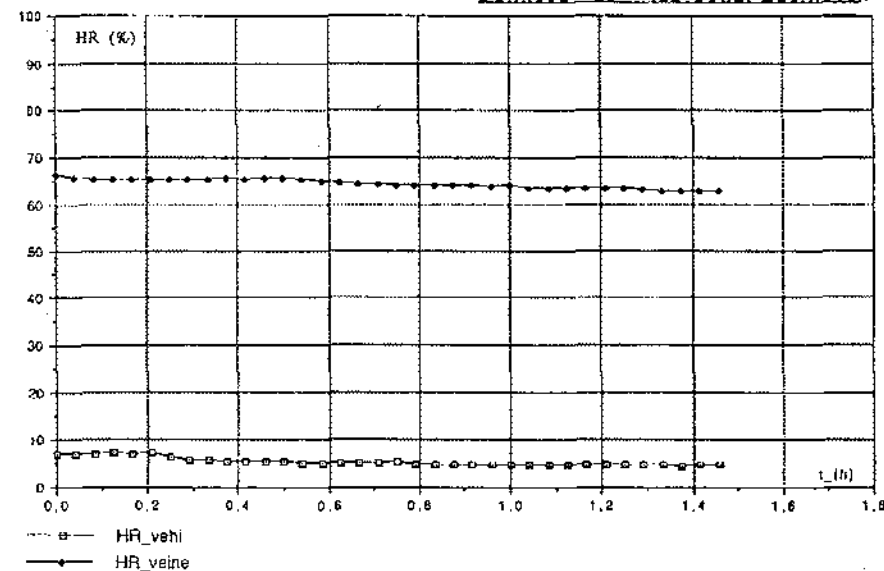
Données de "tab-T-s.cr-5"



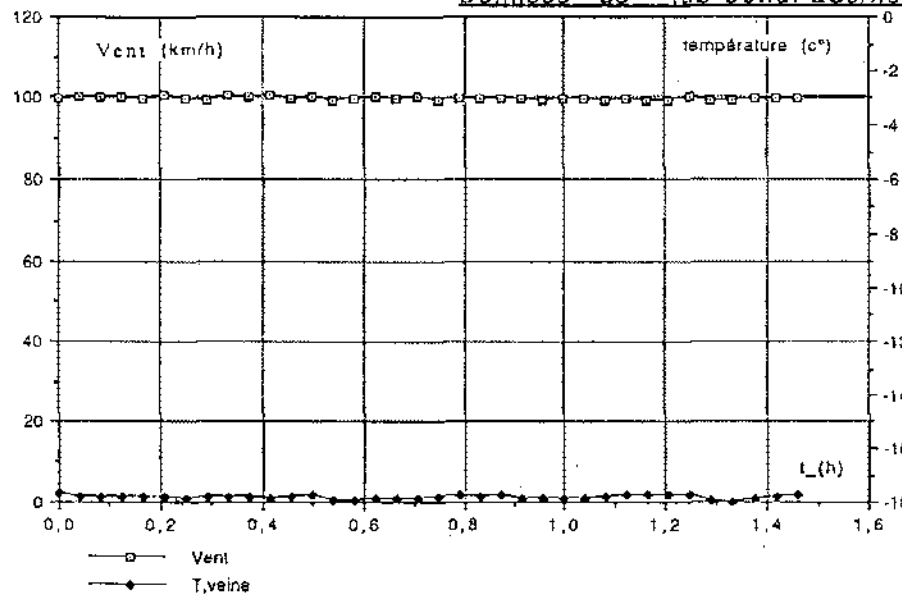
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



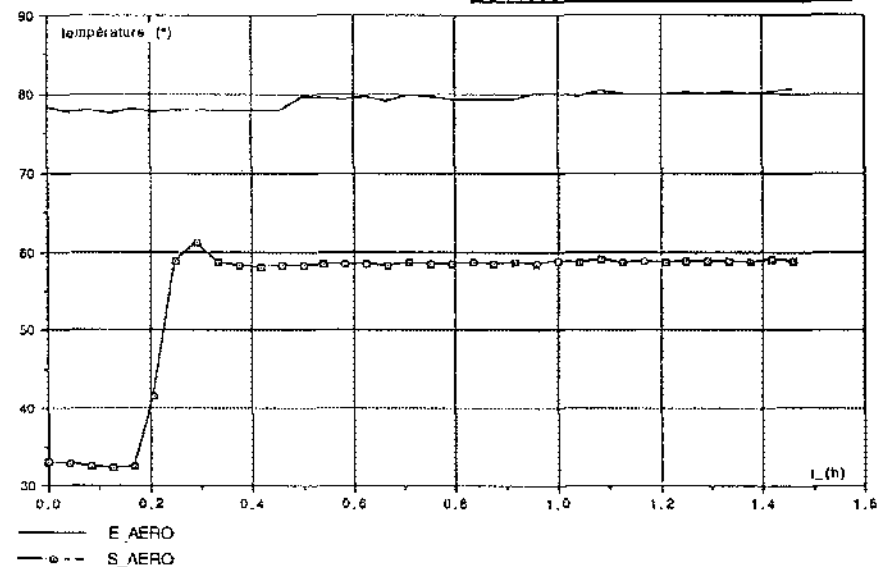
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



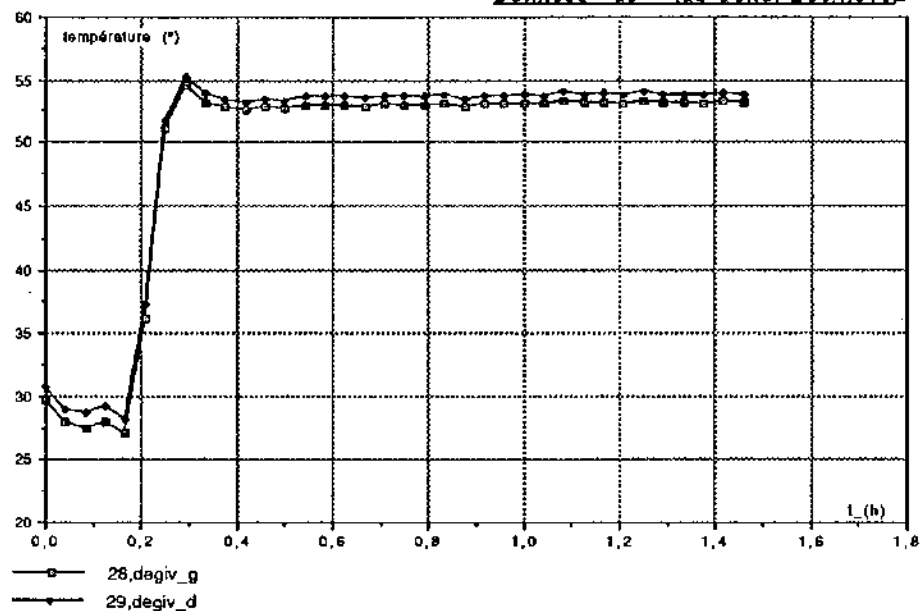
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



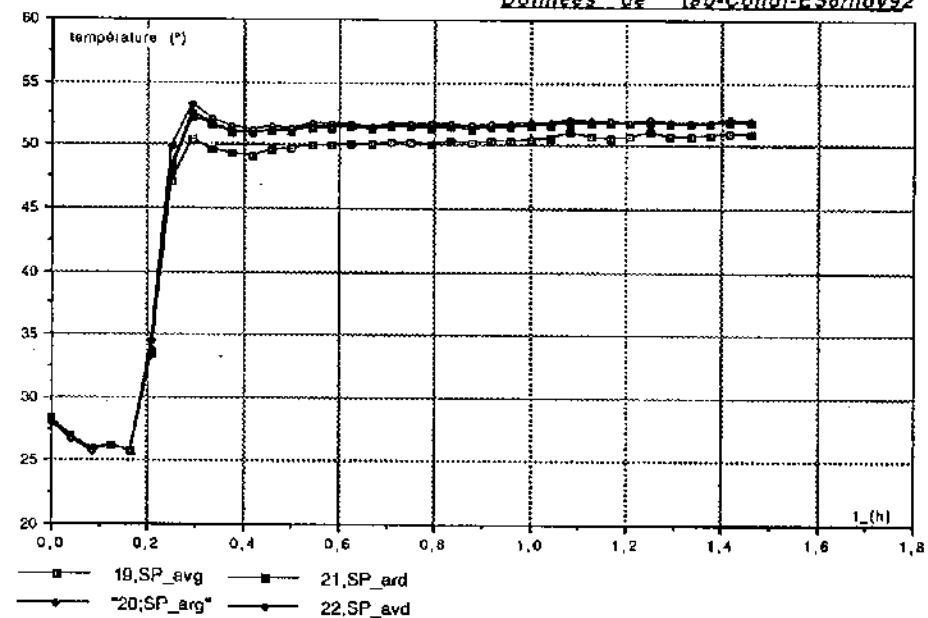
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



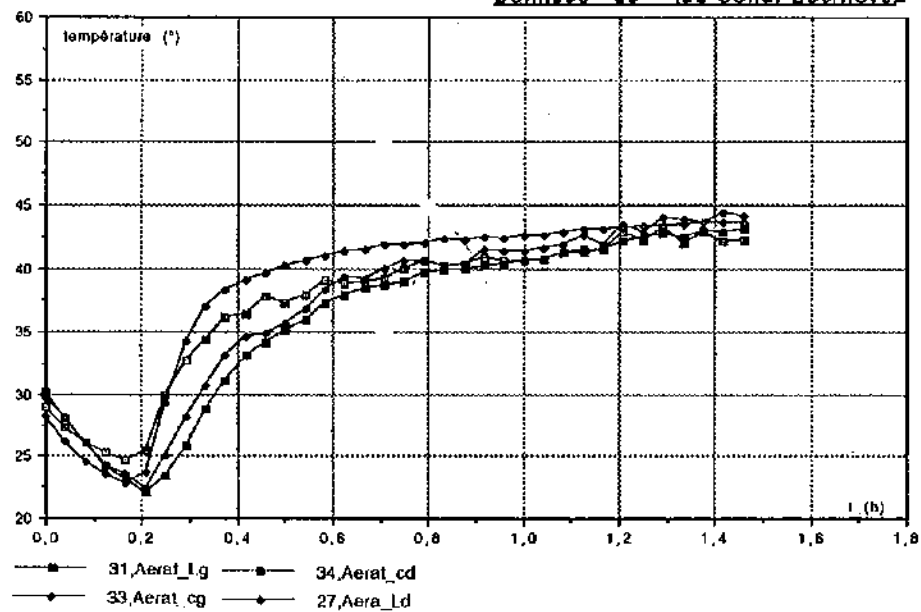
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



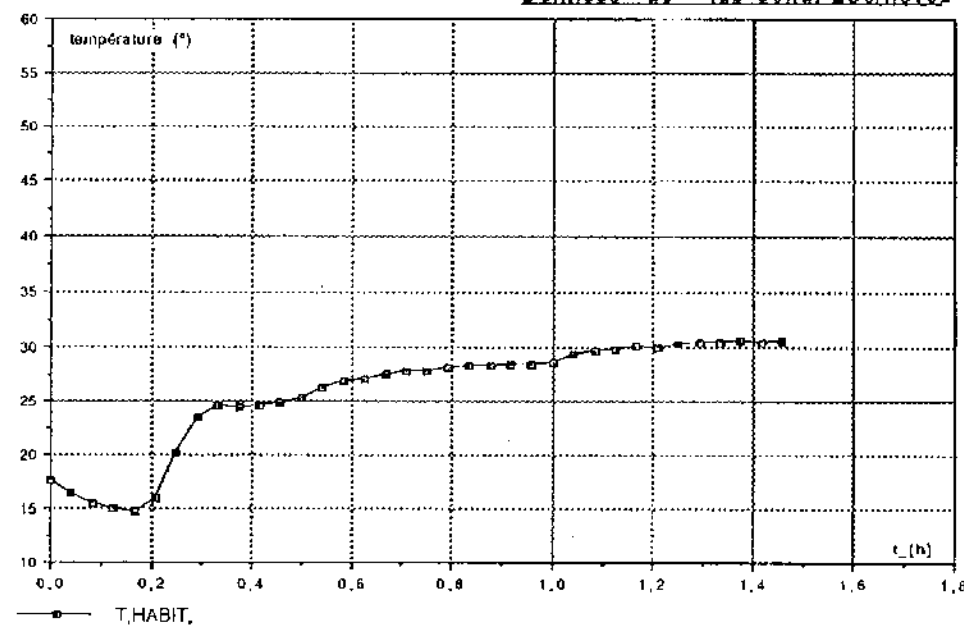
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



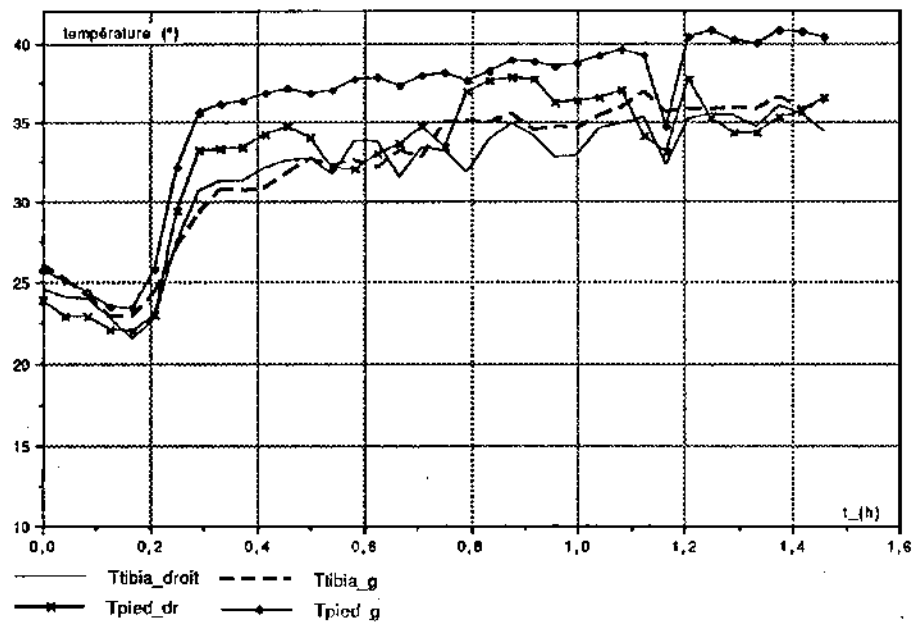
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



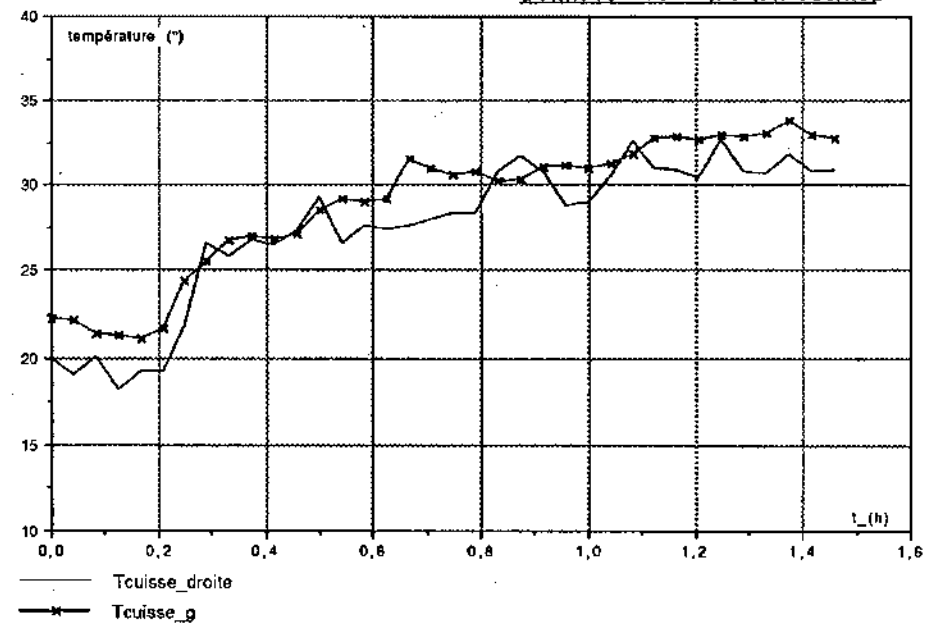
Données de "tab-Cond-ES6/nov92"



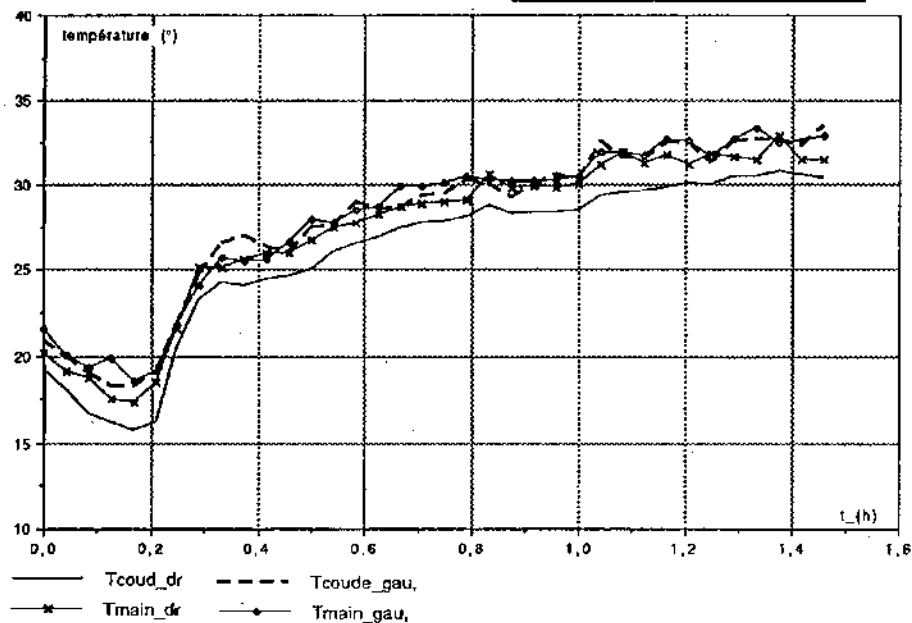
Données de "lab-tair-es6/n92"



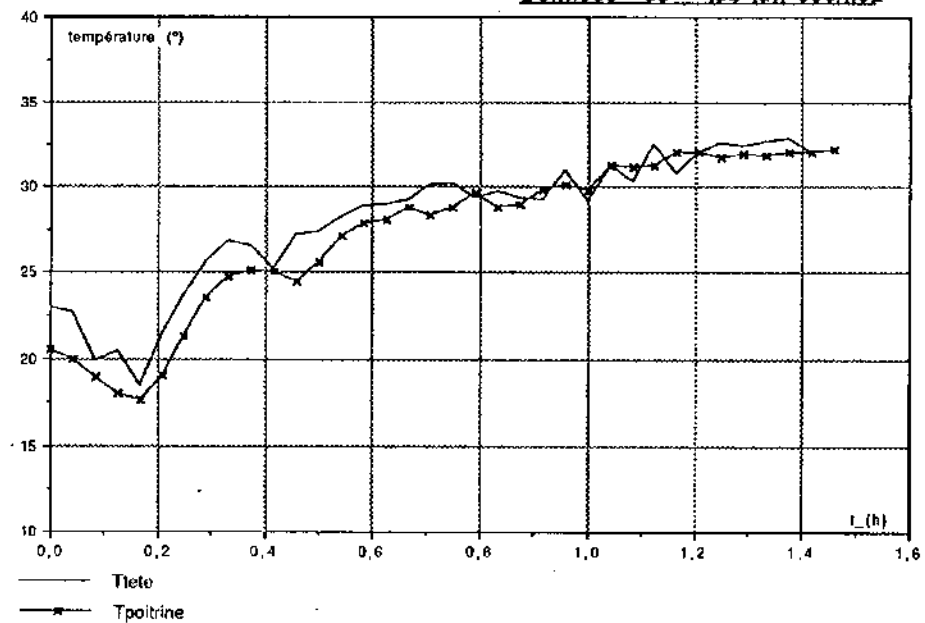
Données de "lab-tair-es6/n92"



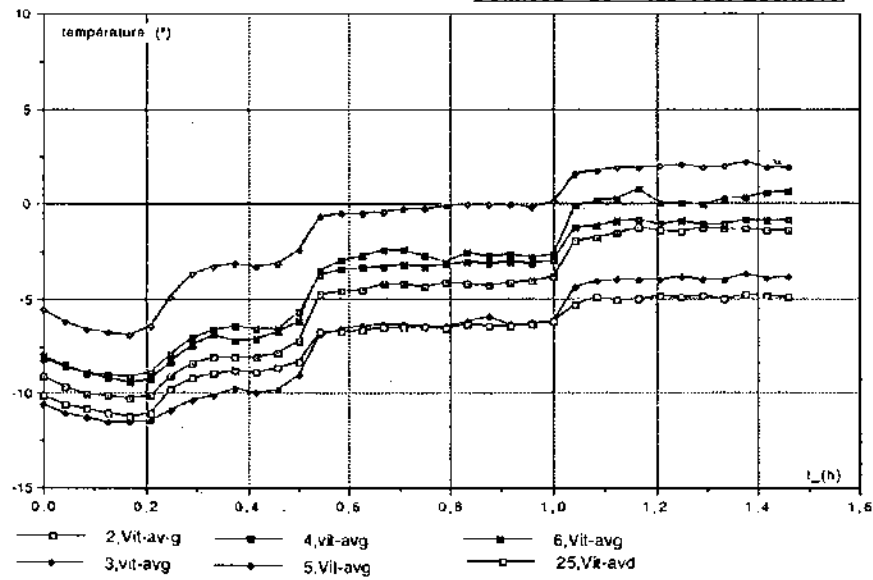
Données de "lab-tair-es6/n92"



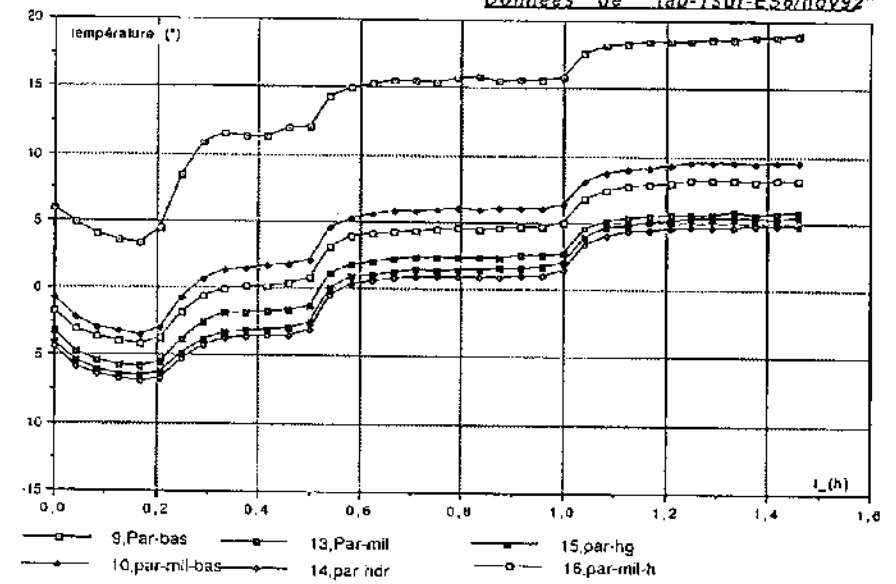
Données de "lab-tair-es6/n92"



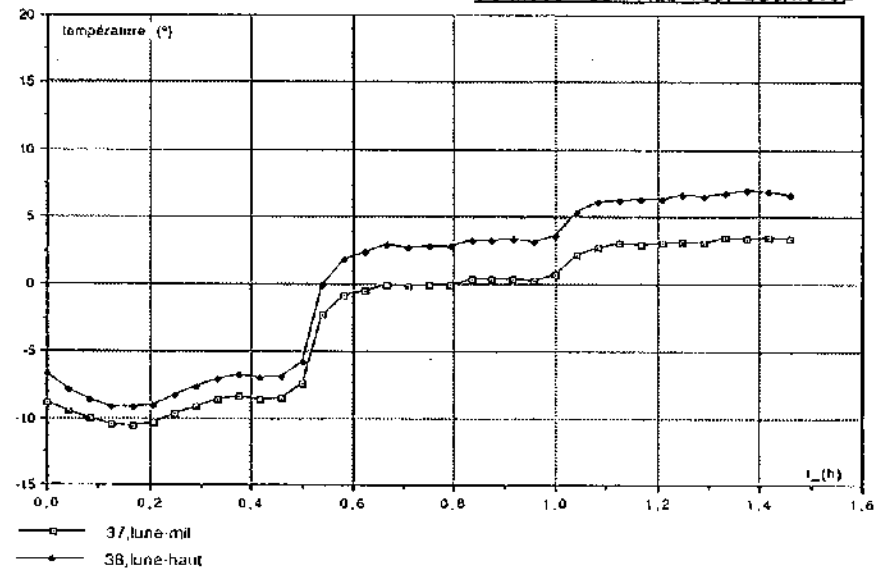
Données de "lab-Tsur-ES6/nov92"



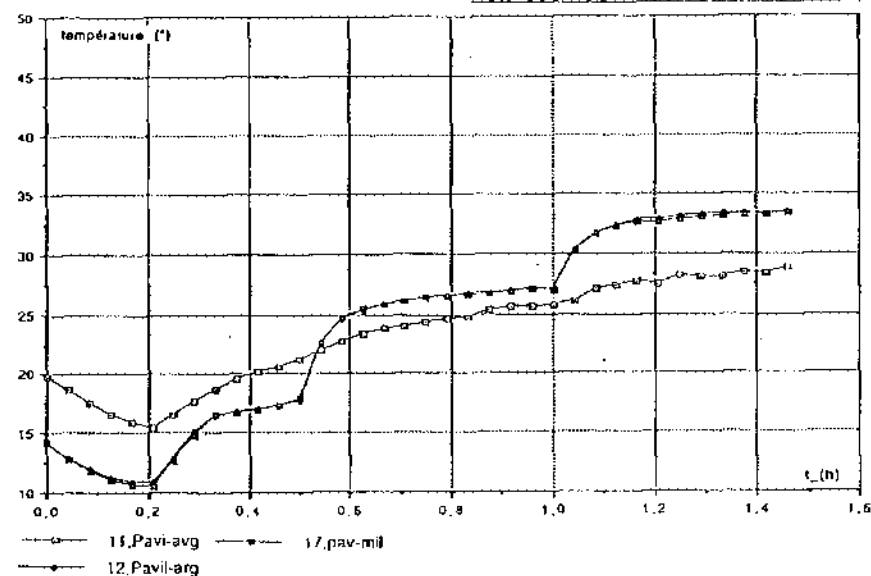
Données de "lab-Tsur-ES6/nov92"



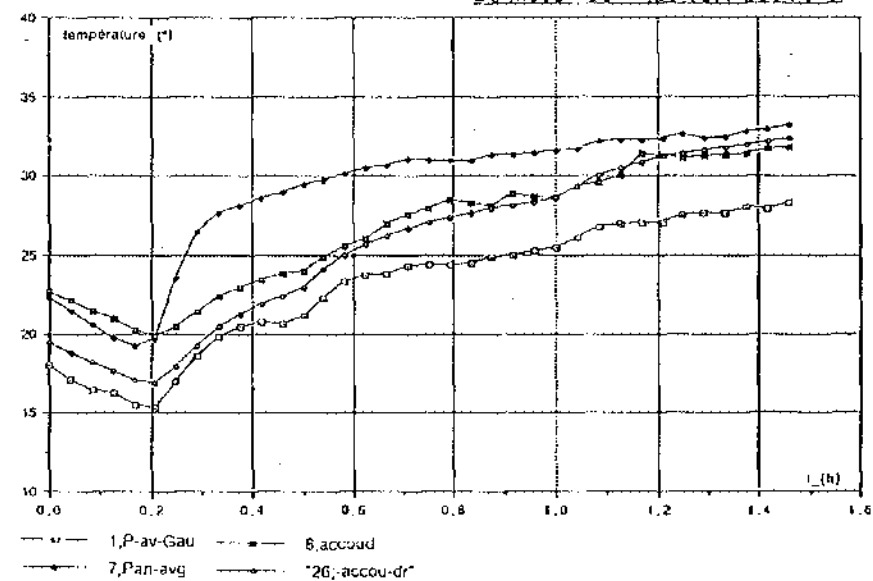
Données de "lab-Tsur-ES6/nov92"



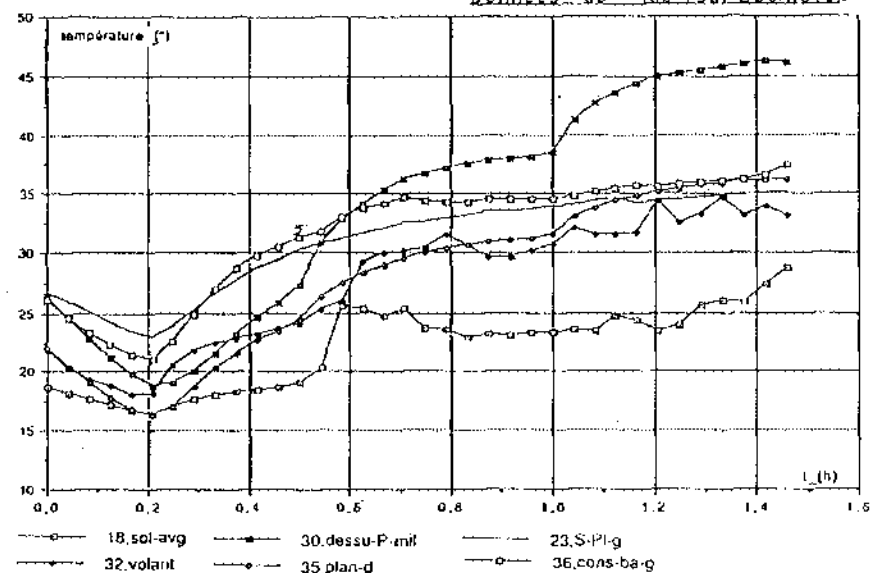
Données de "lab-Tsur-ES6/nov92"



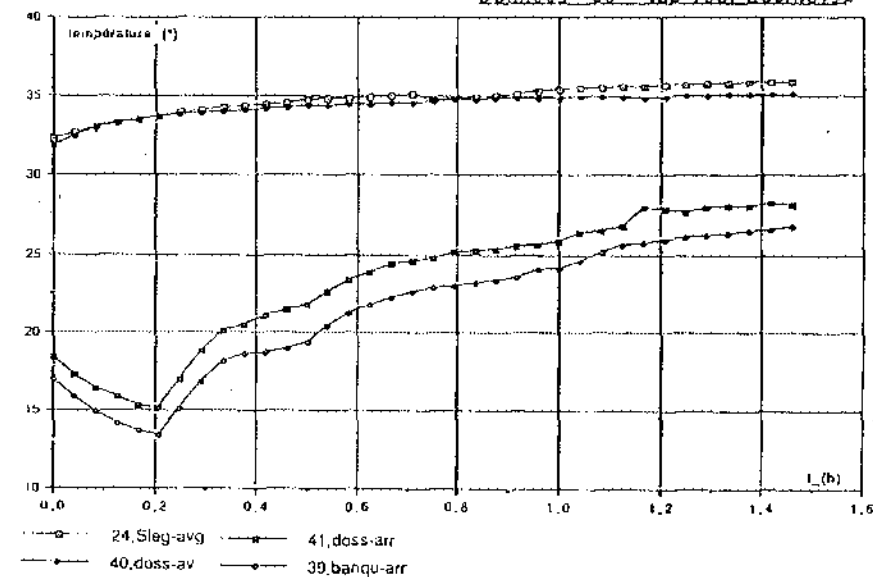
Données de "lab-Tsur-ES6/nov92"



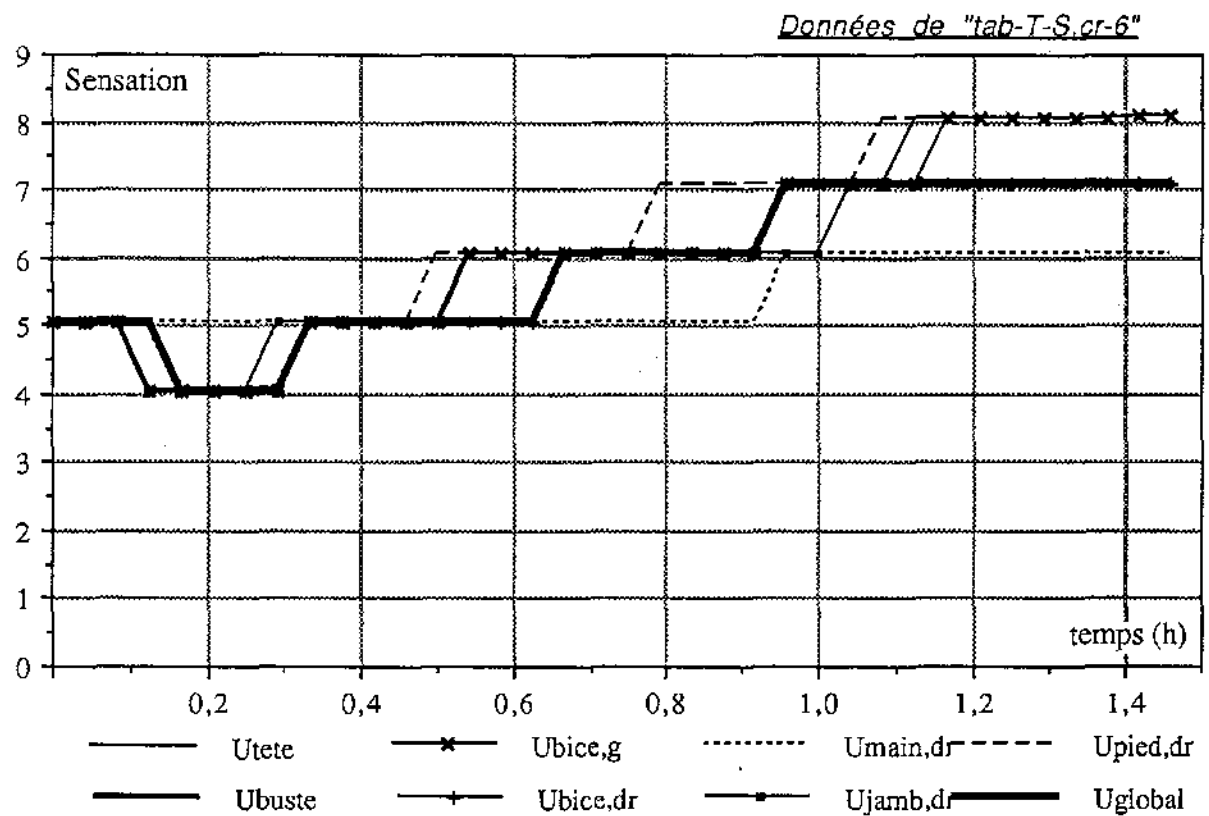
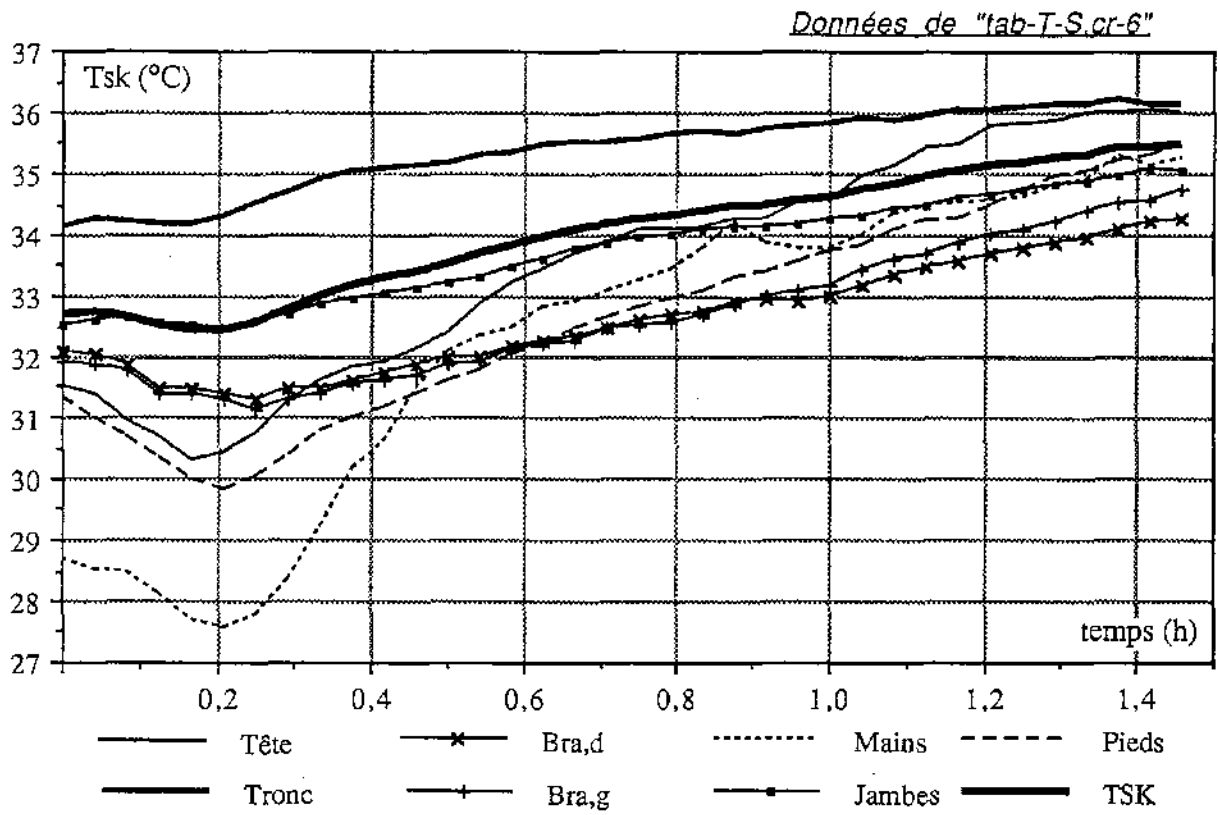
Données de "lab-Tsur-ES6/nov92"

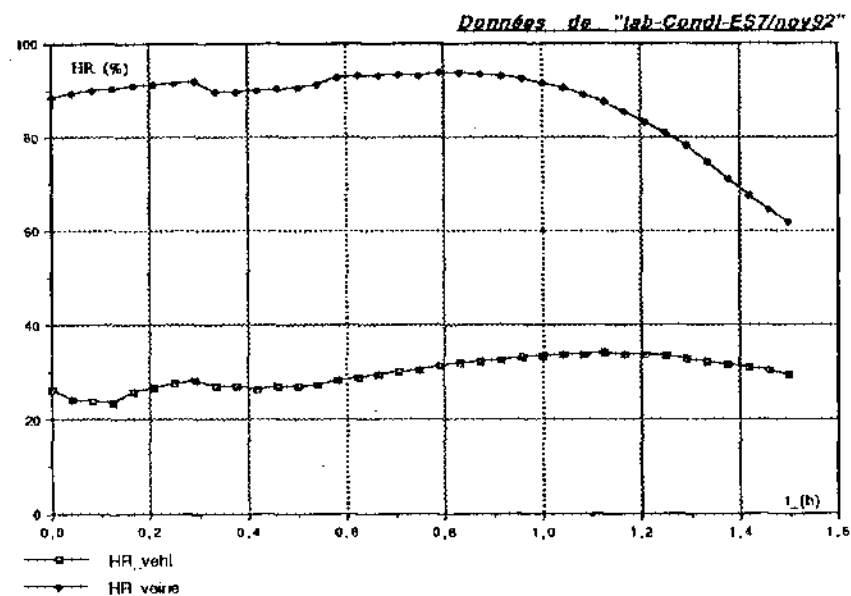
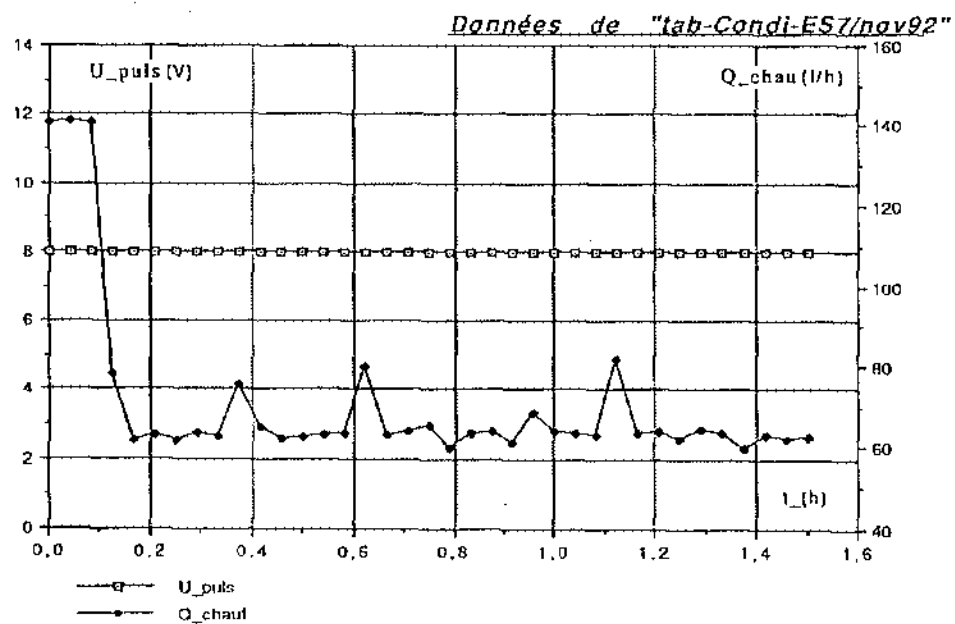
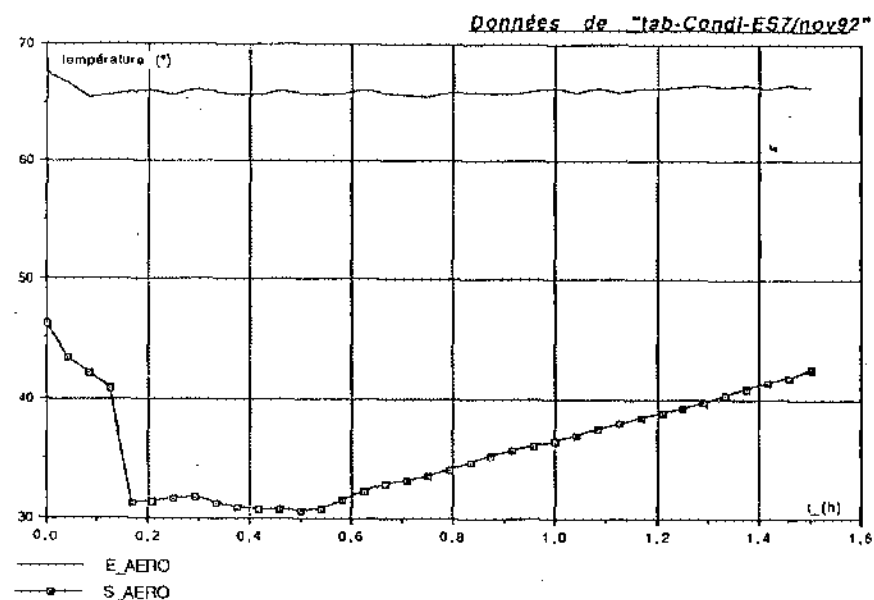
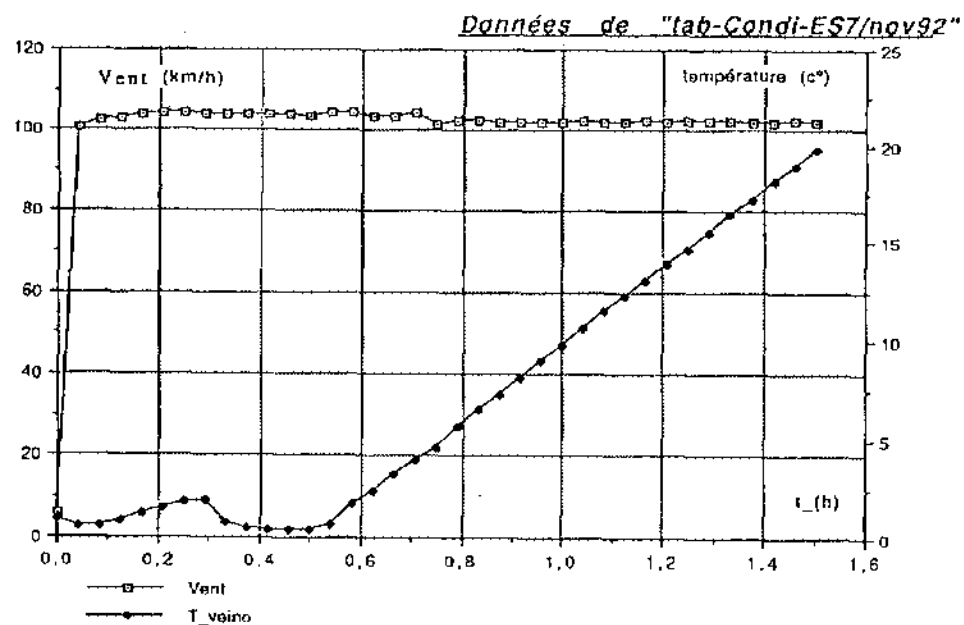


Données de "lab-Tsur-ES6/nov92"

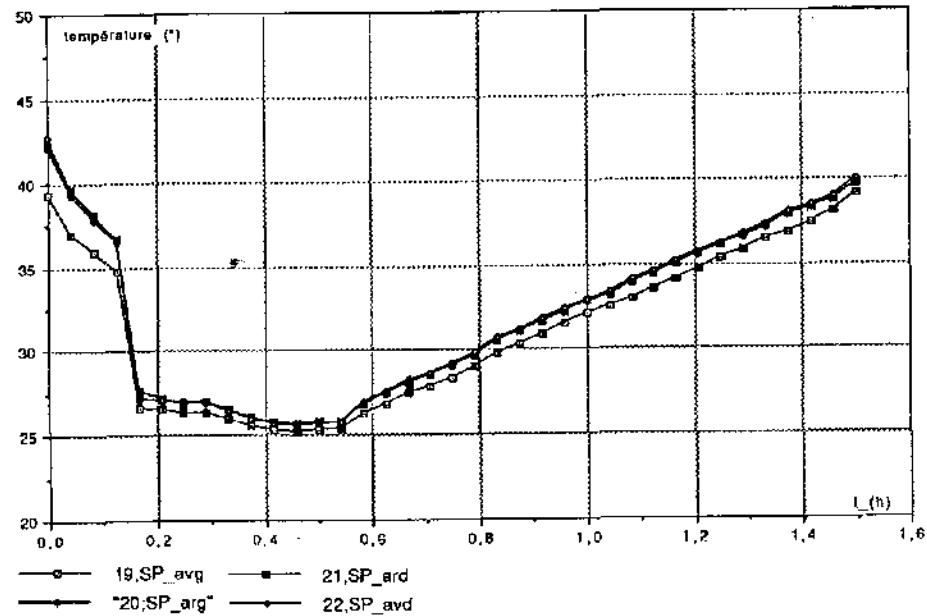


TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS

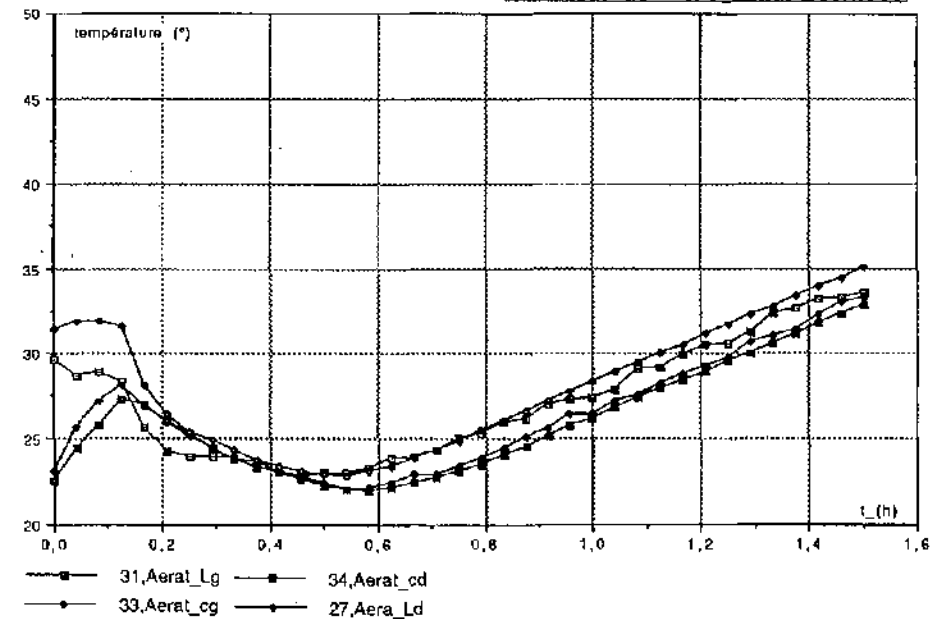




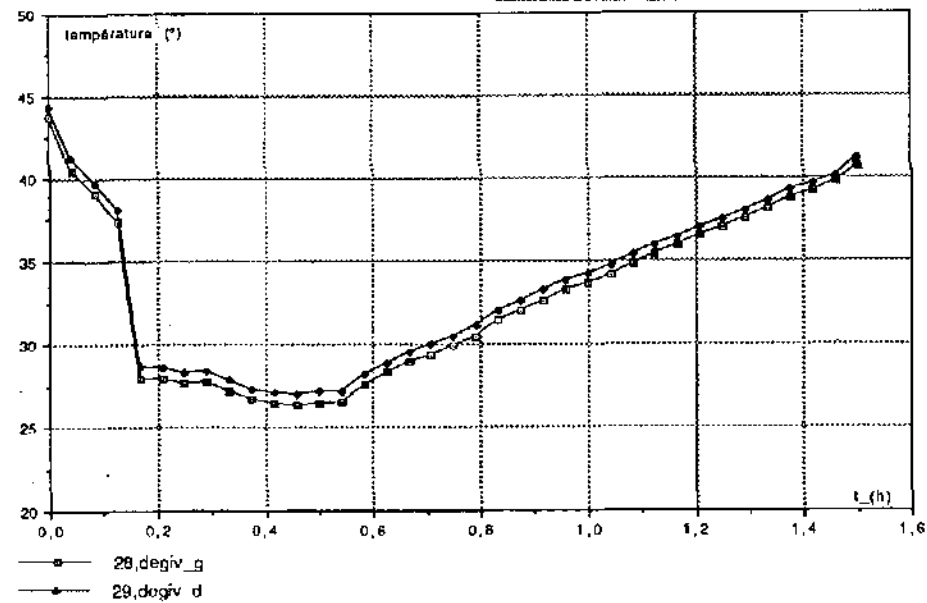
Données de "tab-Condi-ES7/nov92"



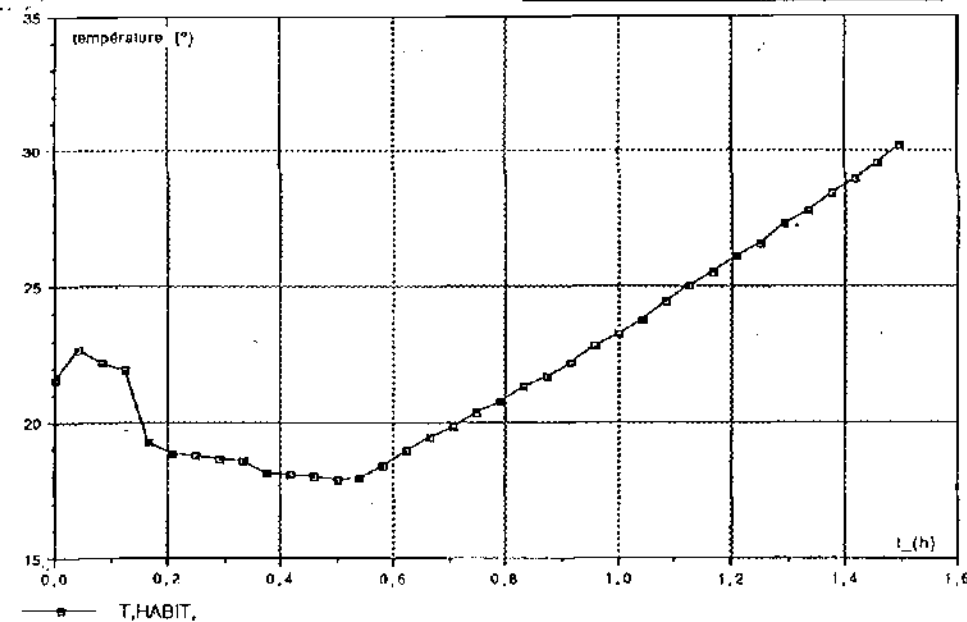
Données de "tab-Condi-ES7/nov92"

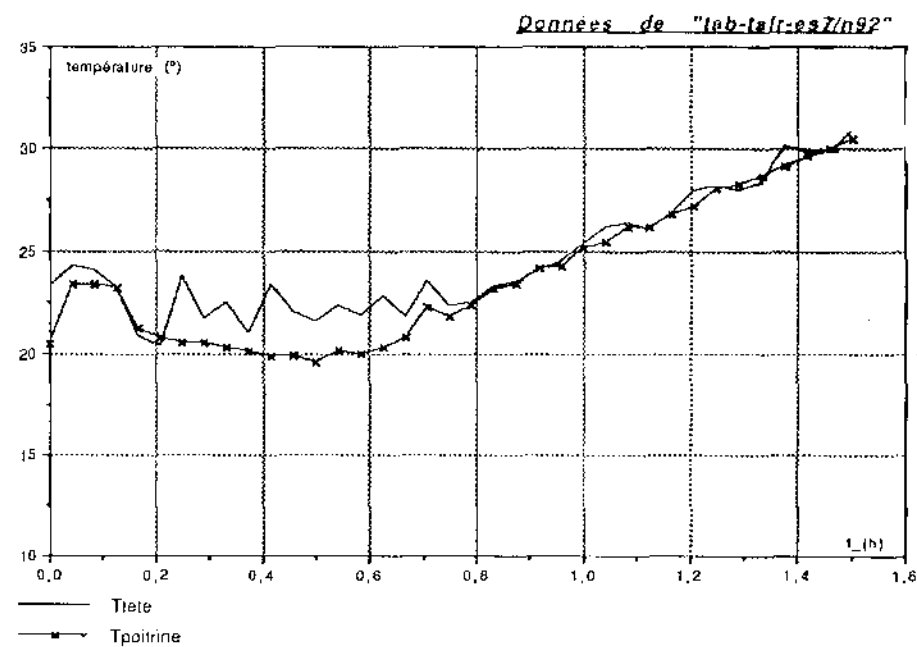
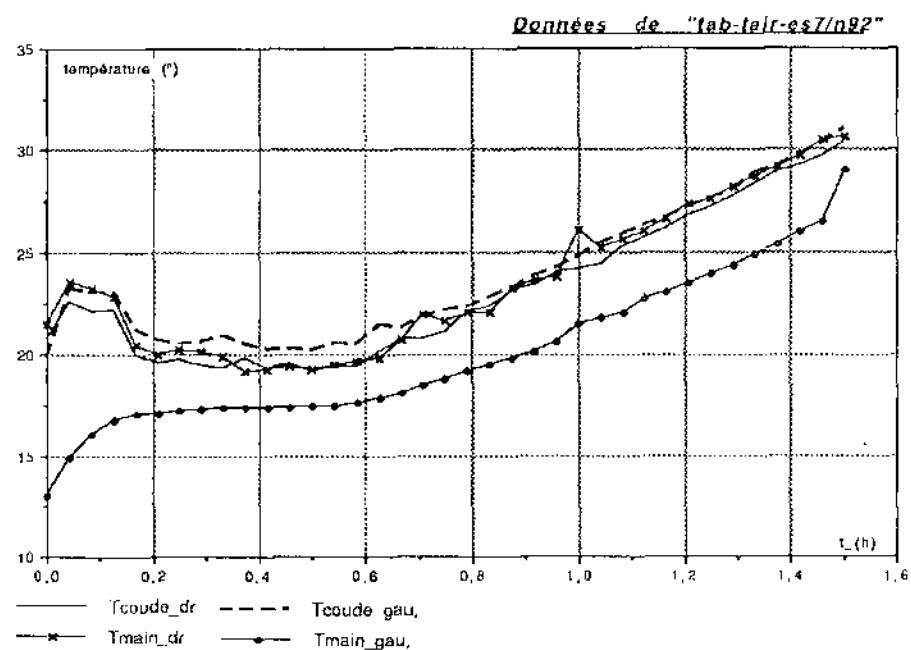
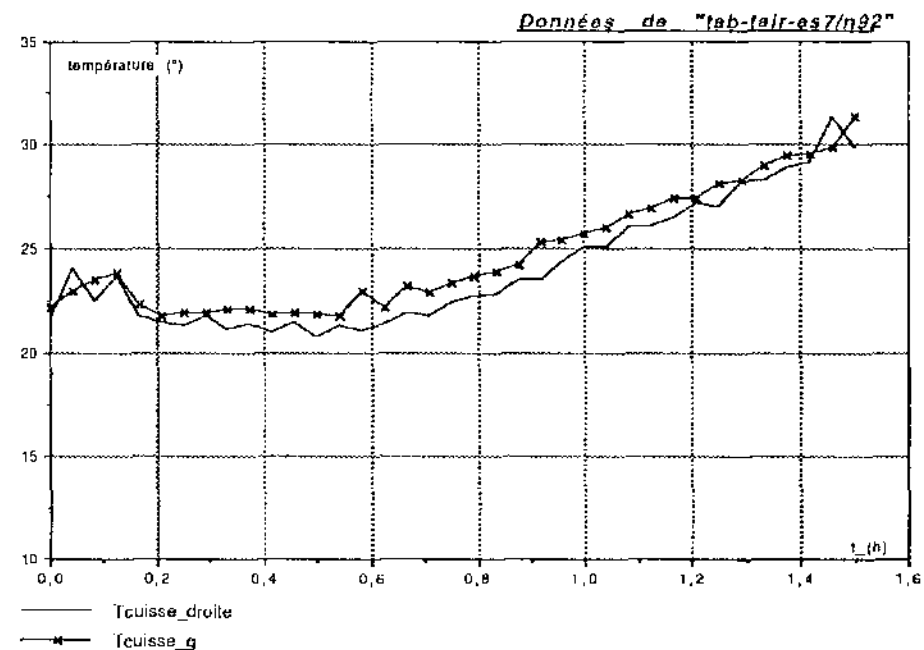
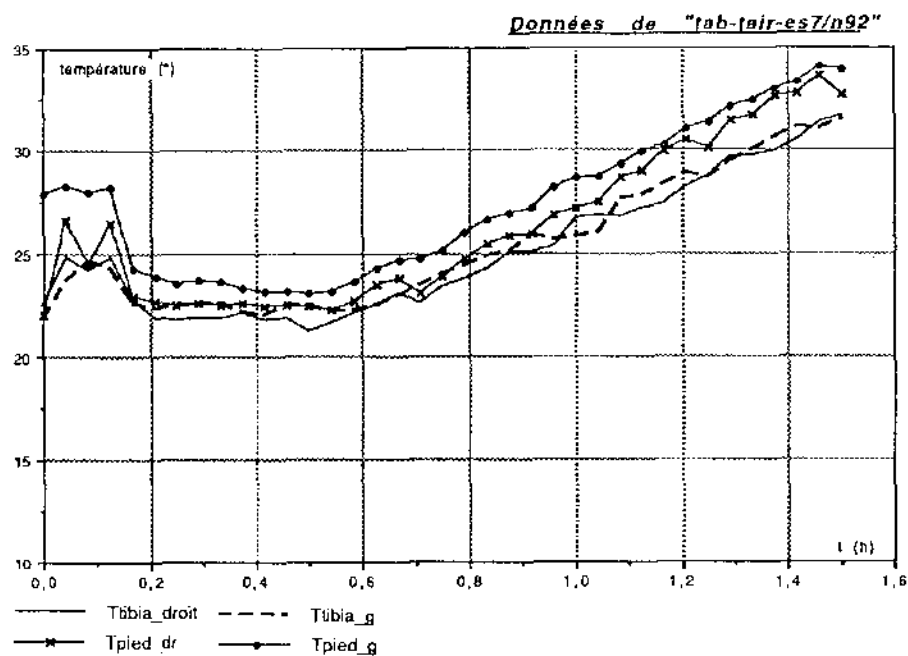


Données de "tab-Condi-ES7/nov92"

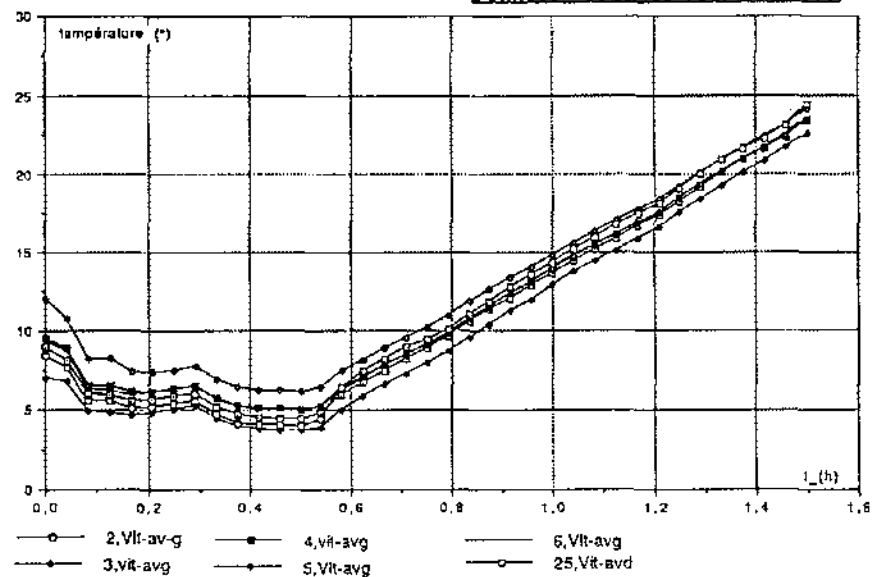


Données de "tab-Condi-ES7/nov92"

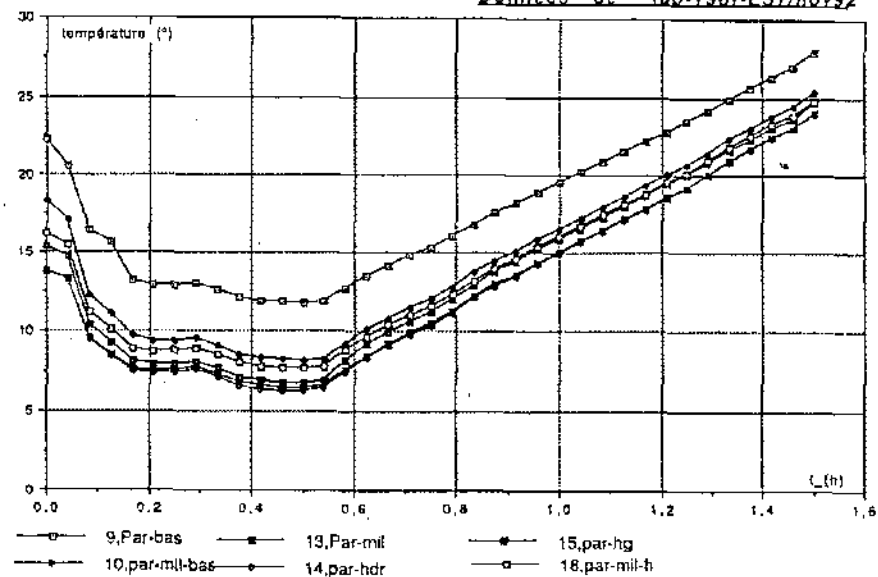




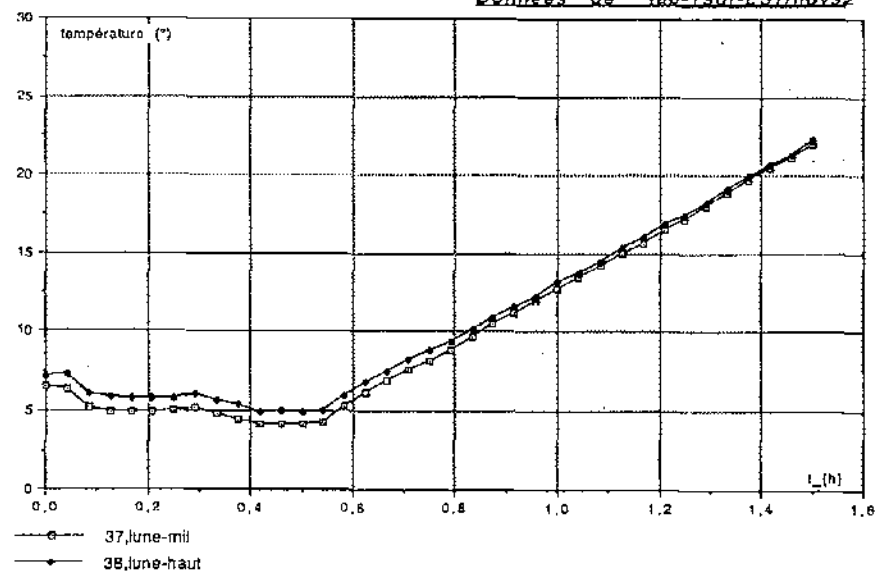
Données de "lab-Tsur-ES7/nov92"



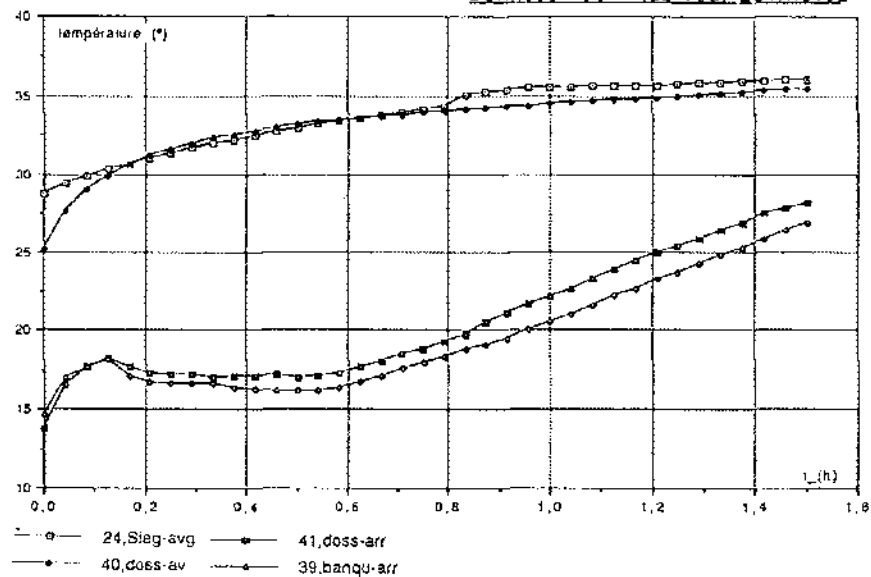
Données de "lab-Tsur-ES7/nov92"



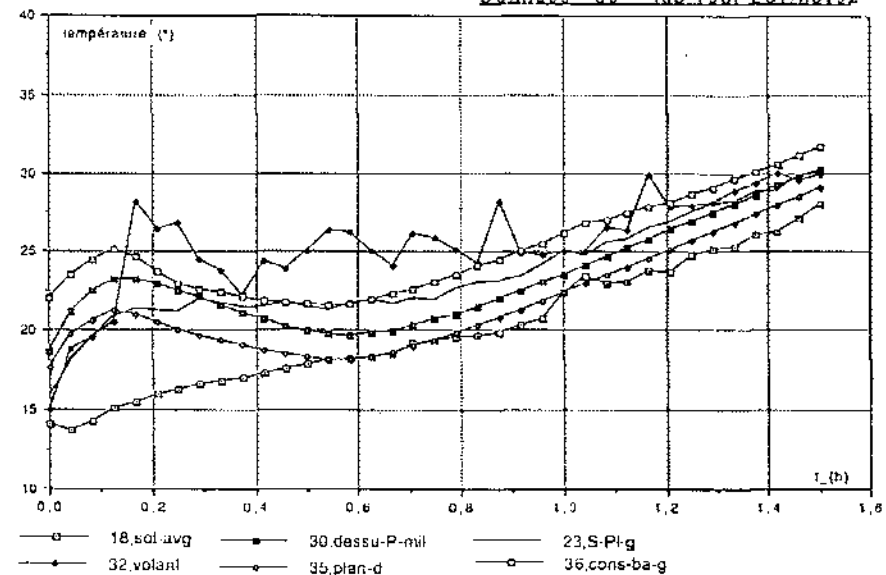
Données de "lab-Tsur-ES7/nov92"



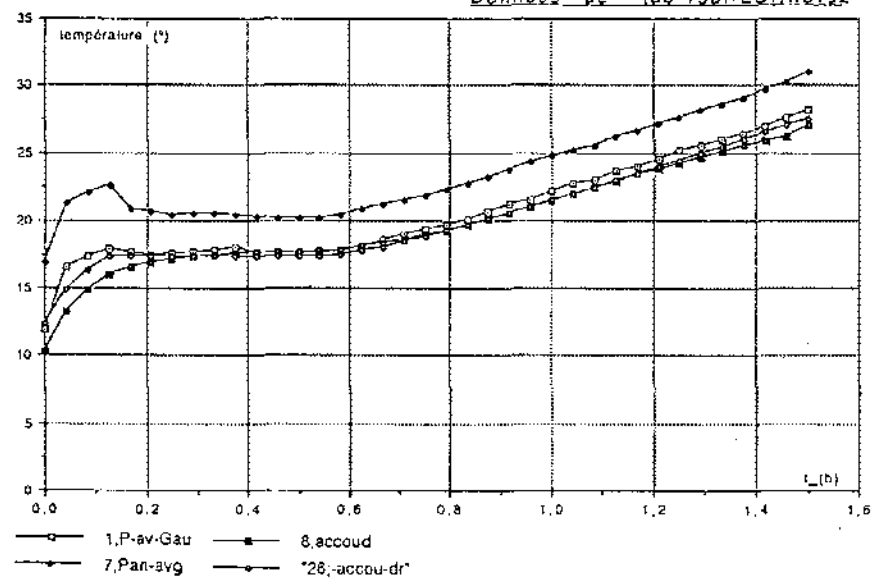
Données de "lab-Tsur-ES7/nov92"



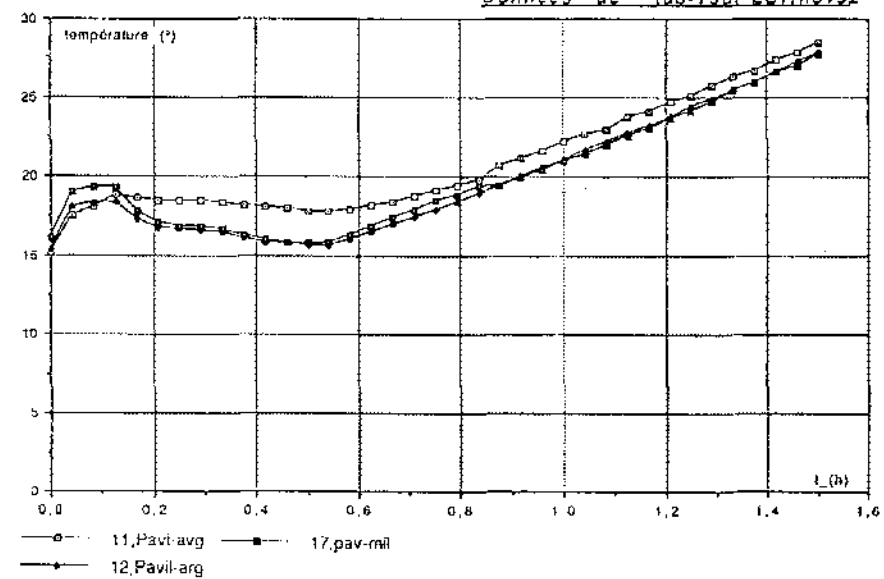
Données de "lab-Tsur-ES7/nov92"



Données de "lab-Tsur-ES7/nov92"

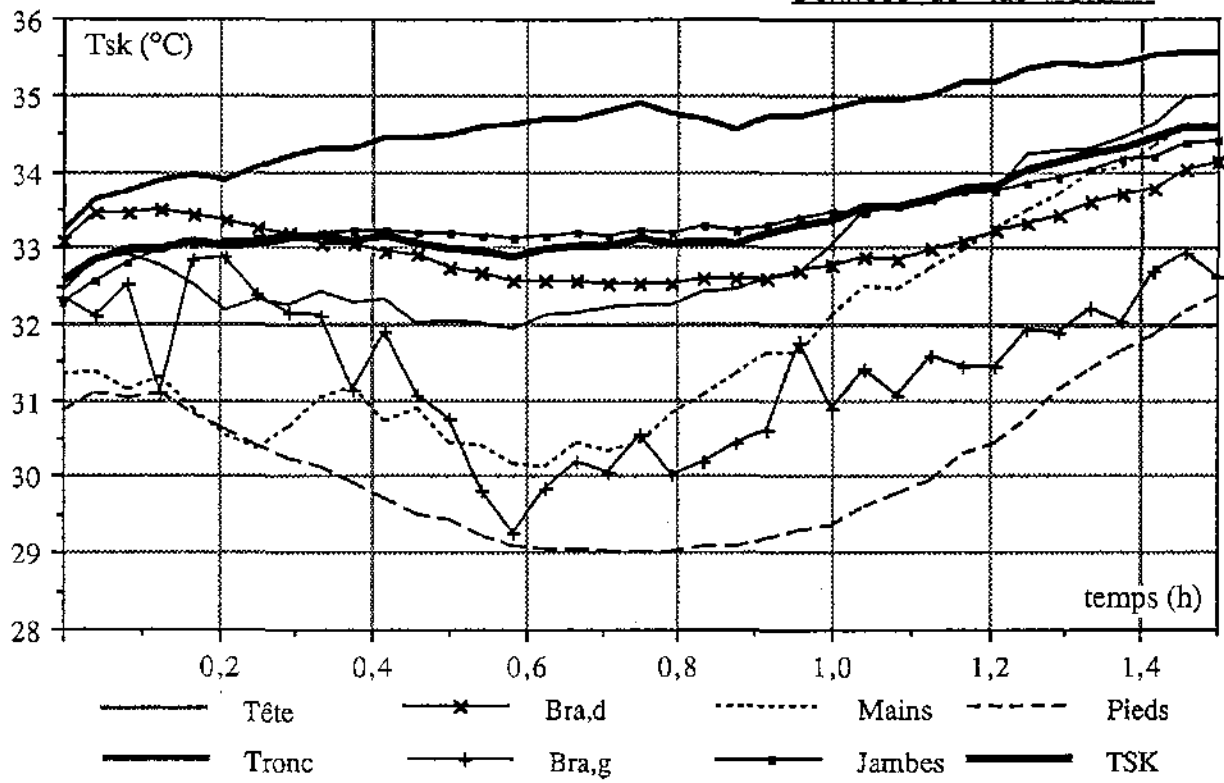


Données de "lab-Tsur-ES7/nov92"

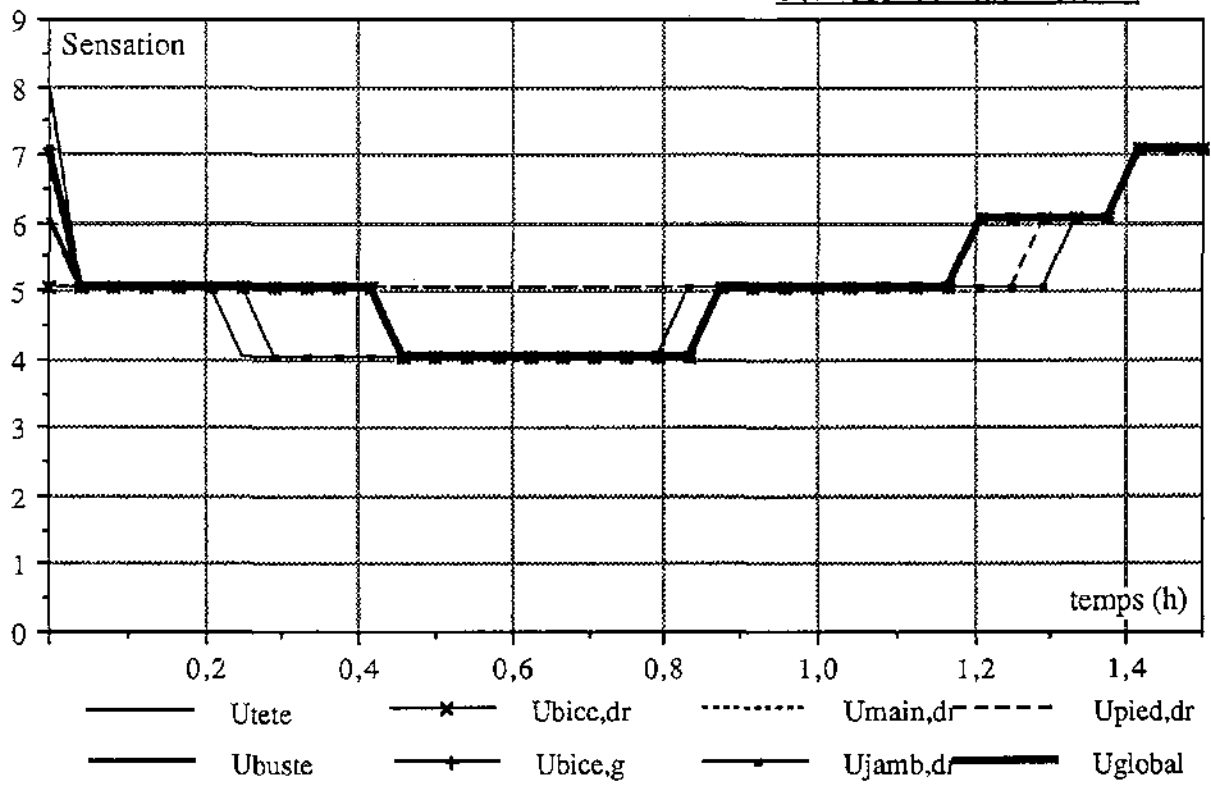


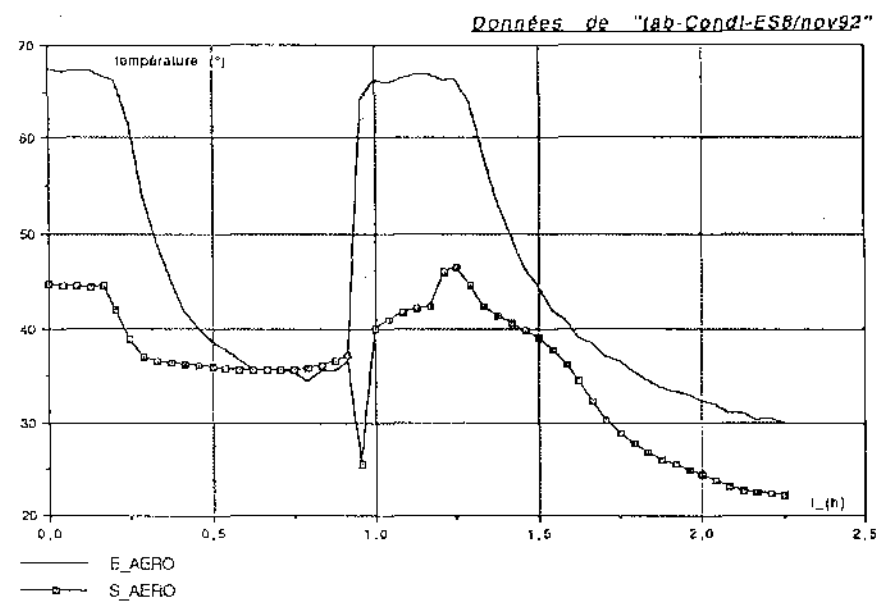
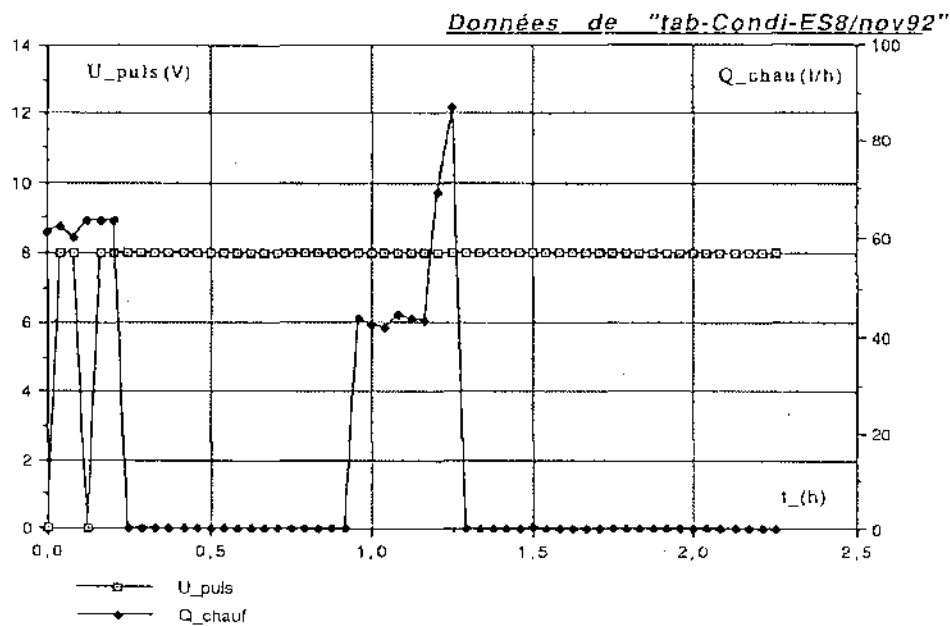
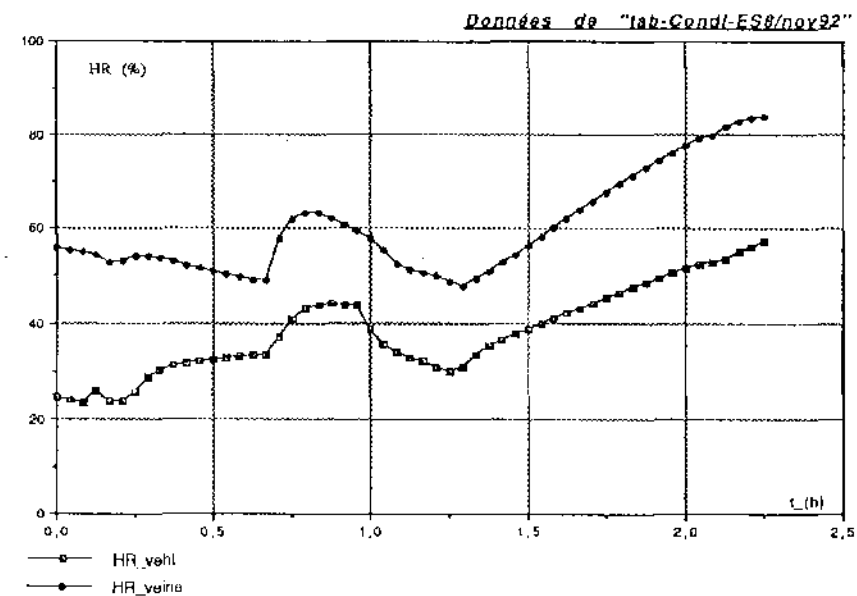
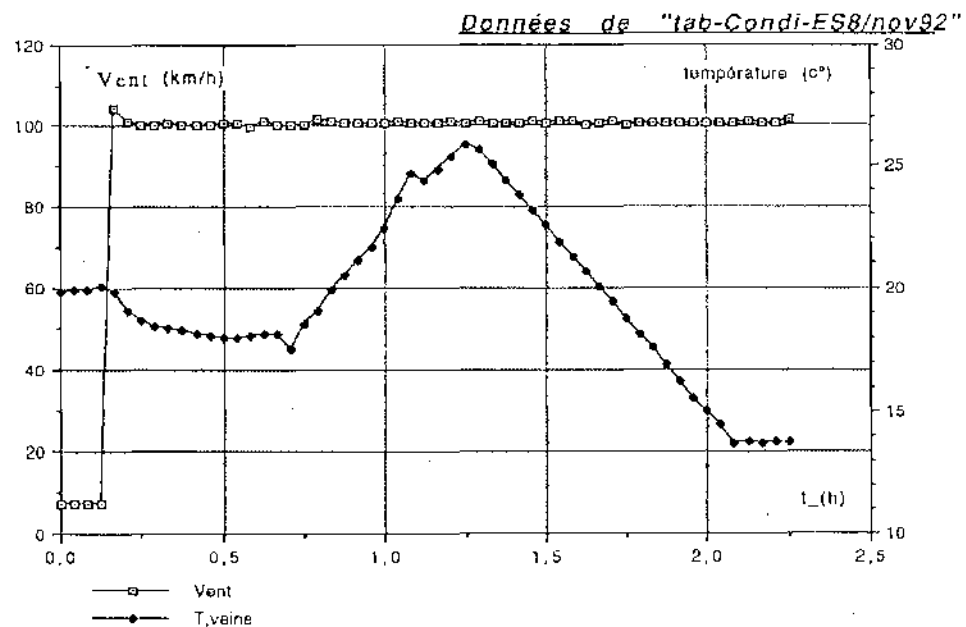
TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS

Données de "tab-T-S.cr-7"

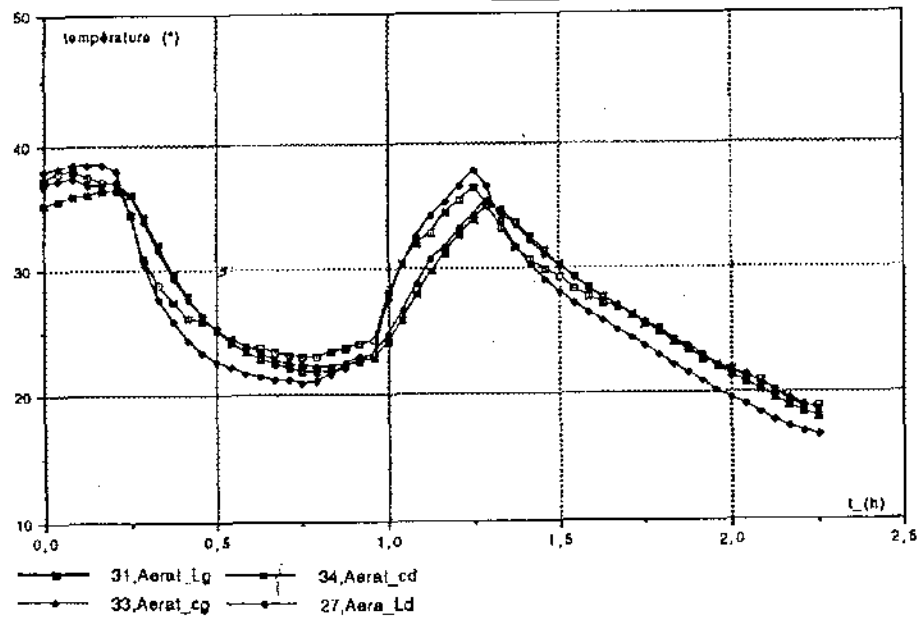


Données de "tab-T-S.cr-7"

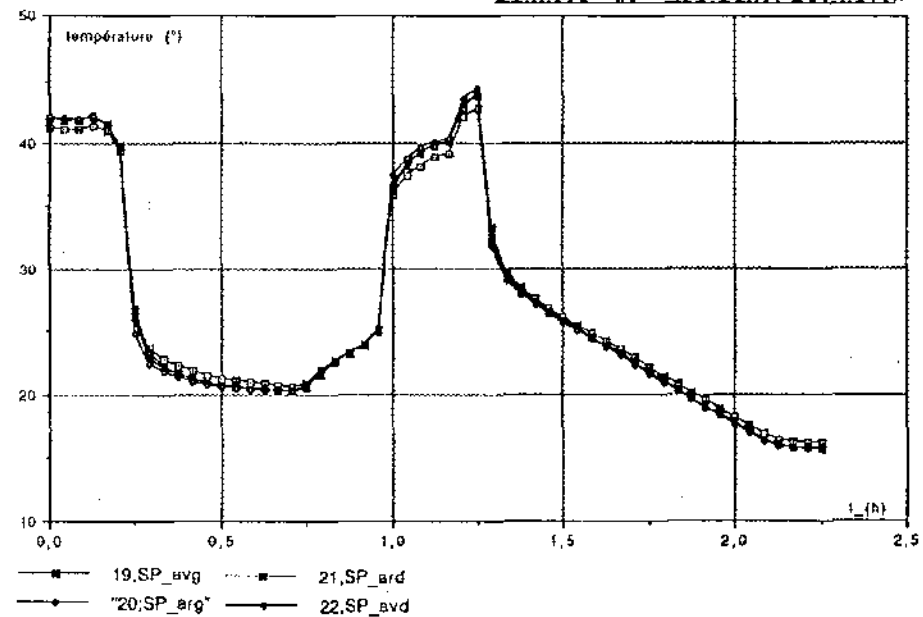




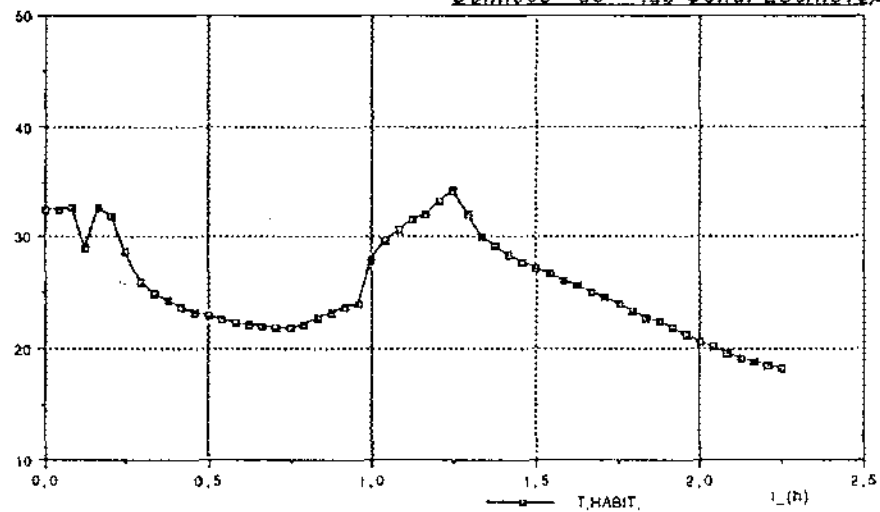
Données de "lab-Cond-ES8/nov92"



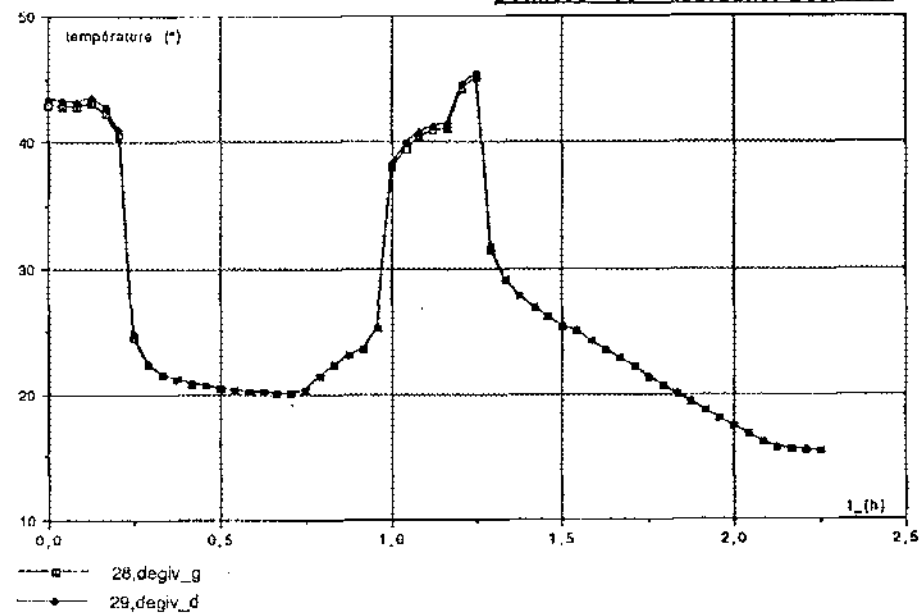
Données de "lab-Cond-ES8/nov92"



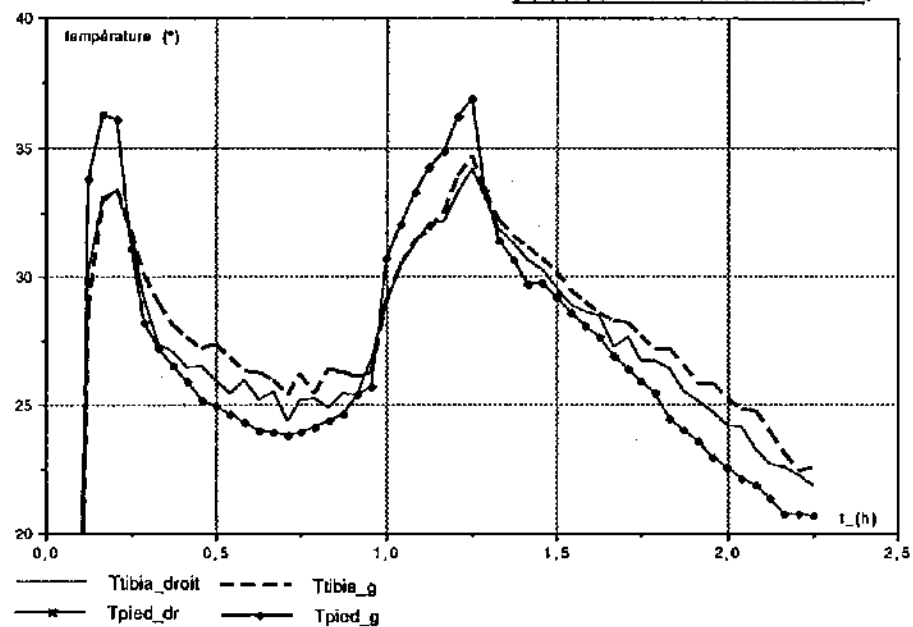
Données de "lab-Cond-ES8/nov92"



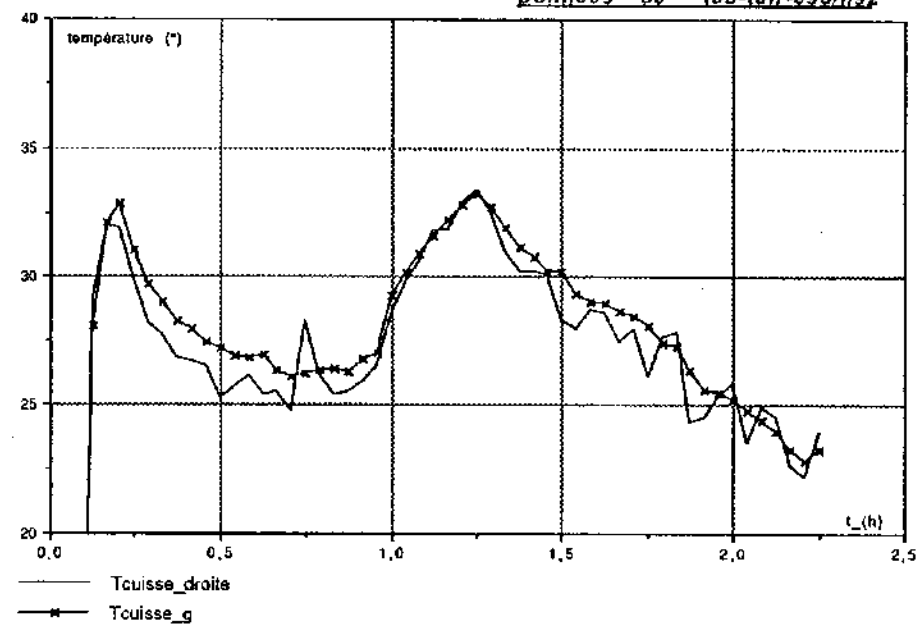
Données de "lab-Cond-ES8/nov92"



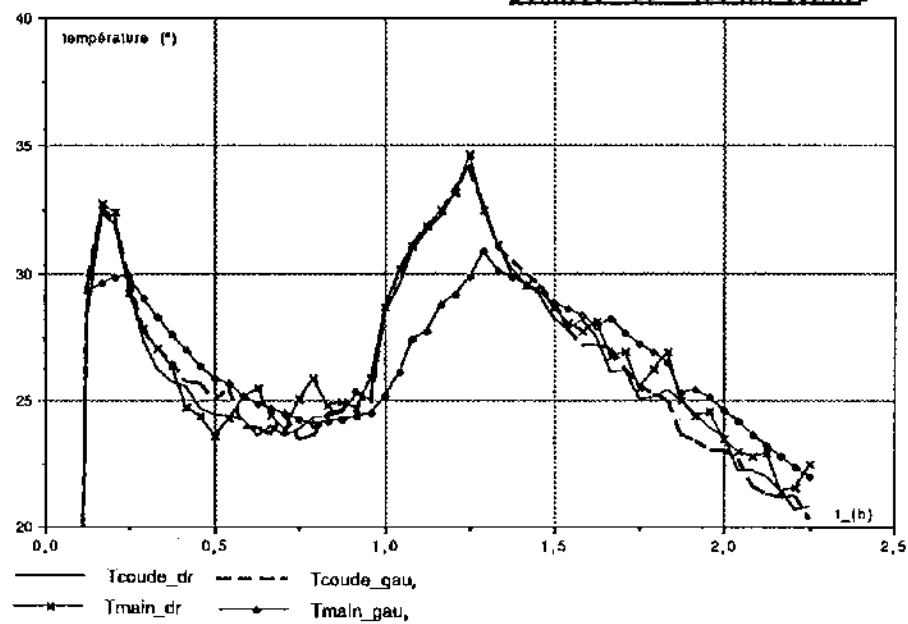
Données de "tab-tair-es8/n92"



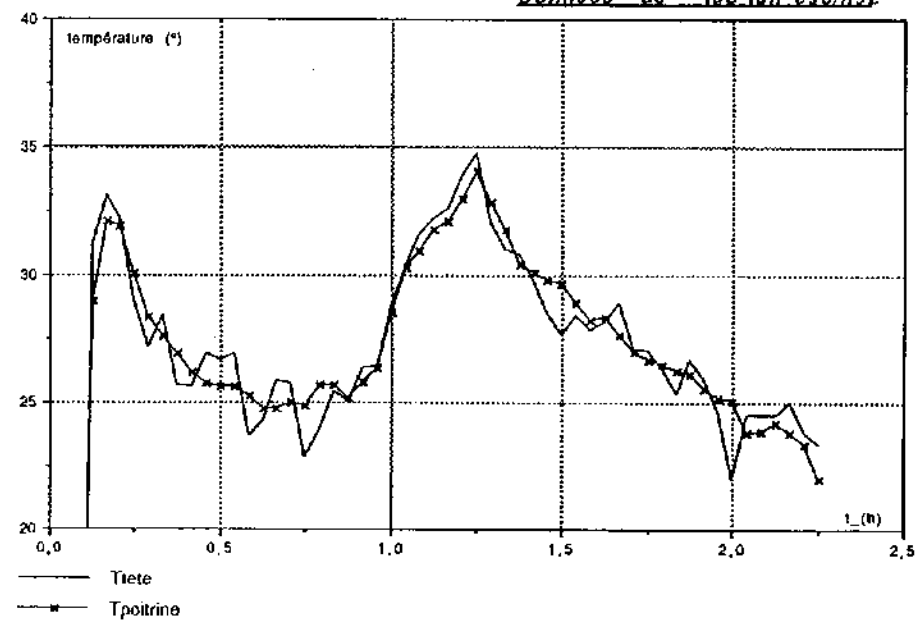
Données de "tab-tair-es8/n92"

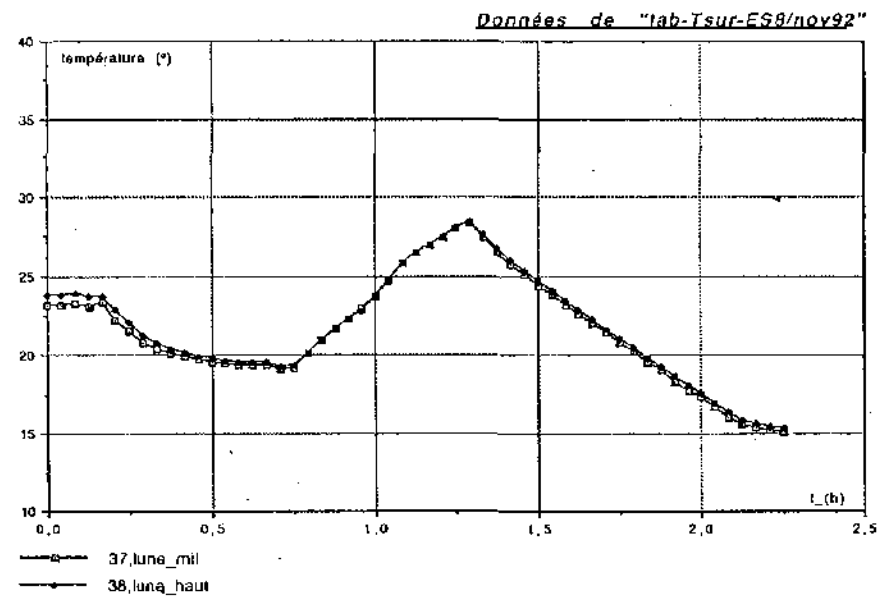
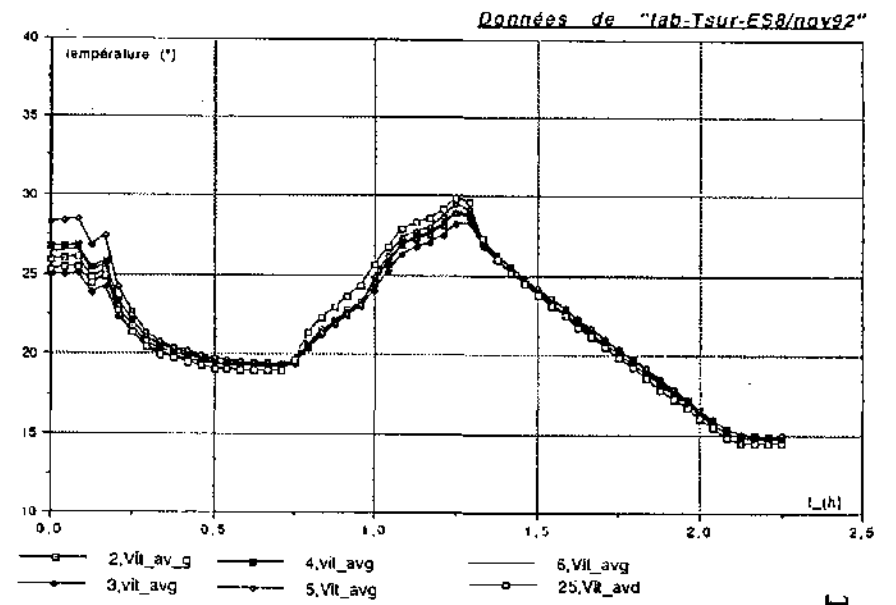
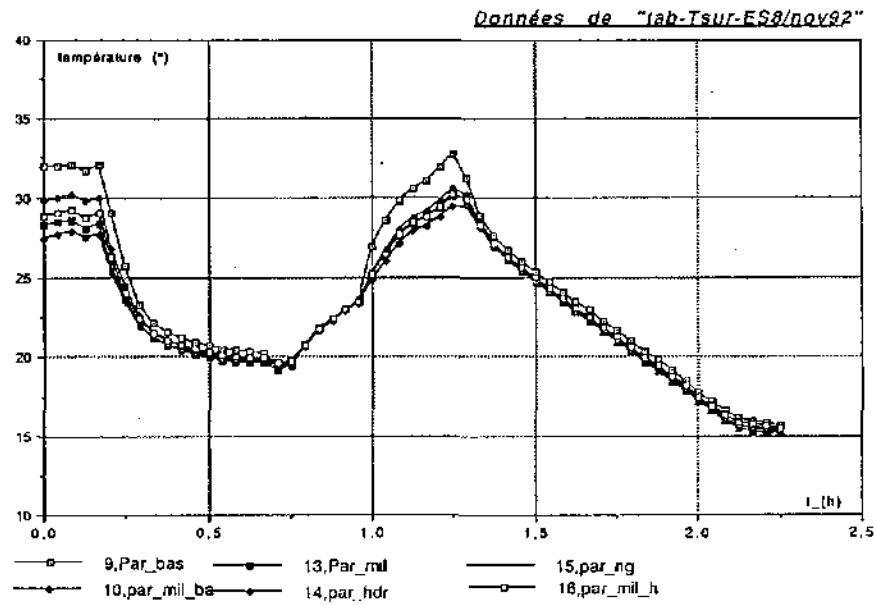


Données de "tab-tair-es8/n92"



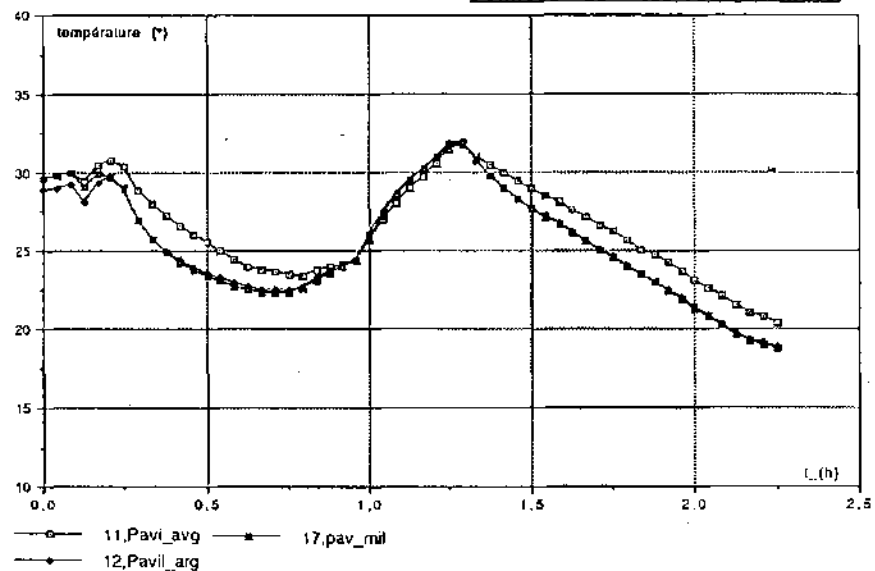
Données de "tab-tair-es8/n92"



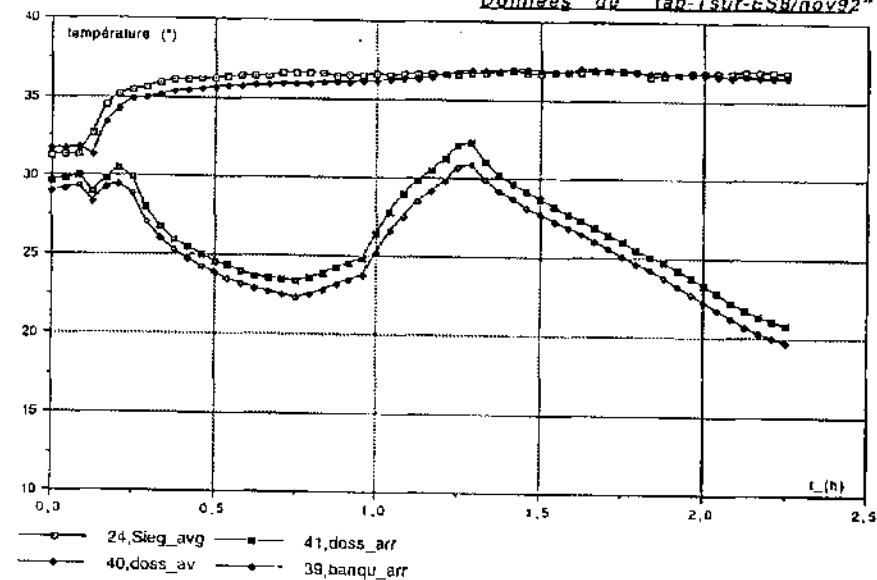


TEMPÉRATURES DE SURFACE

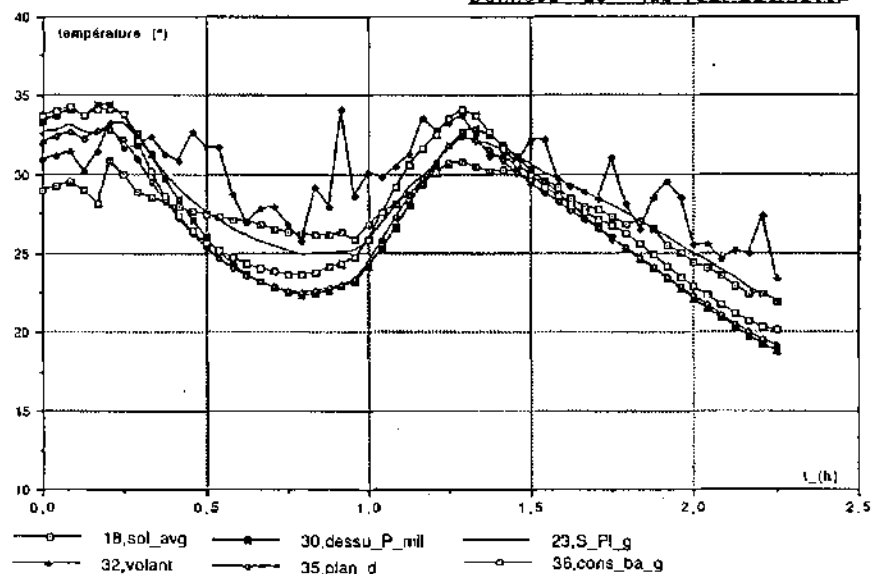
Données de "lab-Tsur-ES8/nov92"



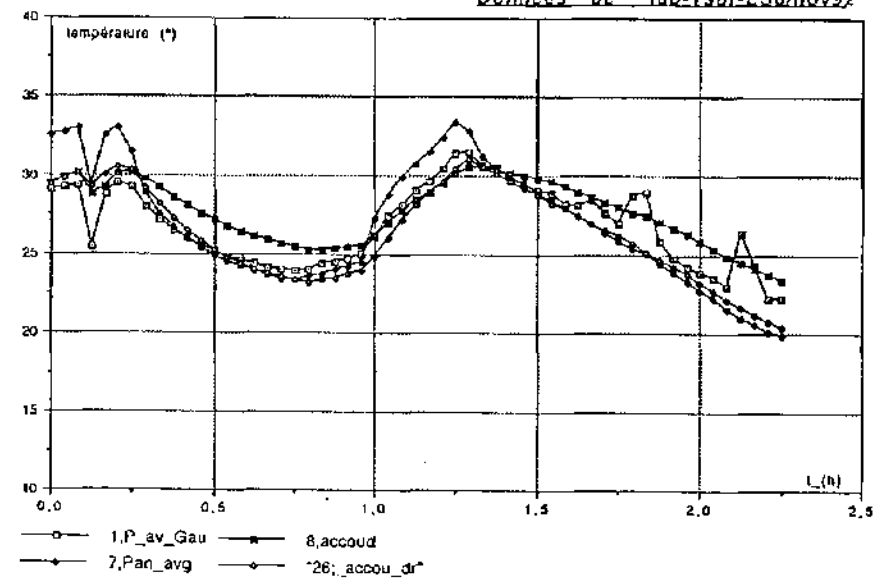
Données de "lab-Tsur-ES8/nov92"



Données de "lab-Tsur-ES8/nov92"

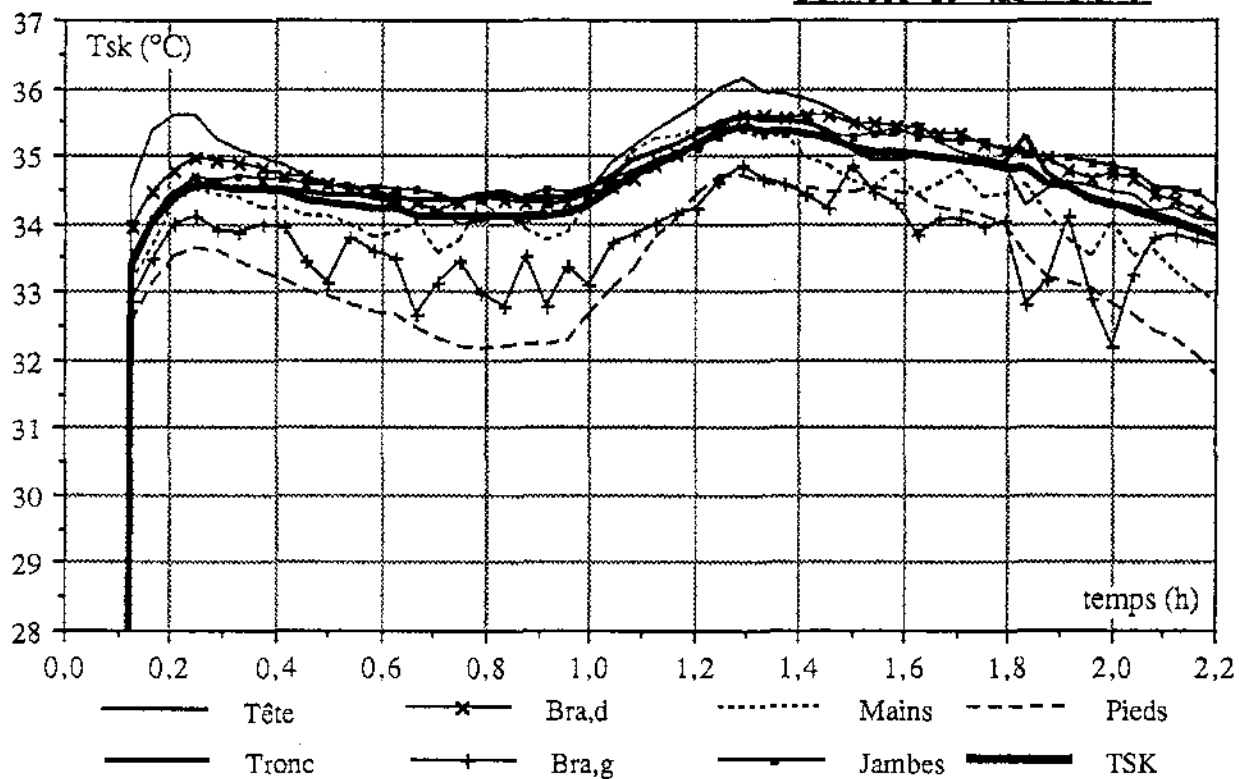


Données de "lab-Tsur-ES8/nov92"

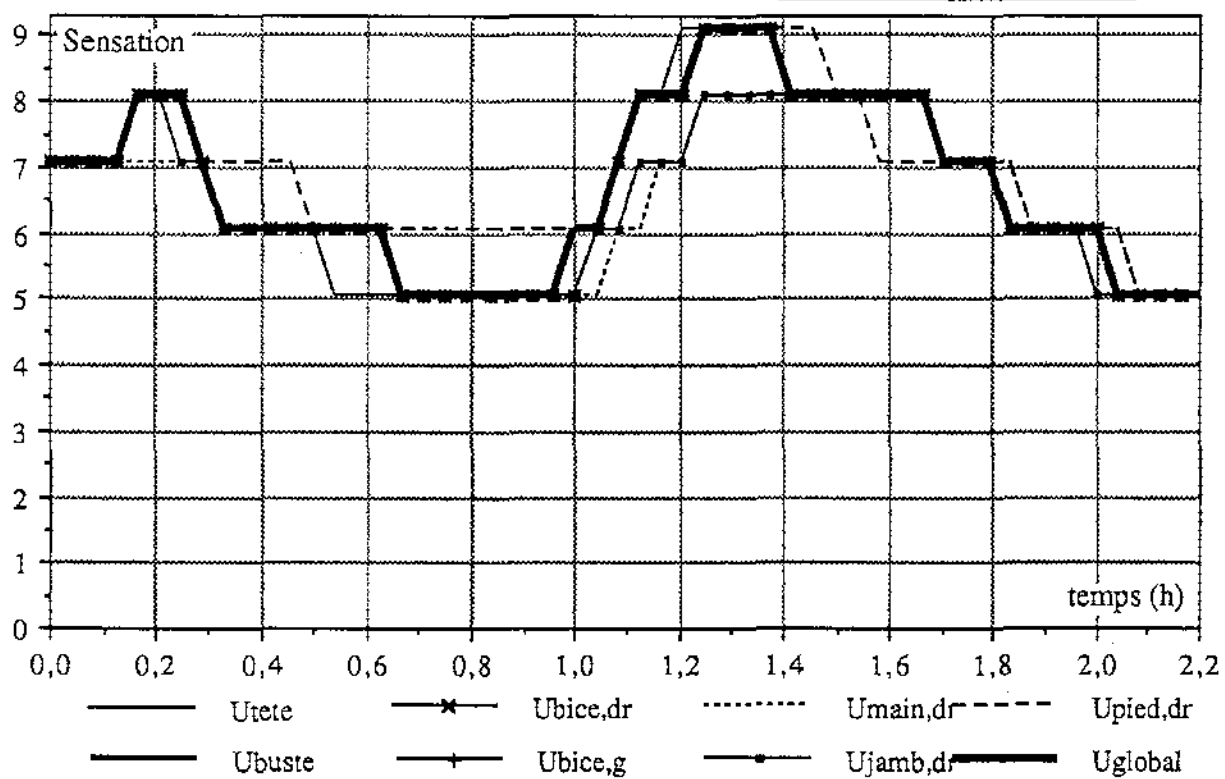


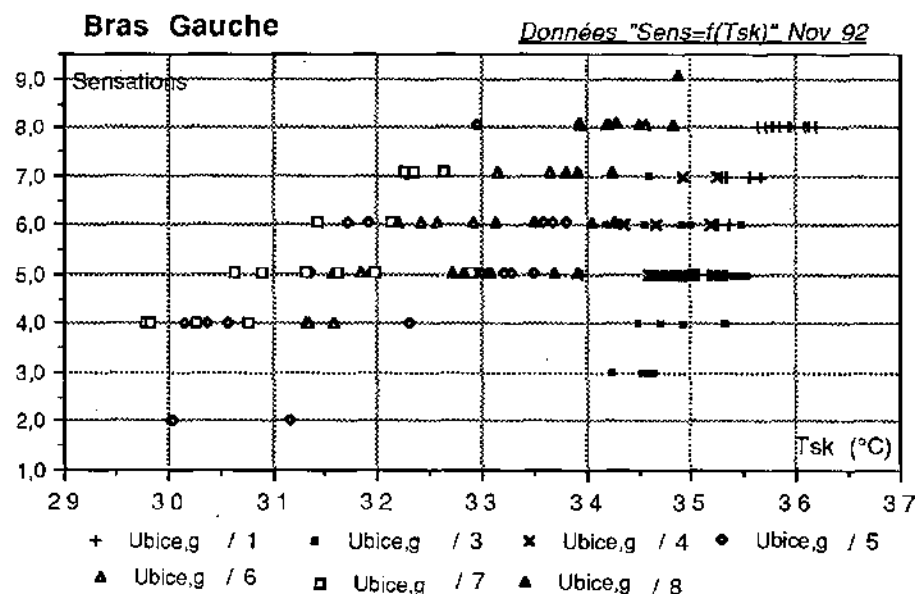
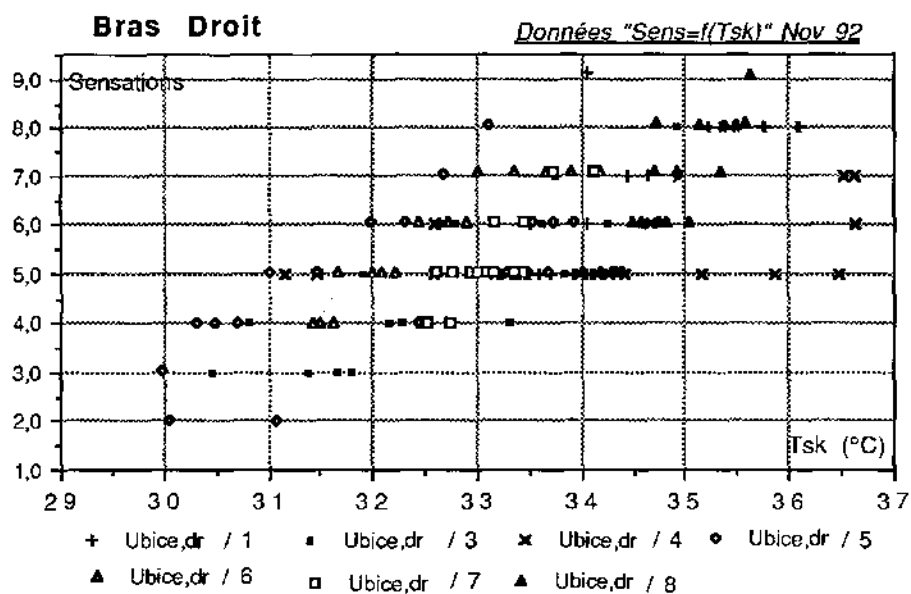
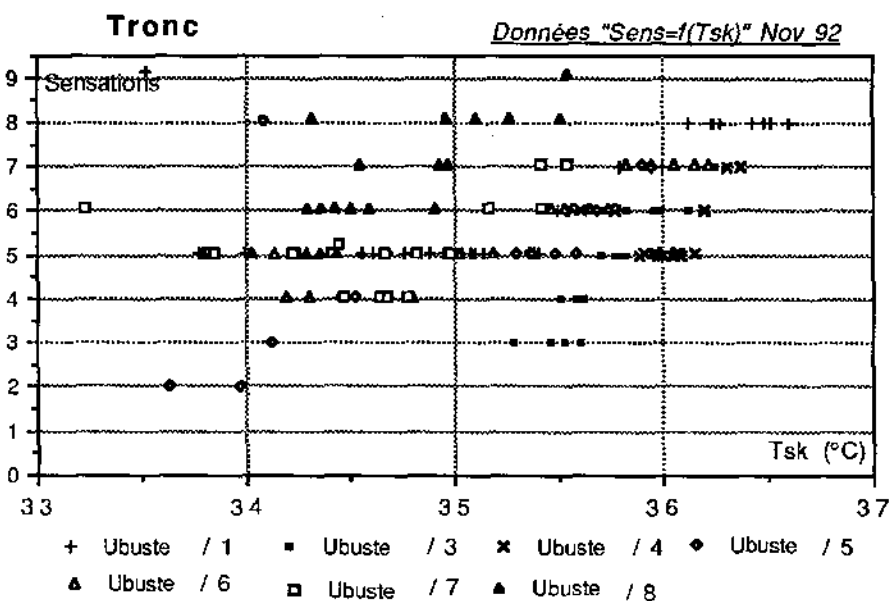
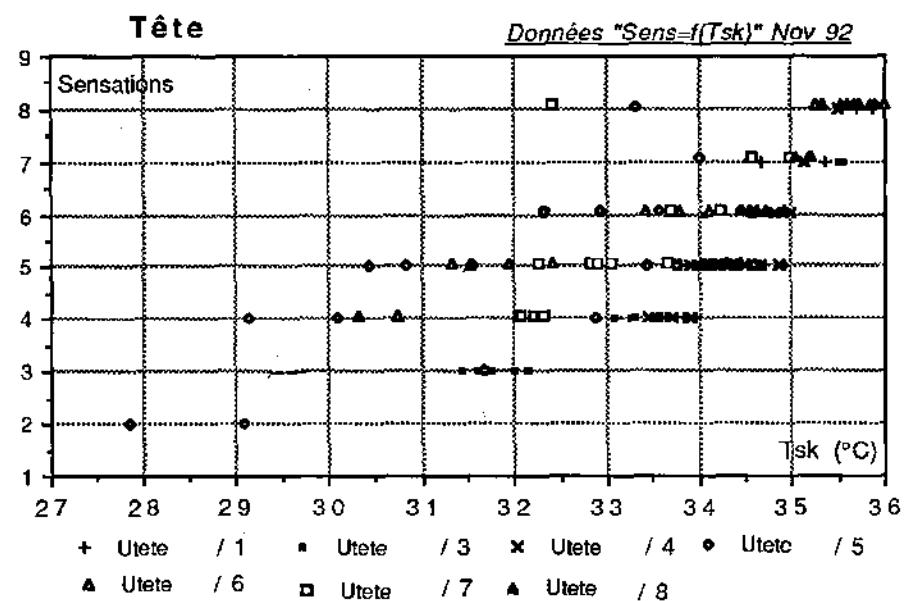
TEMPERATURES DE PEAU ET SENSATIONS

Données de "tab-T-S.cr-8"



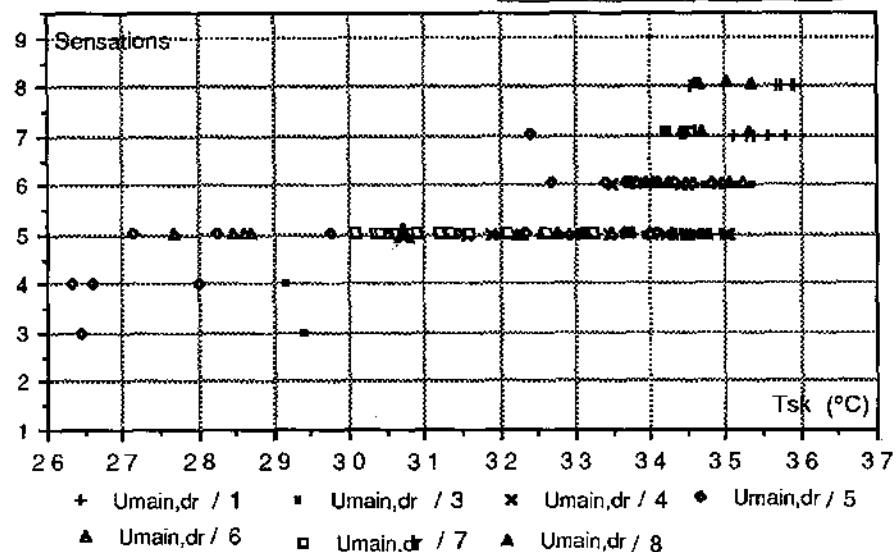
Données de "tab-T-S.cr-8"





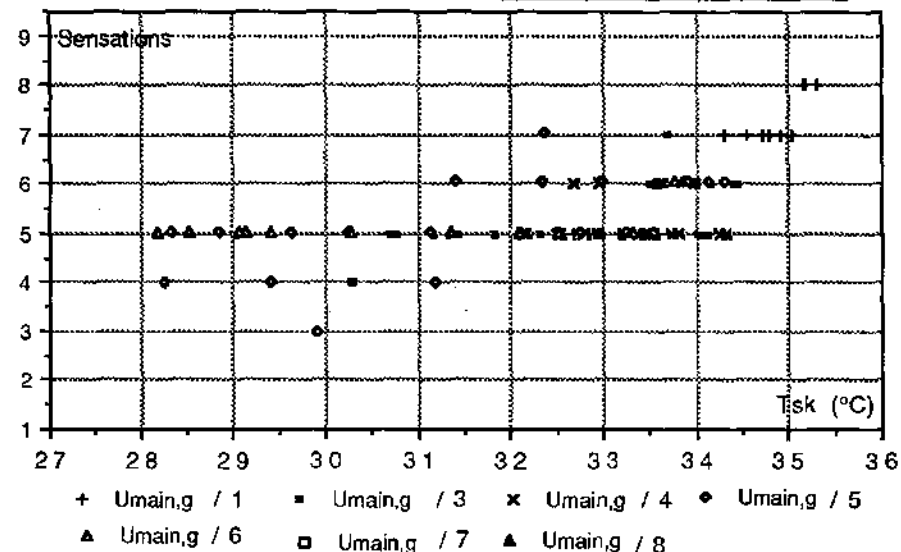
Main droite

Données "Sens=f(Tsk)" Nov 92



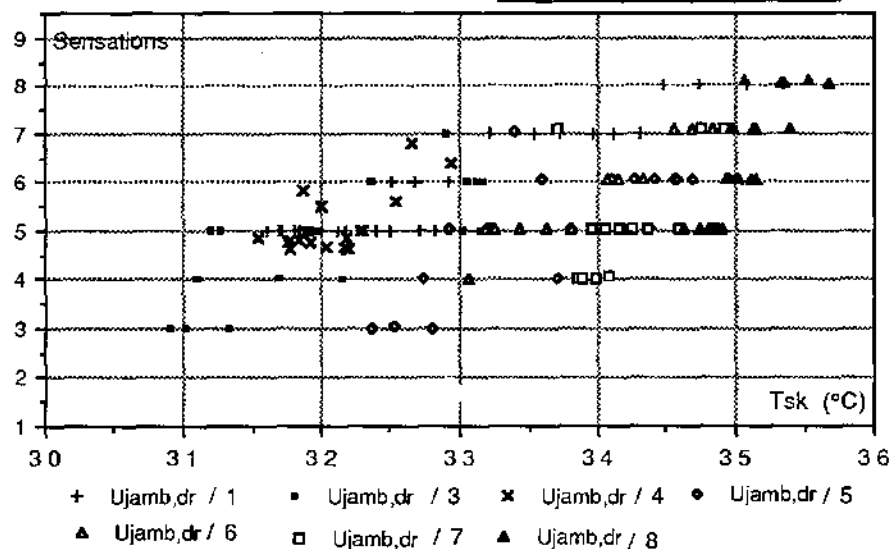
Main Gauche

Données "Sens=f(Tsk)" Nov 92



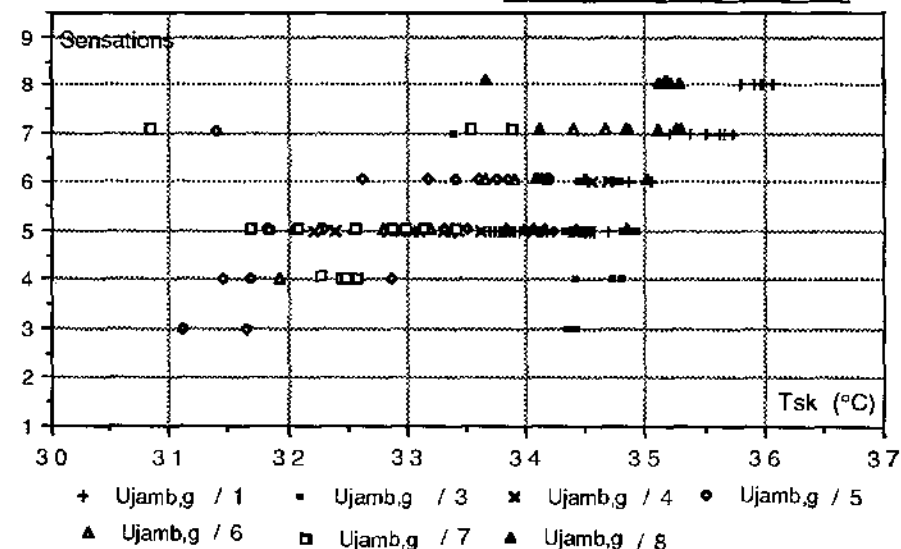
Jambe Droite

Données "Sens=f(Tsk)" Nov 92



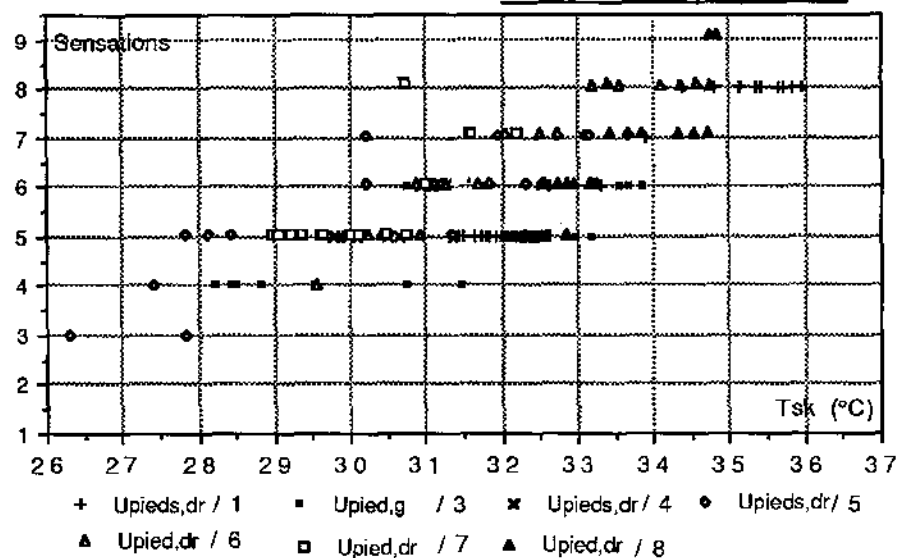
Jambe Gauche

Données "Sens=f(Tsk)" Nov 92



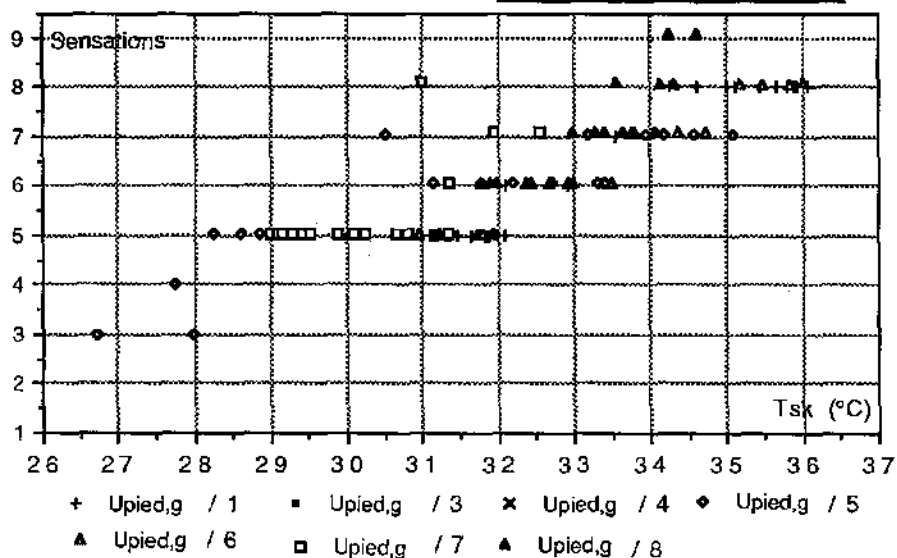
Pied Droit

Données "Sens=f(Tsk)" Nov 92



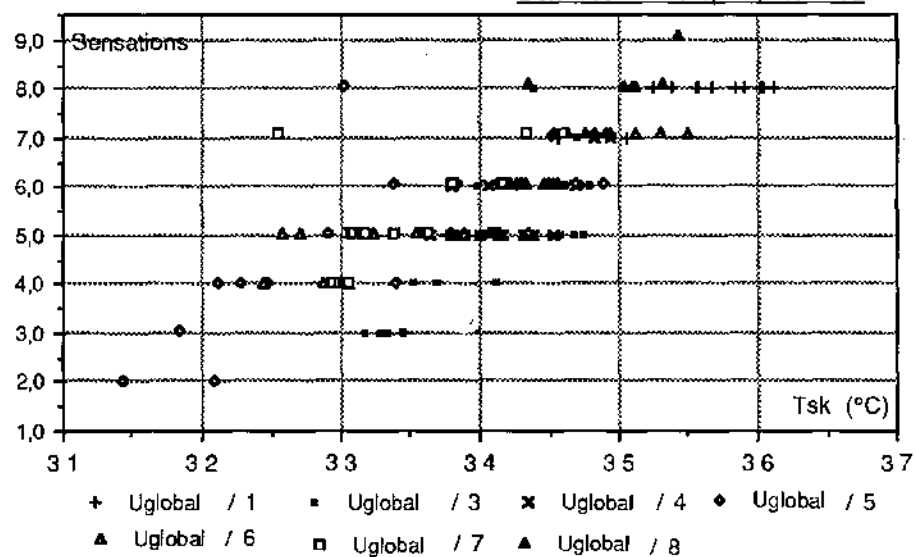
Pied Gauche

Données "Sens=f(Tsk)" Nov 92



Global

Données "Sens=f(Tsk)" Nov 92



- BEZIAN J.J., CHEIKH A., FONZES G., 1992
Modélisation dynamique des échanges par convection naturelle à l'intérieur d'un habitacle automobile. Journées de la S.F.T., Sophia-Antipolis mai 1992, pp.1-9
- CHEIKH A., 1992
Etude numérique et expérimentale des transferts thermiques d'un habitacle de voiture automobile à l'arrêt sous conditions climatiques réelles. Thèse d'université, Energétique, écoles des mines de Paris, 3 décembre 1992
- CHEN Q., DALHUIJSEN A.J., 1992
A design tool for optimal comfort and air quality in a passenger's car. Proc. 2nd Intern. Conf. A.T.A. : Vehicle comfort, Ergonomics, vibrational, noise and thermal aspects, Bologna, Oct 1992
- CHRISTIE T., 1991
La climatisation des voitures exigences et réalisations. Chauffage Ventilation Conditionnement, n°5 mai 1991, pp.18-19
- DELLA ROLLE C., TAREZA A., PALAZZETTI R., GOAN B., CARISO B., 1989
thermal confort in the passenger compartment: a contribution to its evaluation. Proc. international congress, technology status and prospects about the thermal vehicle comfort., Bologna April 1989.
- GRIVEL F., HERRMANN C., D'AMBROSIO F.R., CANDAS V., 1992
Thermal comfort analysis : Subjective data collection, methodology and reference condition. Proc. 2nd Intern. Conf. A.T.A. : Vehicle comfort, Ergonomics, vibrational, noise and thermal aspects, Bologna, Oct 1992
- GWOSDOW A.R., BERGLUND L.G., 1987
Clothing distribution influences thermal responses of man in cool environments.. J. Therm. Biol., Vol 12, No 2, pp. 91-95.
- GWOSDOW A.R., BERGLUND L.G., 1989
physiological and behavioral temperatureregulation of men in simulated nonuniform thermal environments.. Aviation, Space and environmental medicine, june 1989, pp. 558-565
- HOLMER I., NILSSON H., BOHM M., BROWEN A., NOREN O., 1992
Evaluation of thermal environment in automotive vehicles . Proc. 2nd Intern. Conf. A.T.A. : Vehicle comfort, Ergonomics, vibrational, noise and thermal aspects, Bologna, Oct 1992
- INGERSOLL J.G., KALMA T.G., MAXWELL L.M., NEMLEC R.J., 1992
Automobile passenger compartment thermal confort model
- Part I : Compartment cool-down/warm-up calculation .
- Part II : Human thermal confort calculation
Sans références
- LARNICOL P., 1990
Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son environnement. Rapport de stage, DEUST d'énergétique d'Orsay
- LEVENT, 1985
Confort thermique des véhicules. Proc. Clima 2000, Copenhagen .
- MESSANA C., PALAZZATI M., PARISI PRESICCE L., PETRUCCIOLI G., SALOTTI G., 1991
Solar ventilation in vehicles. The role of components involved. XXIII Fisita congress, Torino, PP. 901-909.

- MOREAU J.A., 1991
Mesures par thermo-couple de la température superficielle d'un matériau semi-transparent soumis à un environnement naturel développement d'un modèle analogique appliqué à la correction de ces mesures. . Thèse d'Université, INSA Toulouse, n°171, 22 Nov. 1991.
- NEWBOROUGH M., PROBERT S.D. , 1984
Improving the thermal comfort of sedentary man. Applied Energy, 17, pp. 283-299.
- OLESEN B.W., 1992
Evaluation of thermal comfort in vehicles during transient and steady state conditions. Proc. 2nd Intern. Conf. A.T.A. : Vehicle comfort, Ergonomics, vibrational, noise and thermal aspects, Bologna, Oct 1992
- PACHIAUDI G., BLANCHET V., LETISSERAND D., 1989
Le confort thermique en situation réelle : cas des transports longue distance. Journées de la S.F.T. : Evaluation des échanges de chaleur du confort thermique et des durées de tolérance dans diverses situations de vie et de travail, 14 juin 1989
- PAKLEZA J., SACADURA J.F. 1989
Le confort thermique en situation réelle : cas d'un véhicule individuel. Journées de la S.F.T. : Evaluation des échanges de chaleur du confort thermique et des durées de tolérance dans diverses situations de vie et de travail, 14 juin 1989
- PALAZZETTI M. , 1992
The Man-Environment model : The concept of robust thermal comfort and its measurement. Proc. 2nd Intern. Conf. A.T.A. : Vehicle comfort, Ergonomics, vibrational, noise and thermal aspects, Bologna, Oct 1992
- PARSONS K.C., 1992
A thermal model of the car driver. Proc. 2nd Intern. Conf. A.T.A. : Vehicle comfort, Ergonomics, vibrational, noise and thermal aspects, Bologna, Oct 1992
- PERRIN F., 1991
Modélisation du comportement thermique d'un habitacle d'automobile : approche de l'étude du confort. Thèse d'université, Lyon 91 ISAL.
- ROBIN R., 1992
Conception des systèmes de climatisation automobile.. Bulletin de liaison n°2 du G.U.T., Janvier 1992
- TANAKA H., KITADA M., TANIGUCHI Y., OHNO Y., SHINAGAWA T., AOKI H., 1992
Study on car air conditioning system controlled by car occupants' skin temperature - Part 2 development of a new air conditioning system Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.21-27
- TANIGUCHI Y., AOKI H., FUJIKAKE K., TANAKA H., KITADA M. 1992
Study on car air conditioning system controlled by car occupants' skin temperature - Part 1 Research on a method of quantitative evaluation of car occupants' thermal sensations by skin temperatures. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.13-19
- WERLING E. . 1988
Contribution aux mesures par contact température de surface de parois semi-transparentes. Modélisation - Expérimentation . Thèse , Génie Civil , INSA de Lyon, n°87 ISAL 0054, 5 janv. 1988.



Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"

Rapport d'avancement n°3 : Juin 1993

1ère Partie - Modèle de calcul de rayonnement

I. DETERMINATION DES FACTEURS DE FORME	
Géométrie de l'ensemble.....	2
Calcul des facteurs de forme.....	2
Résultats	5
II. LE MODELE D'ECHANGE RADIATIF	
Description du modèle.....	8
Regroupement des surfaces par les températures expérimentales.....	10
Les premiers tests effectués.....	11
IV. FICHE DESCRIPTIVE DU MODELE DE RAYONNEMENT	11

2ème Partie - Modèle de thermo-physiologie FRANCIS

I. <u>DESCRIPTION DU MODELE</u>	
Fiche TRNSYS	12
Liste des paramètres nécessaires	13
Fiche descriptive du modèle & Liste des variables du modèle	14
II. RELATION SENSATION-TEMPERATURE.	15
III. <u>LES PREMIERS TESTS DES DEUX MODELES COUPLES</u>	
Climat homogène et constant	19
Essai n° 5 du mois de novembre	19

1ère Partie - Modèle de rayonnement

Le calcul des échanges radiatifs est décomposé en deux parties : le calcul des facteurs de forme, purement géométrique, puis le bilan radiatif entre les différentes surfaces à partir des facteurs de formes. Les deux étapes sont présentées séparément.

I. Détermination des facteurs de forme

Géométrie de l'ensemble

A partir du fichier C.A.O. de la ZX et de celui d'un mannequin, nous avons réalisé une géométrie spécifique au calcul des transferts radiatifs entre le conducteur et la voiture. Nous avons cependant dû faire certaines hypothèses, afin de simplifier la géométrie complexe de l'ensemble.

- Etant donné qu'il n'y a pas de transferts radiatifs entre les surfaces du conducteur qui sont en contact avec le siège, nous avons supprimé ces parties inutiles au calcul du rayonnement (cf. page 3).

- Pour des raisons évidentes, il est important de décrire finement la géométrie des surfaces qui "voient" le plus le conducteur. Ainsi la partie avant de l'habitacle est restée proche de la réalité alors que la partie arrière a été largement simplifiée.

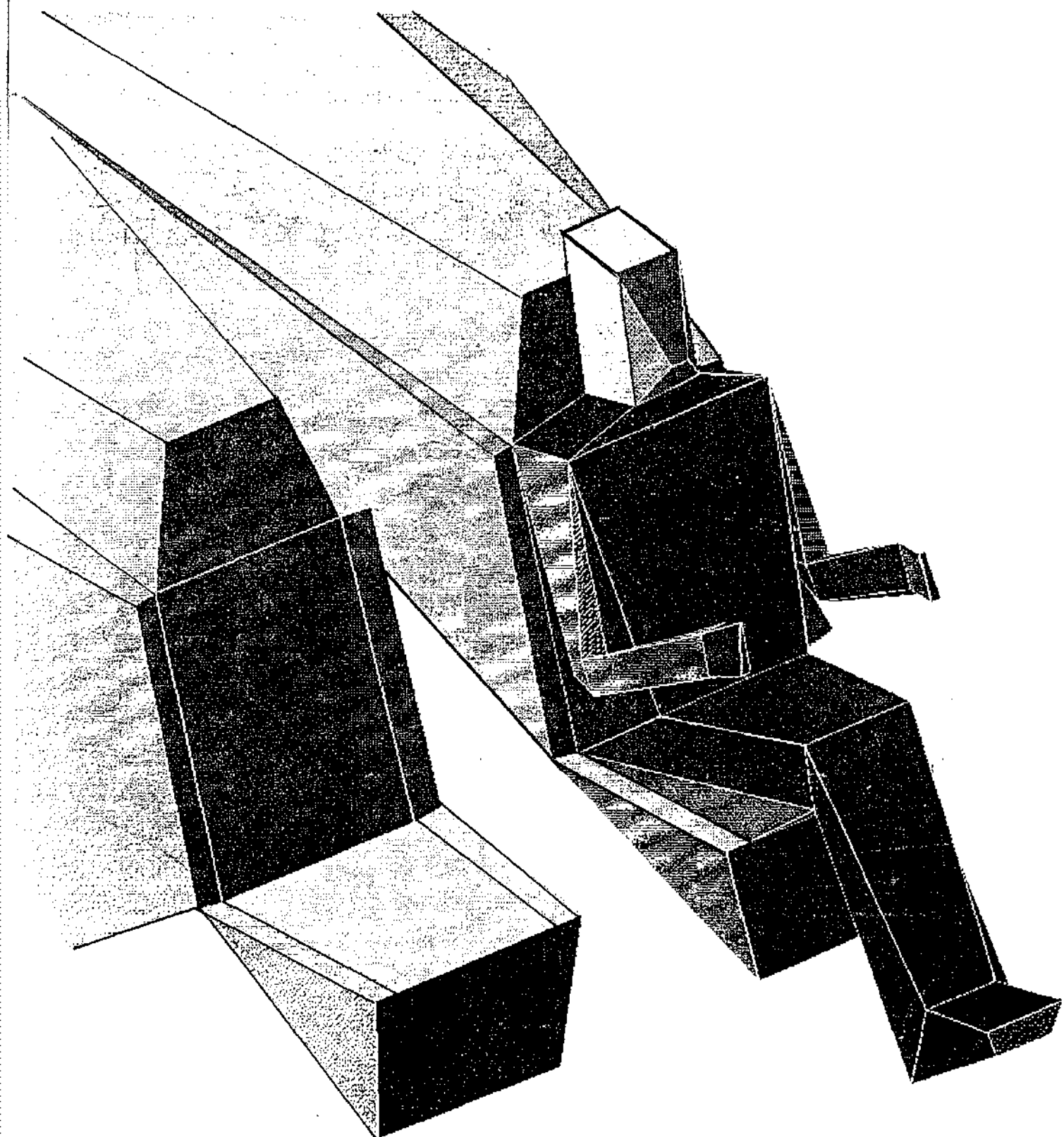
- Chaque surface devant être isotherme, nous avons tenu compte des différentes répartitions en températures obtenues lors des essais d'octobre et de novembre 1992 (cf. rapport n°2). Les vitres proches du conducteur ont été découpées en plusieurs surfaces pour respecter les différences importantes de température qui y ont été observés. Pour le pavillon nous avons dû tenir compte de la partie vitrée, dont la température peut être très différente des autres surfaces, surtout en cas d'ensoleillement.

Calcul des facteurs de formes

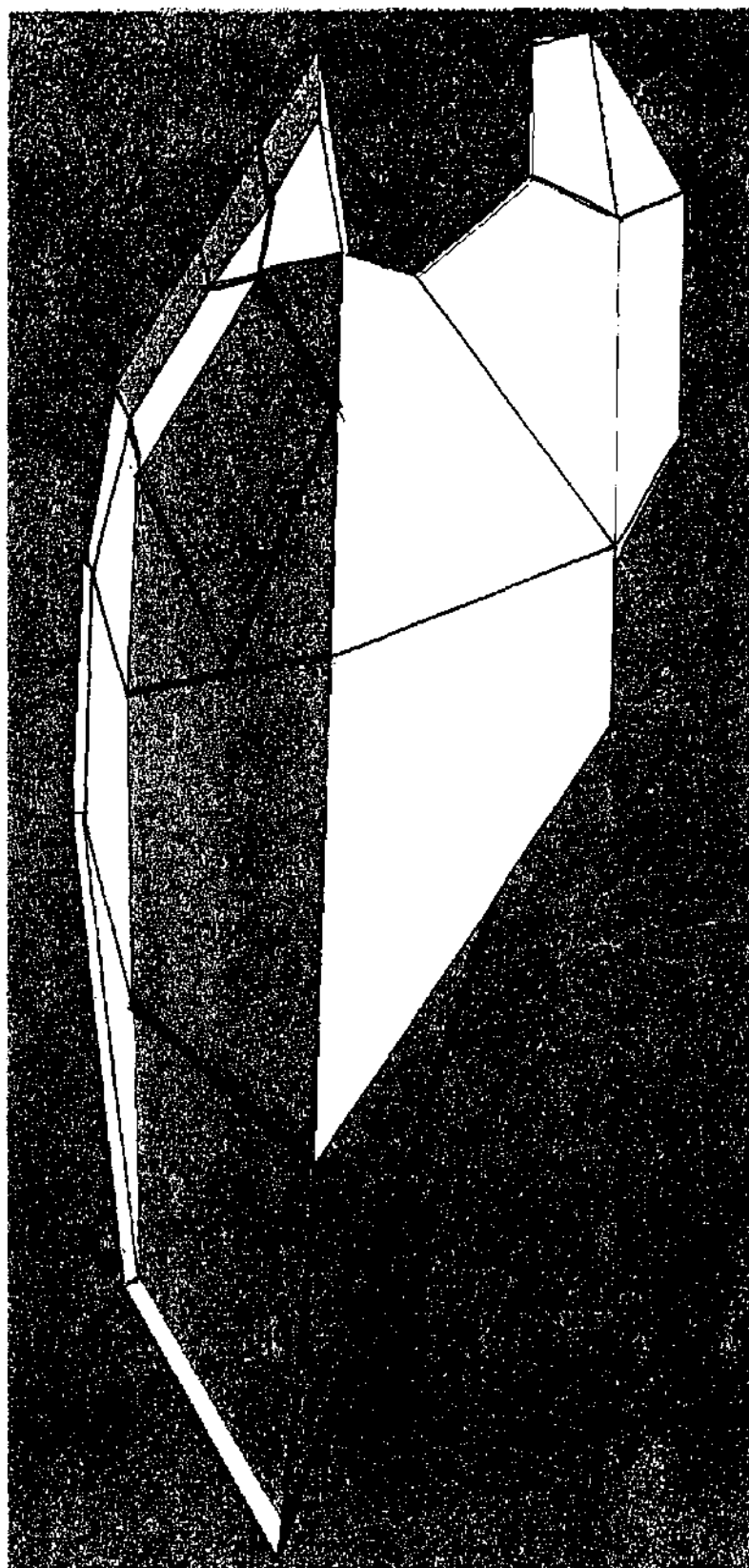
A partir de cette géométrie, les facteurs de formes sont calculés par le programme "FCTFRM". Ce programme calcule les facteurs de forme en considérant que le rayonnement est émis selon une demi-sphère dont le centre est situé au centre de la surface rayonnante. La surface de la demi-sphère est découpée en plusieurs triangles sphériques qui déterminent les angles solides dans lequel est émis une portion du rayonnement.

Le calcul des facteurs de forme sera d'autant plus précis que les surfaces des triangles seront plus homogènes et les angles solides de tir petits. Un premier programme est utilisé pour triangulariser l'ensemble des surfaces. Le programme "FCTFRM" a la particularité de pouvoir regrouper les différentes surfaces ayant des températures identiques.

Représentation du conducteur 'collé' au siège



Géométrie simplifiée de l'habitacle



La géométrie obtenue comprend environ 300 surfaces élémentaires différentes, que nous avons regroupées en 27 groupes de température : 20 pour le véhicule et 7 pour le conducteur.

les différentes surfaces sont numérotées ainsi :

n°1 pavillon
 n°2 toit ouvrant
 n°3 haut du pare-brise
 n°4 milieu du pare-brise
 n°5 bas du pare-brise
 n°6 vitre avant droit
 n°7 lunette arrière et vitres arrières
 n°8, 9, 10, 11 vitre avant gauche
 n°12 siège
 n°13 haut du tableau de bord
 n°14 milieu du tableau de bord
 n°15 dessous du tableau de bord plus console
 n°16 plancher
 n°17 haut des portières avant
 n°18 bas des portières avant
 n°19 portières arrières
 n°20 montant du pare-brise

Habitacle

n°21 tête
 n°22 tronc
 n°23 bras gauche
 n°24 bras droit
 n°25 mains
 n°26 jambes
 n°27 pieds

Conducteur

Résultats

Nous obtenons une matrice de facteur de forme de dimension 27×27 , qui est donnée en page suivante. Les facteurs de forme $F(i,i)$ ne sont pas nul, car il s'agit de groupe de surfaces qui ne sont pas forcément coplanaires.

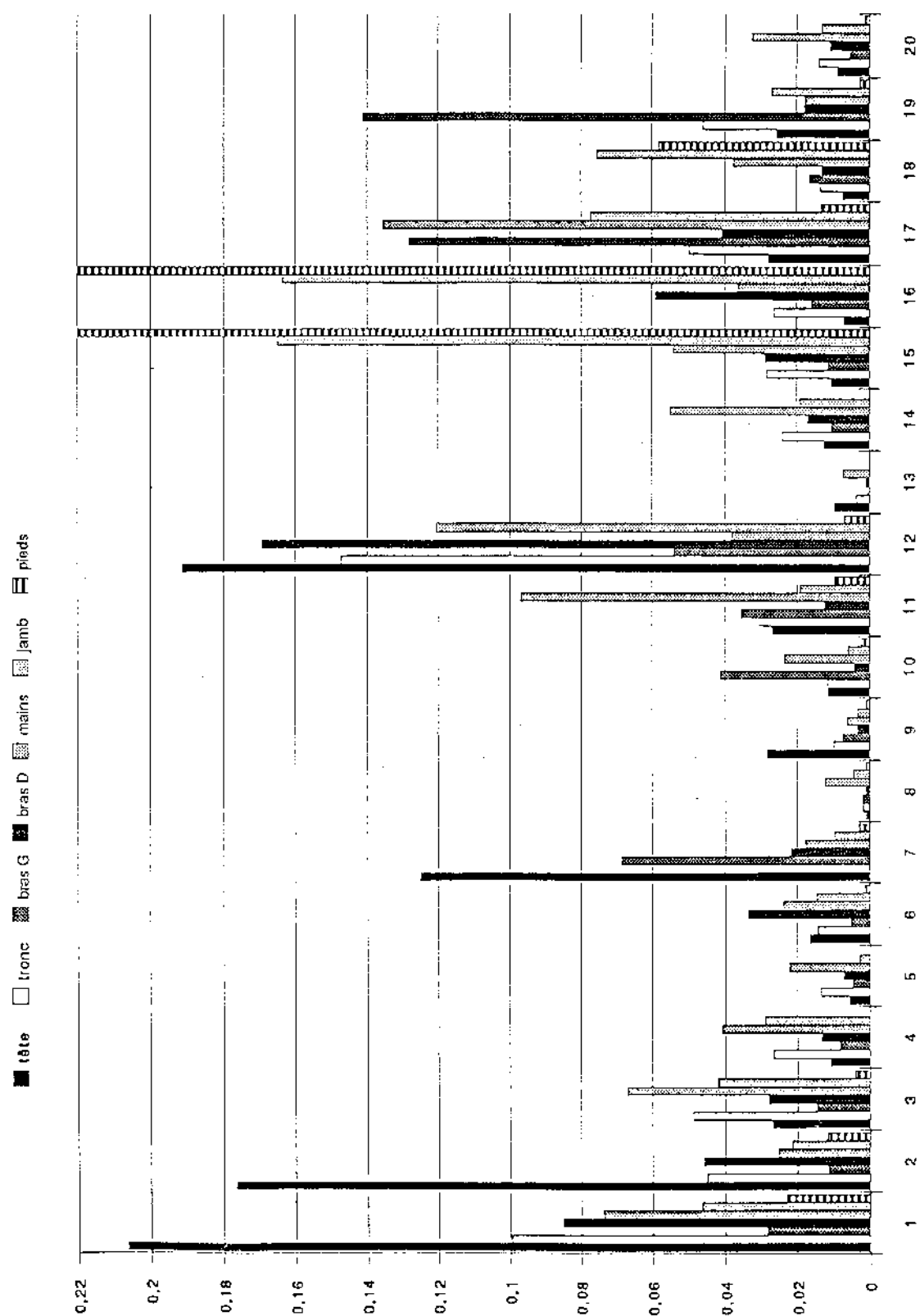
Le temps de calcul de ces facteurs de forme est assez long (60h. sur SUN), mais en fait il n'est réalisé qu'une fois, puis stocké dans un fichier qui sera utilisé par le modèle d'échanges radiatifs.

Le graphique de la page 7 représente les facteurs de formes "surfaces conducteur \Rightarrow surfaces habitacle". La valeur des facteurs de forme permet d'avoir une idée de l'influence qu'aura chaque surface sur les échanges radiatifs. On peut noter que par exemple les surfaces 8 et 13 auront une influence assez faible car le corps du conducteur "ne voit pas" ces surfaces. A l'inverse les pieds seront influencés de manière prépondérante par les surface 15 et 16.

Matrice des facteurs de forme

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0,0234	0,0067	0,0098	0,0051	0,0028	0,0191	0,1085	0,0008	0,0047	0,0024	0,0096	0,5368	0,0214	0,0193	0,0159	0,0549	0,0302	0,0163	0,0313	0,0051	0,0186	0,027	0,003	0,009	0,0017	0,0143	0,0013
2	0,0245	0,0005	0,0102	0,0062	0,0036	0,0299	0,0833	0,0011	0,009	0,0049	0,014	0,3577	0,0255	0,0264	0,0252	0,0918	0,051	0,0287	0,0458	0,0057	0,0811	0,0444	0,0044	0,0177	0,0022	0,0241	0,0025
3	0,0415	0,0121	0,0021	0,0013	0,0004	0,0479	0,0418	0,0039	0,0049	0,0055	0,0335	0,1826	0,101	0,0495	0,0111	0,1174	0,0841	0,0512	0,0396	0,0176	0,011	0,057	0,0058	0,0127	0,0068	0,0558	0,0011
4	0,0272	0,0092	0,0016	0,0021	0,0009	0,0350	0,0259	0,0073	0,0024	0,0039	0,0224	0,1406	0,3596	0,0152	0,0001	0,0726	0,0805	0,0308	0,0285	0,0241	0,0057	0,0386	0,0048	0,0075	0,0052	0,0479	0
5	0,017	0,0059	0,0006	0,001	0,002	0,0188	0,0171	0,0043	0,0014	0,0027	0,0105	0,0525	0,7556	0	0	0,0075	0,0275	0,0001	0,0147	0,0204	0,0032	0,0221	0,0031	0,0046	0,0031	0,0054	0
6	0,1083	0,0467	0,0831	0,038	0,0179	0,0008	0,0179	0,0027	0,0058	0,0058	0,0196	0,2594	0,0447	0,0564	0,0393	0,0913	0,0476	0,0224	0,0068	0,019	0,009	0,0222	0,0032	0,0202	0,0032	0,026	0,0005
7	0,0995	0,021	0,0069	0,0044	0,0026	0,0029	0,0846	0,0002	0,0008	0,0004	0,0019	0,7028	0,0032	0,0046	0,006	0,0092	0,0032	0,0019	0,0092	0,002	0,0109	0,0075	0,0067	0,0021	0,0004	0,0027	0,0002
8	0,0527	0,0201	0,0587	0,0877	0,0463	0,0304	0,0155	0	0	0	0,0015	0,068	0,093	0,1349	0,0188	0,0532	0,0674	0,031	0,0085	0,0365	0,006	0,0319	0,0132	0,007	0,0188	0,0913	0,005
9	0,1632	0,0858	0,0395	0,0152	0,0078	0,0353	0,0302	0	0	0	0	0,137	0,0279	0,0291	0,0268	0,0374	0,0389	0,024	0,022	0,0085	0,0928	0,0936	0,0275	0,0126	0,0052	0,0374	0,0018
10	0,074	0,0412	0,0397	0,0226	0,0137	0,0315	0,0122	0	0	0	0	0,1611	0,0126	0,0302	0,0299	0,0559	0,0604	0,023	0,0218	0,0078	0,0335	0,098	0,1349	0,0142	0,0172	0,0582	0,0042
11	0,0964	0,0388	0,0782	0,042	0,0177	0,0349	0,0212	0,0002	0	0	0	0,0949	0,0522	0,0592	0,0329	0,0551	0,0518	0,0334	0,0188	0,0231	0,0257	0,0834	0,0378	0,0134	0,023	0,0599	0,0058
12	0,1882	0,0345	0,0148	0,0092	0,0031	0,016	0,2687	0,0004	0,0014	0,0018	0,0033	0,175	0,0008	0,007	0,0248	0,0535	0,021	0,0179	0,1027	0,0047	0,0064	0,014	0,002	0,0063	0,0093	0,0131	0,0001
13	0,0733	0,024	0,0801	0,2282	0,4318	0,0269	0,012	0,0049	0,0028	0,0014	0,0177	0,0075	0,0093	0	0	0,0001	0,0014	0	0,001	0,0783	0,0092	0,0036	0,0002	0,0004	0,0006	0	0
14	0,1429	0,0537	0,0848	0,0209	0	0,0735	0,0369	0,0155	0,0062	0,0072	0,0434	0,1468	0	0,0001	0	0,0388	0,1222	0,0163	0,0296	0,0277	0,009	0,0484	0,0083	0,0134	0,0096	0,0438	0
15	0,0238	0,0104	0,0039	0	0	0,0104	0,0097	0,0004	0,0012	0,0014	0,0049	0,1057	0	0	0,2115	0,3186	0,03	0,1252	0,011	0,0013	0,0015	0,0115	0,0018	0,0045	0,0019	0,0763	0,0313
16	0,0668	0,0307	0,0331	0,0165	0,0015	0,0196	0,0122	0,001	0,0013	0,0022	0,0067	0,2204	0	0,0064	0,2598	0,0719	0,0297	0,0634	0,0349	0,0075	0,0008	0,0087	0,002	0,0076	0,001	0,0615	0,0316
17	0,0983	0,0457	0,0635	0,0489	0,0148	0,0273	0,0114	0,0034	0,0037	0,0064	0,0167	0,1949	0,0013	0,0539	0,0653	0,0794	0,0218	0,0177	0,0033	0,0198	0,0087	0,0442	0,0442	0,0141	0,0104	0,0777	0,0026
18	0,0503	0,0227	0,0367	0,0178	0	0,0122	0,0066	0,0015	0,0022	0,0023	0,0103	0,1578	0	0,0068	0,2593	0,1615	0,0169	0,1142	0,0034	0,0085	0,0022	0,0114	0,0054	0,0043	0,0027	0,072	0,0105
19	0,0591	0,0278	0,0203	0,0117	0,0054	0,0034	0,022	0,0003	0,0014	0,0016	0,0041	0,6465	0,0006	0,0088	0,0162	0,0632	0,0022	0,0024	0,0002	0,0036	0,0053	0,0275	0,033	0,0042	0,0009	0,0182	0,0003
20	0,0516	0,0161	0,0414	0,0456	0,0346	0,034	0,0217	0,0058	0,0025	0,0026	0,0233	0,1365	0,2325	0,0382	0,0089	0,0623	0,0618	0,0279	0,0168	0,016	0,0085	0,0384	0,0061	0,0118	0,0078	0,0414	0,0009
21	0,2064	0,1765	0,0268	0,0111	0,0057	0,0166	0,1248	0,001	0,0282	0,0114	0,0268	0,1915	0,0098	0,0127	0,0106	0,0071	0,0279	0,0075	0,0255	0,0088	0	0,05	0,0045	0,0028	0,001	0,0065	0,0002
22	0,0995	0,045	0,0487	0,0265	0,0136	0,0144	0,0305	0,0018	0,01	0,0117	0,0305	0,1474	0,0039	0,0241	0,0284	0,0264	0,05	0,0136	0,0459	0,0139	0,0175	0,0018	0,1204	0,1187	0,0044	0,043	0
23	0,0283	0,0115	0,0149	0,0084	0,0049	0,0053	0,0685	0,0019	0,0075	0,0412	0,0354	0,054	0,0004	0,0106	0,0114	0,0158	0,1281	0,0165	0,1411	0,0056	0,004	0,3083	0,0125	0,0059	0,0018	0,0511	0,0005
24	0,0851	0,0459	0,0278	0,0133	0,0073	0,0385	0,0217	0,001	0,0034	0,0043	0,0126	0,1694	0,001	0,0171	0,0285	0,0591	0,0409	0,0131	0,018	0,0109	0,0025	0,3041	0,0059	0,0175	0,0021	0,0532	0,0006
25	0,0737	0,0253	0,067	0,0408	0,0221	0,0238	0,0176	0,0124	0,0064	0,0236	0,097	0,0381	0,0075	0,055	0,0542	0,0365	0,1355	0,0376	0,0176	0,0324	0,0042	0,051	0,0082	0,0095	0,0135	0,0864	0,0039
26	0,0464	0,0215	0,0419	0,0269	0,0029	0,0148	0,0097	0,0046	0,0035	0,0061	0,0192	0,1207	0	0,0192	0,165	0,1636	0,0772	0,0753	0,0268	0,0132	0,002	0,0378	0,0175	0,0182	0,0066	0,0483	0,009
27	0,023	0,0119	0,0042	0	0	0,0015	0,0032	0,0013	0,0009	0,0023	0,0098	0,0073	0	0	0,3567	0,4438	0,0135	0,0581	0,0027	0,0016	0,0003	0	0,0008	0,0011	0,0016	0,0473	0,0076

Graphe des facteurs de forme conducteur->habitable



II. Modèle d'échanges radiatifs

Description du modèle

La méthode de calcul est basée sur le calcul des flux nets. Certaines hypothèses doivent être posées :

- les surfaces sont opaques au rayonnement infra-rouge, elles sont grises et diffusantes en émission et en réflexion. Leurs propriétés radiatives sont indépendantes de la longueur d'onde et de la direction d'émission

$$\varepsilon = \alpha = 1 - \rho \quad \varepsilon \text{ émissivité, } \alpha \text{ absorptivité, } \rho \text{ coefficient de réflexion}$$

- Chaque surface considérée est isotherme, la surface i est à température T_i
- Le flux incident venant des autres surfaces est réparti uniformément.
- le milieu traversé par le rayonnement est considéré comme parfaitement transparent, et ne participe donc pas aux échanges.

On définit la radiosité J comme la somme de l'émittance de la surface ($\varepsilon \sigma T^4$) et du flux réfléchi venant des autres surfaces (ρE avec E éclairement).

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \rho_i E_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) E_i$$

E_i est l'éclairement de la surface i dû au flux venant des n autres surfaces j ($j=1, n$)

$$E_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j$$

$$\text{d'où} \quad J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j \quad (1)$$

$$\text{ou encore} \quad \sum_{j=1}^n [\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) F_{ij}] J_j = \varepsilon_i \sigma T_i^4 = \varepsilon_i \tau_i \quad (\delta_{ij} = 0 \text{ sauf si } i=j)$$

si on écrit cette relation sous forme matricielle on obtient

$$\left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (1 - \varepsilon) F \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} \quad \text{d'où}$$

$$\begin{bmatrix} J \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (1 - \varepsilon) F \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A M T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} \quad (2)$$

Le flux net ϕ est défini comme la différence entre le flux émis par la surface et le flux absorbé venant des autres surface :

$$\phi_i = \varepsilon_i (\sigma T_i^4 - E_i) = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (\sigma T_i^4 - J_i)$$

ou sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\epsilon) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \right\}$$

on a d'après (1):

$$\begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} = (1-\epsilon) \left\{ \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} FJ \end{bmatrix} \right\}$$

soit:

$$\begin{bmatrix} \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} FJ \end{bmatrix} \right\}$$

soit d'après (2):

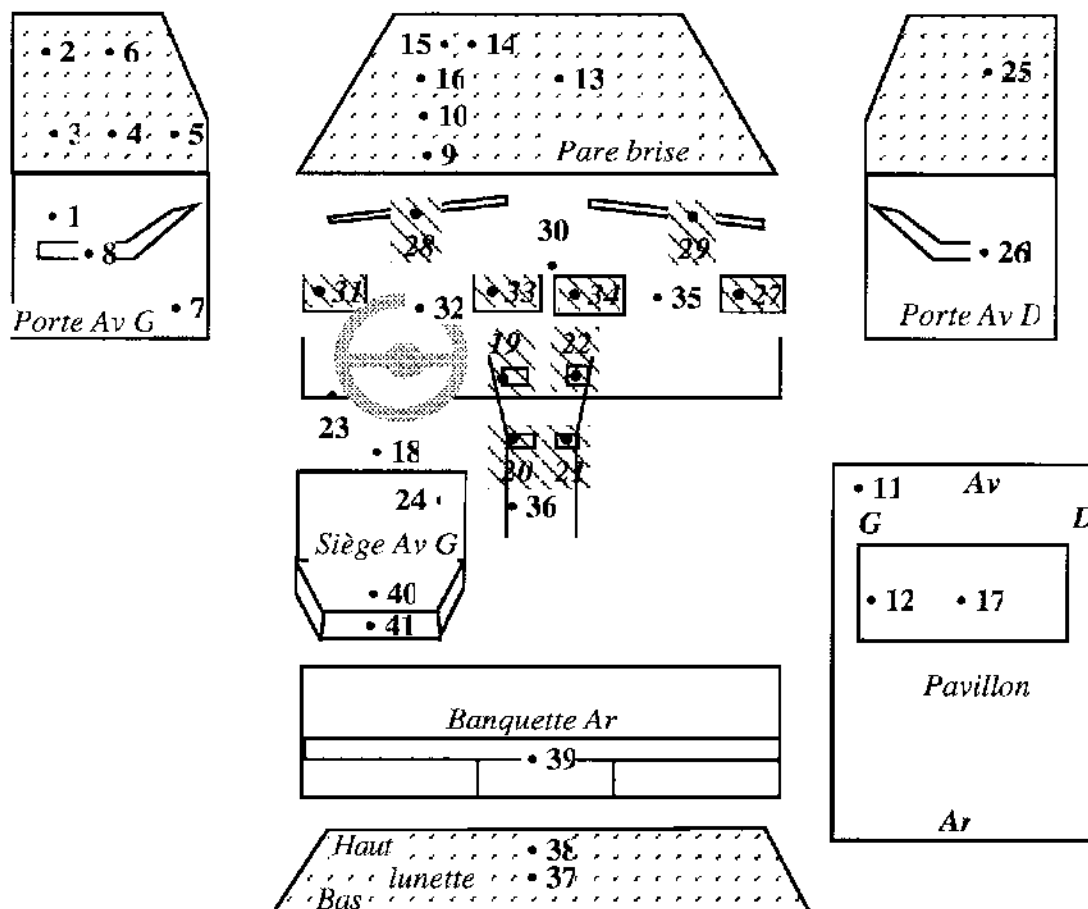
$$\begin{bmatrix} \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} - \epsilon \begin{bmatrix} F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AMT \end{bmatrix} \right\} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix}$$

soit :

$$\begin{bmatrix} \phi \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 - FF \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AMT \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \epsilon \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} 1 - FF \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \end{bmatrix}$$

Regroupement des températures de surfaces de l'habitacle

Les 31 températures de surfaces relevés lors des essais doivent être regroupés de façon à obtenir 20 températures correspondants aux groupes de surface décrites ci-dessus. Pour le conducteur les températures de peau ou de vêtement sont directement issues du modèle.



numéros des thermocouples lors de essais de novembre (les n° hachurés correspondent à des températures d'air.)

1	PANneau AVant Gauche (haut arrière)	17	16	PARe BRIsE MILieu Haut	4
2	VITre AVAnt Gauche (haut arrière)	9	17	PAVillon Centre	2
3	VITre AVAnt Gauche (bas arrière)	10	18	PIEds AVant Gauche	16
4	VITre AVAnt Gauche (bas milieu)	11	24	ASSise AVAnt Gauche	
5	VITre AVAnt Gauche (bas avant)	8	25	VITre AVAnt Droite	6
6	VITre AVAnt Gauche (haut avant)	11	26	ACCoudoir AVAnt Droit	17
7	PANneau AVAnt Gauche (bas avant)	18	30	DEssus PLAnche Centre	13
8	accoudoir AVAnt Gauche	17	32	VOIant	
9	PARe BRIsE Bas	5	35	Planche De Bord Droite	14
10	PARc BRIsE Milieu Bas	4	36	CONSOLE Bas Gauche	15
11	PAVillon AVAnt Gauche	1	37	LUNette MILieu	7
12	PAVillon ARrière Gauche	2	38	LUNette Haut	7
13	PARe BRIsE Centre	4	39	Banquette ARrière	12
14	PARe BRIsE Haut Droit	3	40	DOSSier AVAnt (Siège conducteur)	
15	PARe BRIsE Haut Gauche	3	41	DOSSier ARrière (Siège conducteur)	12

les numéros en gras correspondent aux surfaces définies dans la description géométrique simplifiée.

Les premiers tests effectués

Plusieurs tests simples doivent être effectués sur le modèle avant de le connecter au modèle de thermo-physiologie puis de le comparer avec les résultats expérimentaux.

Nous avons testé le programme en fixant toutes les surfaces à la même température (habitable et conducteur), nous obtenons un flux quasiment nul à la quatrième décimale près.

Puis nous avons fait le calcul du rayonnement couplé avec le modèle de thermo-physiologie en supposant une ambiance isotherme (cf chap 2.II).

IV. FICHE DESCRIPTIVE DU MODELE DE RAYONNEMENT

La description du modèle est donné dans le formalisme "PROFORMA"

UNIVERSITE PAUL SABATIER



P.S.A. - VALEO - LESETH

Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"

CALCUL DES TRANSFERTS RADIATIFS ENTRE UN CONDUCTEUR ET SON VEHICULE

Mai 1993 - Version 0.0

L.E.S.E.T.H. - Laboratoire Etudes des Systèmes et Environnement Thermique de l'Homme
U.P.S. - 118, Route de narbonne - 31062 Toulouse Cedex - Téléphone : 61 55 68 29. Fax : 61 55 60 21

CHAPITRE 1 : Fiche Signalétique

Objet : Calcul des échanges par rayonnement entre les surfaces du conducteur et l'habitacle de la voiture
Phénomènes : transferts radiatifs
Hypothèses : surfaces grises, gaz non absorbant, géométrie de l'ensemble bien défini
Méthode : Bilan thermique
Caractère : ☐ intrinsèque ☐ interface ☒ couplage ☐ macro-modèle
Degrés de liberté : 27

RESUME

Calcul des transferts radiatifs entre les 20 surfaces intérieures de la voiture et les 7 surfaces des segments du corps humain.
 Les flux nets rayonnés sont calculés à partir des températures de parois, des surfaces des habits ou de la peau du conducteur et des facteur de forme calculés précédemment.

MODE D'APPROCHE	<input type="checkbox"/> simplifié	<input checked="" type="checkbox"/> détaillé	<input type="checkbox"/> empirique	<input type="checkbox"/> conventionnel
TYPE	<input type="checkbox"/> algorithmique	<input checked="" type="checkbox"/> équationnel	<input checked="" type="checkbox"/> jeux de données	<input type="checkbox"/> logique
ETAT	<input type="checkbox"/> embryonnaire	<input type="checkbox"/> en développement	<input checked="" type="checkbox"/> à affiner	<input checked="" type="checkbox"/> finalisé
VALIDATION	<input type="checkbox"/> qualitative	<input type="checkbox"/> analytique	<input type="checkbox"/> numérique	<input type="checkbox"/> expérimentale

INFORMATIONS GENERALES

Rédacteur et Suivi de la fiche

F. Althabégouïty, LESETH - UPS Toulouse

Date de la fiche : 24/05/93

Date de la modification	Objet de la modification	Numéro de version	Auteur de la modification
05/1993	création du modèle	0.0	F. ALTHABEGOÏTY, A. CORDIER & F. THELLIER

CHAPITRE 2 : Description formelle

NOMENCLATURE

Paramètres :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
FF(i,j)	(27*27) fact. de forme	-	réel	0 à 1		
EMI(i)	27 émissivité des surfaces	-	réel	0 à 1		
AMT(i,j)	matrice inverse de (1-ε FF)	-	réel	0 à 1		

Variables de couplage en "entrée" :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
TT(i)	20 Temp. de surface de l'habitacle	°C	réel	-15 à 50		
TT(20+i)	7 Temp de surface du conducteur	°C	réel	25 à 35		

Variables de couplage en "sortie" :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
RAYO(i)	7 flux net des segments du corps	Kj/h	réel			
RAY(i)	27 densité de flux net des surfaces	Kj/h m ²	réel			

Déclarations des variables internes au modèle :

K Constantes **P** Paramètres **I** Inputs, Entrées **V** Variables

Remarques : • Les unités données sont celles utilisées dans le programme

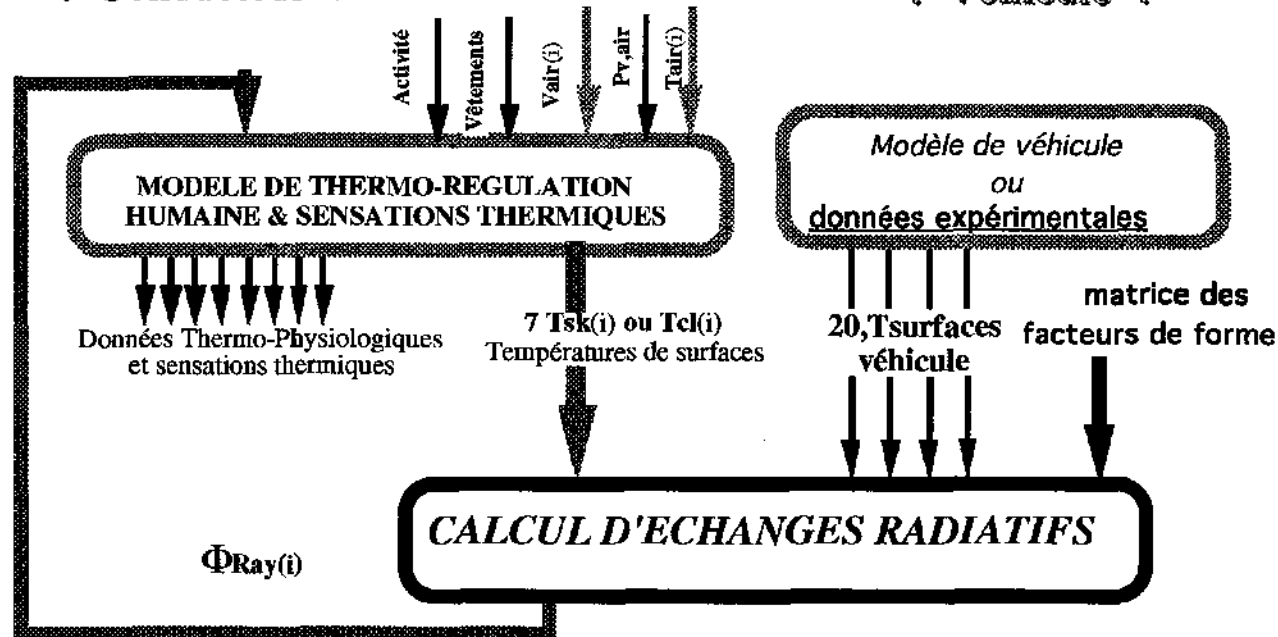
Nom	dim	Définition	unités	
ARFE	27	valeur intermédiaire pour le calcul du flux net		V
EMI	27	Emissivité des 27 groupes de surfaces		P
EPS	27	valeur intermédiaire pour le calcul du flux net $SIG*(TR^4-T4M)$		V
F	27*27	valeur intermédiaire pour le calcul du flux net $\partial_{i,j} FF(i,j)$	-	V
FE	27	valeur intermédiaire pour le calcul du flux net $\sum F(i,j)*EPS(j)$		V
FF	27*27	Facteur de forme calculé par le programme fctfrm(VALEO)		K
FR	27	densité de flux net rayonné $FE(i)-RFE(i)$	Kj/hm ²	V
FRS	7	Flux net rayonné des 7 segments du conducteur $SURF(i)FE(i)$	Kj/h	v
RFE	27	valeur intermédiaire pour le calcul du flux net		V
SIG	1	constante de Boltzmann		K
SIGF	27	somme sur j des FF(i,j)	1	V
SURF	7	surfaces des segments du conducteur	m ²	K
TR	27	température des différents groupes de surfaces de l'habitacle et conducteur	°C	K
T4M	1	valeur moyenne de TR ⁴	(°C) ⁴	V

SCHEMA BLOC

Modèle complet, liaisons entre modèle de thermophysiology et environnement thermique (véhicule)

. Conducteur .

. Véhicule .



FORMULATIONS

les échanges au niveau de la peau ou des vêtements avec l'habitacle de la voiture

A partir des facteurs de forme, de la matrice inverse AMT, des températures des 20 groupes de surface de l'habitacle de la voiture et des 7 températures surfaciques des segments du conducteur on calcule les densité de flux de l'ensemble voiture conducteur.

On calcule les 7 flux nets émis par les segments du conducteur en multipliant leurs densité de flux par leurs surfaces respectives.

on note:

Φ

Vecteur de densité de flux net

FF

matrice des facteurs de forme

$\phi(i)$ densité de flux net échangé par la surface i

FF(i,j) facteur de forme de la surface i vers j

ε vecteur des émissivités $\varepsilon(i)$

émissivité de la surface i

τ vecteur des émittances des surface

$\tau(i) = \sigma T^4(i)$ émittance de la surface i

$$AMT(i,j) = \{\delta_{i,j} - (1 - \varepsilon(i))FF(i,j)\}^{-1}$$

Les flux nets radiatifs sont donnés par l'expression (R. Bru):

$$\left[\phi \right] = \left\{ \left[1 \right] - \left[1 - FF \right] \cdot \left[AMT \right] \cdot \left[1 - \varepsilon \right] \right\} \cdot \left[1 - FF \right] \left[\tau \right]$$

Les calculs matriciels étant assez lourds nous devons passer par des étapes intermédiaires. Le flux net radiatif est calculé de la manière suivante, pour i de 1 à 27 et j de 1 à 27:

- calcul de $\left[1 - FF \right]$

$$F(i,j) = \delta_{i,j} - FF(i,j)$$

- calcul de la valeur moyenne des températures de surface puissance 4 :

$$T4M = \sum_{i=1}^{27} TR(i)^4$$

- calcul de $\tau(i)$ pondéré par $T4M$:

$$EPS(i) = \text{SIG}(TR(i)^4 - T4M)$$

- calcul intermédiaire du flux net rayonné $\left[1 - FF \right] \left[\tau \right]$:

$$FE(i) = \sum_{j=1}^{27} F(i,j) EPS(j)$$

- calcul de $\left[1 - \varepsilon \right] \cdot \left[1 - FF \right] \left[\tau \right]$:

$$RFE(i) = (1 - \varepsilon(i)) FE(i)$$

- calcul de $\left[AMT \right] \cdot \left[1 - \varepsilon \right] \cdot \left[1 - FF \right] \left[\tau \right]$:

$$ARFE(i) = \sum_{j=1}^{27} AMT(i,j) RFE(j)$$

- calcul de $\left[1 - FF \right] \cdot \left[AMT \right] \cdot \left[1 - \varepsilon \right] \left[1 - FF \right] \left[\tau \right]$:

$$RFE(i) = \sum_{j=1}^{27} F(i,j) ARFE(j)$$

- calcul de densité de flux :

$$FR(i) = FE(i) - RFE(i)$$

- pour les 7 segments du conducteur nous calculons le flux net :

$$FRS(i) = FR(i) \cdot SURF(i)$$

CHAPITRE 3 - Domaine d'Application - Règles d'Usage

HYPOTHESES DETAILLEES :

- Le modèle dans un premier temps n'est établi que pour le conducteur d'une voiture, dont la géométrie est définie préalablement.
- La voiture est représentée par 20 surfaces et le conducteur par 7
- La gaz ne participe pas aux échanges, il est ni absorbant ni émissif
- Seul le rayonnement infra-rouge est pris en compte
- Les surfaces sont considérées comme des surfaces grises
- L'émission est Lambertienne

CONDITIONS DE VALIDITE :

LISTE DES APPLICATIONS : Le modèle calcule les différents flux entre les diverses surfaces de l'ensemble habitacle - conducteur

EXEMPLES DE MODELES ASSOCIES : Calcul des facteurs de forme.

REGLES DE COHERENCE POUR L'ASSEMBLAGE : Le mode de calcul nécessite le calcul des températures pour chaque surface

DIFFICULTES : Le programme nécessite de nombreux relevés de températures de paroi ainsi que les températures de surfaces du conducteur à chaque pas de temps.

CHAPITRE 4 - Validation

En cours de validation

ENVIRONNEMENT ET MISE EN OEUVRE: Simulations effectuées sous TRNSYS au - L.E.S.E.T.H. - U.P.S. Toulouse.

CHAPITRE 5 - Références Bibliographiques

THELLIER F. - *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Un approche pour l'étude du confort.* Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse n°510, Juillet 1989.

BRU R. - *Modélisation d'un habitat solaire, application à la simulation d'échanges thermiques cutanés.* Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse , décembre 1983.

2ère Partie - Modèle de Thermophysiology-Francis

I. Description du modèle

Fiche TRNSYS

Cette fiche permet de connecter le module de thermo-physiologie aux autres modules avec les conventions spécifiques à TRNSYS

Fiche TRNSYS : FRANCIS - TYPE 54

Modèle mathématique de thermorégulation humaine. Le corps est divisé en 29 compartiments (7 segments, chacun divisés en 4 couches plus le flux sanguin). Le bilan thermique de chaque compartiment est calculé, puis les températures ; toutes les réactions physiologiques sont prises en compte (sudation, vasomotricité, frissons). Passage des variables physiologiques aux sensations thermiques.

LES PARAMETRES

1	cas	= 1	conditions d'Hiver	Vêtements Epais
		= 2	conditions d'Eté	Vêtements légers
<i>(cas= 3 : conditions d'Hiver -Vêtements Légers et cas = 4 : conditions d'Eté-Vêtements Epais sont prévus dans le programme mais ne seront étudiés que par la suite)</i>				
3	Dsort	début de l'impression des résultats (h)		
4	Fsort	fin	"	"
5	sncf	Pas de temps	"	"

LES ENTREES

1	M	Métabolisme total (met ou W/m ²)
2	Pa	Pression de vapeur dans l'air (Pa)
3 à 9	Ta(i)	Températures d'air sur les 7 segments (°C)
10 à 16	Va(i)	Vitesses d'air sur les 7 segments (m/s)
17 à 23	RAYO(i)	Flux net rayonnés par les 7 segments (KJ/h)
23 à 30	RAY(i)	Densité de flux net rayonnés par les 7 segments (KJ/hm ²)

LES SORTIES

1	Tsk	température moyenne cutanée (°C)
2	Tclo	température moyenne de surface des vêtements (°C)
3	ω	mouillure moyenne cutanée
4	Sensglo	sensation globale (de 1 à 9)
5 à 11	Tskl(i)	température cutanée des 7 segments (°C)
12 à 18	Tcl(i)	température de surface des vêtements des 7 segments (°C)
19 à 25	ω(i)	mouillure cutanée des 7 segments (°C)
26 à 32	Sens(i)	sensation thermique des 7 segments (de 1 à 9)
33	HP	production totale de chaleur (KJ/h)
34	Hflow	stockage total de chaleur (KJ/h)
35	Conv	échange de chaleur par convection (KJ/h)
36	Ray	" " " " rayonnement (KJ/h)
37	Dry	échange sensible (convection + rayonnement) (KJ/h)
38	Evap	eau perdue par évaporation (g/h)
31	Qevap	évaporation totale depuis le début (g)
39	Qsud	quantité d'eau suée depuis le début (g)
40	Qdrip	eau ruisselant depuis le début (g)
41	T(1)	température interne de la tête (°C)
42	T(5)	température rectale (°C)
43	XPOURgl	pourcentage dans la plage de sensation globale
44 à 50	XPOUR(i)	pourcentage dans la plage de sensation pour chaque segment

- Les paramètres du modèle sont lus dans des fichiers différents pour chaque cas
- des résultats intermédiaires sont imprimés dans le fichier "Resu". entre le temps *DSORT* et *FSORT* tous les *SNCF*.
- Toutes les grandeurs thermo-physiologie sont accessibles.
- Les sensations sont exprimées sur une échelle en 9 points :
1-très froid ... 5 -confort ... +9-étouffant

Liste des paramètres du modèle pour les conditions n°1

Le fichiers ci-dessous regroupe tous les paramètres utiles au modèle, certains seront appelés à être modifié par la suite, et sont notés en italique (résistance thermique des vêtements, surface de contact, paramètres du tableau température cutanées->sensations, ...).

<u>Fichier des paramètres du modèle</u>						
	C	QB	EB	BFB	TC	Tset
1	3.290	11.200	4.5	48.00	4.00	37.06
2	0.675	0.270	0.0	0.27	7.80	36.34
3	0.225	0.125	0.0	0.12	13.20	35.78
4	0.243	0.061	0.612	0.80	0.0	35.12
5	9.465	39.200	4.5	232.00	1.45	37.12
6	15.920	6.380	0.0	6.40	5.55	36.61
7	4.280	2.341	0.0	2.30	15.70	34.15
8	1.222	0.307	3.27	4.28	0.0	32.86
9	0.63	0.344	0.0	0.345	1.45	35.01
10	1.53	0.622	0.0	0.62	4.8	34.27
11	0.293	0.163	0.0	0.16	14.4	33.50
12	0.220	0.055	0.593	0.25	0.0	32.54
13	0.63	0.344	0.0	0.345	1.45	35.01
14	1.53	0.622	0.0	0.62	4.8	34.27
15	0.293	0.163	0.0	0.16	14.4	33.50
16	0.220	0.055	0.593	0.25	0.0	32.54
17	0.143	0.087	0.0	0.10	4.10	34.60
18	0.067	0.027	0.0	0.05	9.60	34.00
19	0.090	0.050	0.0	0.05	9.60	33.20
20	0.168	0.041	0.432	0.57	0.0	32.52
21	3.992	2.226	0.0	2.20	5.25	36.10
22	9.250	3.700	0.0	3.70	14.10	35.36
23	1.440	0.800	0.0	0.80	50.50	33.70
24	1.088	0.270	2.98	3.78	0.0	33.09
25	0.241	0.145	0.0	0.15	5.05	34.95
26	0.067	0.027	0.0	0.03	17.20	34.00
27	0.135	0.075	0.0	0.08	13.90	32.90
28	0.225	0.054	0.6	0.82	0.0	31.74
29	2.250	0.000	0.0	0.0	0.0	36.69
PERSU	Pcont	HR	HCO	Rcl	Fcl	Tclo
0.0674	0.00	5.50	6.51	0.000	1.000	25.000
0.3604	0.50	4.50	5.42	0.220	1.000	25.000
0.0653	0.00	4.50	8.91	0.200	1.000	25.000
0.0653	0.00	4.50	8.91	0.200	1.000	25.000

0.0475	0.30	3.00	8.85	0.000	1.000	25.000		
0.3283	0.00	4.50	7.71	0.140	1.000	25.000		
0.0659	0.00	4.00	8.90	0.110	1.000	25.000		
SKINR	SKINS	SKINC	SKINV	WORKI	CHILI			
0.0827	0.081	0.050	0.1320	0.010	0.0233			
0.5870	0.482	0.150	0.3220	0.500	0.5480			
0.0411	0.077	0.025	0.0475	0.050	0.0526			
0.0411	0.077	0.025	0.0475	0.050	0.0526			
0.2215	0.031	0.350	0.1220	0.010	0.0023			
0.1860	0.219	0.050	0.2300	0.370	0.3190			
0.0399	0.035	0.350	0.1000	0.010	0.0023			
CSW	SSW	PSW	XSW	CDIL	SDIL	PDIL	XDIL	
360	60	60	400	150	25	25	150	
CSTRI	SSTRI	PSTRI	XSTRI	CCHIL	SCHIL	PCHIL	XCHIL	
300	50	50	200	180	30	30	300	
QBT	CLW	CNN	CSK	ADU	BPH	BULL	EAUMAX	IL
69.73	2.2	59.85	3.386	1.8877	0.3	10.0	80	0.6

Fiche descriptive du modèle et liste des variables du modèle

La fiche et la liste des variables sont donnés ci-après dans le formalisme "PROFORMA"

UNIVERSITE PAUL SABATIER



P.S.A. - DALEO - LESETH

Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"

Modèle de mannequin thermique dans une voiture

Modèle de thermorégulation humaine et d'évaluation des sensations thermiques
pour un homme dans un véhicule

Mai 1993 - version 2.0

Françoise THELLIER, Frédéric ALTHABEGOITY, Alain CORDIER, Françoise MONCHOUX

L.E.S.E.T.H. -Laboratoire Etudes des Systèmes et Environnement Thermique de l'Homme
U.P.S. - 118, Route de narbonne - 31062 Toulouse Cedex - Téléphone : 61 55 68 29. Fax : 61 55 60 21

CHAPITRE 1 : Fiche Signalétique

Objet : Corps humain (Francis) dans une voiture
Phénomènes : Thermorégulation humaine, thermique du corps humain, Sensations thermiques
Hypothèses : Homme "standard", conditions climatiques d'une voiture dans des conditions bien déterminées
Méthode : Bilan thermique
Caractère : ☐ intrinsèque ☐ interface ☒ couplage ☐ macro-modèle
Degrés de liberté : 22

RESUME

Physique->physiologie : Calcul du bilan thermique du corps humain, ce modèle permet d'obtenir toutes les données physiologiques globales et locales d'un individu soumis à une ambiance thermique hétérogène. Le corps est divisé en 29 compartiments.

Physiologie->sensations : Les grandeurs physiologiques globales et locales sont traduites en sensations thermiques globales et locales. Le modèle s'appuie sur des résultats expérimentaux.

MODE D'APPROCHE	<input type="checkbox"/> simplifié	<input checked="" type="checkbox"/> détaillé	<input checked="" type="checkbox"/> empirique	<input type="checkbox"/> conventionnel
TYPE	<input type="checkbox"/> algorithmique	<input checked="" type="checkbox"/> équationnel	<input checked="" type="checkbox"/> jeux de données	<input type="checkbox"/> logique
ETAT	<input type="checkbox"/> embryonnaire	<input type="checkbox"/> en développement	<input checked="" type="checkbox"/> à affiner	<input type="checkbox"/> finalisé
VALIDATION	<input type="checkbox"/> qualitative	<input type="checkbox"/> analytique	<input type="checkbox"/> numérique	<input checked="" type="checkbox"/> expérimentale

INFORMATIONS GENERALES

Rédacteur et Suivi de la fiche

F. Thellier, LESETH - UPS Toulouse

Date de la fiche : 24/05/93

Date de la modification	Objet de la modification	Numéro de version	Auteur de la modification
1989	Insertion du modèle dans TRNSYS Validation pour de l'habitat	0.0	F. THELLIER & A. CORDIER
1991	Ajout des sensations thermiques Validation pour l'habitat	1.0	A. CORDIER, M GALEOU & F. THELLIER
mai 1993	Application aux véhicules	2.0	F. ALTHABEGOITY, A. CORDIER & F. THELLIER

CHAPITRE 2 : Description formelle

NOMENCLATURE

Paramètres :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
cas	conditions	sans	entier	(1; 2 ; 3 ; 4)	1	

Variables de couplage en "entrée" :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
M	Métabolisme total	met	réel	1 à 3 met	1 met	1 met
Pa	Pression de vapeur dans l'air	Pa	réel			
Ta(i)	7 Temp d'air (Mode 1 & 2)	°C	réel	10 à 40		
Va(i)	7 vitesses d'air (Mode 1 & 2)	m/s	réel	0 à 2		
Ray(i)	7 flux nets rayonnés (mode 2)	kJ/h	réel			

Variables de couplage en "sortie" :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
Tsk et Tsk(i)	Temp. cutanées moyenne et locales	°C	réel	30 à 40		
Tcl et Tcl(i)	Températures des vêtements moyenne et locales	°C	réel	10 à 40		
ω_{tot} et $\omega(i)$	Mouillures cutanées moyenne et locales	-	réel	0 à 1		
Sensg et sens(i)	sensations globale et locales des 7 segments	-	réel	1 à 9		1 : très froid 9: étouffant
de nombreuses sorties sont disponibles voir annexe : <i>"exemple de résultats"</i>						

Déclarations des variables internes au modèle :

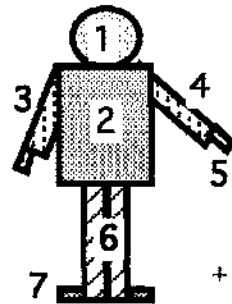
Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
Voir annexe : <i>"les variables du modèle"</i>						

SCHEMA FONCTIONNEL

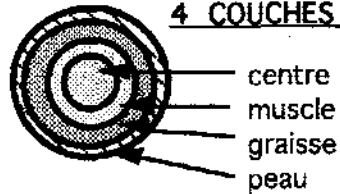
Système contrôlé

7 SEGMENTS

- 1 tête
- 2 tronc
- 3 bras droit
- 4 bras gauche
- 5 mains
- 6 jambes
- 7 pieds

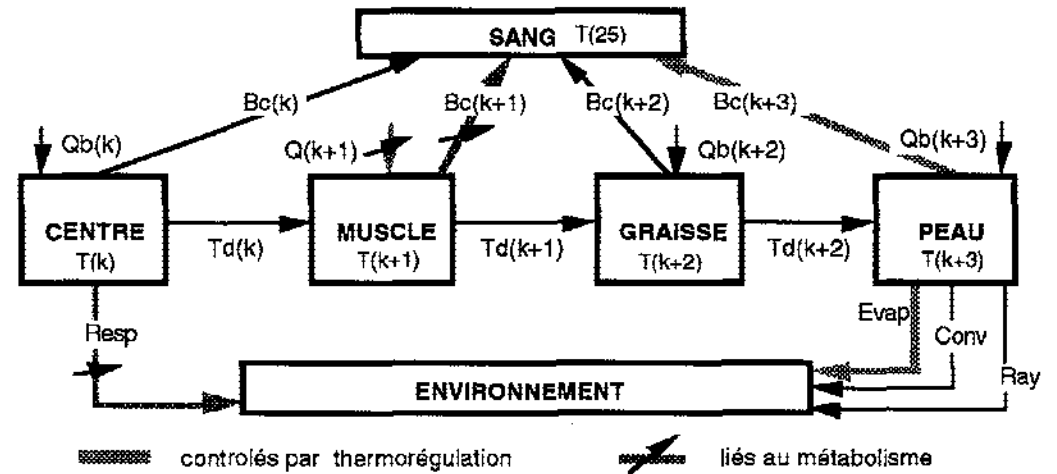


4 COUCHES



+ le flux sanguin

[(7 segments) * (4 couches)] + flux sanguin = 29 compartiments



Schématisation les échanges de chaleur dans un segment

Système de contrôle

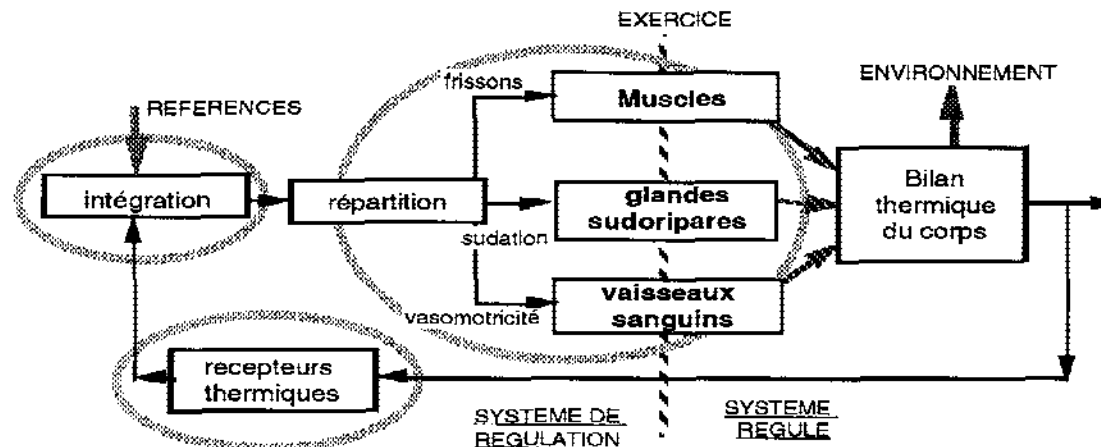
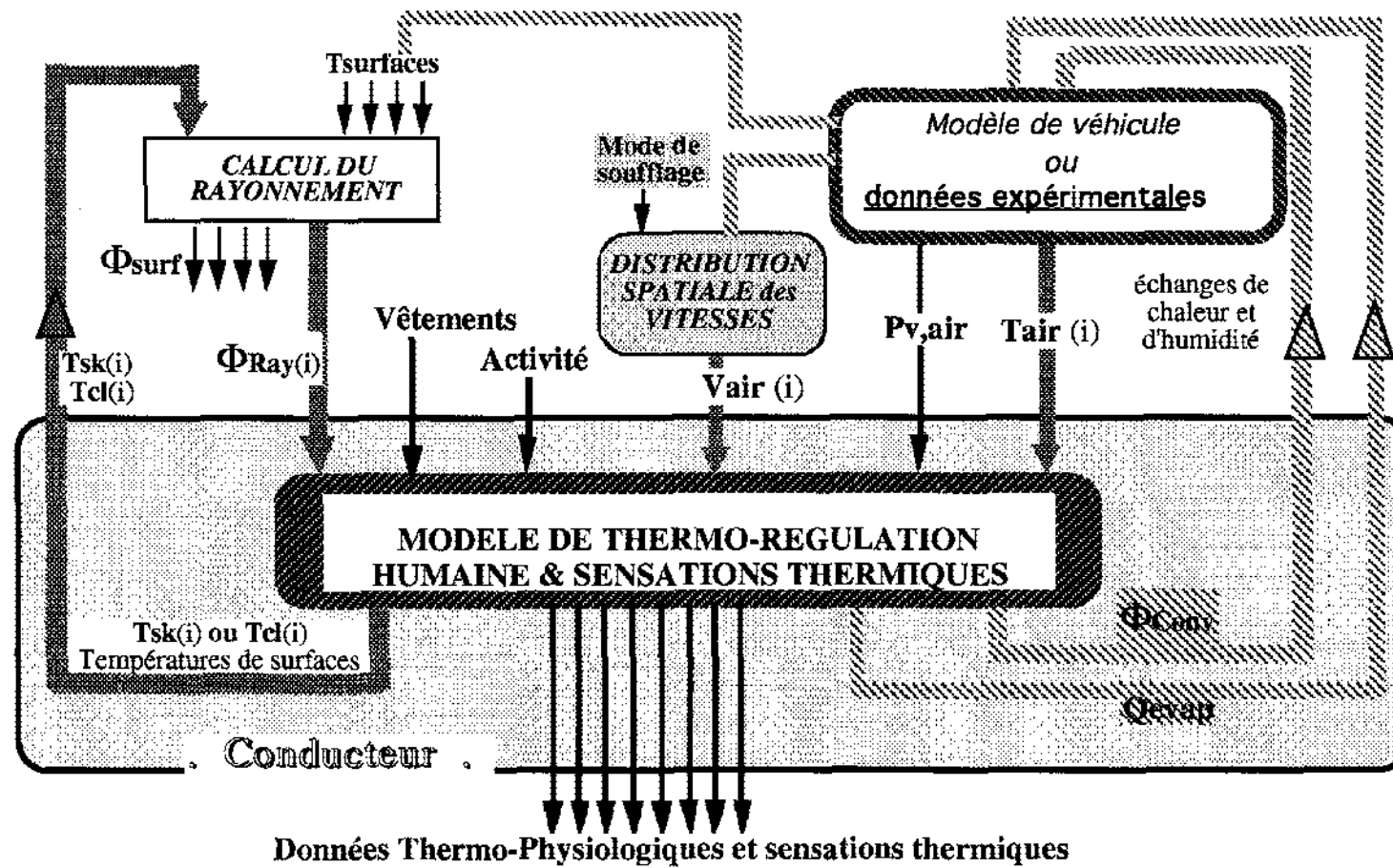


Schéma bloc : Modèle complet, liaisons entre modèle de thermophysiology et environnement thermique (véhicule)



FORMULATIONS

Le corps est décomposé en deux sous systèmes :

- le système contrôlé : il est passif et a les caractéristiques physiques et physiologiques réelles du corps humain ; il met en jeu uniquement des transferts de masse et de chaleur ;
- le système de contrôle : il correspond à la partie active du système, c'est le régulateur ; il met en jeu uniquement des transferts d'information et de commande.

Système contrôlé Dans la description qui suit, les notations utilisées correspondent à :

- indice "b" = valeurs basales des variables,
- indice "n" = numéro de compartiment (n = 1 à 29)
- indice "i" = numéro de segment (i = 1 à 7), (i=1-Tête; 2-tronc, 3-bras droit, 4 bras gauche, 5-mains, 6-jambes, 7-pieds)
- indice "k" = numéro de couche (k = 1 à 4), (k=1-centre, 2-muscle, 3-graisse, 4-peau)

LES TRANSFERTS INTERNES DE CHALEUR

- La production de chaleur - Le métabolisme basal M_b est réparti dans toutes les couches, sa valeur totale est :

$$M_b = \sum M_{b(n)} = 80 \text{ W} = 69 \text{ kcal/h}$$

- L'Augmentation due au travail ou métabolisme d'activité M_a n'a lieu que dans les muscles :

$$M_{a(k+1),i} = \text{work}_i(i) \cdot \text{WORK}, \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^7 \text{work}_i(i) = 1$$

- Conduction tissulaire (T_d), se fait de manière radiale d'une couche à l'autre. Il a été établi sur un modèle de sphère ou de cylindre.

$$T_{d(k)} = TC(k)(T(k) - T(k+1))$$

- Convection sanguine (B_c) de chaque couche. Le débit sanguin est constant au centre et dans la graisse. Dans les muscles, il augmente en fonction de la production de chaleur. Dans la couche cutanée, il est fortement contrôlé par le régulateur.

$$BC(n) = BF(n) \cdot C(29) \cdot (T(n) - T(29))$$

LES ECHANGES DE CHALEUR AVEC L'EXTERIEUR

• Les pertes respiratoires (R_{res}) par convection (C_{res}) et évaporation (E_{res}) sont prises en compte dans la couche centrale de la tête (13 %) et du tronc (87 %).
 $R_{\text{res}} = C_{\text{res}} + E_{\text{res}}$ avec $C_{\text{res}} = 0.0014 \cdot M \cdot (T_{\text{exp}} - T_a)$ $E_{\text{res}} = 1.72 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (P_{\text{exp}} - P_a)$

T_{exp} : Température de l'air expiré

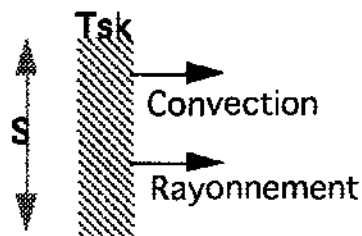
P_{exp} : pression de vapeur saturante à température T_{exp}

$$T_{\text{exp}} = 32,5 + 0,066 T_a + 1,99 \cdot 10^{-4} P_a$$

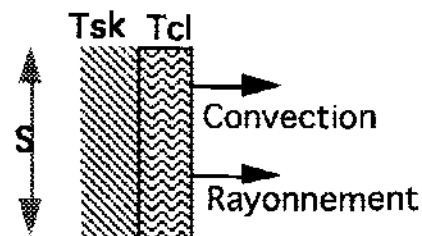
$$P_{\text{exp}} = P_{\text{sat}}(T_{\text{exp}})$$

les échanges au niveau de la peau ou des vêtements

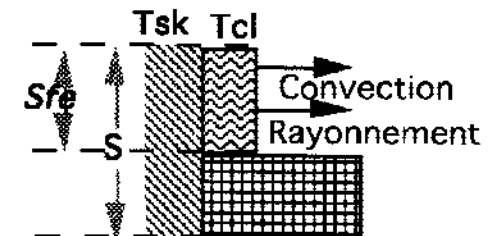
Trois configurations sont envisagées, on considère que chaque segment est soit nu soit vêtu, et peut être ou non en contact avec le siège.:



cas d'un segment nu



cas d'un segment vêtu :



cas d'un segment vêtu en contact avec le siège:

* Segment nu : les échanges ont lieu sur une surface S de peau à température T_{sk}

* Segment vêtu : les échanges ont lieu sur une surface S de vêtement à température T_{cl}

* Segment vêtu en contact avec le siège : on considère que la surface en contact avec le siège n'échange pas de chaleur, les échanges ont lieu sur une surface S_{fe} de vêtement à température T_{cl}

• Vêtements : Pour la plupart des segments les échanges avec le milieu environnant ont lieu sur la surface des vêtements.

$$\text{Conduction à travers le vêtement : } \text{Cond}(i) = \frac{S(i) (T_{\text{sk}}(i) - T_{\text{cl}}(i))}{R_{\text{cl}}(i)}$$

R_{cl} résistance thermique des vêtements

Attention : R_{cl} est une résistance réelle locale ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) la notation la plus utilisée pour les vêtements est en général I_{cl} qui est une résistance équivalente globale en clo (cf définition du clo)

Remarque : on fait l'hypothèse que les vêtements n'absorbent ni chaleur ni humidité, on a donc $\text{Cond}(i) = \text{Conv}(i) + \text{Ray}(i)$

• Rayonnement (Ray) : Ray(i) flux radiatifs sont calculés par le module de bilan radiatif de la voiture. Ils sont calculés en fonction de Tcl, des température de surface du véhicule et de leur émissivité

• Convection (Conv) : Conv(i) = Hc(i).Sfe(i).(Tcl(i)-Ta(i)) avec Hc(i) = h0(i).Va^{0,5} (h0(i) : tabulés)

$$Sfe(i) = S(i) \cdot Fcl(i) \cdot (1 - Pcont(i))$$

S(i) surface du segment i

Sfe(i) est la surface d'échange avec l'extérieur

Fcl(i) facteur d'augmentation de surface dû au vêtement

Pcont(i) pourcentage de la surface en contact avec le siège.

• Conduction : les échanges par conduction ne sont pas pris en compte pour les petites surfaces : mains et pieds. Par contre pour les surfaces plus importantes : cuisses et tronc les hypothèses ci-dessus sont posées en première approche.

• Les pertes par évaporation (Evap) : $Evap(i) = Ediff(i) + Esw(i)$

$$\begin{aligned} Ediff(i) &= 0,06 \cdot (1 - \omega(i)) \cdot Emax(i) \\ Esw(i) &= \omega(i) \cdot Emax(i) \\ Emax(i) &= Fpcl \cdot Lw \cdot hc(i) \cdot (Psat(Tsk(i)) - Pa) \end{aligned}$$

La mouillure (ω) est calculée grâce à la comparaison entre la quantité d'eau (H2Omax) donnant une mouillure de 1 et la quantité d'eau se trouvant sur la peau à un instant donné (mH2O). Cette quantité d'eau est fonction de la production de sueur (déterminée par le système de contrôle SWEAT), de la variation de masse d'eau depuis pas de temps précédent et du rendement d'évaporation (Rest)

- $L_v(T(i))$: Chaleur latente de vaporisation à température T(i)

- $Fpcl = \frac{fcl}{1 + fcl \cdot hc \cdot Rcl / II}$ Il coefficient de perméabilité des vêtements (Fpcl = 1 si le sujet est nu.)

$$Rsw = Rsw + \Delta sw = (SWEAT - Rsw) \cdot (1 - e^{-20 \cdot \Delta t}) \quad , \quad Rsw \geq 0$$

$$Sud(i) = Edif(i) + SkS(i) \cdot Rsw \cdot (2^{(ERROR(i)/BULL)})$$

si $\omega(i) < 0.5$ Drip(i) = 0

si $\omega(i) \geq 0.5$ Rest(i) = $1 - 0.5 \cdot \omega(i)^2$, $0 \leq Rest(i) \leq 1$ et $Drip(i) = \frac{Sud(i)}{L_v(T(i))} \cdot (1 - Rest(i))$

$$m_{H2O}(i) = m_{H2O}(i) + \left(\frac{Sud(i) - Evap(i)}{L_v(T(i))} \right) \cdot \Delta t \quad , \quad m_{H2O}(i) > 0$$

si $m_{H2O}(i) \geq H2Omax(i)$ Drip(i) = Drip(i) + $\frac{m_{H2O}(i) - m_{H2Omax}(i)}{\Delta t}$ $m_{H2O}(i) = m_{H2Omax}(i)$

$$\omega(i) = \sqrt{m_{H2O}(i) / m_{H2Omax}(i)}$$

Initialisations : Pour les valeurs initiales et les paramètres. Voir annexe pour le fichier des paramètres internes au modèle

BILANS THERMIQUES (HF)

(les variables soulignées sont contrôlées par le régulateur ; les variables *italiques* dépendent directement du métabolisme).

Centre	$HF(k) = M_b(k) - T_d(k) - Resp(k) - BC(k)$
Muscle	$HF(k+1) = M_b(k+1) + \underline{M}_{sh}(k) + M_a(k) + T_d(k) - T_d(k+1) - BC(k+1)$
Graisse	$HF(k+2) = M_b(k+2) + T_d(k+1) - T_d(k+2) - BC(k+2)$
Peau	$HF(k+3) = M_b(k+3) + T_d(k+2) - \underline{BC}_t(k+3) - Conv(k+3) - Ray(k+3) - Evap(k+3)$
Sang	$HF(29) = \sum_{n=1}^{24} \underline{BC}(n)$

Température de la couche k à l'instant t+dt :

$$T_{(k)}^{t+dt} = T_{(k)}^t + \frac{HF(k)}{C_{(k)}} \Delta t$$

Système de contrôle

• Le système de contrôle détermine les réactions physiologiques internes 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,
- le deuxième intègre les signaux et détermine l'amplitude des commandes,
- le troisième effectue la répartition des signaux dans le système contrôlé.

1 - Signal d'erreur :

$$ERROR(n) = (T(n) - Tset(n)) + (Rate(n) \cdot F(n))$$

$$ERROR(n) > 0 \quad WARM(n) = ERROR(n) \quad \text{et} \quad ERROR(n) < 0 \quad COLD(n) = ERROR(n).$$

Remarque : Un terme dynamique ($Rate(n) \cdot F(n)$) est prévu, mais cet effet n'étant pas pour l'instant mis en évidence il est négligé $Rate(n) = 0$.

2 - L'intégrateur reçoit les informations venant des détecteurs et détermine des signaux de commande générale ER_s , ER_1 , ER_p . Les températures qui interviennent alors sont uniquement la température interne de la tête, correspondant à l'hypothalamus, et une moyenne pondérée des températures cutanées de chaque segment :

Signaux de commande générale :

$$ER_S = \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} WARM_{(i)} - \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} COLD_{(i)} \quad ER_1 = WARM_{(1)} - COLD_{(1)}$$

$$ER_P = (WARM_{(1)} \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} WARM_{(i)}) - (COLD_{(1)} \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} COLD_{(i)})$$

Les coefficients $SkR_{(i)}$ sont proportionnels aux nombres de thermorécepteurs cutanés de chaque segment (i). $\sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} = 1$

3 - L'effecteur reçoit les signaux de commande générale venant de l'intégrateur et détermine la nature de la commande à transmettre au système contrôlé. Les quatre types de la commande (COM) sont :

- SWEAT qui régule la sudation, CHILL les frissons, DILAT la vasodilatation, STRIC la vasoconstriction.

Mode général de calcul :

$$COM = C.ER_{(1)} + S.ER_S + P.ER_P \quad 0 \leq COM \leq XCOM$$

Ces coefficients de commande sont toujours positifs et bornés par des valeurs supérieures (XCOM), qui correspondent aux limites physiologiques du corps humain. Les signaux de commande sont répartis aux divers effecteurs dans chaque segment.

* Les frissons : L'Augmentation de production de chaleur due aux frissons M_{sh} n'a lieu que dans les couches musculaires :

$$M_{sh}(k+1),i = chili(i).CHILL \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^7 chili(i) = 1$$

* La vasomotricité provoque une augmentation ou une diminution du débit sanguin. Il intervient en plus un phénomène local lié à la résistance supplémentaire du système veineux de surface, qui est fonction de sa température.

$$BF_{(k+3),(i)} = \left(\frac{BF_{b(k+3),(i)} + SkV_{(i)} DILAT}{1 + SkC_{(i)} STRIC} \right) 2(ERROR(i)/10) \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^7 SkV_{(i)} = 1 \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^7 SkC_{(i)} = 1$$

* La sudation est répartie sur les différents segments, en fonction du nombre de glandes sudoripares. (voir pertes par évaporation)

DETERMINATION DU PAS DE TEMPS : Certaines réactions physiologiques peuvent être assez rapides. Le modèle est prévu pour un pas de temps (dt) de calcul inférieur à 1 minute ; il est réduit si l'augmentation de température d'un compartiment est supérieure à 0,1°C au cours d'un pas de

temps. La minute est bien inférieure au pas de temps habituellement utilisé dans les simulations de l'habitat. Il a donc fallu décomposer le pas de temps (Delt) de TRNSYS en pas de temps plus petits (Δt) dans le modèle

$$\Delta t = 1/60 \quad (\text{si } \text{ABS}(\frac{HF(n)}{C(n)}) \cdot \Delta t > 0.1 \quad \Delta t = \Delta t/2)$$

DETERMINATION DES NOUVELLES TEMPERATURES :

Température locale des vêtements $T_{cl}(i) = T_{sk}(i) - \frac{DRY(i) \cdot R_{cl}(i)}{SF(i)}$ (si $R_{cl}(i) = 0$ $T_{cl}(i) = T_{sk}(i)$)

Températures moyennes cutanée (T_{sk}) et des vêtements (T_{clo}) :

$$T_{sk} = \frac{\sum_{i=1}^7 T_{sk}(i) C(i)}{\sum_{i=1}^7 C(i)} \quad T_{clo} = \frac{\sum_{i=1}^7 T_{cl}(i) SF(i)}{A_{du}}$$

Les échanges de chaleur, les quantités d'eau suées, évaporées, etc... sont calculées pour la totalité du corps ainsi que les pertes d'eau cumulées depuis le début de l'exposition.

- DETERMINATION DES SENSATIONS THERMIQUES : S_{gl} : sensation globale, $Sens(i)$: sensation locale sur le segment i , données sur l'échelle suivante : 1 très froid, 2 froid, 3 frais, 4 confort frais, 5 confort, 6 confort chaud, 7 chaud, 8 très chaud, 9 étouffant. La méthode n'est pas encore définitive car nous n'avons pas les correspondances température sensation.

CHAPITRE 3 - Domaine d'Application - Règles d'Usage

HYPOTHESES DETAILLEES

Le modèle dans un premier temps n'est établi que pour le conducteur d'une voiture, dans des conditions d'hiver, avec un habillement épais définie préalablement.

Hypothèses générales sur le modèle

- L'individu est un homme "standard" en bonne santé, ne mange pas, ne dort pas, n'a pas d'émotion
(Taille : 1,75 m; Poids : 74 Kg; Surface corporelle : 1,89 m²).
- ses vêtements n'absorbent pas d'humidité et ne sont pas imperméables
- Il n'est pas soumis directement au rayonnement solaire
- les sensations thermiques ne correspondent qu'à l'échelle définie ci-dessus, et représentent les estimations données par "l'essayeur de PSA"

Hypothèses internes au modèle

- Chaque couche est à température homogène. Pas d'échange au sein d'une même couche.
- Pas de transfert dans le sens longitudinal
- Le gradient de température n'a lieu qu'entre deux couches
- Les transferts par conduction entre les segments sont négligés
- Les segments sont reliés entre eux uniquement par le flux sanguin
- Certains membres sont regroupés ; les deux jambes, par exemple, ont la même température et sont traités comme un seul segment. Par contre les deux bras sont séparés.
- Le métabolisme basal est réparti dans les couches
- Le métabolisme d'activité ou de frisson n'a lieu que dans les muscles
- Le débit sanguin est constant au centre et dans la graisse.
- Les pertes respiratoires sont prises en compte dans la couche centrale de la tête (13%) et du tronc (87%)

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

LISTE DES APPLICATIONS : Détermination des réactions thermophysologiques et des sensations thermiques d'un homme dans une voiture.

EXEMPLES DE MODELES ASSOCIES : Calcul du bilan radiatif et carte de vitesses locales en fonction du type de soufflage.

REGLES DE COHERENCE POUR L'ASSEMBLAGE : Le mode de calcul nécessite le calcul des flux nets échangés par chaque segment du sujet.

DIFFICULTES : Un grand nombre de paramètres est nécessaire. Les caractéristiques physiologiques du système contrôlé ont été établies de façon expérimentale et sont peu contestées. Par contre, les paramètres du système régulateur (températures de consigne et coefficients de contrôle) varient énormément d'un auteur à l'autre. Mais beaucoup de précautions sont nécessaires pour modifier les paramètres, car la modification d'un seul paramètre entraîne souvent des conséquences inattendues.

CHAPITRE 4 - Validation

Le modèle dans son état actuel n'a pas été validé, mais les versions précédentes ont été validées dans les conditions suivantes

Validation Générale : Par comparaison avec des résultats trouvés dans la littérature

- Variations de la température cutanée moyenne en fonction de la température opérative de la forme $T_{sk} = f(T_{op}, M)$
- Différence verticale (tête-pieds) de température d'air : expériences réalisées par Tanaka.

Validation détaillée : dans des conditions de l'habitat

Comparaison avec des expériences effectuées au Laboratoire de Physiologie et Psychologie Environnementales, L.P.P.E., C.N.R.S. Strasbourg.
Recherche financée par P.C.A-habitat-MELLAT, l'A.F.M.E., G.d.F. et E.d.F

- conditions proches de la neutralité thermophysiological.
- fortes hétérogénéités de l'ambiance thermique.
- Expériences "confort", au limites de l'inconfort local

ENVIRONNEMENT ET MISE EN OEUVRE: Simulations effectuées sous TRNSYS au - L.E.S.E.T.H. - U.P.S. Toulouse.

CHAPITRE 5 - Références Bibliographiques

• Le modèle physique -> physiologie

- Modèle de base de physiologie a été créé par J.A.J. Stolwijk et J.D. Hardy, en 1970, pour les programmes Skylab et Apollo de la NASA Le programme
STOLWIJK J.A.J. - *Mathematical model of thermoregulation*. Physical & behavioral temperature regulation, edited by J.D. Hardy, A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk. Thomas publisher Springfield, chap. 48, pp.703-721, 1970.
STOLWIJK J.A.J., HARDY J.D. - *Control of body temperature*. Handbook of physiology - reaction to environmental agents, Chap. 4, pp.45-68, 1977.

- Implémentation dans TRNSYS, échanges avec un environnement non isotherme et validation de l'ensemble

THELLIER F. - *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Un approche pour l'étude du confort*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse n°510, Juillet 1989.

• la partie physiologie -> sensations

GALEOU M. - *La sensation thermique chez l'homme dans son habitat : des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse n°1008, octobre 1991.

LES VARIABLES DU MODELE DE THERMOPHYSIOLOGIE - FRANCIS

Nomenclature:

K Constantes (*fich.* : Lues dans le fichier de paramètres physiologiques *cal.* : calculées)

P Paramètres **I** Inputs, Entrées **V** Variables **T6** Variables spécifiques à TRNSYS

§§ Valeur instantanée de la variable **§§T** Valeur totale pour tout le corps $§§T = \sum_1^n §§(i)$

§§I Valeur locale pour un segment **§§SK** Valeur locale pour la peau (SK ->skin)

§§M Valeur moyenne sur le pas de temps TRNSYS $§§M = \sum §§T \cdot \Delta t / \sum \Delta t$ avec $\sum \Delta t = \text{Delt}$ (pas de temps TRNSYS)

Q§§ Quantité cumulée depuis le début de la simulation $Q§§ = \sum §§T \cdot dt$

2 fonctions **PSAT(T)** : Pression de vapeur saturante à température T et **QL(T)** : Chaleur latente de vaporisation à température T

Pour le système de thermorégulation

CON vasoconstriction
DIL vasodilatation
CHIL frisson
SWEAT sudation

<--- §§ --->

S§§ coefficient de contrôle cutané
C§§ coefficient de contrôle central
P§§ coeff. produit central & cutané
X§§ valeur maximale ($0 \leq §§ \leq X§§$)

Remarques :• Les unités données sont celles utilisées dans le programme .

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
ACT	1	Métabolisme total (M_{tot}) ACT=XIN(1) ACT=ACT*3700/4180*ADU	Kcal/h		I
ADU	1	Surface de peau (aire de Dubois A_{DU})	m ²	1,8877	K
BC	29	Echange de chaleur par convection sanguine (<i>Blood Convection</i>) BC(N)=BF(N)*(TT(N)-TT(29))*(1.-BPH)	Kcal/h		V
BF	29	Débit sanguin (<i>Blood Flow</i>)	l/h		V
BFB	29	Débit sanguin Basal (<i>Blood Flow Basal</i>)	l/h	fich.	K
BPH	1	Coef. de préchauffage du sang (<i>Blood PreHeating</i>)	-	0,3	K
BULL	1	Coef. de Bullard	°C ⁻¹	10	K
C	29	Capacité calorifique	Kcal/°C	fich.	K
CAS	1	cas étudié cas=1 -> conditions d'hiver vêtements épais	-	-	P

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
CCHIL	1	Coef. de contrôle des frissons (central)	Kcal/h°C	180	K
CDIL	1	Coef. de contrôle de vasoDILATion (central)	l/h°C	150	K
CHILI	7	Coef. de répartition des frissons $\sum CHILI(i) = 1$	-	fich.	K
CHILL	1	Signal de commande des frissons (central) $CHILL = CCHIL * ER1 - SCHIL * ERSK - PCHIL * ERP$ $0 \leq CHILL \leq XCHIL$	Kcal/h		K
CLI	1	Coef. de perméabilité des vêtements (I_L indice de lotens)	-		P
CLW	1	Coef. de Lewis (L_w)	°C/Pa	0.0016	K
CNN	1	Capacité calorifique totale $CNN = \sum C(n)$	Kcal/h°C	59,85	K
COLD	29	Signal de froid de chaque segment si $ERROR < 0$ $COLD(N) = -ERROR(N)$	°C	≥ 0	V
COLDSK	1	Signal de froid de la peau $COLDSK = \sum COLD(i) * SKINR(i)$	°C		V
CONDM	1	Coef. de CONduction Moyen du corps $CONDM = (HP - (HFLOW - RESPL - RESPS)) / (ADU * (TT(29) - TS))$	Kcal/h°C		V
CONVO	7	Echange CONVectif au niveau de la peau $CONV = HCS(i) * (TT(i) - TA(i))$	Kcal/h		V
CONVCL	7	Echange CONVectif à la surface des habits $CONVCL(I) = HCS(I) * FCL(I) * (TCL(I) - TA(I))$	Kcal/h		V
CONVM,T	1	Flux CONVectif Moyen & Total $CONVT = \sum CONVCL(I) + RESPS$	Kcal/h		V
CSK	1	Capacité calorifique totale de la peau	Kcal/h°C	3,387	K
CSTRI	1	Coef. de contrôle de vasoconSTRICtion (central)	l/h°C	300	K
CSW	1	Coef. de contrôle de la sudation (central)	Kcal/h°C	370	K
DELT	1	Pas de temps de TRNSYS	h		T7
DH2O	7	Variation de masse d'eau sur la peau $DH2O(I) = (((SUD(I) - E(4*I)) / QL(TT(4*I))) - DRIP(I)) * DT$	g/h		V
DILAT	1	Signal de commande de vasoDILATation $DILAT = CDIL * ER1 + SDIL * ERSK + PDIL * ERP$ $0 \leq DILAT \leq XDIL$	l/h		V
DRIP	7	Quantité d'eau qui ruissèle (<i>DRIPping</i>) $DRIP(I) = (SUD(I) / QL(TT(4*I))) * (1 - REST(I)) + (H2O(I) - H2OMX(I)) / DT$	g/h		V
DRIPM & T	1	Quantité d'eau qui ruissèle Moyenne & Totale	g/h		V
DRYSK	7	Echange de chaleur sensible peau-vêtement $DRYSK(I) = (TSK(I) - TCL(I)) / RCL$	Kcal/h		V
DRYCL	7	Echange de chaleur sensible au niveau des vêtements $DRYCL(I) = CONV(I) + RAY(I)$	Kcal/h		V
DSORT	1	Temps de début d'impression des résultats	h		P

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
DSWEAT	1	Variation de SWEAT $DSWEAT=(SWEAT-RSWEAT)*(1-EXP(-20.*DT))$	-		V
DT	1	Pas de temps interne du modèle	h		V
DTDT	1	$\Delta T/\Delta t$	°C/h		T7
EAUMAX	1	Masse d'eau maximale sur la peau	g	80	K
E	29	perte de chaleur par Evaporation $E(N+3)=W(I)*EMAX(I)+EDIF(I)$	Kcal/h		V
EB	29	perte de chaleur par Evaporation basale	Kcal/h	fich.	K
EDIF	7	perte de chaleur par Evaporation diffuse $EDIF(I)=0.07*(1-W(I))*EMAX(I)$	Kcal/h		V
EMAXSK	7	perte de chaleur par Evaporation maximale $EMAXSK(I)=CLW*HCS(I)*(PSKIN(I)-PCL(I))$	Kcal/h		V
EMAXCL	7	perte de chaleur par Evaporation maximale $EMAXCL(I)=CLW*(PCL(I)-PAIR)/RCL$	Kcal/h		V
ERROR	29	Signal d'erreur $ERROR(N)=(TT(N)-TSET(N))+RATE(N)*F(N)$	°C		V
ER1	1	Coef. de commande central $ER1=WARM(1)-COLD(1)$	°C		V
ERP	1	Coef. de contrôle multiplicatif $ERP=WARM(1)*WARMSK-COLD(1)*COLDSK$	°C		V
ERSK	1	Coef. de commande périphérique cutané $ERSK=WARMSK-COLDSK$	°C		V
EVAGM & T	1	Quantité d'eau totale évaporée au niveau de la peau $EVAGT=\sum E(4*I)/QL(TT(4*I))$	g		V
EVAPM & T	1	perte par évaporation Moyenne & Totale $EVAPT=\sum E(4*I) + RESPL$	Kcal/h		V
F	29	Vitesse de variation des températures $F(N)=HF(N)/C(N)$	°C/h		V
FCL	7	Facteur d'augmentation dû aux vêtements $FCL(I)=1.+0.1*CLO(I)/0.18$ ou $FCL(I)=1.$	%		V
FFCL	1	calcul intermédiaire pour les vêtements $FFCL = FCL(I)/\{1+(FCL(I)*CLO(I)*(HC(I)+HR(I)))\}$	-		V
FPCL	1	calcul intermédiaire pour les vêtements $FPCL = FCL(I)/\{1+(HC(I)*FCL(I)*CLO(I)/CLI)\}$	-		V
FSORT	1	Temps final de sortie des résultats	h		P
H2O	7	Quantité d'eau sur la peau $H2O(I)=H2O(I)+DH2O(I) \quad 0 \leq H2O(I) \leq H2OMX(I)$	g		V
H2OMX	7	Quantité d'eau maximale sur la peau $H2OMX(I)=EAUMAX*PERSUR(I)/100.$	g	cal.	K
HC & HCO	7	Coef. de convection $HC(I)=HCO(I)*VA(I)**0.5$	Kcal/h°Cm ²		V
HCS	7	Coef. de convection sur la surface réelle $HCS(I)=HC(I)*SF(I)$	Kcal/h°C		V

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
HCSE	7	Coef. de convection sur la surface d'échange $HCSE(I)=HC(I)*SFE(I)$	Kcal/h°C		V
HF	29	Variation du stockage de chaleur (<i>Heat Flux</i>)	Kcal/h		V
HFLOM & T	1	Somme des flux total moyen & stockage de chaleur totale	Kcal/h		V
HO	7	coefficient equivalent d'échange de chaleur sensible $HO(I)=HR(I)+HC(I)$	Kcal/h°Cm ²		V
HP	1	Production totale de chaleur métabolique (<i>Heat Production</i>) $HP= \sum Q(N)$	Kcal/h		V
HPM	1	Production totale moyenne de chaleur	Kcal/h		V
HR	7	Coef. de rayonnement	Kcal/h°Cm ²	fich.	P
HRS	7	Coefficient équivalent de rayonnement $HRS(I)=HR(I)*SF(I)$	Kcal/h		V
I		Indice de boucle (en général pour les segments i=1,7)			
I.....		I21/I31/I32, IBLOQ, IGAM, IOCIL1,2,3 Indices pour le blocage des oscillations			
ICOMPT	1	Compteur de pas de temps			
INFO	10	Paramètres de TRNSYS			T6
K	1	Indice de boucle (<i>en général pour les couches</i>)			
N	1	Indice de boucle (<i>en général pour les 29 compartiments</i>)			
NI	1	nombre d'inputs			T6
OUT	40	Sorties TRNSYS			T6
PAIR	1	Pression de vapeur d'eau dans l'air	Pa		I
PAR	20	Paramètres de TRNSYS			T6
PCL	7	Pression de vapeur à la surface des habits $PCL(i)= PSAT(Tcl(i))$	Pa		V
PCONT	7	Pourcentage de surface en contact	%	fich.	K
PCHIL	1	Coef. de contrôle des frissons, (produit)	Kcal/h°C ²	30	K
PSTRI	1	Coef. de contrôle de vasoconstriction (produit)	l/h°C ²	50	K
PDIL	1	Coef. de contrôle de vasodilatation (produit)	l/h°C ²	29	K
PSW	1	Coef. de contrôle de sudation (produit)	Kcal/h°C ²	70	K
PERSUR	7	Pourcentage de surface corporelle	%	fich.	K

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
PSAT	fct	pression de vapeur saturante à température T	Pa		fct
PSKIN	7	Pression de vapeur à la surface de la peau $PSKIN(i) = PSAT(TT(i))$	Pa		V
PSORT	1	Variable interne à l'impression des résultats			V
Q	29	Production de chaleur métabolique	Kcal/h		V
QB	29	Production de chaleur métabolique basal	Kcal/h	fich.	K
QBT	1	Métabolisme basal total $QBT = \sum QB(n)$	Kcal/h	79,73	K
QDRIP	1	Quantité d'eau totale qui ruissèle depuis le début	g		V
QEVAP	1	Quantité d'eau totale évaporée depuis le début	g		V
QSUD	1	Quantité d'eau totale transpirée depuis le début	g		V
QL	fct	Calcul de la chaleur latente de vaporisation à température T $QL(T) = (597,5 - 0,59 T) \cdot 10^{-3}$	Kcal/g		fct
RATE	29	Sensibilité dynamique $RATE(N) = 0.0$	°C/(°C/h)	0	K
RAY	7	densité de flux net calculé par le type 70	Kcal/hm ²		I
RAYO	7	Flux rayonné (calculé par le type 70)	Kcal/h		I
RAYM & T	1	Flux total rayonné Moyen et Totale	Kcal/h		V
RCL	7	Résistance thermique des vêtements	m ² °Ch/Kcal	fich	P
RENW	1	Rendement du travail externe	-		P
RESPL	1	Echange respiratoire de chaleur latente $RESPL = 0.0023 \cdot ACT \cdot (PSAT(TEXP) - PAIR)$	Kcal/h		V
RESPS	1	Echange respiratoire de chaleur sensible $RESPS = 0.0014 \cdot ACT \cdot (TEXP - TA(1))$	Kcal/h		V
REST	7	Rendement Evaporatoire de la Sudation Thermique $REST(I) = 1 - (0.5 \cdot W(I) \cdot W(I))$	-		V
RSWEAT	1	Sudation résiduelle $RSWEAT = RSWEAT + DSWEAT$	-		V
SBF	1	Débit sanguin cutané total (<i>Skin Blood Flow</i>) $SBF = \sum BF(4 \cdot I)$	l/h		V
SCHIL	1	Coef. de contrôle périphérique des frissons	Kcal/h°C	30	K
SDIL	1	Coef. de contrôle périphérique de vasodilatation	Kcal/h°C	29	K
SENS	7	Sensation thermique	-		V

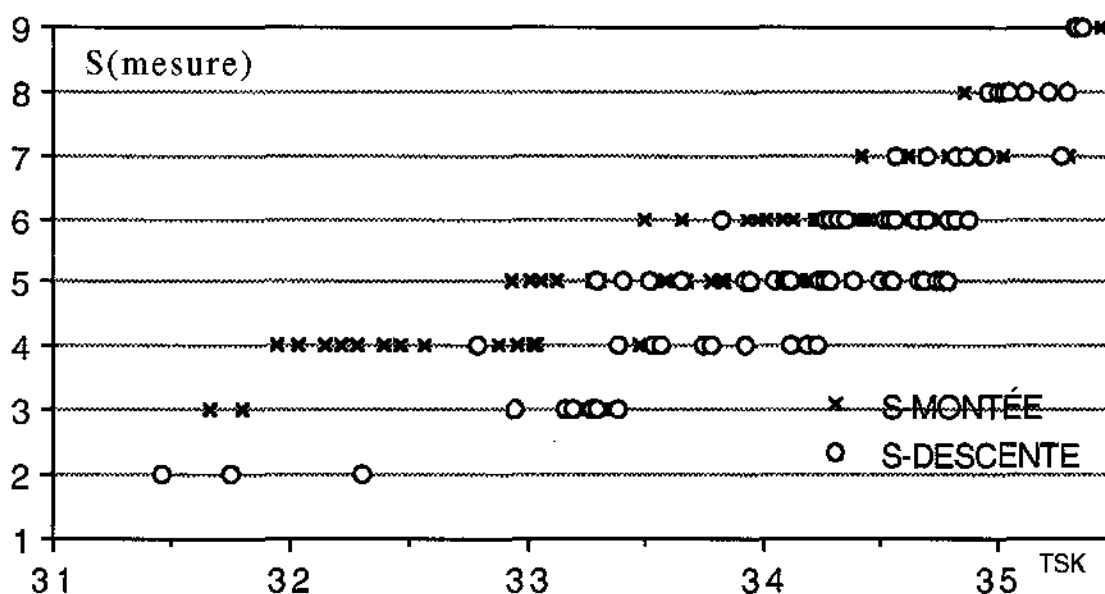
Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
SEPS	1	ϵ , Variable interne à l'impression des résultats		0,01	K
SF	7	Surface cutanée de chaque segment $SF(I)=ADU*PERSUR(I)/100.$	m ²	cal	K
SFE	7	Surface d'échange convectif entre Francis et l'air	m ²		K
SKINC	7	Coef. de répartition de vasoconstriction $\Sigma SKINC = 1$		fich.	K
SKINR	7	Poids de chaque seg. pour la sensibilité calcul de WARMSK et COLDSK $\Sigma SKINR = 1$		fich.	K
SKINS	7	Coef. de répartition de sudation $\Sigma SKINS = 1$		fich.	K
SKINV	7	Coef. de répartition de vasodilatation $\Sigma SKINV = 1$		fich.	K
SNCF	1	Pas de temps de sortie des résultats	h		P
SORTI	1	Variable interne à l'impression des résultats	h		V
SSTRI	1	Coef. de contrôle périphérique des frissons	Kcal/h°C	50	K
SSW	1	Coef. de contrôle périphérique de sudation	Kcal/h°C	70	K
STIME	1	Temps $STIME=STIME+DT$	h		V
STOK	100	Variable de stockage d'un pas de temps sur l'autre			T7
STRIC	1	Coef. de contrôle vasoconstriction $STRIC=-CSTRI*ER1-SSTRI*ERSK-PSTRI*ERP \ 0 \leq STRIC \leq XSTRI$	l/h		V
SUD	7	Sudation $SUD(I)=EDIF(I)+SKINS(I)*RSWEAT*(2.*(ERROR(4*I)/BULL.))$	Kcal/h		V
SUDM & T	1	Sudation totale Moyenne & Totale	g/h		V
SWEAT	1	Coef. de contrôle de sudation $SWEAT=CSW*ER1+SSW*ERSK+PSW*ERP \ 0 \leq SWEAT \leq XSW$	Kcal/h		V
TA	7	Température de l'air ambiant	°C		I
TBM	1	Température moyenne du corps $TBM=\Sigma TT(N)*C(N)/CNN$	°C		V
TC	29	Coef. de conduction entre 2 couches $TD(N)=TC(N)*(TT(N)-TT(N+1))$	Kcal/h°C	fich.	K
TCL	7	Température des habits	°C		V
TCLO	1	Température moyenne des habits $TCLO= \Sigma (TCL(i)* SF(i)) / Adu$	°C		V
TD	29	Echange conductif entre 2 couches	Kcal/h		V
TEXP	1	Température de l'air expiré $TEXP=32.5+0.077*TA(1)+0.027*PAIR$	°C		V

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
TFINAL	1	Temps final de simulation	h		T7
TIME	1	Temps	h		T7
TIMEO	1	Temps de début de simulation	h		T7
TOP	7	Température opérative sur chaque segment $TOP(I)=TCL(I)-(CONVCL(I)+RAYCL(I))/(FCL(I)*SF(I)*HO(I))$	°C		V
TR	7	Température moyenne de rayonnement	°C		I
TSET	29	Température de consigne	°C	fich.	K
TSK	1	Température moyenne cutanée $TS=\sum (TT(4*I)*C(4*I))/CSK$	°C		V
TT	29	Température des 29 segments $TT(N)=TT(N)+F(N)*DT$	°C		V
U	29	Valeur absolue de F $U=ABS(F(N))$	°C/h		V
VA	7	Vitesse de l'air	m/s		I
W	7	Mouillure cutanée $W(I)=SQRT(H2O(I)/H2OMX(I))$	-		V
WARM	29	Signal de chaud si $ERROR(N) > 0$ $WARM(N)=ERROR(N)$	°C		V
WARMSK	1	Signal total cutané de chaud $WARMSK=\sum WARM(4*I)*SKINR(I)$	°C		V
WORK	1	Travail externe $WORK=ACT-QBT(1-RENEW)$ work > 0	Kcal/h		V
WORKI	7	Coef. de répartition du travail $\sum WORKI(i) = 1$	-	fich.	K
WTOT	1	Mouillure cutanée totale $WTOT=\sum W(I)*PERSUR(I)/100.$	%		V
XCHIL	1	valeur maximale de contrôle de frisson	Kcal/h	300	K
XDIL	1	valeur Max. du coef. de vasodilatation	l/h	150	K
XSTRI	1	valeur Max. du coef. de vasoconstriction	l/h	200	V
XSW	1	valeur Max. du coef. de sudation	Kcal/h	400	K
XIN	20	Inputs de TRNSYS			T7
XL	1	Coef. de variation du métabolisme au chaud $XL=1+0,5 SWEAT/100$	-		V

II. RELATION TEMPERATURE CUTANEE/SENSATION GLOBALE

A partir des expériences de novembre 1992, on a tenté d'écrire un premier tableau de relation entre la température moyenne de peau et la sensation globale, dans l'échelle à 9 points utilisée pour les voitures (le tableau actuel, en 7 points, est utilisable pour l'habitat). Ce tableau ne pourra être écrit valablement que lorsque le nombre d'expériences sera suffisant (rappelons que le tableau actuel est le fruit de plusieurs centaines d'expériences). Toutefois, il nous a paru utile de faire un premier essai, sur la température moyenne de peau et la sensation globale, pour se faire une idée générale de son aspect et pour déterminer où devaient porter nos efforts.

Nous sommes partis de la totalité des valeurs expérimentales des essais 3,5,6,7 et 8, du mois de novembre, après la période d'équilibre. Les expériences 1 et 4 n'ont pas été utilisées, leurs conditions expérimentales n'étant pas suffisamment claires (l'essai 2 n'existe pas). La courbe brute des sensations en fonction de la température, non représentée ici, montre une grande dispersion des points. Après plusieurs essais de clarification, nous nous sommes aperçus qu'une meilleure représentation pouvait être faite en séparant les mesures en cours de montée et en cours de descente en température (figure ci-dessous).

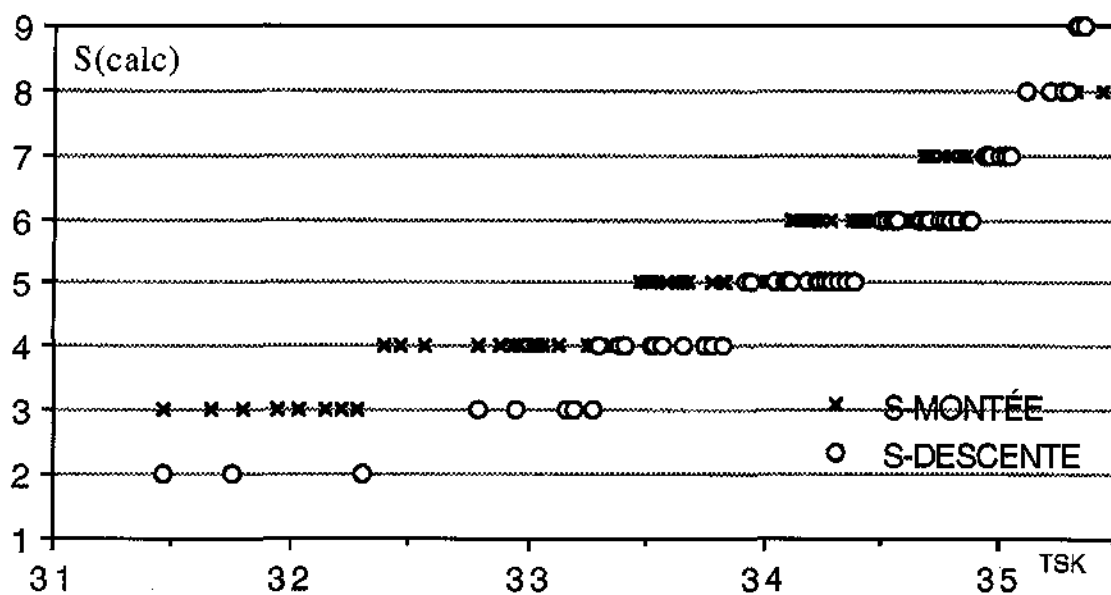


Sensation mesurée en fonction de la température cutanée moyenne mesurée à la montée et descente

On peut voir sur cette figure que si l'écart entre montée et descente disparaît pour les hautes températures, il peut atteindre 2 points pour les basses températures. On tire de ces courbes le tableau de relation Température/Sensation suivant

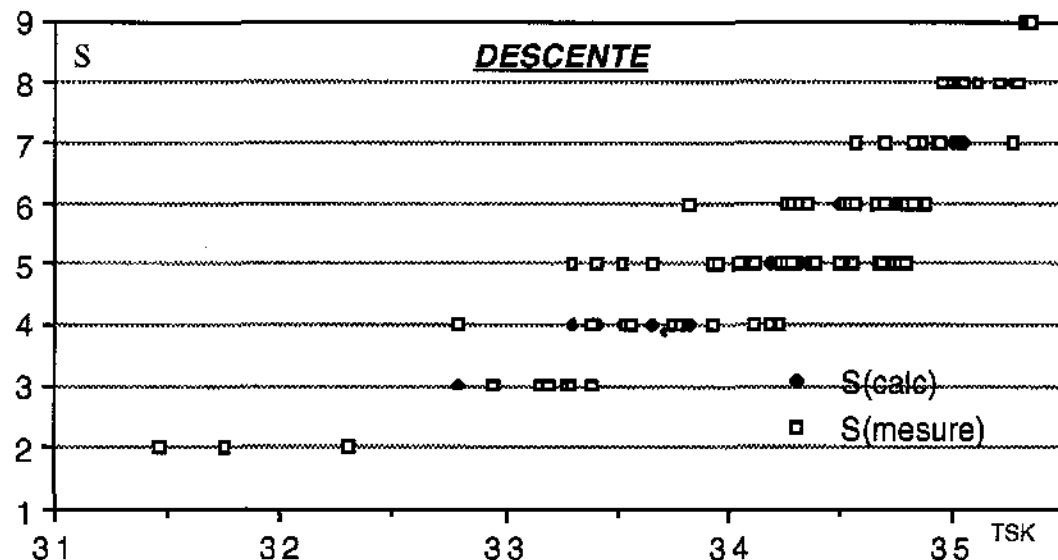
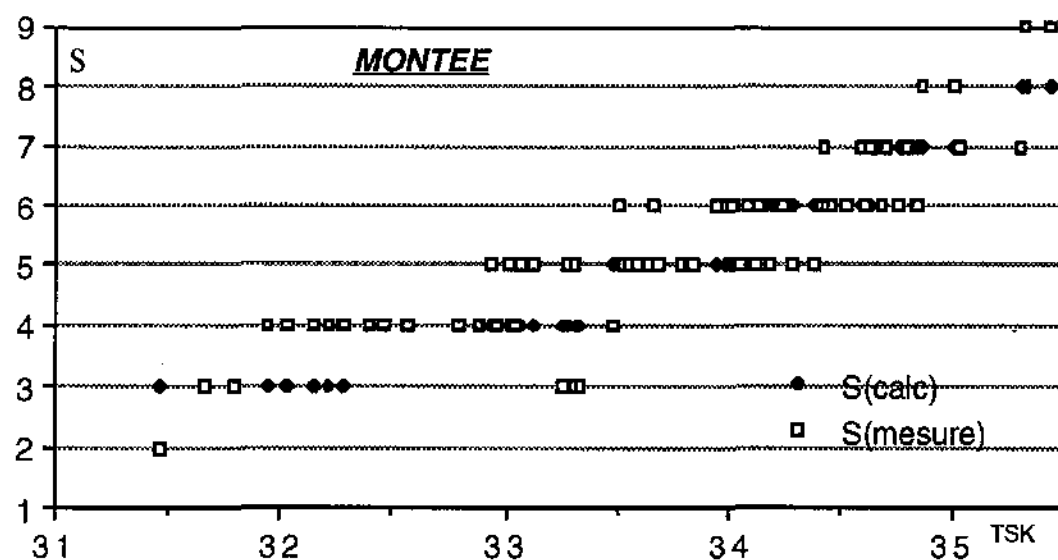
SENSATION	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MONTEE	28,7	29,7	30,7	31,7	32,9	33,9	34,3	35,0	35,4	35,7	36,0
DESCENTE	29,5	30,8	32,0	33,0	33,6	34,2	34,8	35,0	35,2	35,4	36,0

En appliquant ce tableau aux températures de peau mesurées, on trouve les sensations calculées pour la montée et la descente (figure suivante)



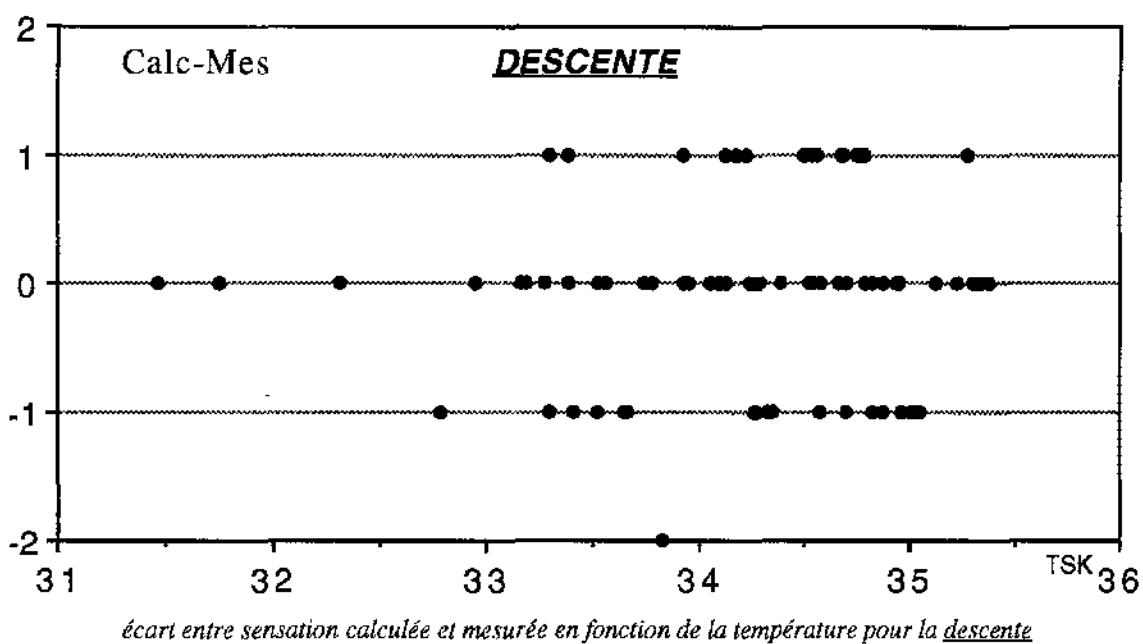
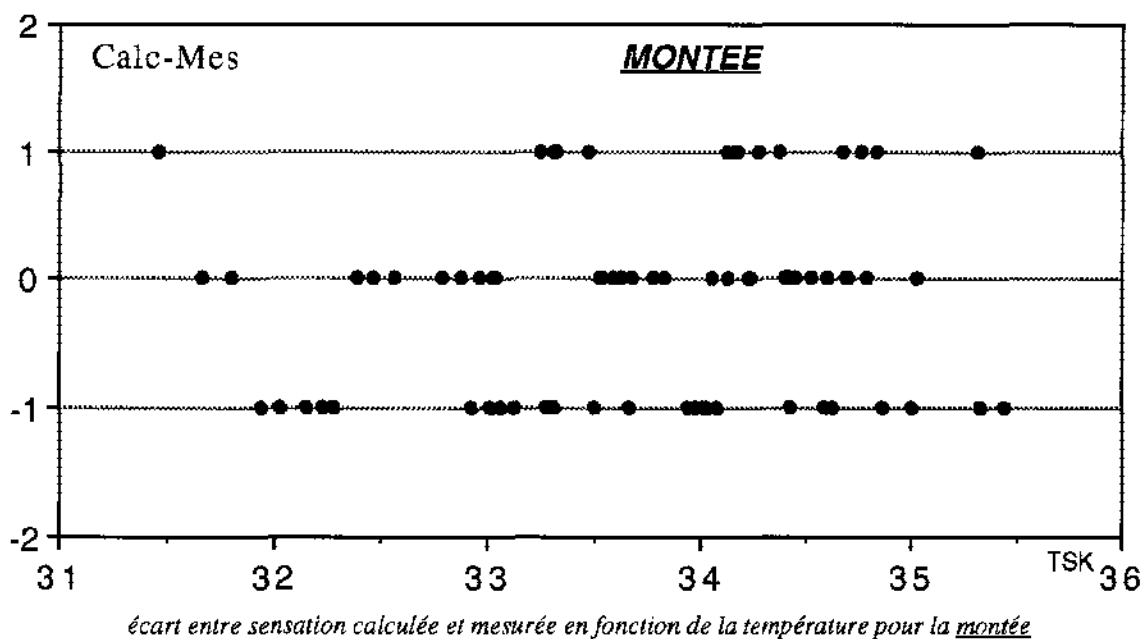
Sensation calculée en fonction de la température cutanée moyenne mesurée à la montée et descente

On a porté sur les figures suivantes les points expérimentaux et calculés à la montée et la descente.

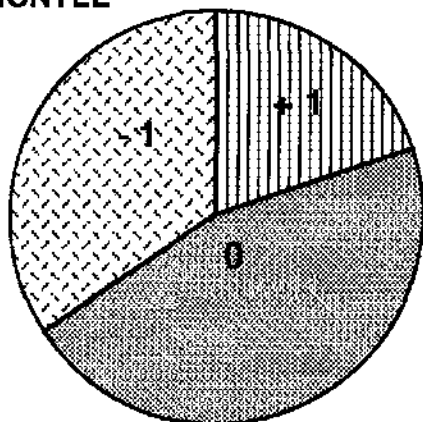


Comparaison sensation calculée et mesurée en fonction de Tsk à la montée et descente

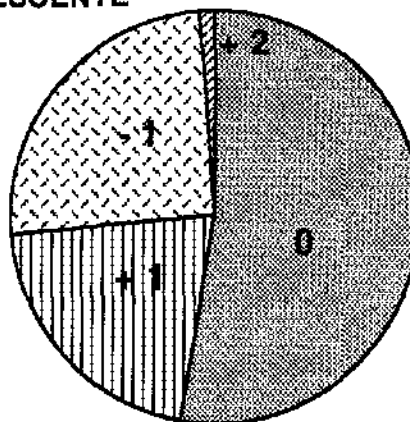
Les différences entre les valeurs calculées et mesurées, en fonction de la température de peau, sont portées sur les figures suivantes, ainsi que les diagrammes qui montrent la proportion de valeurs qui s'écartent de 0,-1,+1,ou +2.



MONTEE



DESCENTE



écart entre sensations calculées et mesurées pour montée et la descente

La relation entre la sensation et la température mesurée, proposée dans le tableau ci-dessus, peut paraître tout à fait satisfaisante, puisqu'elle donne un écart à l'expérience compris dans une fourchette de ± 1 . Toutefois, il faut bien remarquer qu'il s'agit de la température et de la sensation moyenne (les valeurs locales seront peut être plus difficiles à maîtriser), et qu'il faudra aussi tenir compte des écarts entre la température mesurée et celle calculée par le modèle, pour avoir l'écart complet entre calcul et expérience.

III. Premiers tests des deux modèles couplés (FRANCIS-rayonnement)

Le couplage du calcul du rayonnement avec le modèle Francis nous permet de calculer les températures cutanées du conducteur en tenant compte des effets radiatifs. Sur les courbes qui suivent nous avons regroupé les résultats des simulations avec les expériences.

Climat homogène et constant

Nous n'avons pas pour l'instant d'essais à climat constant. Nous avons pris le début de l'essai 1 du mois de novembre entre 0,5h et 1,8h, pendant ce temps les températures de paroi sont environ à 22°C et les températures d'air près du conducteur sont à 25°C.

Sur les courbes suivantes les températures cutanées simulées sont plus élevées, que celles des expériences, pour les parties couvertes, notamment pour les jambes où la différence atteint 2,5°C. Pour les mains et la tête par contre on obtient des températures simulées inférieures aux températures expérimentales.

Essai n° 3, 5 et 7 du mois de novembre

Nous avons fait les simulations 3, 5, 7 du mois de novembre. Nous constatons les mêmes écarts que pour l'essai 1 : les températures des parties couvertes sont, en général, supérieures aux valeurs expérimentales, essentiellement les températures des bras, des jambes et des pieds pour les essais 5 et 7, par contre pour l'essai 3 la température des bras est très proche des valeurs expérimentales. Les températures des mains et de la tête sont elles toujours plus basses que les valeurs expérimentales.

Il semblerait qu'actuellement le sujet soit trop vêtu, le problème se pose toujours pour l'évaluation du vêtement. Les résistances thermiques que l'on attribue aux différentes parties du corps ne sont pas faciles à évaluer, elles ont été calculées par la méthode de Lotens. Pour calculer la résistance thermique des différents habits il faut tenir compte de l'épaisseur d'air entre la peau et le vêtement, nous l'avons évalué de façon totalement arbitraire ainsi que la surface de contact corps - siège.

Le mode de soufflage peut aussi intervenir sur ces écarts entre les températures simulées et les températures expérimentales car il varie d'un essai à l'autre. Pour l'essai 3 nous ne retrouvons pas la même différence au niveau des bras que pour les essais 5 et 7. Les vitesses d'air ont été mesurées avec une marge d'erreur importante et lors des simulations il n'a pas été tenu compte la vitesse du vent extérieur.

Les mains sont habituellement les parties du corps où, expérimentalement, on a le plus d'écart en températures suivant les personnes testées; cet écart peut être de l'ordre de 3 à 4 °C pour des personnes différentes dans des conditions identiques, surtout lorsque celles-ci sont vêtues.



Rapport d'avancement n°4 : Octobre 1993

1ère Partie - Températures cutanées

I. <u>MODIFICATION DES VETEMENTS DANS LA MODELISATION</u>	2
II. <u>EXPERIENCES DE MAI 93</u>	4
III. <u>COMPARAISON EXPERIENCES - SIMULATION</u>	4

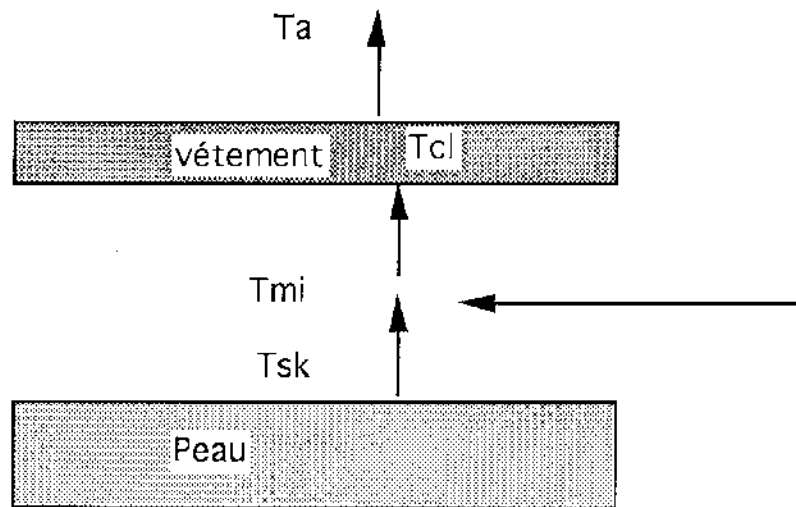
2ème Partie - Sensations thermiques

I. <u>EXPÉRIENCES</u>	6
II. <u>VALEURS MOYENNES PAR EXPÉRIENCE</u>	9
III. <u>VALEURS MOYENNES POUR TOUTES LES EXPÉRIENCES</u>	17

1ère Partie - Températures cutanées

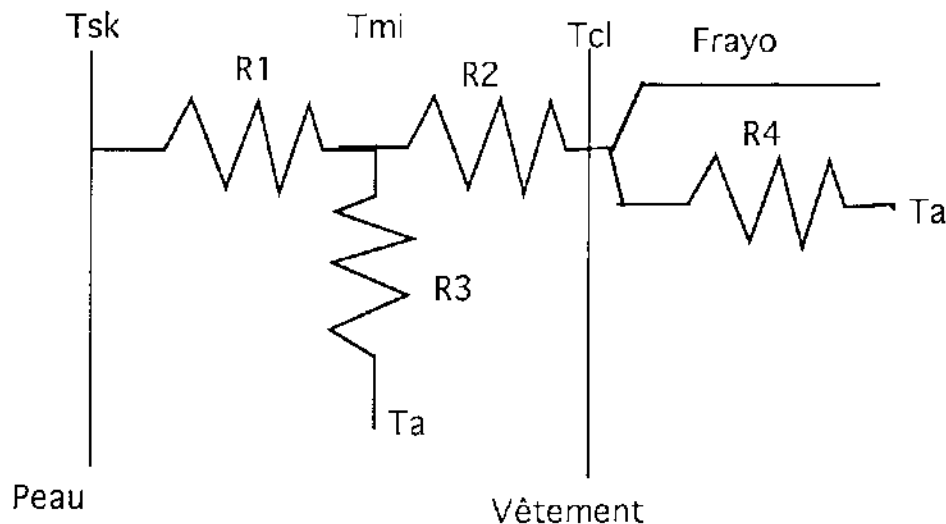
I. Modification des vêtements dans la modélisation

Pour améliorer la prise en compte des habits dans le modèle nous avons introduit dans la modélisation une couche d'air entre la peau et les vêtements. Dans cette couche nous supposons qu'il y a un débit qui dépend des ouvertures des vêtements et de leur perméabilités à l'air ~~ce débit d'air~~ dépend de la vitesse du vent à la surface des vêtements.



a.) Calcul de la température des vêtements

Pour le calcul de T_{cl} nous faisons intervenir T_{mi} une température "milieu" qui caractérise la température de cette couche d'air. Pour calculer ces températures nous faisons l'analogie avec le circuit électrique suivant :



On prend comme valeur de résistance :

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{cl}}{2}$$

$$R_3 = \frac{1}{\rho C_p d}$$

$$R_4 = \frac{1}{FCL H_c}$$

R_{cl} : résistance thermique des vêtements (rapport n°3)

FCL : facteur de grandissement de la surface d'échange dû aux vêtements

H_c : *coefficient* coefficient d'échange convectif à la surface des vêtements

d : ~~est~~ le débit d'air dans la couche entre la peau et les vêtements. C'est un débit volumique par m^2 . d est proportionnel à la vitesse d'air, V_a , sur la surface extérieure des vêtements. On peut donc écrire R_3 sous la forme:

$$R_3 = \frac{1}{C_i V_a} \quad \text{où } C_i \text{ est une constante qui dépend de la}$$

nature du tissu et des ouvertures du vêtement. On prend, ici, $C_i = 20$ sauf pour les pieds où on prend $C_i = 0,1$.

F_{rayo} est le flux échangé par rayonnement avec la voiture.

L'égalité ~~des flux~~ *thermiques* entre les flux entrants et les flux sortants dans la couche d'air intermédiaire nous donne l'équation suivante:

$$\frac{T_{sk} - T_{mi}}{R_1} + \frac{T_a - T_{mi}}{R_3} = \frac{T_{mi} - T_{cl}}{R_2}$$

soit :

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) T_{mi} - \frac{1}{R_2} T_{cl} = \frac{T_{sk}}{R_1} + \frac{T_a}{R_3} \quad (1)$$

On suppose que le flux entrant dans le vêtement est égal au flux sortant, on a donc l'équation suivante:

$$\frac{T_{mi} - T_{cl}}{R_2} = F_{rayo} + \frac{T_{cl} - T_a}{R_4}$$

soit :

$$\frac{1}{R_2} T_{mi} - \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) T_{cl} = F_{rayo} - \frac{T_a}{R_4} \quad (2)$$

On résout le système formé des équations (1) (2), on en tire T_{cl} et T_{mi} de chaque segment en fonction de T_{sk} et de T_a .

Avec la valeur de T_{mi} on calcule le flux "sec" évacuer par la surface de la peau pour chaque segments :

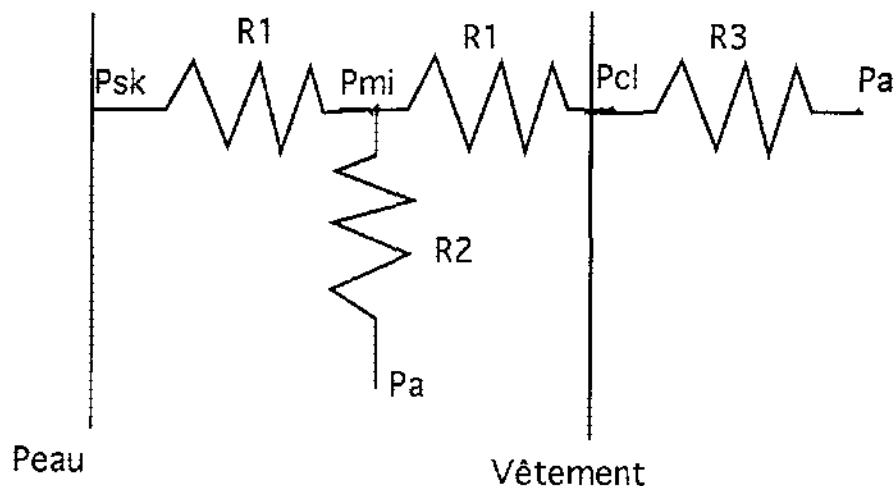
$$DRYSK = 2 * SFE * \frac{1}{R_{cl}} * (T_{sk} - T_{mi})$$

SFE : surface du segment qui n'est pas en contact avec le siège

b). Calcul de la pression saturante P_{cl} à la surface des vêtements

De même que pour la température, on a modifié le calcul de la pression saturante en tenant compte de la couche d'air entre les habits, ce qui nous permet de mieux évaluer l'évaporation maximale.

Par analogie avec les circuits électriques on peut représenter le système de la manière suivante :



Les résistances ont pour valeur :

$$R_1 = \frac{R_{cl}}{2Clw Cl_i}$$

$$R_2 = \frac{rT_{mi}}{Ql d}$$

$$R_3 = \frac{1}{F_{cl} L_w H_c}$$

Avec:

Cl_w : coefficient de Lewis

F_{cl} : facteur de grandissement de la surface dû au vêtements

Cl_i : coefficient de perméabilité des vêtements

H_c : coefficient de convection

Q_l : chaleur latente de vaporisation de l'eau

d : débit d'air dans la couche entre la peau et les vêtements, proportionnel à la vitesse d'air à la surface des vêtements.

L'égalité entre les flux entrants et les flux sortants dans la couche d'air intermédiaire nous donne l'équation suivante:

$$\frac{P_{sk} - P_{mi}}{R_1} + \frac{P_a - P_{mi}}{R_2} = \frac{P_{mi} - P_a}{R_1 + R_3}$$

soit :

$$P_{mi} = \frac{\frac{P_{sk}}{R_1} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + R_3} \right) P_a}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1 + R_3} + \frac{1}{R_2}}$$

Au niveau des vêtements on a :

$$\frac{P_{mi} - P_{cl}}{R_1} = \frac{P_{cl} - P_a}{R_3}$$

$$\text{soit : } P_{cl} = \frac{\frac{P_{mi}}{R_1} + \frac{P_a}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}}$$

Remarque

Pour prendre en compte cette couche d'air on doit estimer le débit d'air qui passe par les ouvertures des vêtements et au travers des tissus. C'est la constante C_i qui caractérise ces débits, pour l'instant nous avons fixé la valeur de C_i à 20 pour le tronc les bras et les jambes, pour les pieds nous avons considéré que le débit d'air était négligeable et nous avons fixé C_i à 0,1.

Dans le bilan des flux thermique nous introduisons un nouvel échange, nous appellerons ce flux le flux convectif intermédiaire et il s'écrit pour chaque segment (i) :

$$\text{Convint}(i) = C_i(i) * V_a(i) * SFE(i) * (T_{mi}(i) - T_a(i))$$

II. Expérience de mai 93

a) Description

Pendant cette campagne d'essais nous avons réalisé 7 essais différents. 1 essai tout constant (essai n°9), 2 essais faisant intervenir les lampes pour avoir un rayonnement infra-rouge important et une première idée sur l'importance du soleil (essais n° 10 et n°12), 2 essais identiques pour estimer la fiabilité et la précision de Francis (essai n°11 et n°13), 1 essai dont les variations des conditions de chauffage soient l'inverse des deux précédents pour comparer les réponses de Francis lorsqu'on change le sens de variation des conditions auxquelles il est soumis (essai n°14), et 1 essai avec des sauts de convection (essai n°15).

La disposition des thermocouples sur Francis et sur la voiture est la même que pour les essais de novembre 1992 (voir rapport n°2).

Le chauffage de l'air soufflé a été modifié et permet une plus grande souplesse d'utilisation et notamment permet d'avoir deux fois les mêmes expériences (essai n°11 n°13).

Essai 9

Cet essai où tout est constant nous permet d'adapter notre modèle sur Francis dans un cas simple.

Essai 10

Pour cet essai nous avons essayé d'avoir une température de soufflage constante et une variation des températures de paroi de la voiture importante afin d'étudier l'influence des transferts radiatifs entre Francis et la voiture, et l'incidence que cela pourrait avoir sur les sensations.

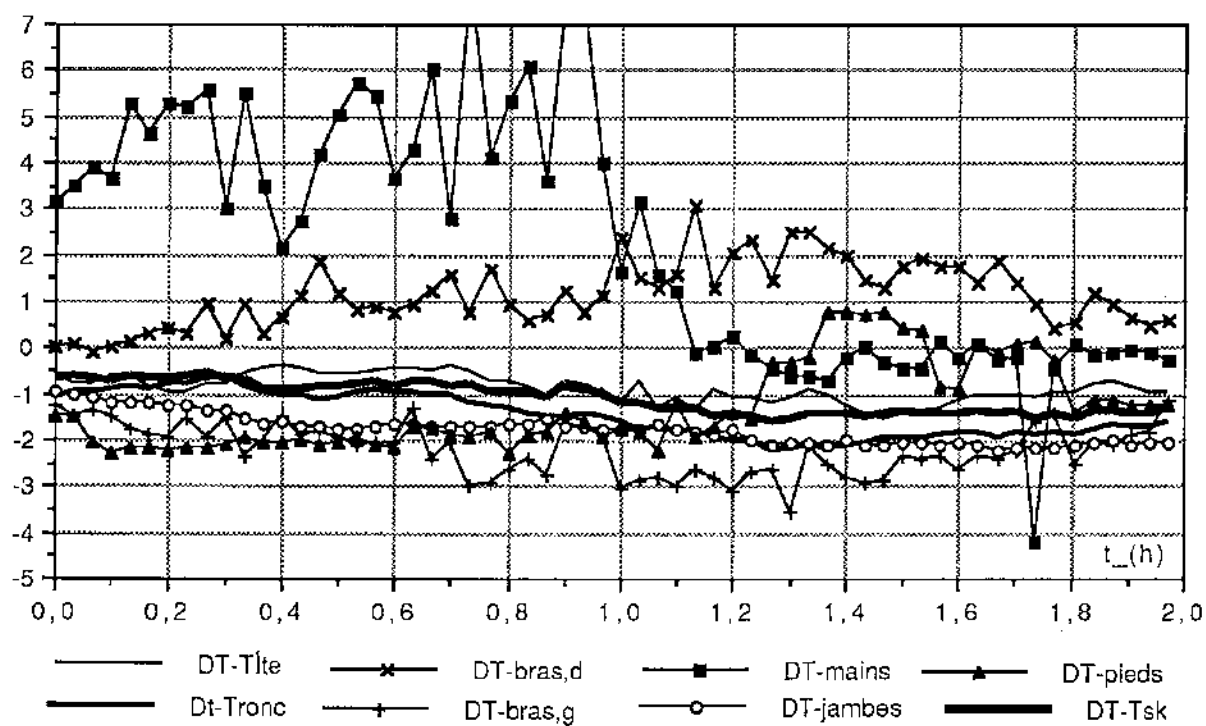
Essai 12

Ici nous avons fait varier l'ensoleillement et la température de la veine afin d'avoir une variation importante des flux radiatifs.

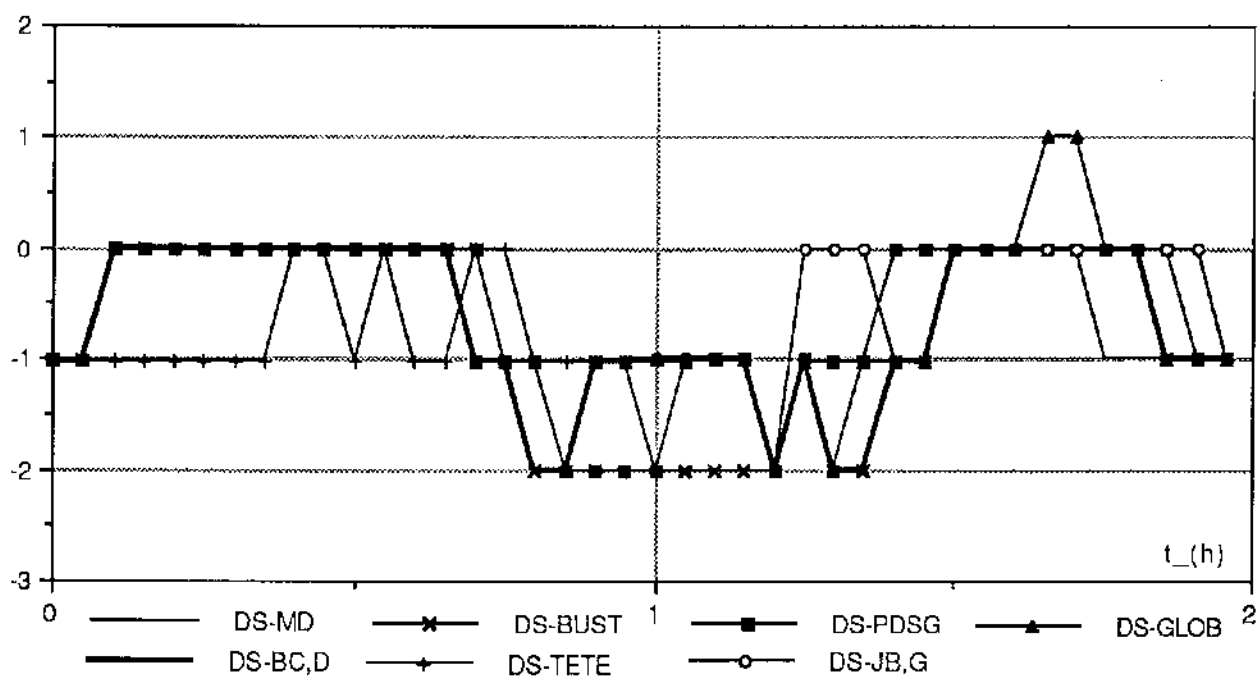
Essai 11 et 13

Ces deux essais identiques du point de vue des conditions nous ont donnés des réponses différentes de la part de Francis : les températures cutanées de l'essai 13 sont inférieures à celles de l'essai 11, de 1 à 2 degré sur l'ensemble de la simulation ; de même, on a une différence de sensation qui va jusqu'à 2 points d'écart lorsqu'on est dans la partie la plus froide des expériences. (voir courbes pages suivantes). Les essais d'octobre 1993 devraient nous permettre de mieux cerner "l'écart" de Francis lors de deux essais identiques.

~~X~~ Courbe de la différence des températures cutanées enregistrée entre l'essai 13 et l'essai 11 pour l'ensemble des segments :
 (DT= (température essai 13) - (température essai 11))



Différence entre les sensations enregistrées lors des essais 11 et 13
 (DS = Sensation13 - Sensation11)



Essai 14

Pour cet essai, nous avons inversé le sens de variation de la température de la veine et de la température de l'air soufflé dans la voiture par rapport aux essais 11 et 13. Cela nous permet d'observer les différences dues au changement de sens de variation.

Essai 15

Nous avons effectué des sauts de convection important pour étudier la réponse de Francis à des changements importants et rapides des conditions et ainsi étudier le mode transitoire

b) Tableau récapitulatif

Sur la page suivante, un tableau donne un récapitulatif des 7 essais de mai 93

Ce tableau donne les sens de variations, et les ordres de grandeur.

En caractères gras les variables sur lesquelles on a agi

→ constante ↗ augmente \ diminue

les notations utilisées sont les suivantes :

- Pour chaque essai apparaissent les trois phases, le titre de l'essai ; toutes les phases font 1/2 heure sauf notation particulière.

- Les quatre premières lignes regroupent les conditions d'essai

T_{veine} (°C), V_{veine} (km/h), H_{rveine} (%) et ensoleillement (W)

- 3 variables du système de chauffage

S ou f position du soufflage,

U_{pul} Tension du pulseur (V)

Q_v débit d'eau dans la chaudière (l/h)

- 2 températures de soufflage,

T_{s,pi} température moyenne de soufflage des quatre points au niveau des pieds (°C),

T_{s,ae} température moyenne de soufflage des aérateurs latéraux et centraux (°C).

- A, e/s températures d'entrée (T_{Ae}) et de sortie (T_{As}) de l'eau dans l'aérotherme (°C),

- ΔTA écart de température entrée-sortie dans l'aérotherme ΔTA = (T_{As} - T_{Ae}) (°C)

- T_{hab} température moyenne dans l'habitacle (°C)

- HR_{hab} humidité relative dans l'habitacle (%)

- VT_{sk} tendance de variations des températures cutanées

- Ex^cpt températures des segments qui ne suivent pas la tendance de variation générale.

except

c) Comparaison simulation expérience

Nous avons fait la simulation de l'ensemble des essais du mois de mai et de l'essai n°5 du mois de novembre. Sur les courbes qui suivent nous avons porté deux simulations différentes : l'ancienne simulation qui ne prend pas en compte la couche d'air entre la peau et les habits, et la nouvelle simulation qui prend en compte cette couche.

Nous avons aussi sorti les différents flux thermiques perdus par le conducteur, ces flux sont calculés par le modèle et dépendent donc des températures de peau simulées, des températures des vêtements (T_{cl}) calculées par le modèle, des températures "milieu" de la couche d'air (T_{mi}) et des températures d'air et de paroi enregistrées lors des expériences.

Tableau des différences entre les simulations et les expériences

Les valeurs données pour les températures sont : $T_{simulée} - T_{expériences}$

	essai 9	essai 10	essai 12	essai 11	essai 13	essai 14	essai 15
tête	1 0	0,5 0	0,7 0 -0,5	0 -0,5	0 -0,5 0	0,2 0	0 1 0 1 0
tronc	0 0,5	-0,5 0,5	-2 -1	--	-1 1 1,5	-1 0 -0,5	-1,5 -1 -1,5 -1
bras,d	1 3	1,5 2,5 0	0 2 0	0 3 2	-0,5 1	0 1 0,2	0,5 1 1,5
bras,g	-2 -1	0 0 0	-1 0 -0,5	-0,5 0 0	0 1,5	0 1,5 0,5	0,5 1 2
main	-3 -2,5	0 1,2 0	0 1,5 1	2 -1 0	-2 -1,5	-1,5 0	0 -1 0 0
jambes	2 2,5	1,5 2 1	1 1,5 1	0,5 1 1	1 2 3	2,5 3 3	1 2 3
pieds	0 -1	1 0 -1	0 -1 0	-0,5 0	1 0 1	0 2 0,5	-0,5 -1 -2
Tsk	0 1	0,5 1 0	-1 0 0	0 1 1,5	0 0,5 1,5	0,5 1 1	0 0,5 0,5

La simulation des températures cutanées nous donne des températures trop élevées, pour les bras et les jambes notamment. La prise en compte de la couche d'air entre la peau et les vêtements a amélioré la modélisation par rapport à Francis. L'introduction d'un nouveau mode de transfert thermique a refroidi le modèle de 1 à 2 degrés pour les essais où le débit d'air dans la voiture est important (essai n°5 et essai n°15), par contre pour les essais où le rayonnement est important et le débit d'air plus faible la variation en température ^{est} moindre, de l'ordre de 0,5 degré. Le nouveau mode de transfert, que l'on appellera flux convectif intermédiaire, peut devenir le mode de transfert prépondérant dans certains essais où la température d'air soufflé est faible et le débit important.

Les courbes des transferts thermiques nous montrent l'importance de l'évacuation de la chaleur par les jambes. Le fait que la température des jambes reste élevée nous fait penser que le métabolisme de cette partie est trop important.

Sur l'ensemble des essais où le rayonnement infra-rouge est important, on a une grande différence entre les températures de la simulation et celles de l'expérience, les transferts par rayonnement infra-rouge seraient donc sous-estimés, la prise en compte de la transparence des habits au rayonnement infra-rouge pourrait améliorer les simulations.

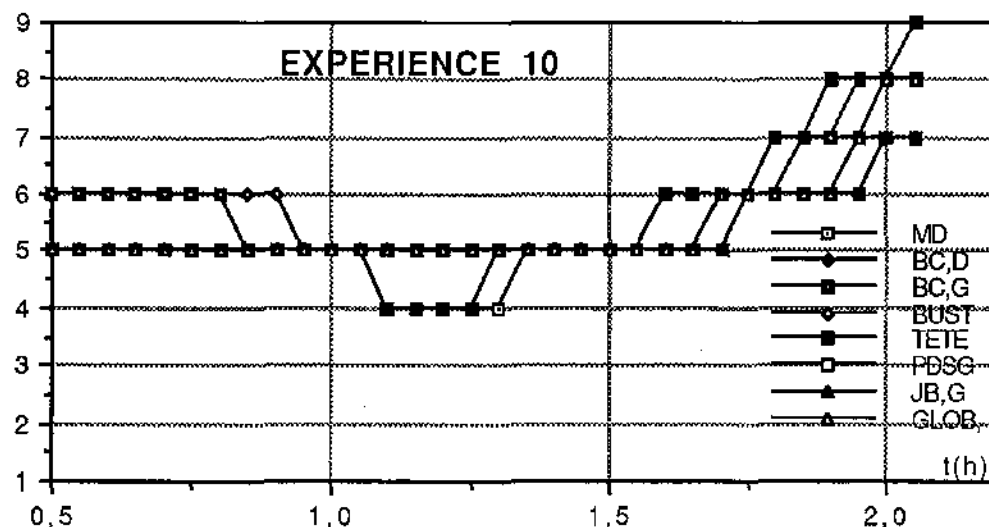
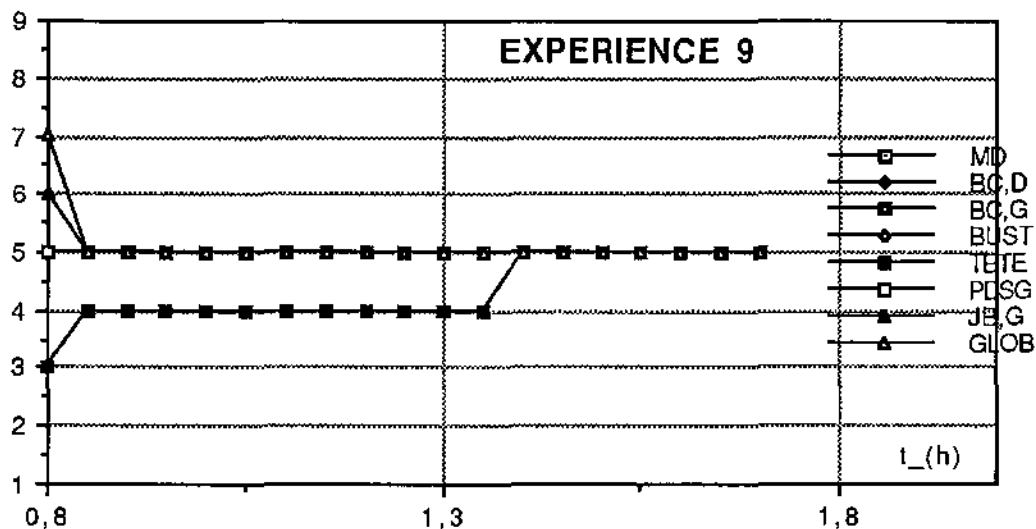
Pat-@rne.

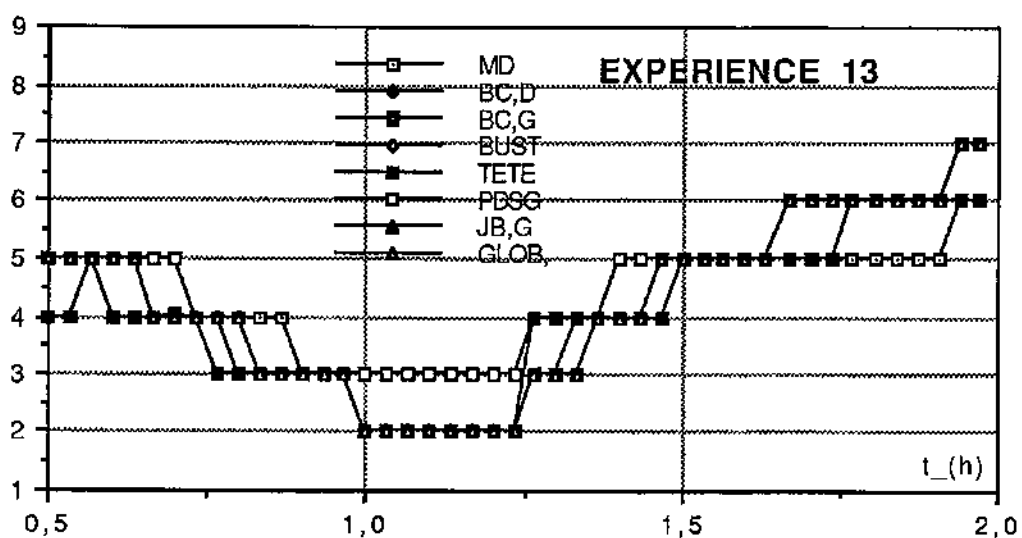
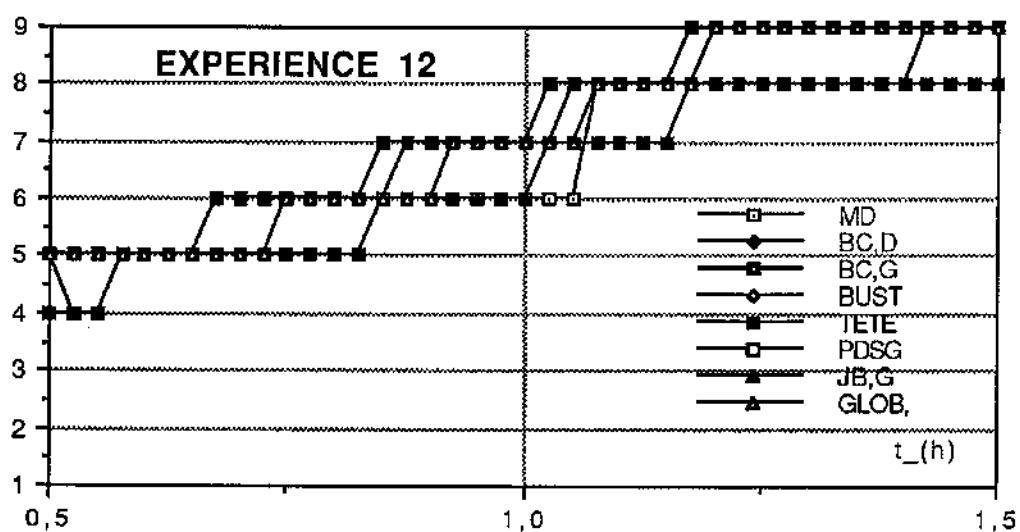
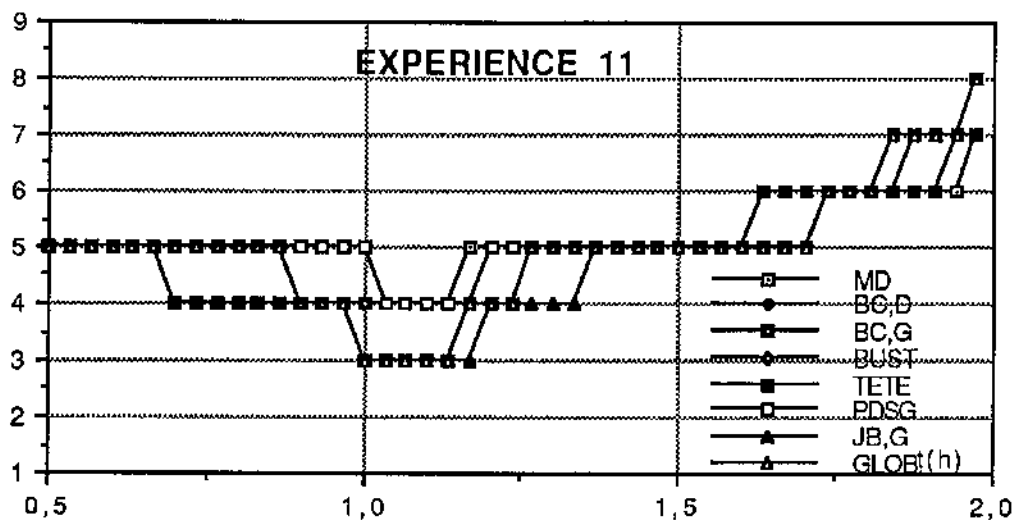
SENSATIONS

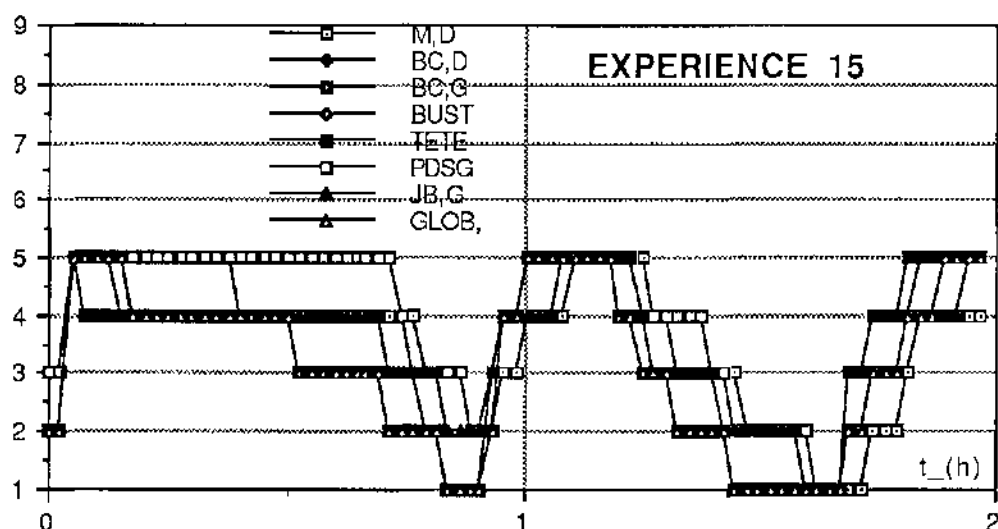
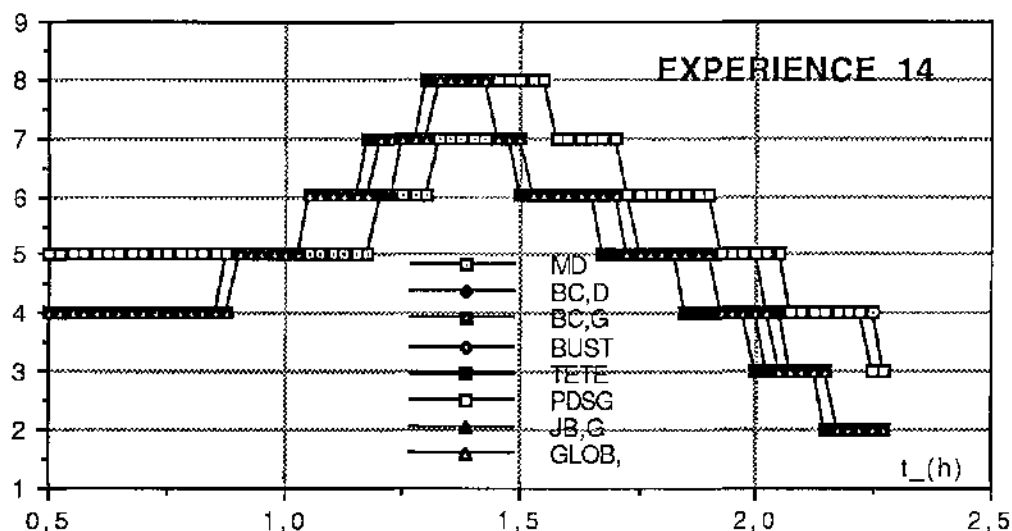
I- EXPÉRIENCES

Les sensations ont été enregistrées pendant l'expérience. Un problème s'est posé sur l'acquisition de la sensation de la jambe droite, mais cela n'a aucune incidence sur le résultat. En effet, les sensations des deux jambes sont très proches et nous disposons de la mesure sur la jambe gauche. De plus, le modèle mathématique ne donne qu'une seule valeur pour les deux jambes.

Sur les 7 courbes suivantes, nous avons porté, pour chaque expérience, les sensations mesurées sur les 7 parties concernées par le programme et la sensation globale, en fonction du temps.







A partir des valeurs expérimentales des températures et des sensations, nous avons, pour chaque expérience, calculé la valeur moyenne des températures qui donnent chaque classe de sensation, pour chaque segment du corps et pour la valeur globale. De plus, nous avons tenu compte de la différence entre les valeurs trouvées lors d'une montée ou d'une descente en température. Par exemple, pour l'expérience 13, nous avons cherché toutes les températures de jambes donnant une sensation de jambes égale à 3 lors de la montée en température, et nous en avons fait la moyenne arithmétique. Nous avons procédé ainsi pour toutes les expériences, toutes les parties du corps, toutes les classes de sensation, en montée et en descente.

Nous avons ainsi tracé les 16 ~~figures~~ ^{figures} suivantes, dans lesquelles sont portées la totalité des expériences exploitables à la date de réalisation de ce travail (juillet 1993). On peut faire plusieurs remarques sur ces courbes :

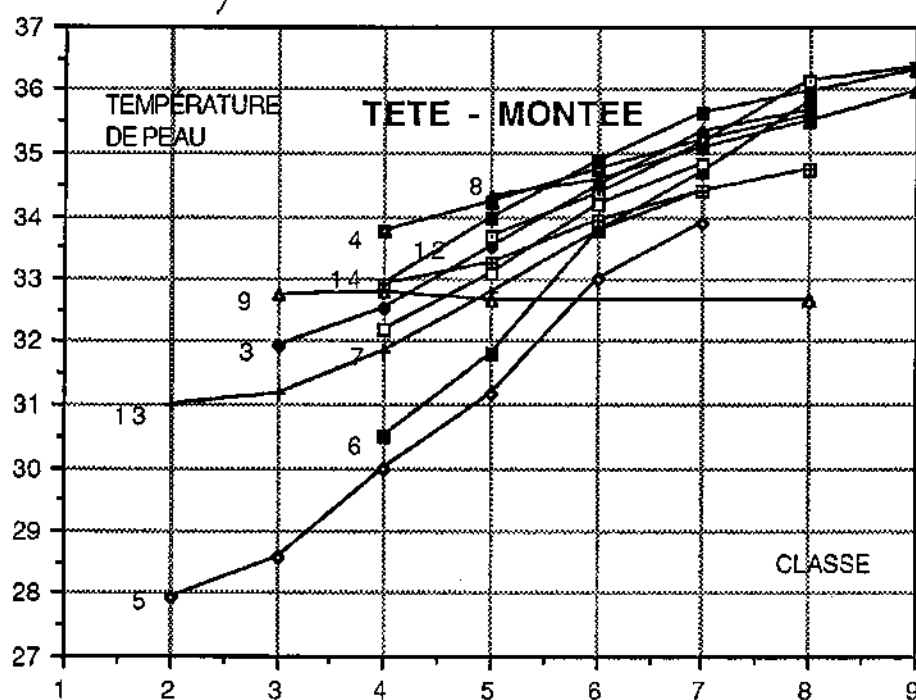
- Certaines expériences donnent des valeurs très éloignées des autres pour une ou plusieurs parties du corps. Il conviendra d'en rechercher les causes lorsque nous aurons avancé dans le travail ; pour l'instant, nous recherchons des valeurs moyennes, aussi

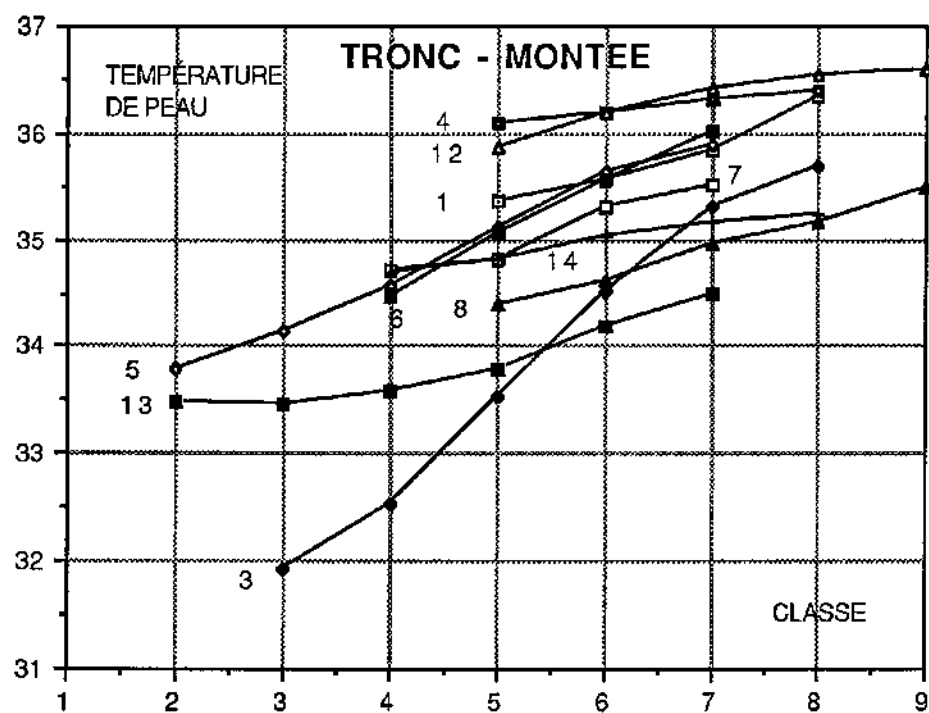
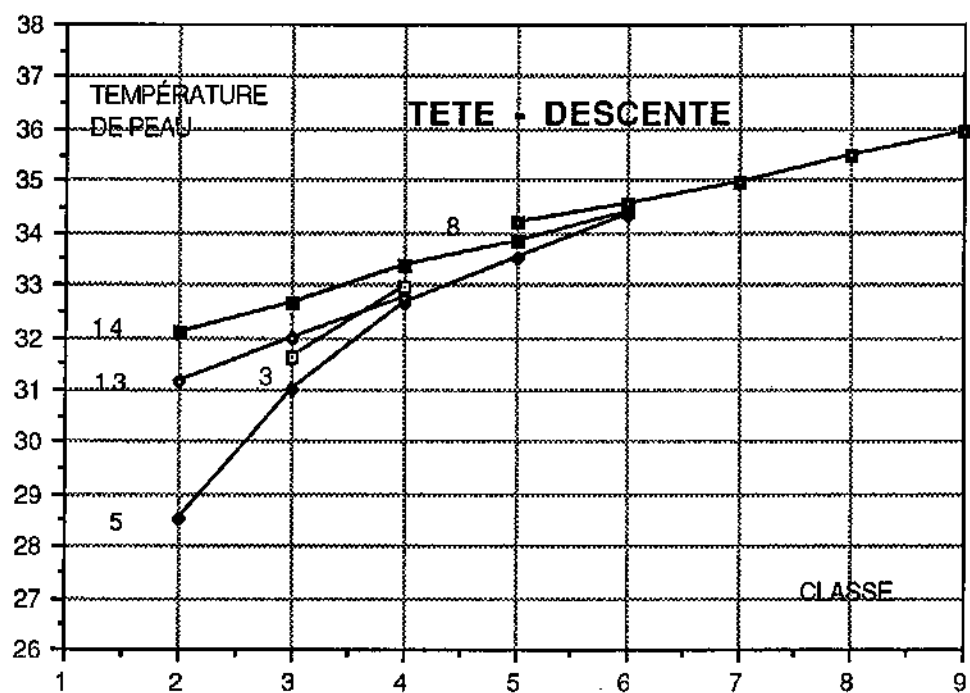
Tete

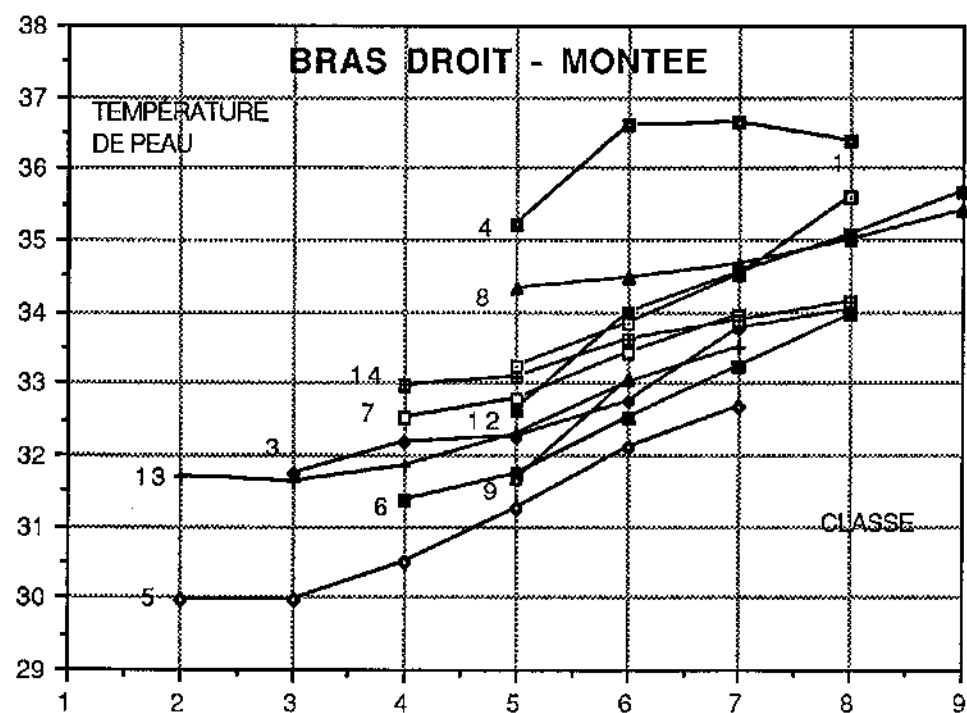
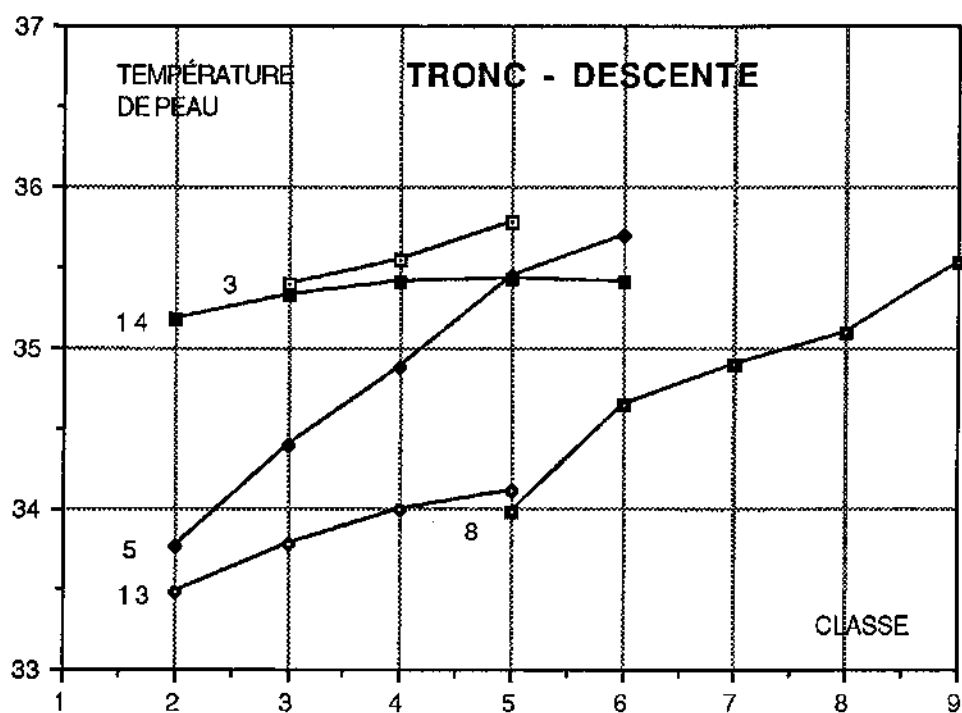
nous ne tiendrons pas compte de ces valeurs. Il s'agit des expériences : 9 (montée bras droit et main), 3 (descente bras gauche), 4 (montée bras droit), 14 (descente pieds).

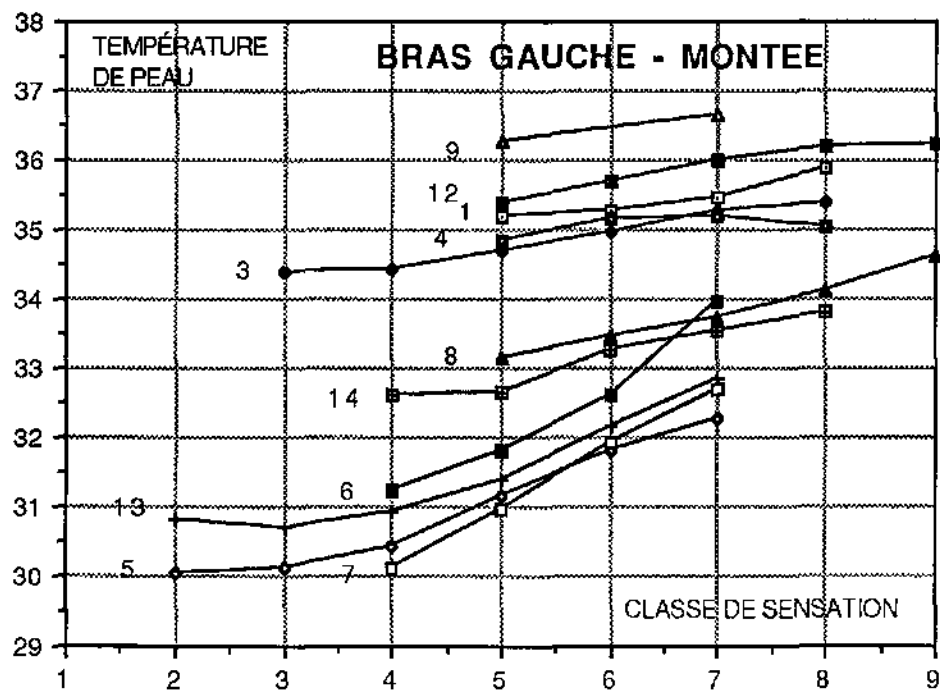
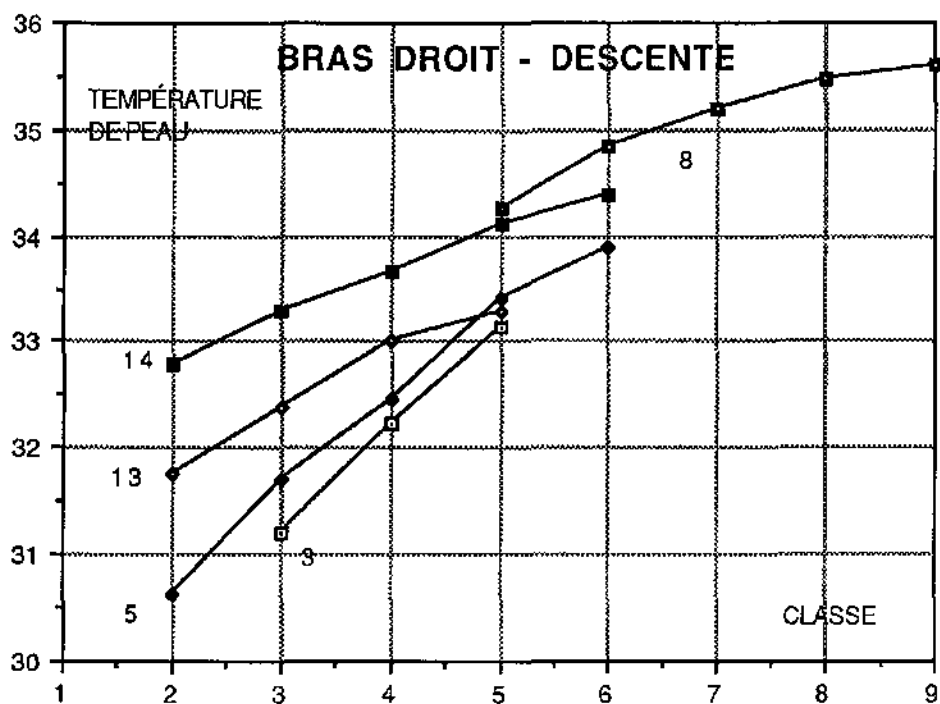
- De gros écarts peuvent être constatés pour les classes inférieures à 6 lorsqu'il s'agit des mains. Il faut tenir compte de la forte imprécision sur la mesure de la sensation des mains, que Francis ne tenait pas toujours fixées au volant (cela est surtout vrai pour les premières expériences ; l'attention de Francis a, par la suite, été attirée sur ce point).

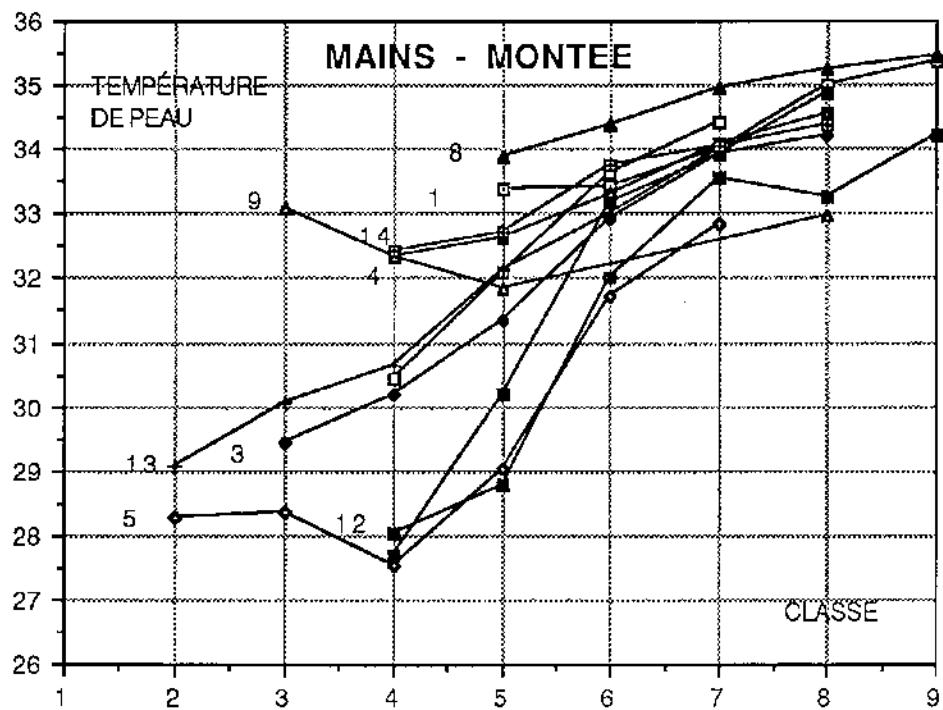
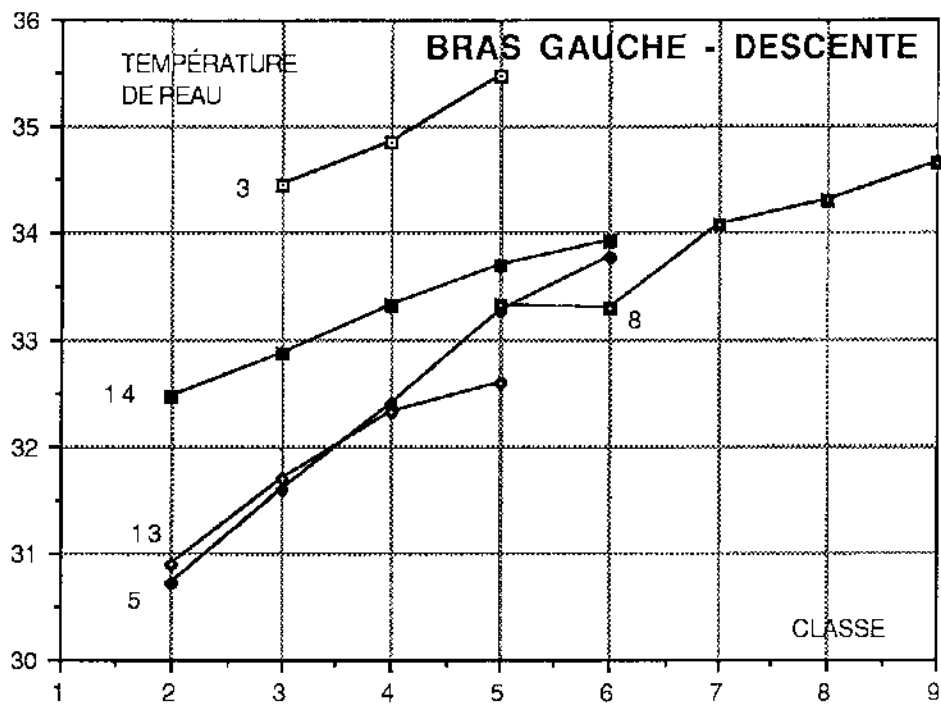
- Le bras gauche présente une anomalie encore inexpliquée, visible sur la figure : les courbes se répartissent en deux groupes bien distincts, séparés de 3 ou 4 degrés. Il faut savoir quel groupe représente la moyenne, l'autre groupe s'en éloignant sous l'effet d'une cause qui reste à trouver (rayonnement solaire, ...). pour cela, nous avons traité séparément ces deux groupes de courbes (voir plus loin : le groupe inférieur sera noté "BG", le groupe supérieur "BGsup")

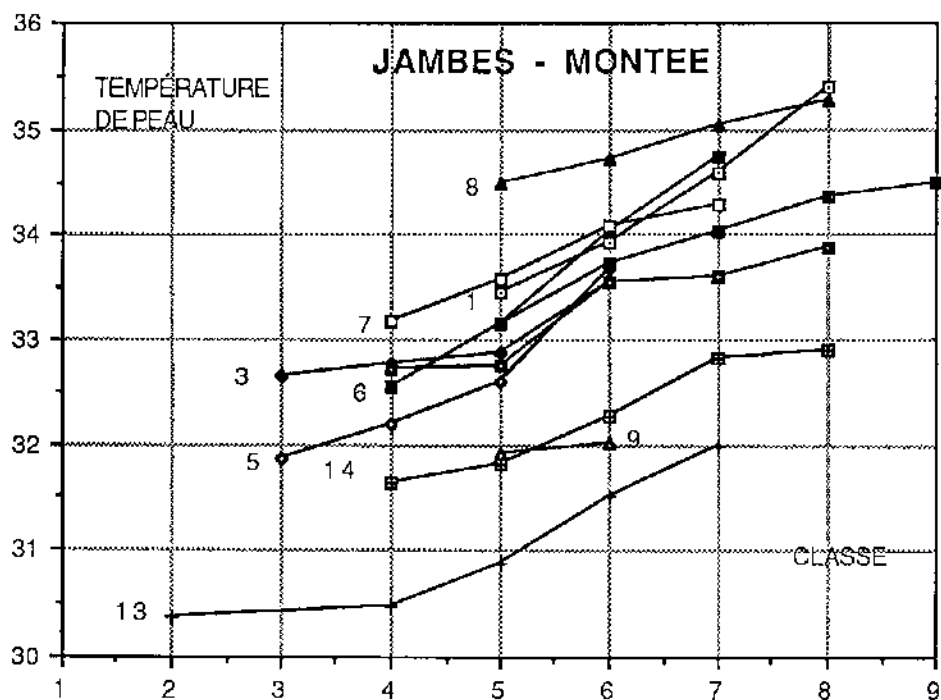
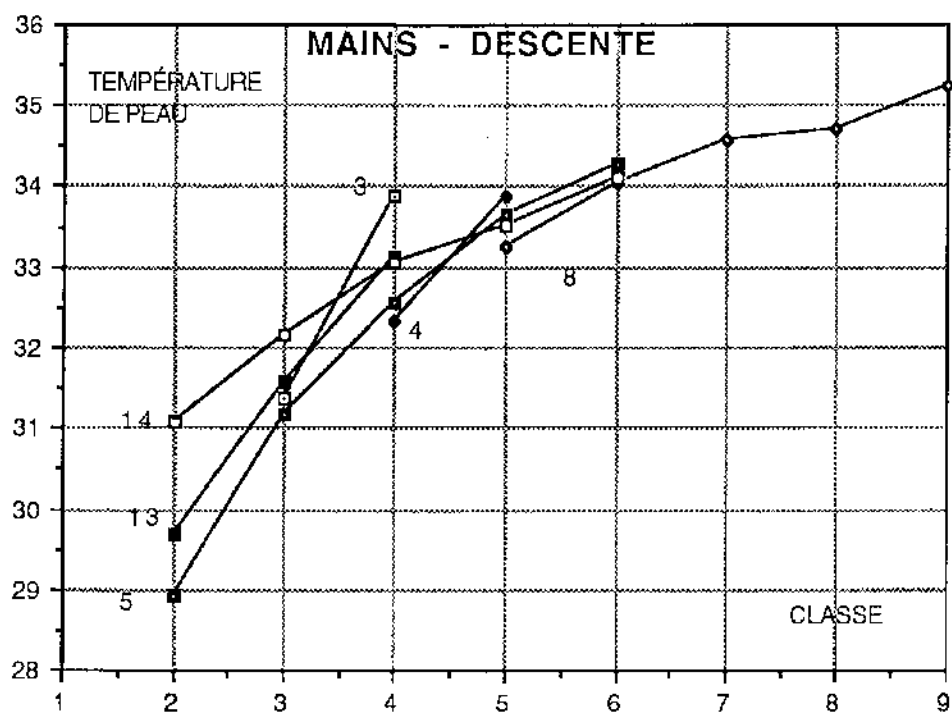


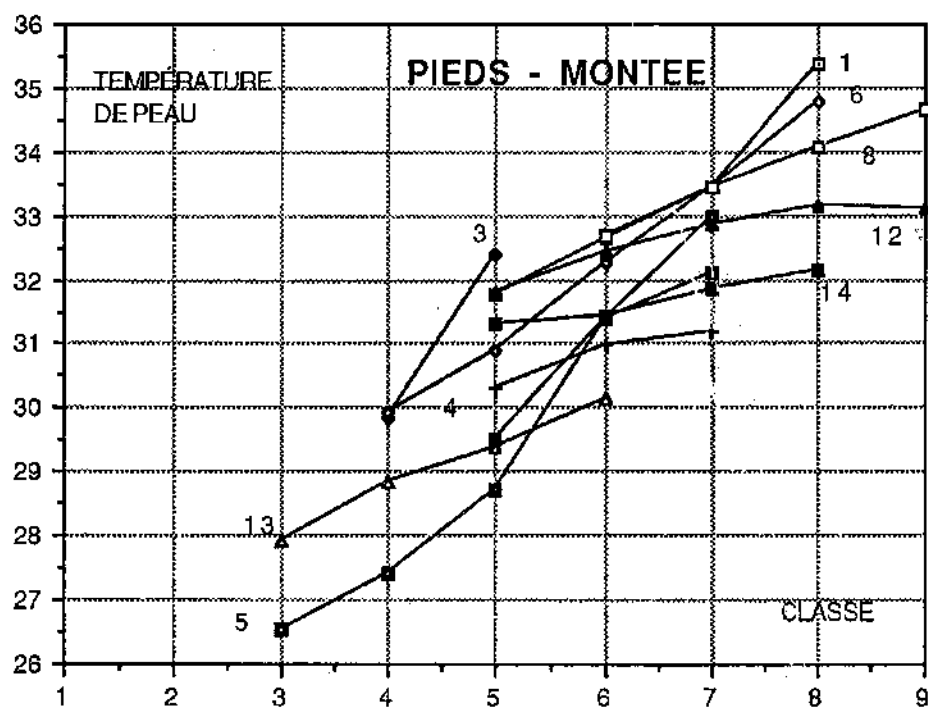
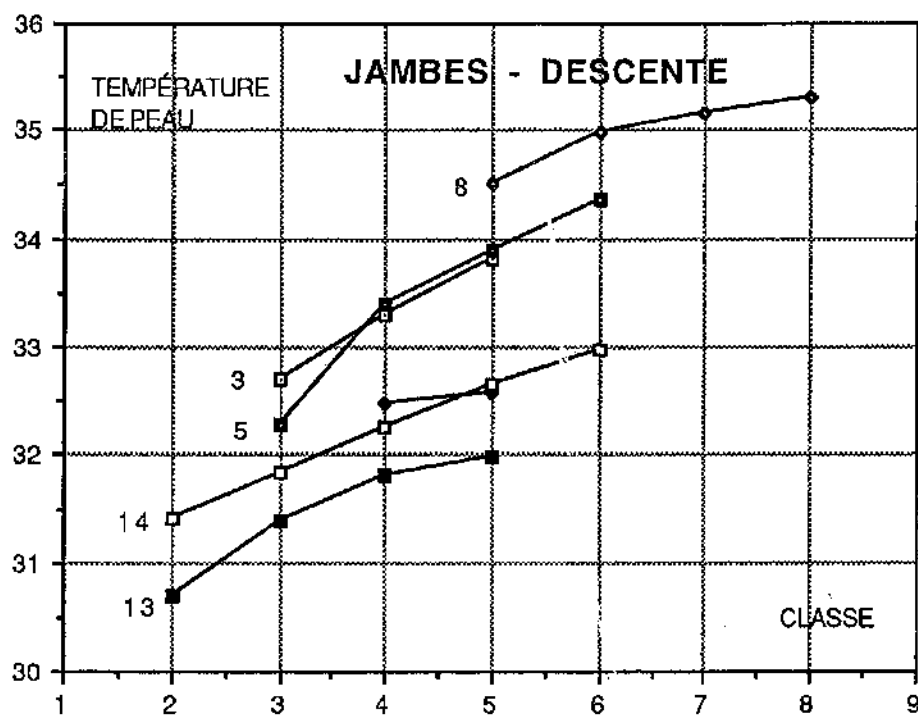


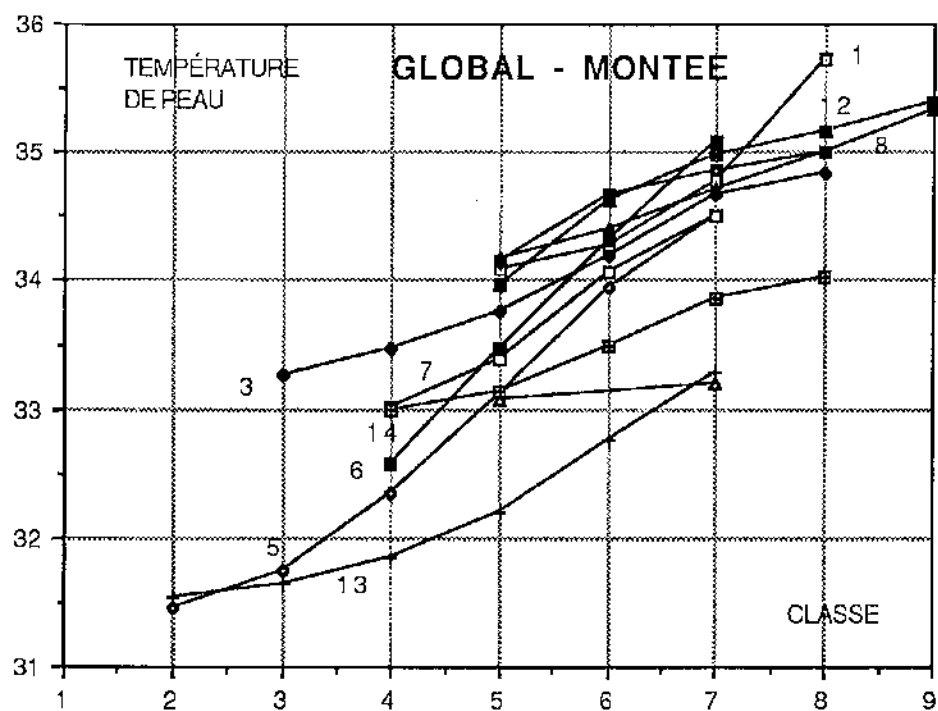
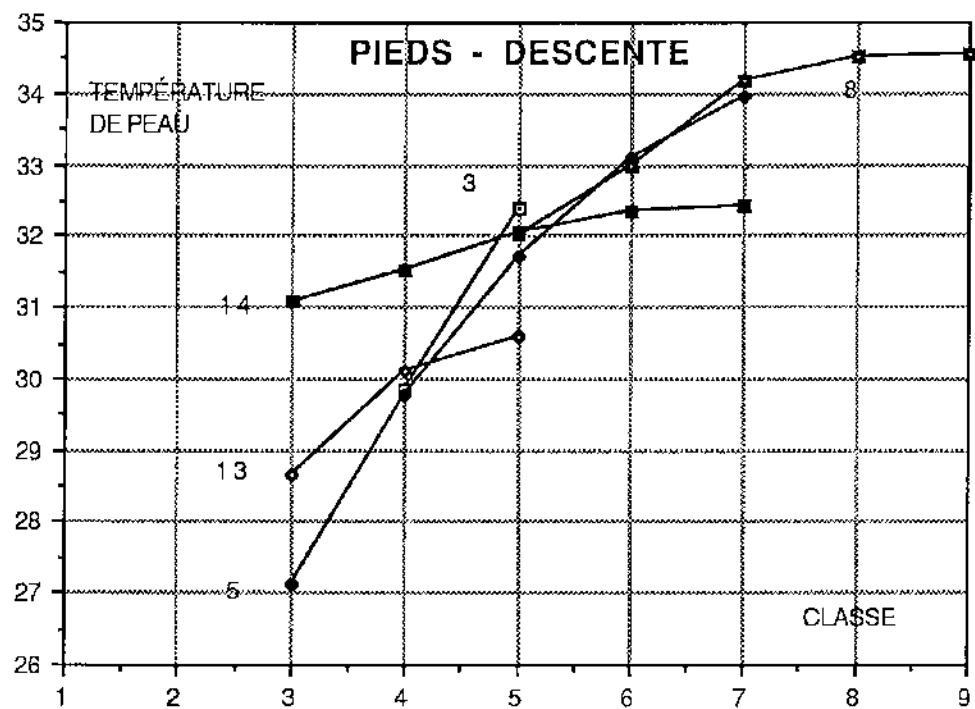


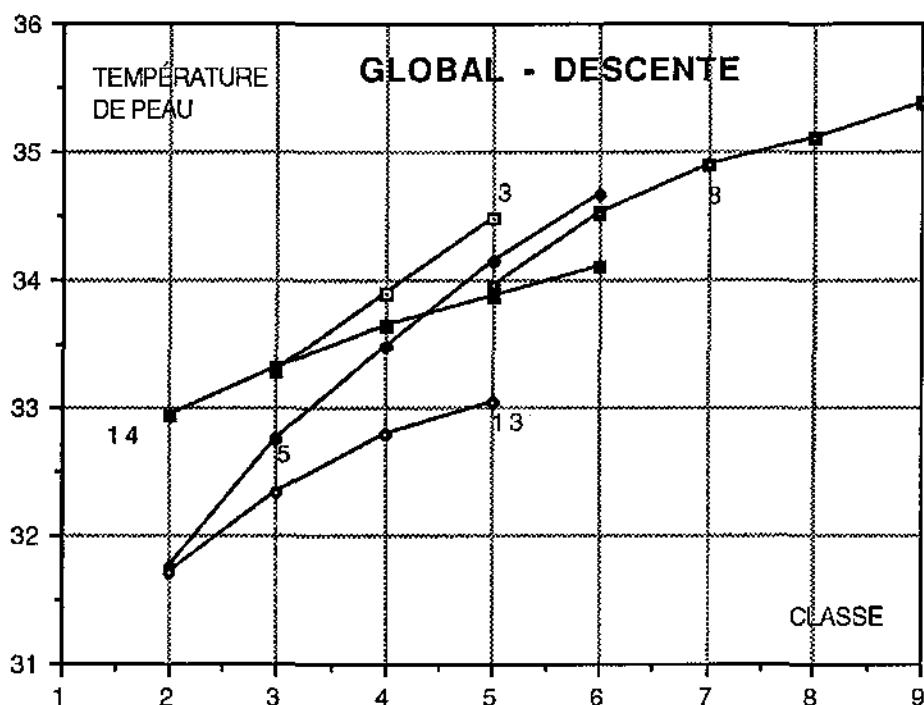












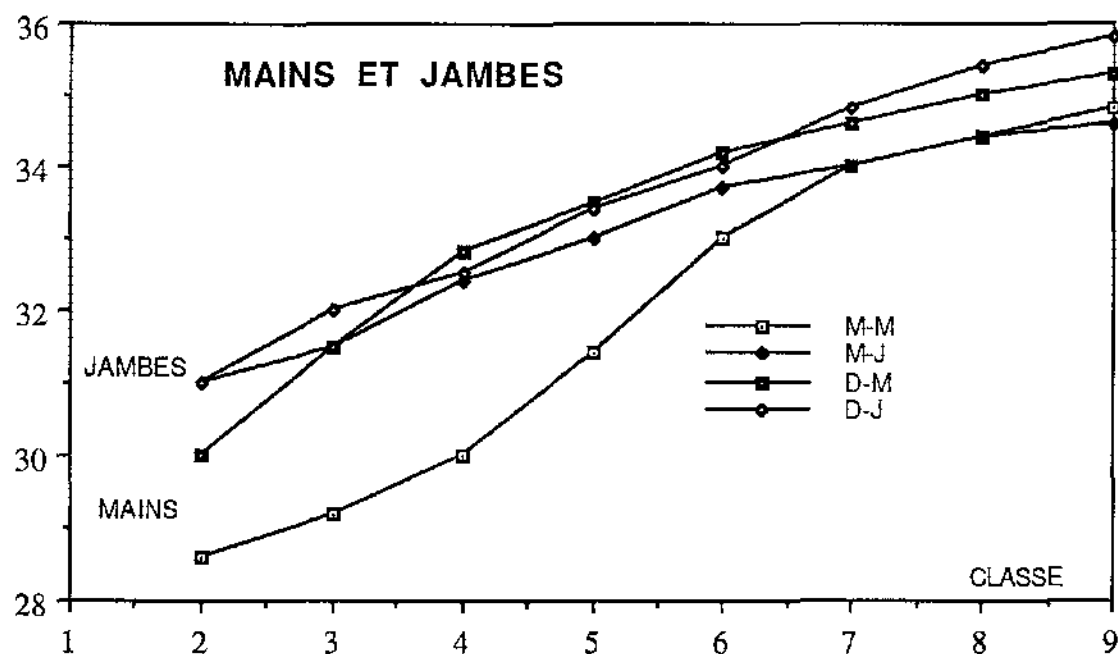
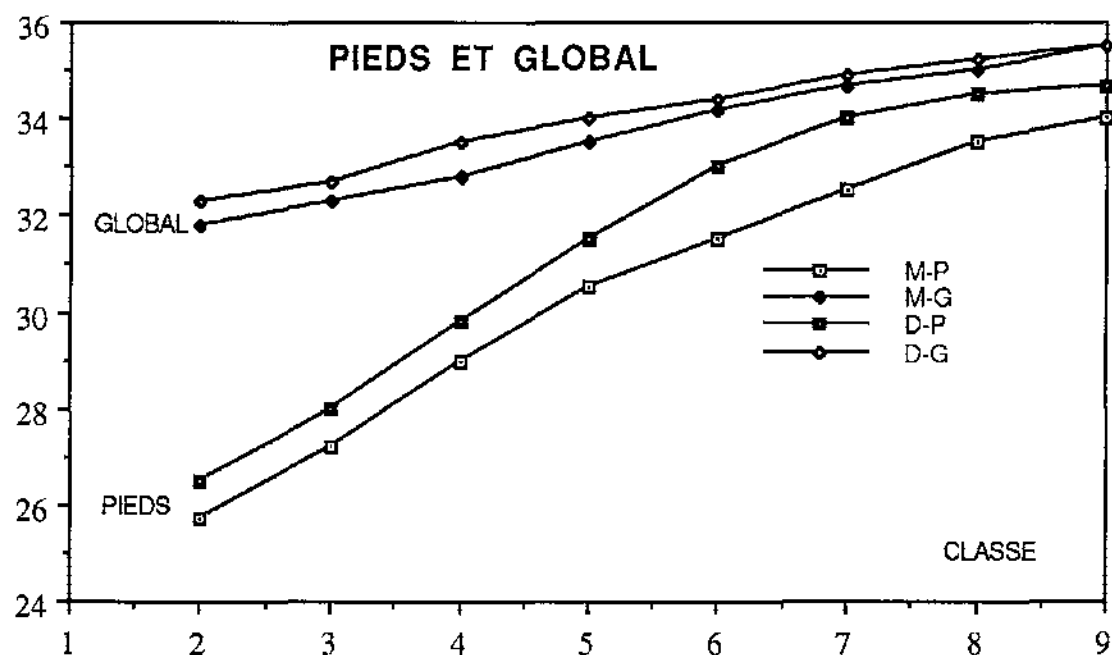
La remarque essentielle qui peut être faite sur ces courbes est que leur dispersion est telle qu'il paraît difficile d'en tirer des règles simples significatives! Nous avons toutefois essayé de prendre des valeurs moyennes, en tenant compte des remarques faites plus haut sur les valeurs trop différentes des autres.

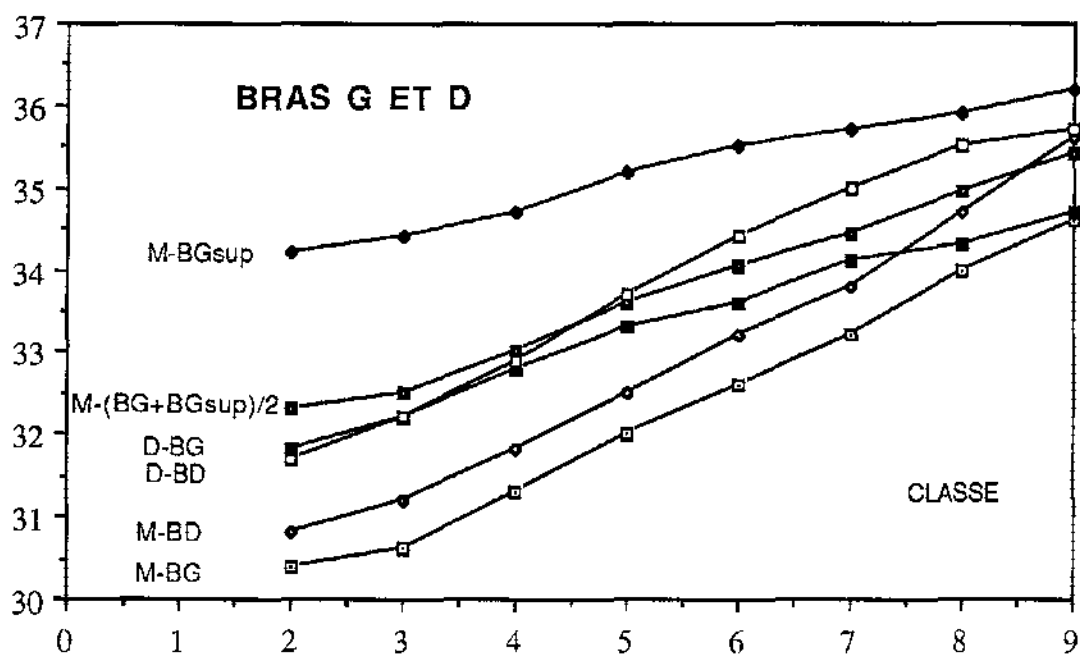
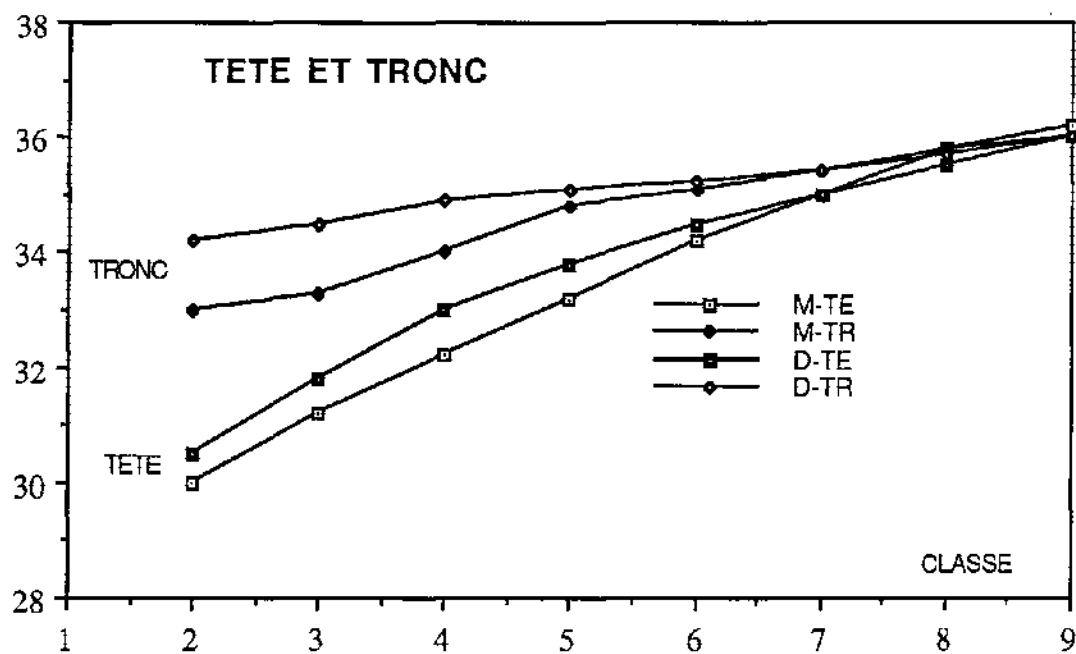
Nous en avons déduit les 4 courbes suivantes, où nous avons regroupé les parties deux par deux. Sur les trois premières figures, on constate bien que la température correspondant à une classe donnée lors d'une descente en température est supérieure à ce qu'elle est à la montée. La remarque déjà faite pour la sensation globale est donc vérifiée. Il faut noter qu'il s'agit d'écarts importants et que la prise en compte de cet effet est bien justifiée.

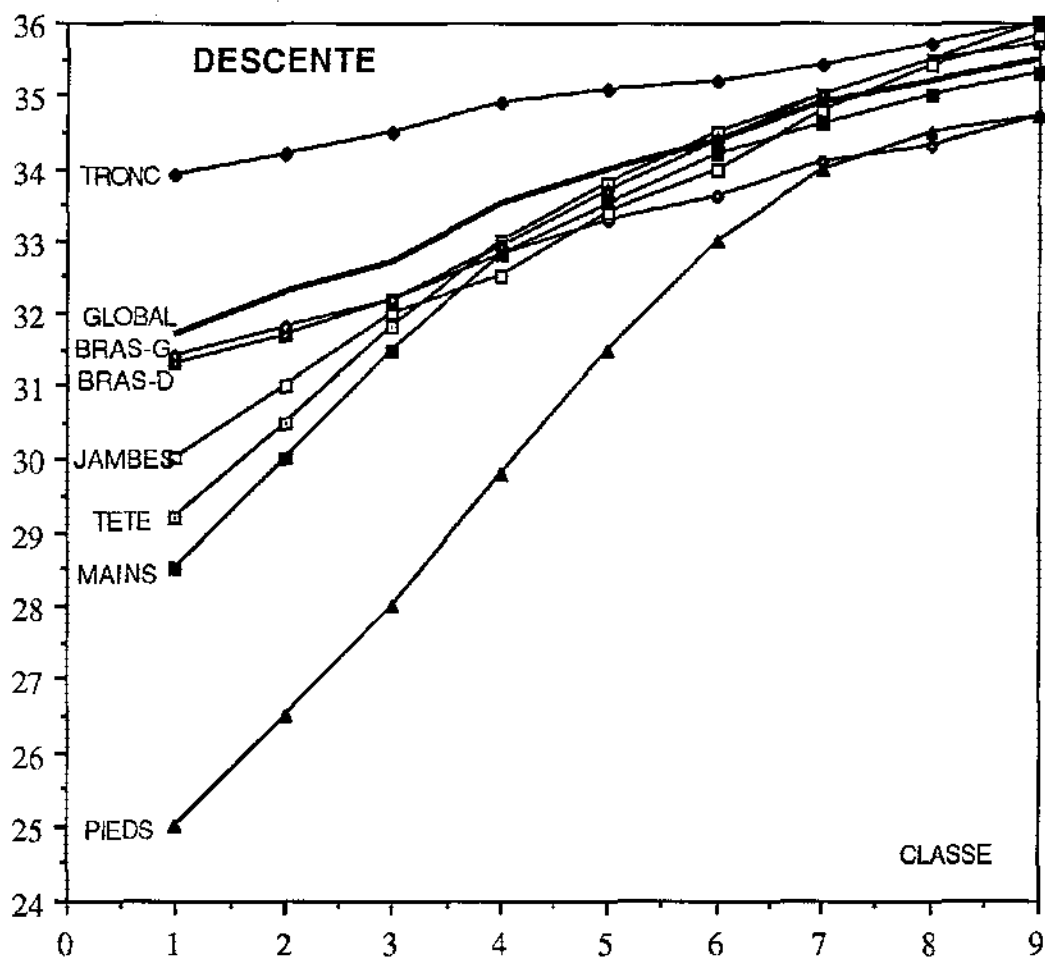
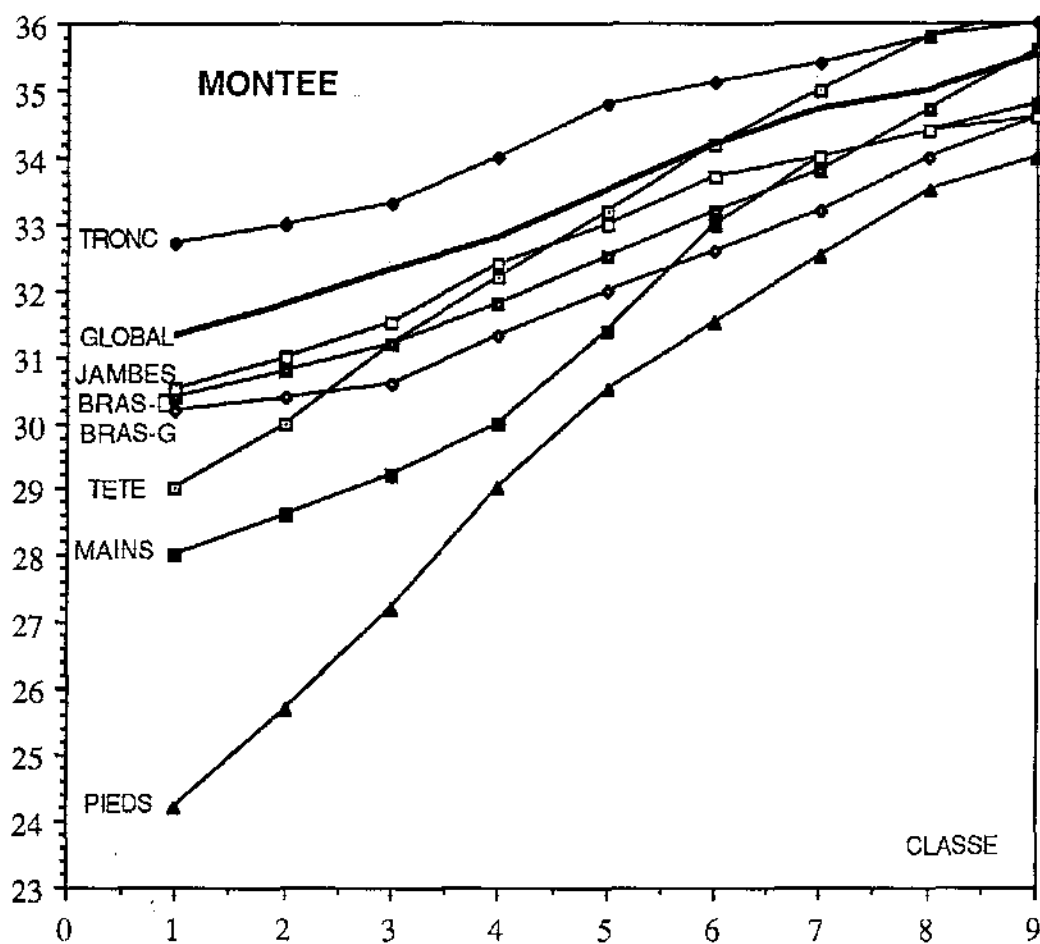
La dernière figure comporte les résultats pour le bras droit et le bras gauche (montée et descente). Pour la montée du bras gauche, nous avons porté les deux groupes de valeurs ("BG" et "BGsup", voir plus haut), et leur moyenne. Il semble clair que seule la courbe BG est cohérente avec les valeurs enregistrées pour le bras droit, avec les valeurs enregistrées à la descente et avec la remarque faite ci-dessus sur les écarts entre montée et descente. Nous décidons donc de prendre la courbe BG pour courbe moyenne et nous chercherons ultérieurement ce qui motive la courbe BGsup.

On peut remarquer l'absence de valeurs pour la classe 1. Nous avons donné arbitrairement des valeurs plausibles pour ces valeurs manquantes pour écrire les tableaux qui suivent les courbes.

Les deux dernières figures résument les courbes de variation de la sensation avec la température pour toutes les parties.







TABLEAUX

police

On pourra utiliser les tableaux suivants, dans les simulations, pour une première approximation. Au fur et à mesure que nous aurons dépouillé d'autres résultats expérimentaux, nous pourrons le modifier pour avoir une plus grande précision. Il sera peut être nécessaire de les dédoubler si on constate qu'un paramètre particulier entraîne un écart systématique. Par exemple, il semble que les expériences où les échanges par rayonnement sont importants se distinguent des autres. Ce fait reste à vérifier et, le cas échéant, à quantifier.

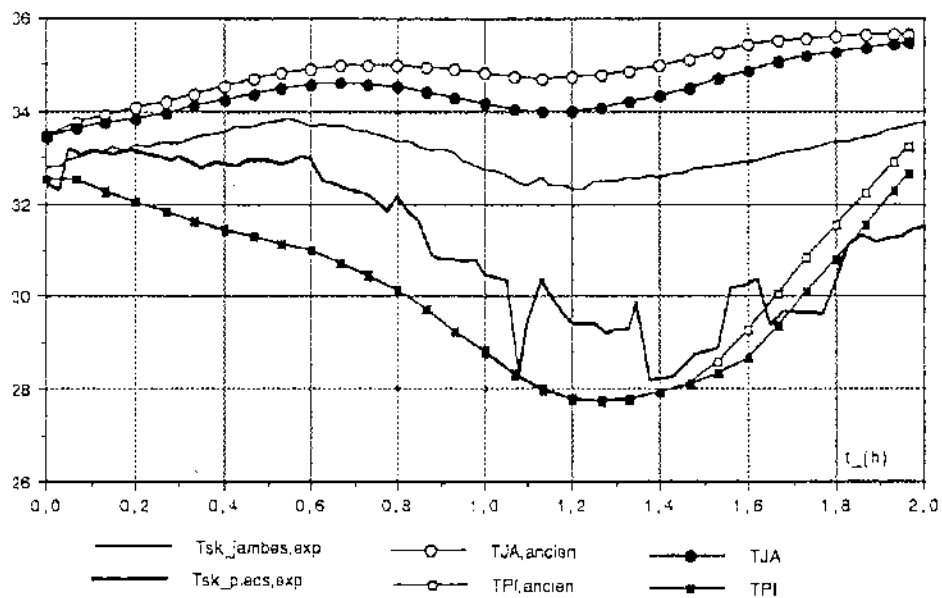
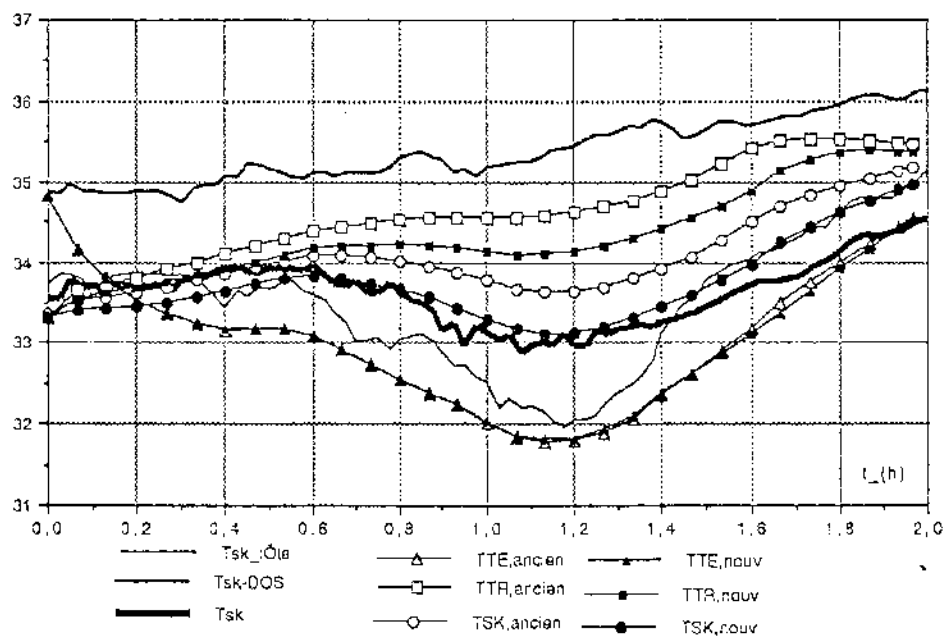
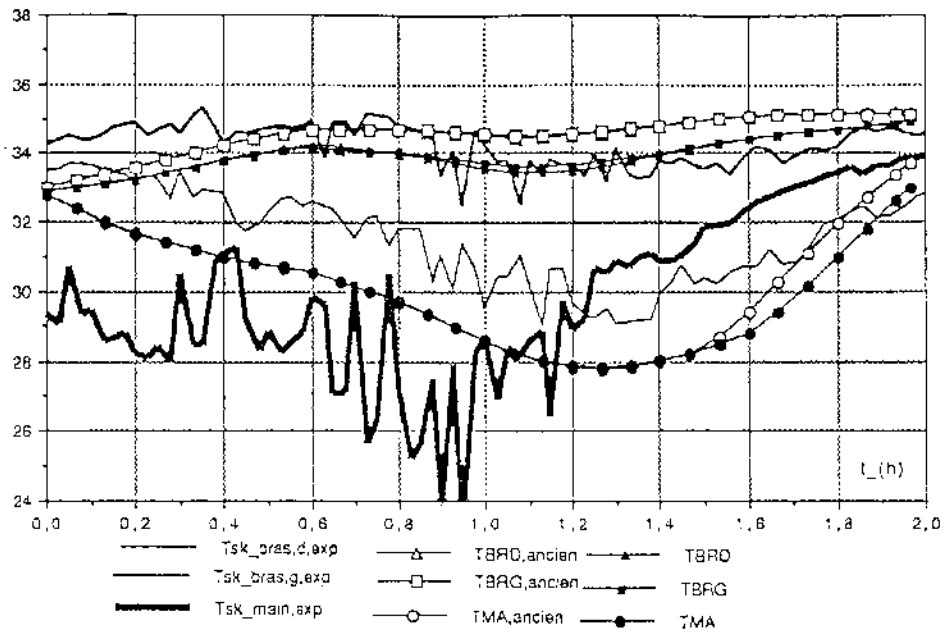
MONTEE

CLASSE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TETE	29,0	30,0	31,2	32,2	33,2	34,2	35,0	35,8	36,2
TRONC	32,7	33,0	33,3	34,0	34,8	35,1	35,4	35,8	36,0
BRAS D.	30,4	30,8	31,2	31,8	32,5	33,2	33,8	34,7	35,6
BRAS G.	30,2	30,4	30,6	31,3	32,0	32,5	33,2	34,0	34,6
MAINS	28,0	28,6	29,2	30,0	31,4	33,0	34,0	34,4	34,8
JAMBES	30,5	31,0	31,5	32,4	33,0	33,7	34,0	34,4	34,6
PIEDS	24,2	25,7	27,2	29,0	30,5	31,5	32,5	33,5	34,0
GLOBAL	31,3	31,8	32,3	32,8	33,5	34,2	34,7	35,0	35,5

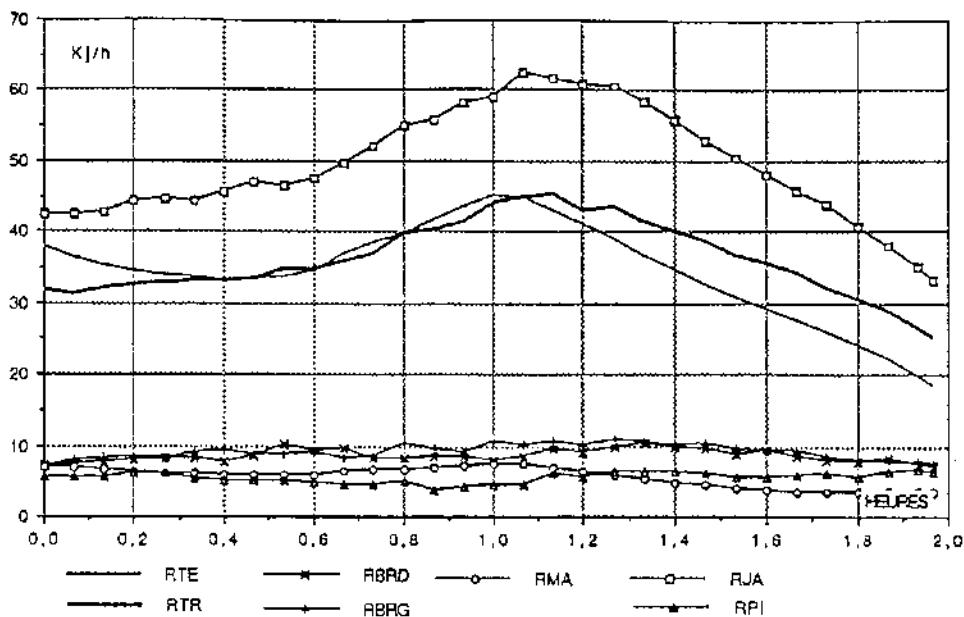
DESCENTE

CLASSE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TETE	29,2	31,5	31,8	33,0	33,8	34,5	35,0	35,5	36,0
TRONC	33,9	34,2	34,5	34,9	35,1	35,2	35,4	35,7	36,0
BRAS D.	31,3	31,7	32,2	32,9	34,7	34,4	35,0	35,5	35,7
BRAS G.	31,4	31,8	32,2	32,8	33,3	33,6	34,1	34,3	34,7
MAINS	28,5	30,0	31,5	32,8	33,5	34,2	34,6	35,0	35,3
JAMBES	30,0	31,0	32,0	32,5	33,4	34,0	34,8	35,4	35,8
PIEDS	25,0	26,5	28,0	29,8	31,5	33,0	34,0	34,5	34,7
GLOBAL	31,9	32,3	32,7	33,5	34,0	34,4	34,9	35,2	35,5

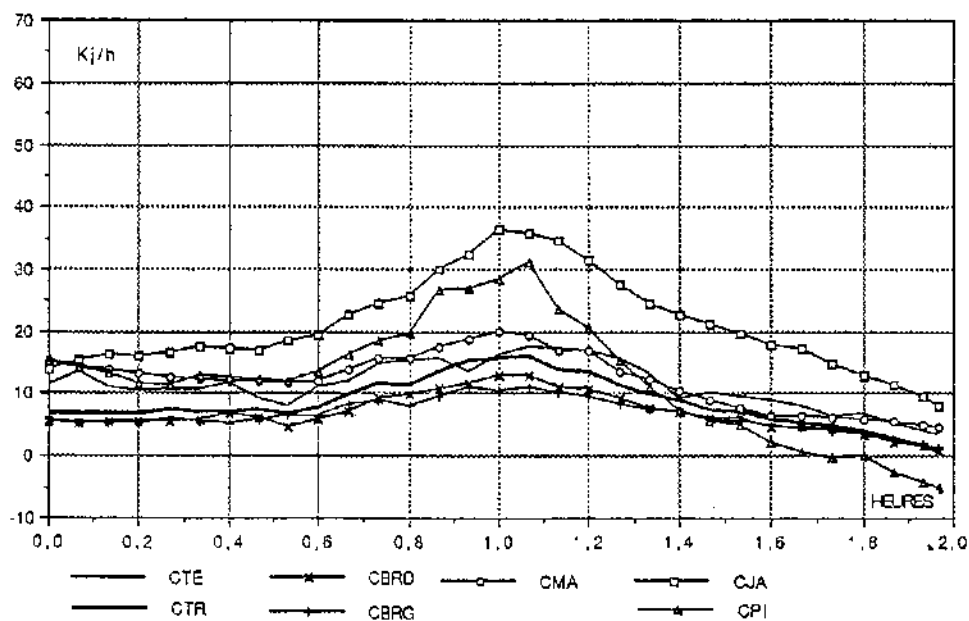
TEMPERATURES : EXPE., NOUVELLE SIMULATION, ANCIENNE SIMULATION
ESSAI 11



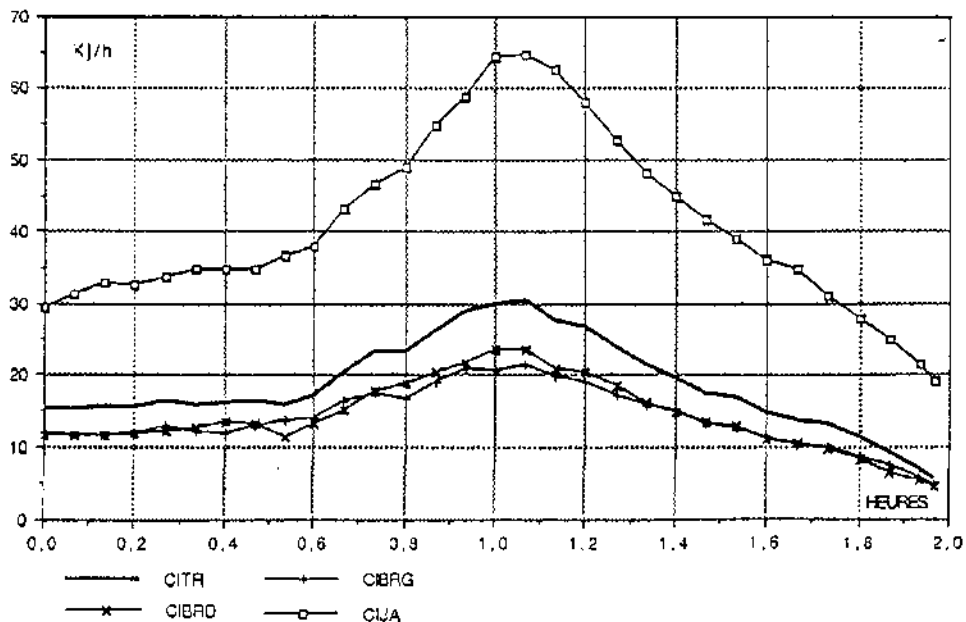
FLUX RADIATIF ESSAI 11

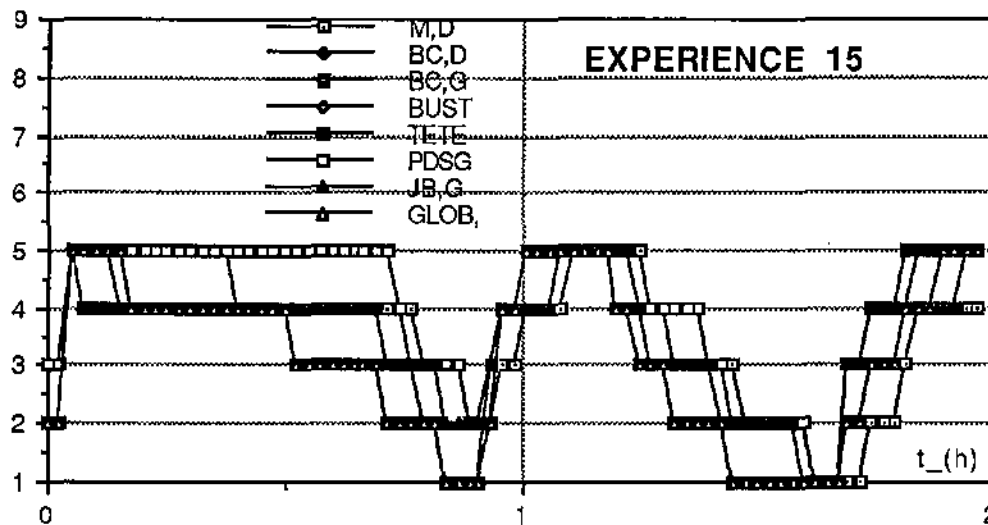
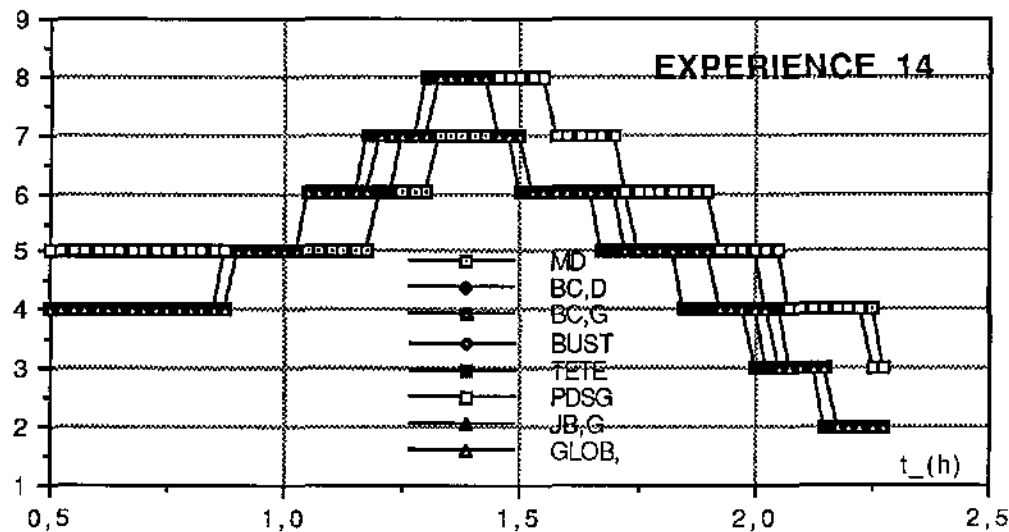


FLUX CONVectif ESSAI 11



FLUX CONVectif INTERMEDIAIRE ESSAI 11





A partir des valeurs expérimentales des températures et des sensations, nous avons, pour chaque expérience, calculé la valeur moyenne des températures qui donnent chaque classe de sensation, pour chaque segment du corps et pour la valeur globale. De plus, nous avons tenu compte de la différence entre les valeurs trouvées lors d'une montée ou d'une descente en température. Par exemple, pour l'expérience 13, nous avons cherché toutes les températures de jambes donnant une sensation de jambes égale à 3 lors de la montée en température, et nous en avons fait la moyenne arithmétique. Nous avons procédé ainsi pour toutes les expériences, toutes les parties du corps, toutes les classes de sensation, en montée et en descente.

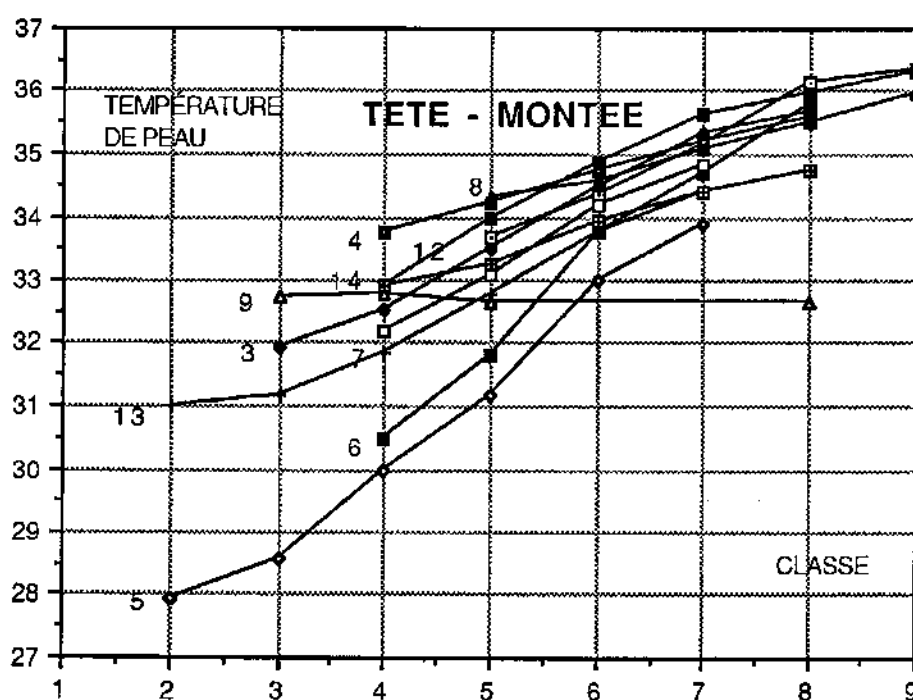
Nous avons ainsi tracé les 16 figures suivantes, dans lesquelles sont portées la totalité des expériences exploitables à la date de réalisation de ce travail (juillet 1993). On peut faire plusieurs remarques sur ces courbes :

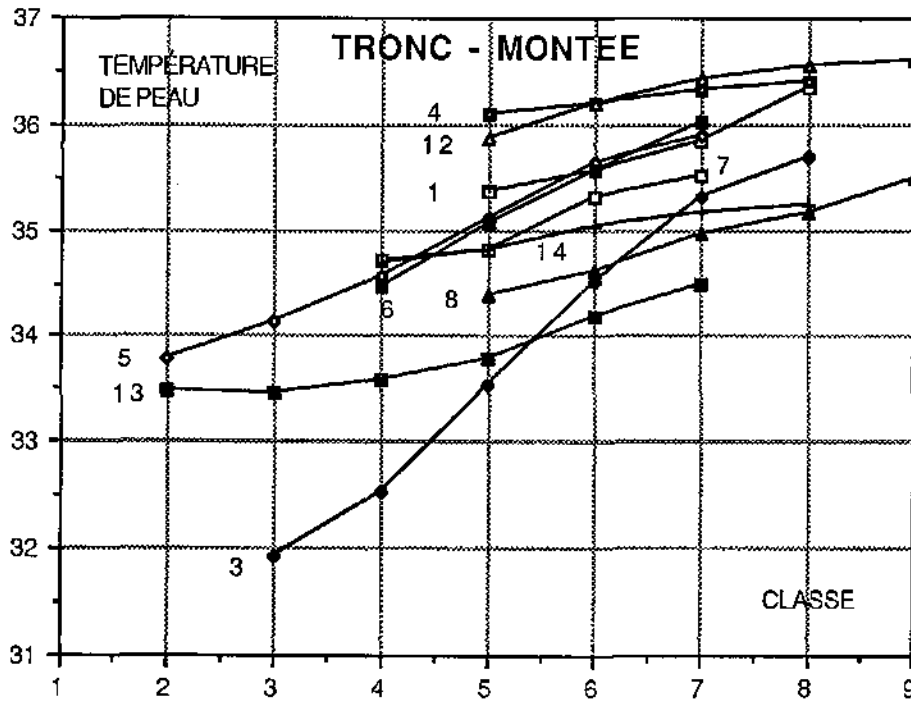
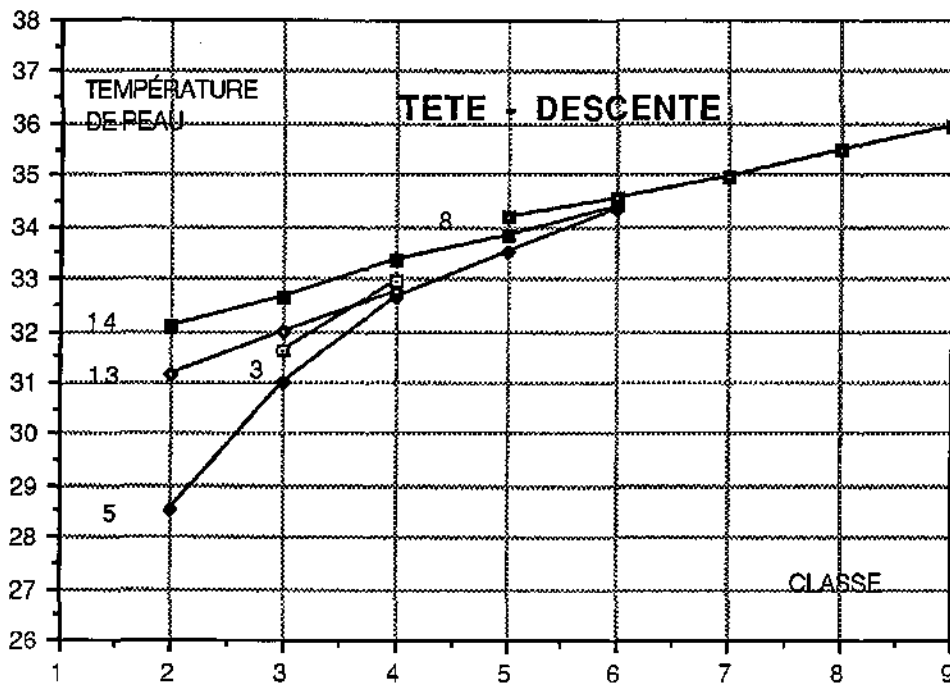
- Certaines expériences donnent des valeurs très éloignées des autres pour une ou plusieurs parties du corps. Il conviendra d'en rechercher les causes lorsque nous aurons avancé dans le travail ; pour l'instant, nous recherchons des valeurs moyennes, aussi nous ne tiendrons pas

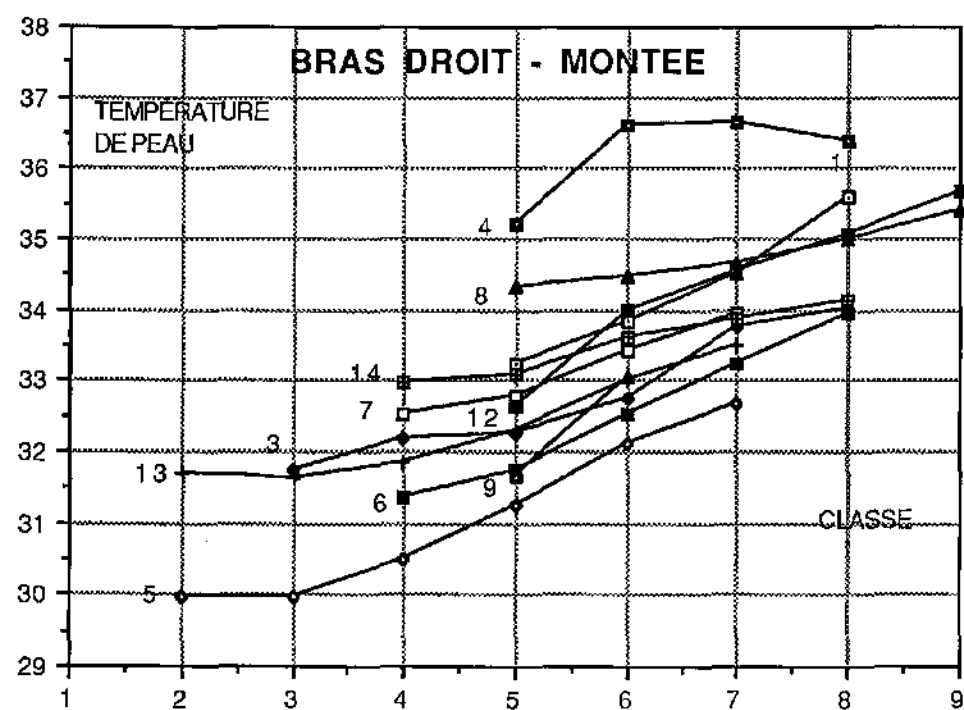
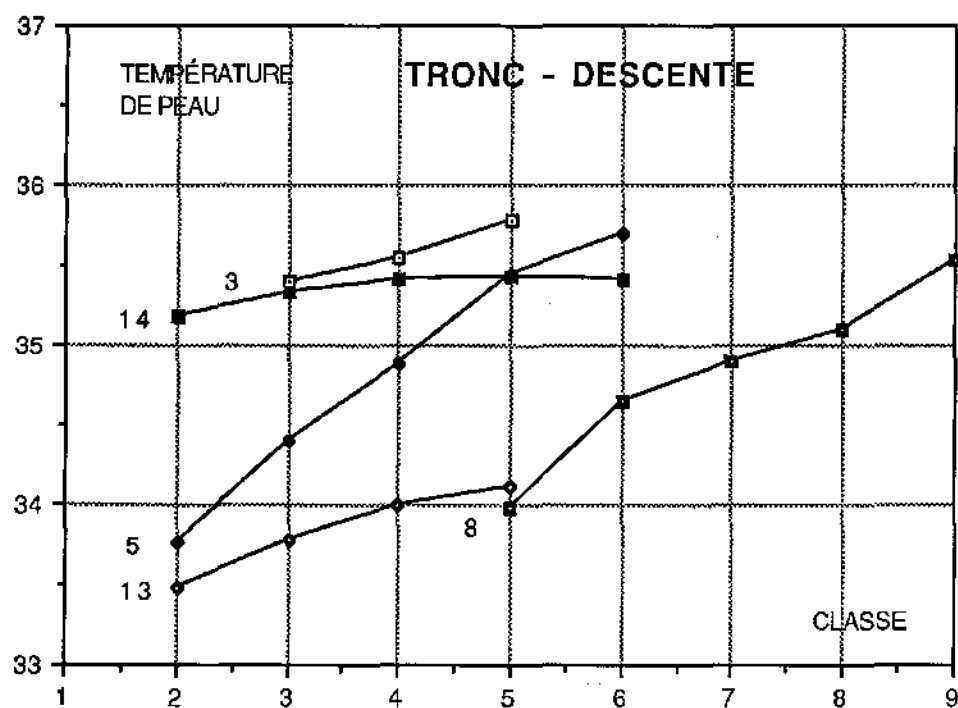
compte de ces valeurs. Il s'agit des expériences : 9 (montée bras droit tête et main), 3 (descente bras gauche), 4 (montée bras droit), 14 (descente pieds).

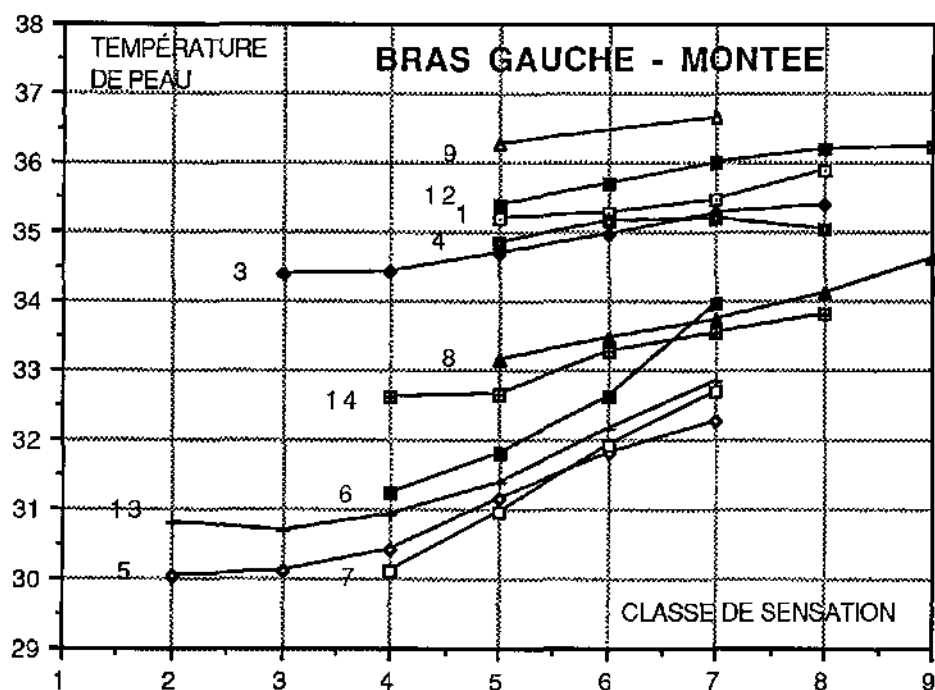
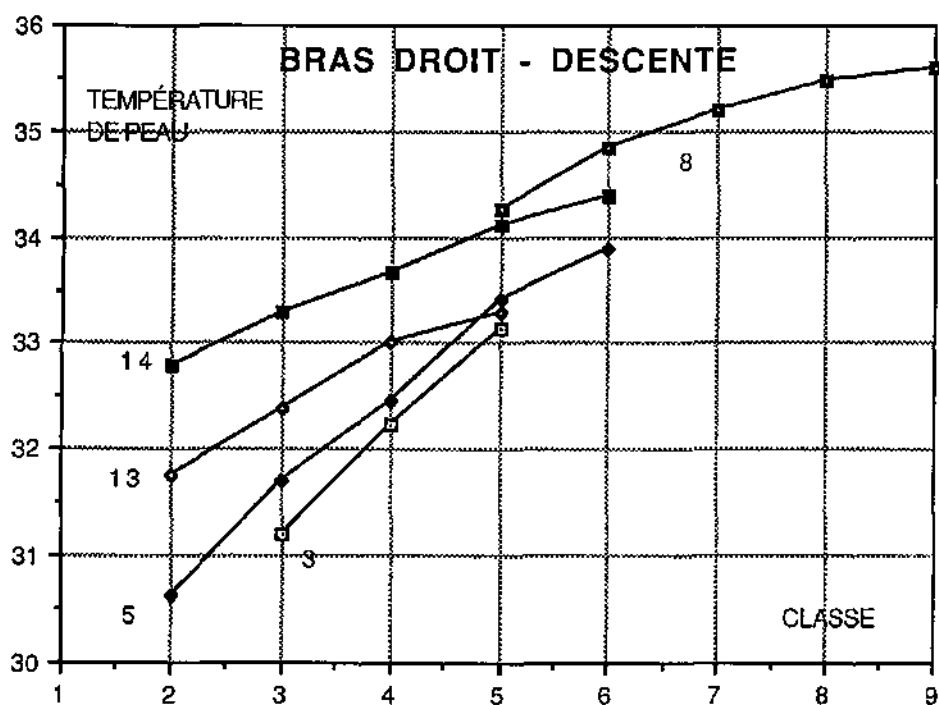
- De gros écarts peuvent être constatés pour les classes inférieures à 6 lorsqu'il s'agit des mains. Il faut tenir compte de la forte imprécision sur la mesure de la sensation des mains, que Francis ne tenait pas toujours fixées au volant (cela est surtout vrai pour les premières expériences ; l'attention de Francis a, par la suite, été attirée sur ce point).

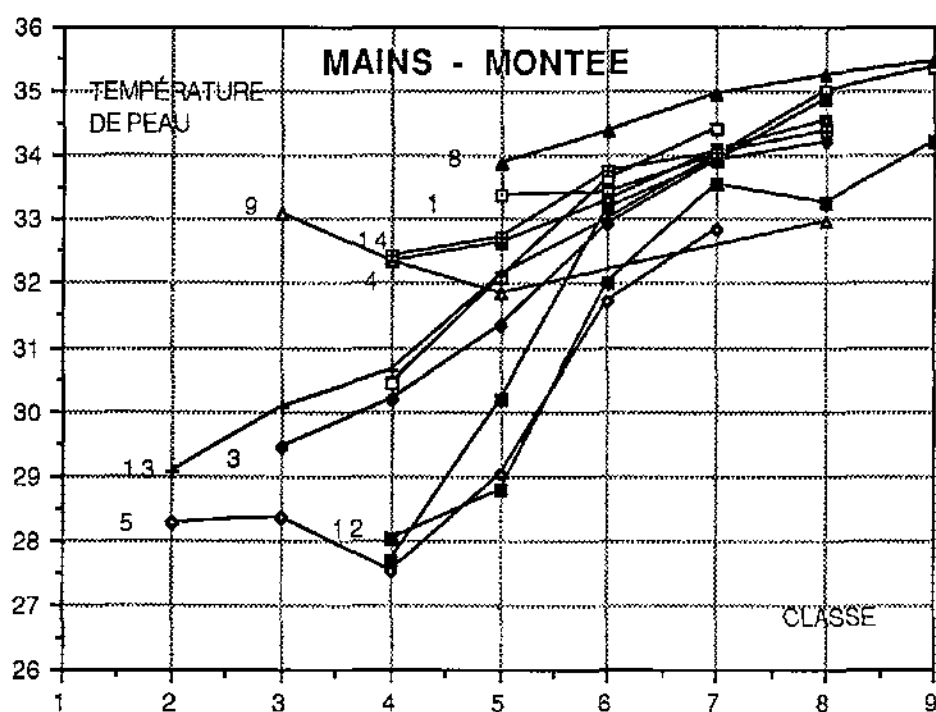
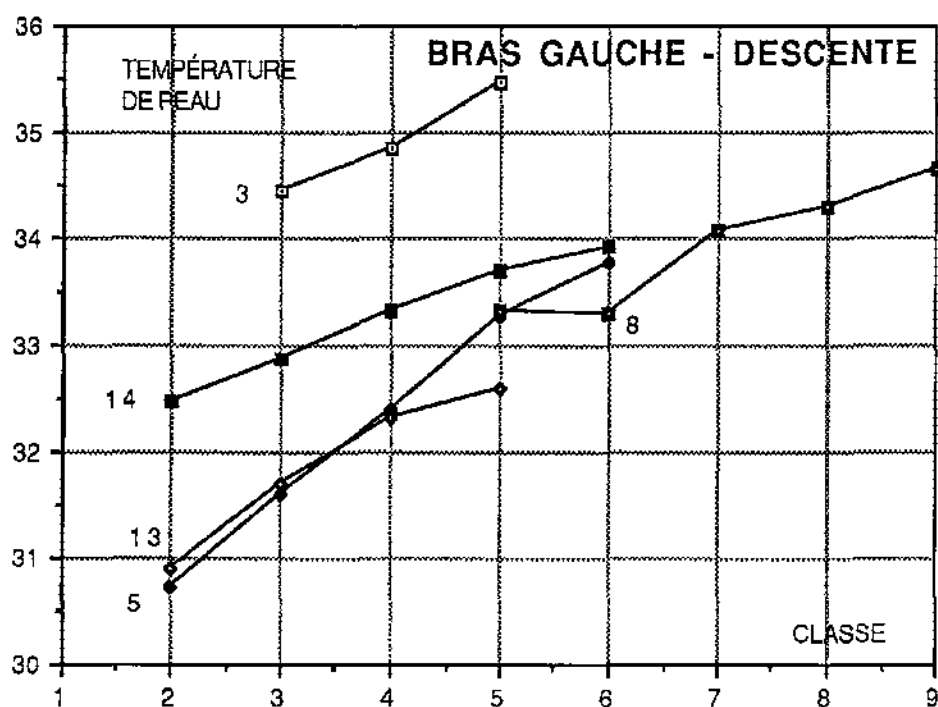
- Le bras gauche présente une anomalie encore inexpliquée, visible sur la figure : les courbes se répartissent en deux groupes bien distincts, séparés de 3 ou 4 degrés. Il faut savoir quel groupe représente la moyenne, l'autre groupe s'en éloignant sous l'effet d'une cause qui reste à trouver (rayonnement solaire, ...). pour cela, nous avons traité séparément ces deux groupes de courbes (voir plus loin : le groupe inférieur sera noté "BG", le groupe supérieur "BGsup").

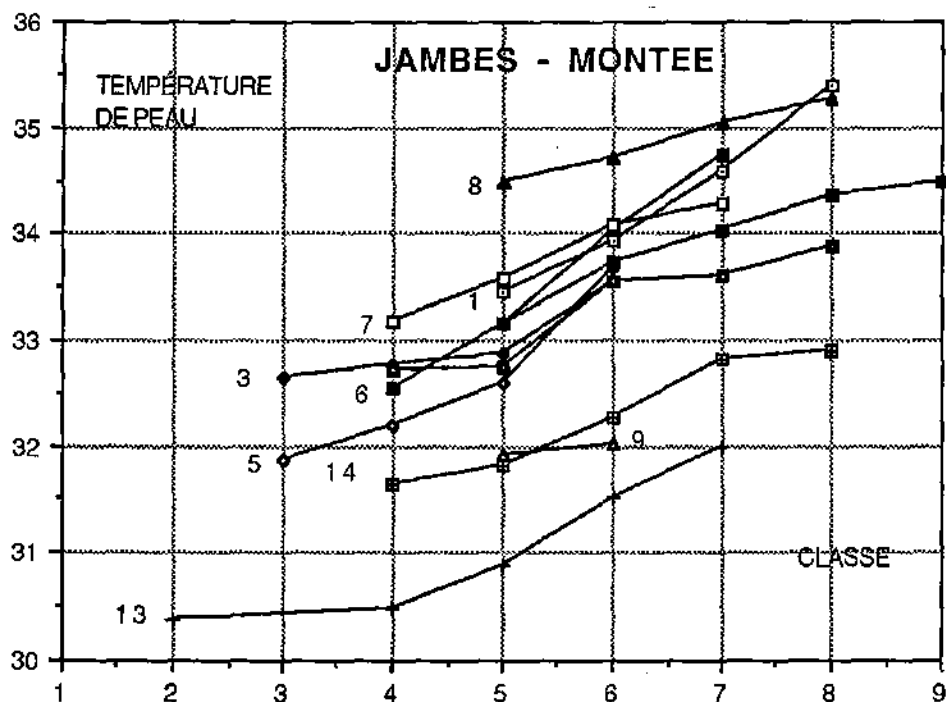
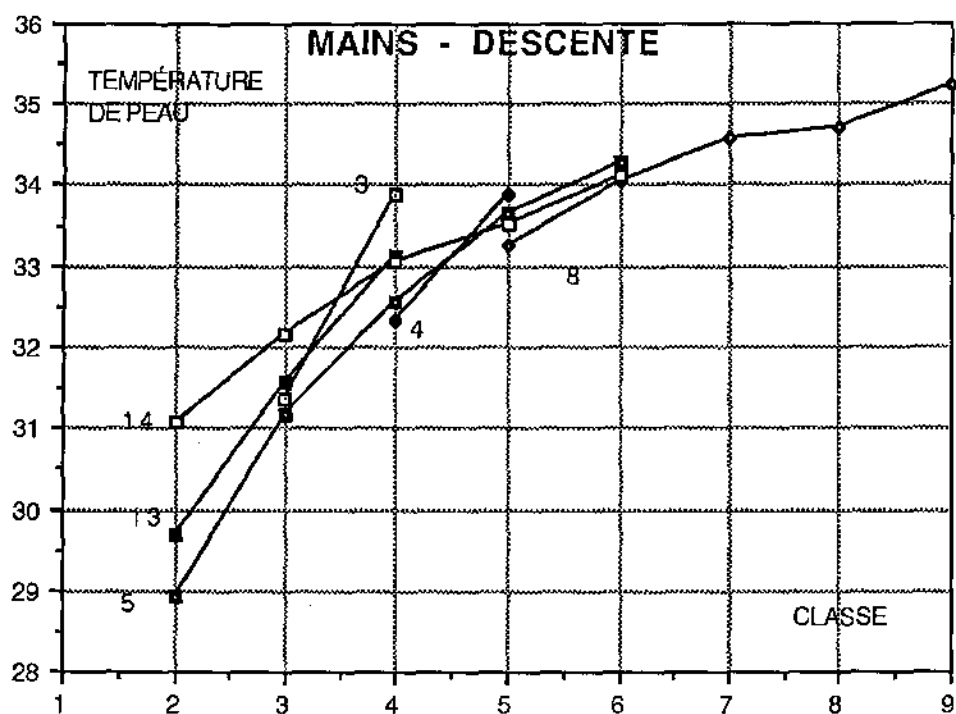


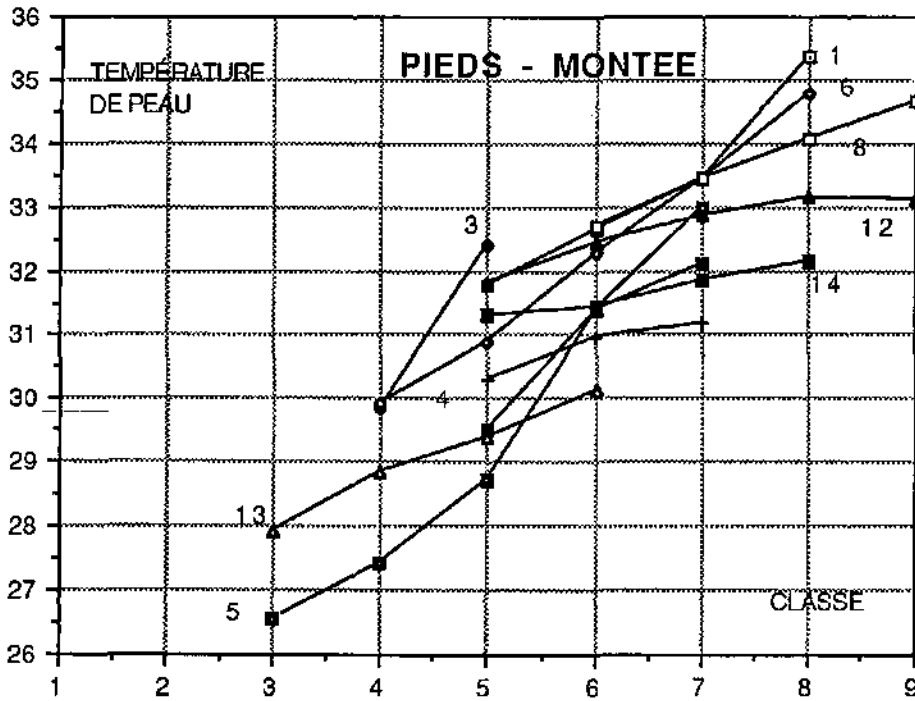
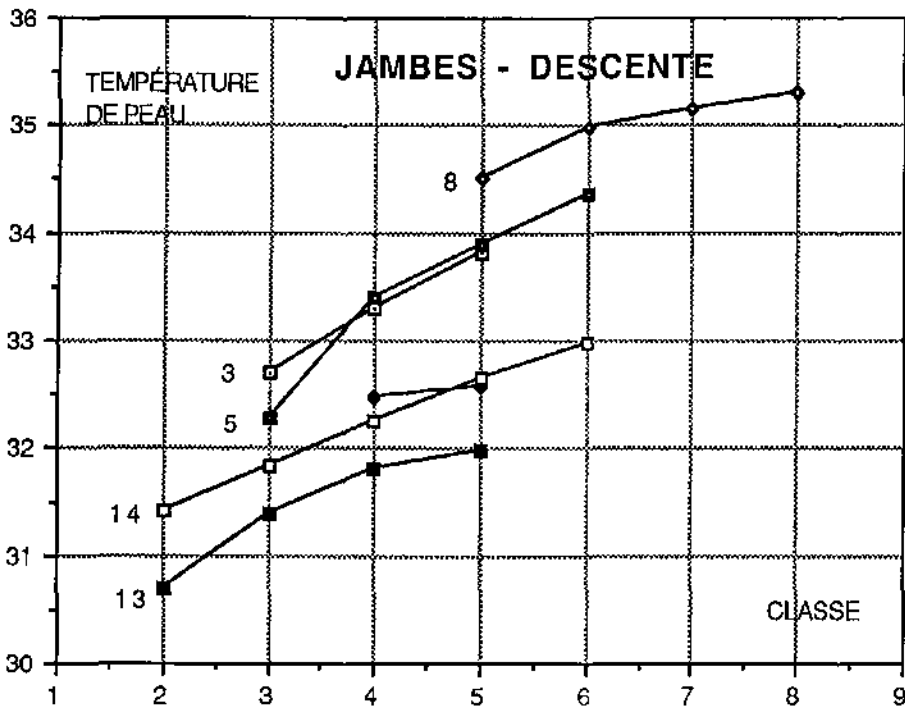


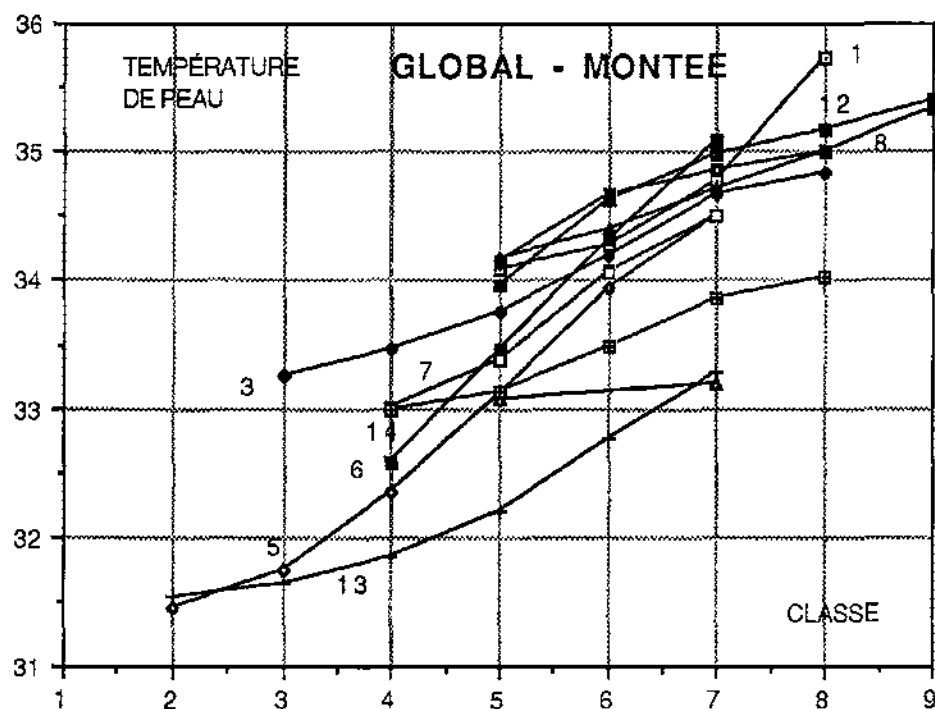
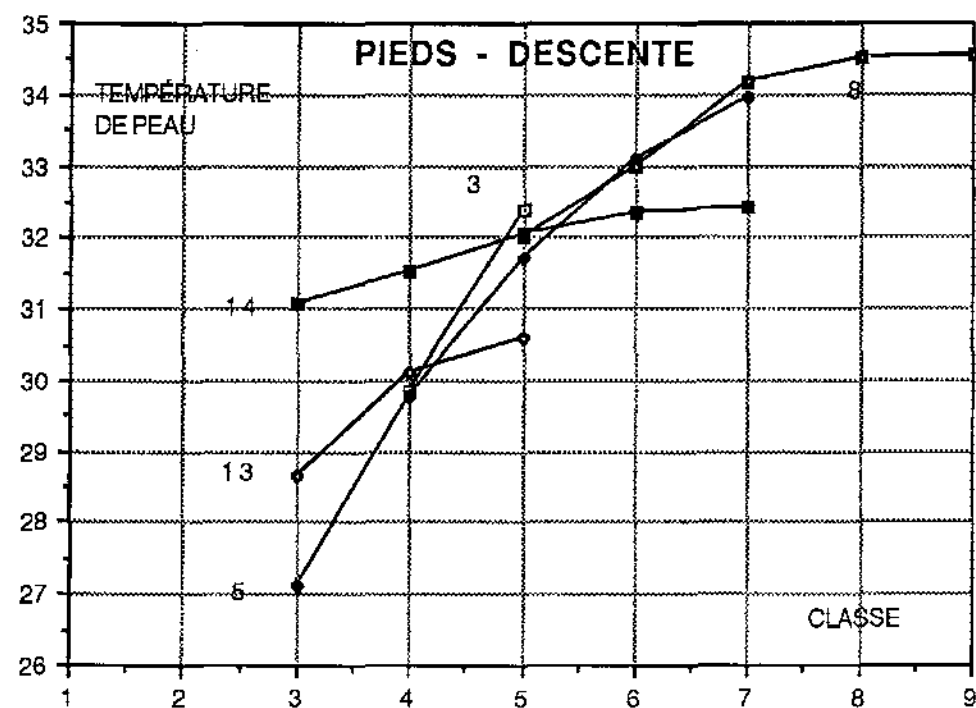


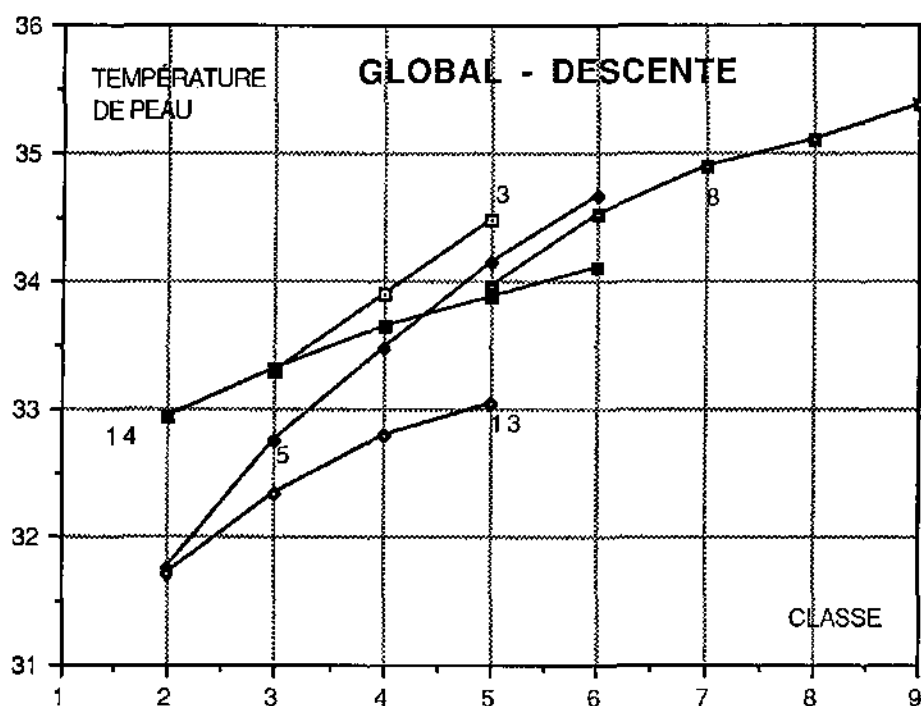












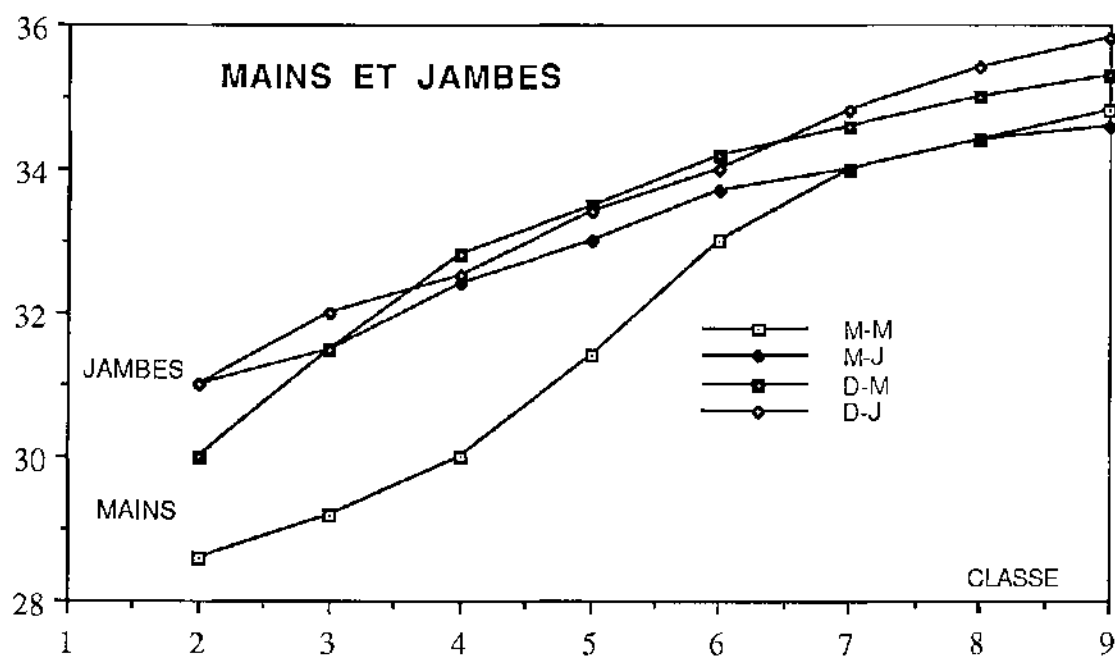
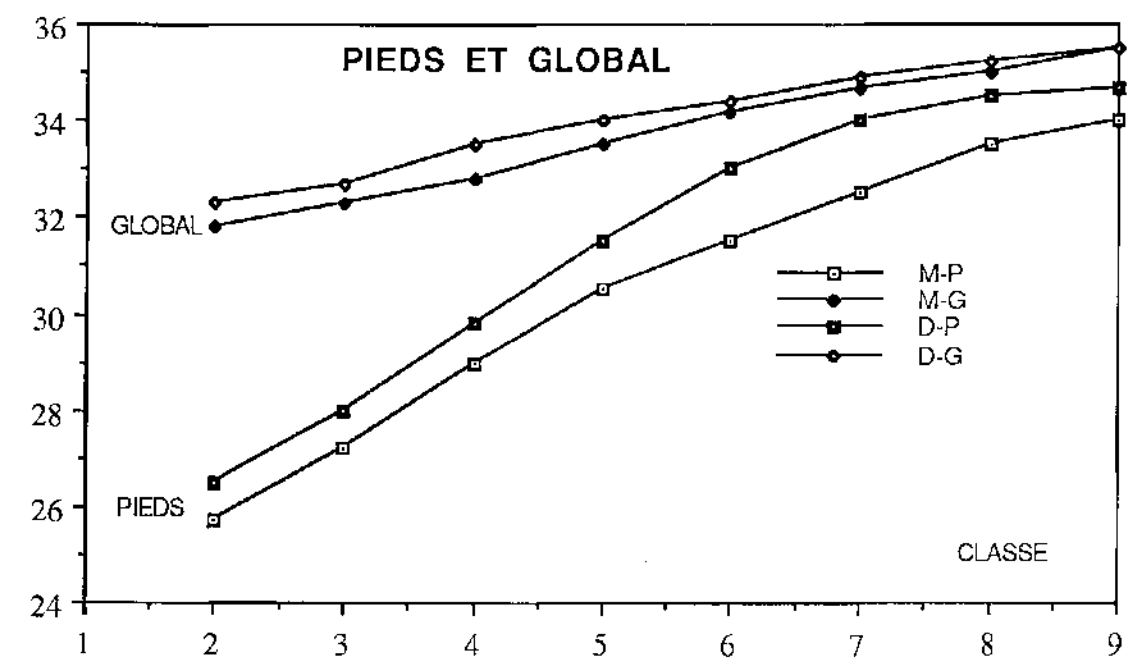
La remarque essentielle qui peut être faite sur ces courbes est que leur dispersion est telle qu'il paraît difficile d'en tirer des règles simples significatives! Nous avons toutefois essayé de prendre des valeurs moyennes, en tenant compte des remarques faites plus haut sur les valeurs trop différentes des autres.

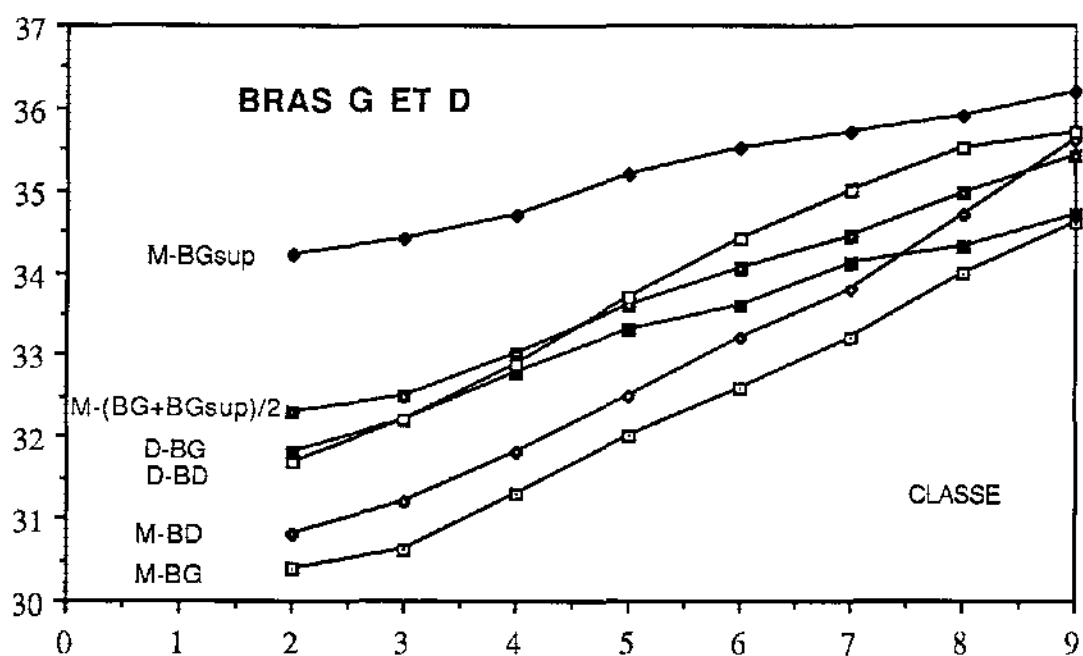
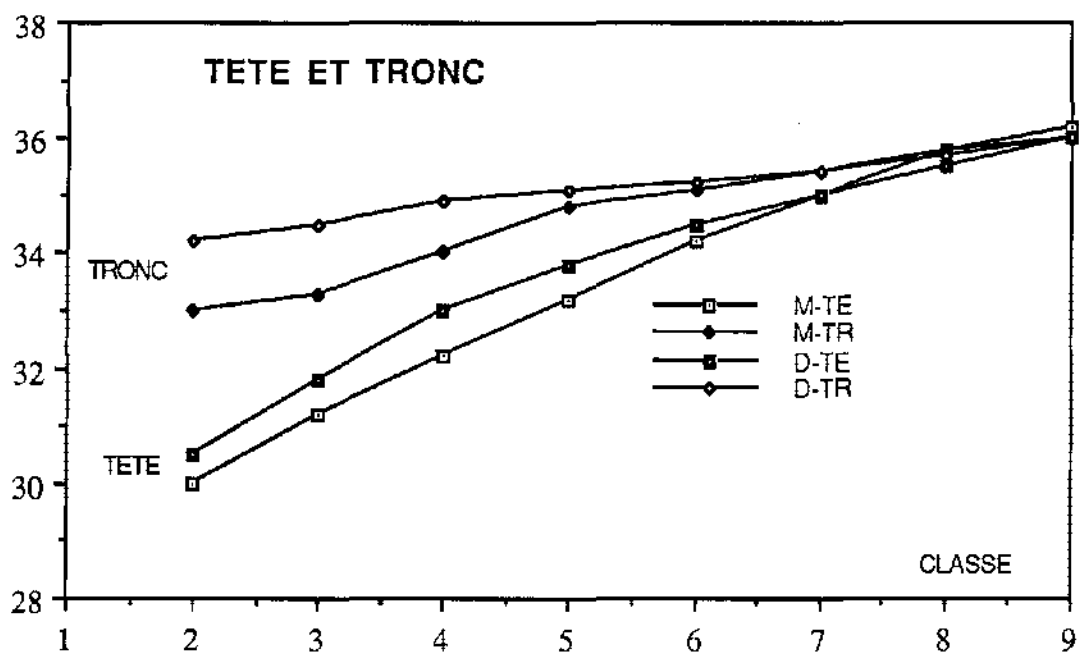
Nous en avons déduit les 4 courbes suivantes, où nous avons regroupé les parties deux par deux. Sur les trois premières figures, on constate bien que la température correspondant à une classe donnée lors d'une descente en température est supérieure à ce qu'elle est à la montée. La remarque déjà faite pour la sensation globale est donc vérifiée. Il faut noter qu'il s'agit d'écart importants et que la prise en compte de cet effet est bien justifiée.

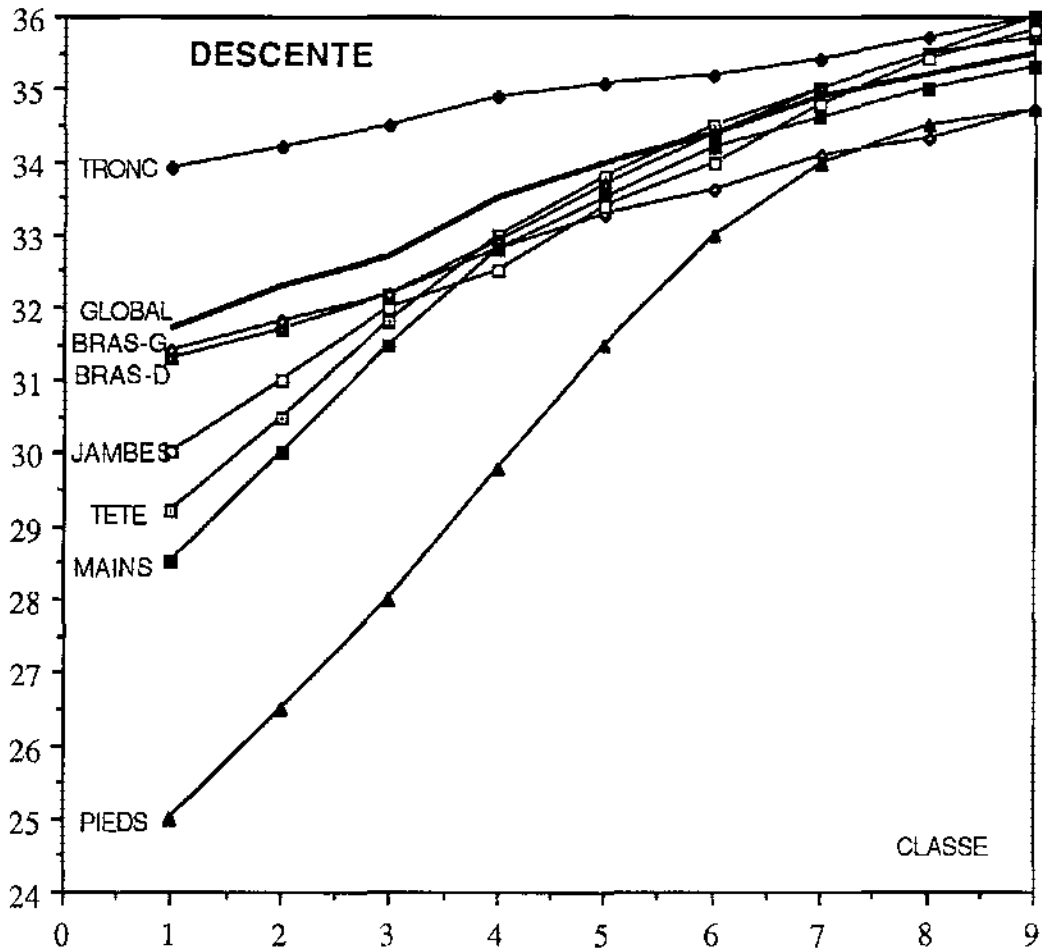
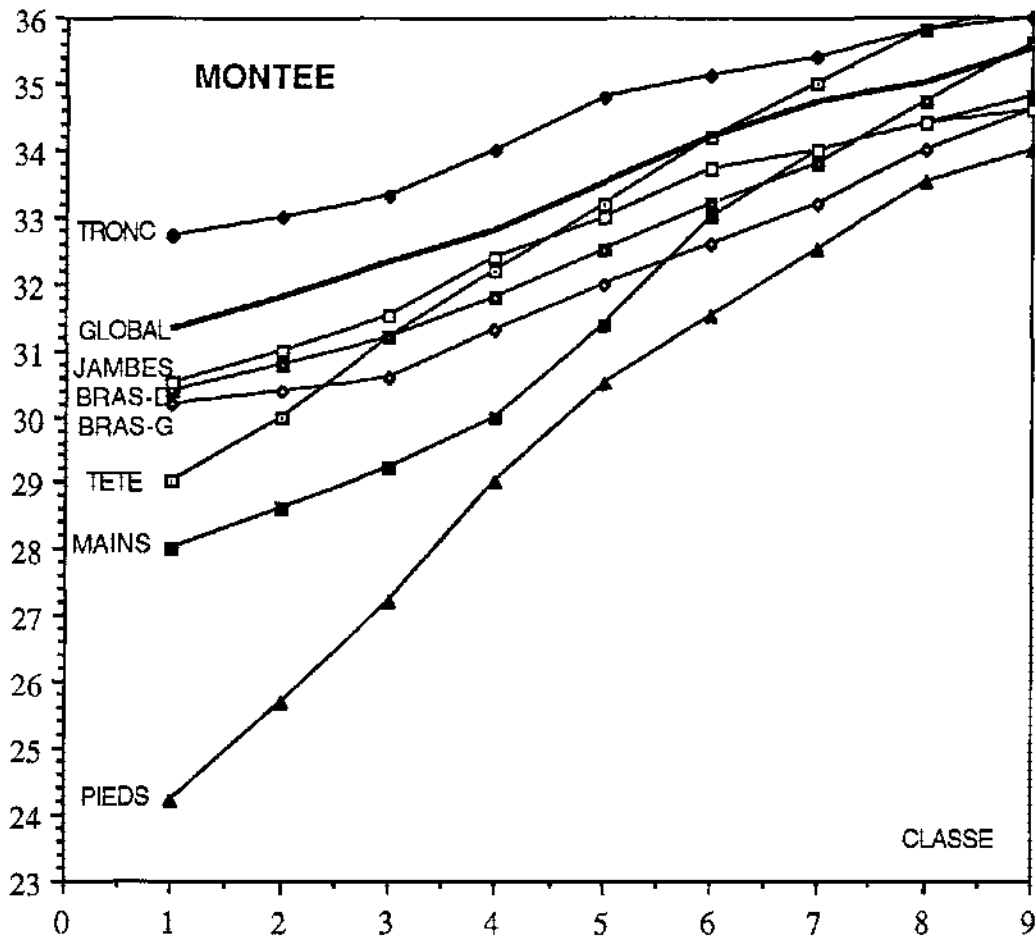
La dernière figure comporte les résultats pour le bras droit et le bras gauche (montée et descente). Pour la montée du bras gauche, nous avons porté les deux groupes de valeurs ("BG" et "BGsup", voir plus haut), et leur moyenne. Il semble clair que seule la courbe BG est cohérente avec les valeurs enregistrées pour le bras droit, avec les valeurs enregistrées à la descente et avec la remarque faite ci-dessus sur les écarts entre montée et descente. Nous décidons donc de prendre la courbe BG pour courbe moyenne et nous chercherons ultérieurement ce qui motive la courbe BGsup.

On peut remarquer l'absence de valeurs pour la classe 1. Nous avons donné arbitrairement des valeurs plausibles pour ces valeurs manquantes pour écrire les tableaux qui suivent les courbes.

Les deux dernières figures résument les courbes de variation de la sensation avec la température pour toutes les parties.







TABLEAUX

On pourra utiliser les tableaux suivants, dans les simulations, pour une première approximation. Au fur et à mesure que nous aurons dépouillé d'autres résultats expérimentaux, nous pourrons le modifier pour avoir une plus grande précision. Il sera peut être nécessaire de les dédoubler si on constate qu'un paramètre particulier entraîne un écart systématique. Par exemple, il semble que les expériences où les échanges par rayonnement sont importants se distinguent des autres. Ce fait reste à vérifier et, le cas échéant, à quantifier.

MONTÉE

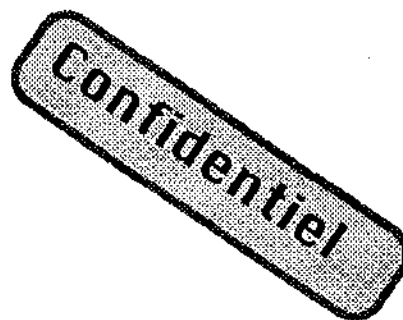
CLASSE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TETE	29,0	30,0	31,2	32,2	33,2	34,2	35,0	35,8	36,2
TRONC	32,7	33,0	33,3	34,0	34,8	35,1	35,4	35,8	36,0
BRAS D.	30,4	30,8	31,2	31,8	32,5	33,2	33,8	34,7	35,6
BRAS G.	30,2	30,4	30,6	31,3	32,0	32,5	33,2	34,0	34,6
MAINS	28,0	28,6	29,2	30,0	31,4	33,0	34,0	34,4	34,8
JAMBES	30,5	31,0	31,5	32,4	33,0	33,7	34,0	34,4	34,6
PIEDS	24,2	25,7	27,2	29,0	30,5	31,5	32,5	33,5	34,0
GLOBAL	31,3	31,8	32,3	32,8	33,5	34,2	34,7	35,0	35,5

DESCENTE

CLASSE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TETE	29,2	31,5	31,8	33,0	33,8	34,5	35,0	35,5	36,0
TRONC	33,9	34,2	34,5	34,9	35,1	35,2	35,4	35,7	36,0
BRAS D.	31,3	31,7	32,2	32,9	34,7	34,4	35,0	35,5	35,7
BRAS G.	31,4	31,8	32,2	32,8	33,3	33,6	34,1	34,3	34,7
MAINS	28,5	30,0	31,5	32,8	33,5	34,2	34,6	35,0	35,3
JAMBES	30,0	31,0	32,0	32,5	33,4	34,0	34,8	35,4	35,8
PIEDS	25,0	26,5	28,0	29,8	31,5	33,0	34,0	34,5	34,7
GLOBAL	31,9	32,3	32,7	33,5	34,0	34,4	34,9	35,2	35,5



Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"



Rapport N°5 : Février 1994

INTRODUCTION.....2

1ère Partie - Essais de Suède

I.	LES EXPERIENCES	3
II.	TABLEAUX RECAPITULATIFS.....	5
III	MESURE DU FLUX SOLAIRE TRANSMIS DANS LA VOITURE.....	9
IV.	SIMULATION DES ESSAIS DE SUEDE (TEMPERATURES).....	10

2ème Partie - Sensations thermiques

I.	LES ESSAIS D'AMELIORATION.....	13
II.	LE NOUVEAU TABLEAU "SENSATIONS/TEMPERATURES"	14
III.	VERIFICATION DU BIEN-FONDE DU NOUVEAU TABLEAU.....	21
IV.	SIMULATION DES ESSAIS DE SUEDE (SENSATIONS)	23

Annexe - fich PROFORMA

INTRODUCTION

Dans ce rapport, la première partie reprend la présentation des essais de Suède, qui avait été abordée lors de la dernière réunion de travail à Toulouse, caractérise l'ensoleillement réel en soufflerie et montre une simulation de la gamme PSA (essai 18) réalisée en Suède.

La deuxième partie , consacrée aux sensations, montre une nouvelle technique de calcul qui semble performante.

Une partie importante du travail effectué depuis le dernier rapport, en particulier sur la modification des transferts de chaleur et de masse dans les vêtements, a été rédigée, et se trouve donc dans le dossier de l'enveloppe SOLEAU, qui est constitué par une "fiche PROFORMA" remise à jour (donnée en annexe), ainsi qu'un listing.

Les modifications sur la représentation des vêtements ont été imposées par l'apparition de problèmes liés au manque de données sur les caractéristiques locales des vêtements. Les vêtements étant le lieu de tous les échanges avec le milieu environnant, il est important de déterminer avec exactitude leur température et leur humidité. En première approche les transferts de masse et de chaleur étaient calculés en régime permanent et découplés (cf. rapport n°1), puis la ventilation sous vestimentale a été ajoutée, les transferts de masse étant toujours représentés par des équations de régime permanent (cf.rapport n°4). Les dernières modifications prennent en compte non seulement la ventilation sous-vestimentale, mais aussi l'effet de tampon qui représente la faculté d'un tissu à absorber puis à désorber de l'eau. Ce phénomène n'est pas très important en conditions froides, mais le devient lorsque le sujet transpire beaucoup et que la pression de vapeur dans l'air est plus élevée. Dans ce nouveau modèle de vêtements il y a couplage entre transferts de chaleur et de masse, car les phénomènes de sorption d'humidité provoquent des dégagement de chaleur.

Un autre problème se pose alors. On a moins besoin des caractéristiques locales des vêtements , mais on a alors besoin des données sur le tissu et les fibres le composant. Ces données sont assez nombreuses mais pas toutes accessibles, il faut alors faire des hypothèses sur la composition exacte des habits portés par Francis.

La nouvelle version du logiciel comportant ces dernières modifications est encore en phase de développement et de validation, la plus grande partie des résultats présentés dans la suite du rapport ont été obtenus avec l'ancienne version du modèle vêtements.

1ère Partie - Essais de Suède

I. Les expériences

L'ensemble des quinze expériences (numérotées de 18 à 32) s'est bien déroulé, nous n'avons pas rencontré de problème majeur.

Pendant ces essais nous avons essayé de visualiser les effets de plusieurs paramètres : soleil, différents modes de soufflage, vitesses d'air dans l'habitacle, variations de condition climatique de l'habitacle plus ou moins brusques, influence des transferts radiatifs seuls puis des transferts convectifs seuls. De plus nous avons fait deux essais identiques à un jour d'intervalle et nous avons également effectué un essai identique aux essais 11 et 13 réalisés en mai à la soufflerie de La Verrière afin de comparer les deux souffleries.

(Les températures cutanées et les sensations expérimentales ont été remis lors de la réunion de novembre 1993)

* Le soleil :

Les lampes solaires n'étant pas à puissance variable, la variation d'intensité sur le véhicule est obtenue en faisant varier le nombre de lampes allumées. Cette méthode engendre une mauvaise repartition du flux solaire reçu par le véhicule aux faibles intensités.

Nous avons réalisé des expériences qui nous permettent d'évaluer l'importance du soleil sur les sensations et les températures cutanées de Francis, en fonction du climat à l'intérieur de l'habitacle.

- Essai 18 : Saut de soleil positif avec une ambiance chaude (pour garder la même température dans l'habitacle on a baissé la température de l'air soufflé) : Il n'y a aucune variation des sensations pour cette expérience alors que certaines températures cutanées mesurées ont augmenté de plusieurs degrés.

- Essai 19 : la même expérience a été réalisée mais dans une ambiance plus froide, lorsqu'on "allume le soleil" on passe assez rapidement de la sensation 2 à la sensation 3 ou 4

- Essai 20 : Saut de soleil négatif dans une ambiance froide, les sensations ont baissé après extinction des lampes.

- Essai 26 : on se met au voisinage de l'équilibre frais (sensation 4) puis on réchauffe l'habitacle en soufflant de l'air plus chaud et en allumant les lampes.

Ces essais montrent que l'on est plus sensible au soleil dans les ambiances froides que dans les ambiances chaudes. Les parties du corps qui sont au soleil réagissent très vite; ce sont le bras gauche, les cuisses, la partie gauche du tronc et parfois les mains. Lorsque les lampes solaires sont allumées la température du bras gauche augmente : pour un rayonnement de 1000 Watt / m^2 , on atteint une température cutanée mesurée de 38°C , ce qui est très élevé compte tenu de la présence du pull qui protège la peau de l'influence directe du soleil.

*** Répartition du soufflage d'air**

Afin d'estimer l'importance de la convection pour le calcul des températures cutanées et pour les sensations nous avons réalisé deux expériences, une où l'on fait varier la répartition de l'air soufflé (essai 23) et une autre où on fait varier la puissance du pulseur (essai 24)

- **Essai 23** : après la période d'équilibre on souffle de l'air frais à la tête, puis une deuxième période pour revenir à l'équilibre et on souffle de l'air frais aux pieds. On retrouve bien le type de répartition du soufflage dans les réponses en sensations et dans les mesures des températures cutanées de Francis.

- **Essai 24** : on augmente la vitesse d'air tout en essayant de garder la même température d'air dans l'habitacle (18°C). L'air relativement frais, qui est soufflé avec une vitesse de plus en plus grande, provoque une baisse des températures cutanées et une diminution des sensations.

Ces deux essais nous montrent l'importance de la convection et nous permet de vérifier notre modèle dans des conditions hétérogènes mais restant au voisinage des conditions de confort thermique.

*** Echanges par rayonnement infra-rouge**

Nous avons essayé de faire varier les températures de surfaces tout en gardant la température de l'air ambiant constante afin de mettre en évidence les transferts de flux radiatifs.

- **Essai 27** : Echanges par rayonnement infra-rouge croissants; on garde une température d'habitacle constante à 27°C et on fait varier la température de la veine de 5°C à -18°C . On enregistre une variation des températures de surfaces uniquement sur les parties vitrées de la voiture. On remarque une faible variation des températures cutanées; par contre, il n'y a aucune variation des sensations.

- **Essai 30** : Echanges par rayonnement infra-rouge décroissants; c'est la même expérience que la 27 mais en sens inverse. Le constat est le même : il n'y a qu'une faible variation des températures cutanées (0.5°C) et aucune variation des sensations.

*** Echanges convectifs**

On fait varier la température de l'air soufflé en gardant la température de la veine constante pour caractériser les échanges convectifs.

- **Essai 31** : la température de la veine reste constante, afin d'avoir peu de variation de température de paroi, la température de l'habitacle décroît de 22°C à 12°C . Les températures cutanées baissent de 1.5°C à 2°C et les sensations passent de 5 à 3 ou 2.

- Essai 32 : on fait la même expérience que pour l'essai 31 avec une température d'habitable croissante qui passe de 20°C à 35°C. Les températures cutanées augmentent de l'ordre de 2°C et les sensations passent de 5 à 8.

Lorsqu'on regarde les variations des températures de surface, on se rend compte qu'elles dépendent plus de la température d'air soufflé que des variations de température de la veine. Lors de ces essais, toutes les surfaces telles que : intérieur de porte console et tableau de bord ont une température de surface qui varie de plus de 10°C. Il est donc difficile de déterminer la part entre les flux radiatifs et les flux convectifs.

*** Grandes amplitudes de variations climatiques**

Nous avons réalisé des essais en vue de faire le tableau de sensations avec des variations brusques et des essais où on couvre l'ensemble des sensations.

- Essai 21 : on a réalisé un essai identique aux essais 11 et 13 des expériences de novembre 1993 à la Verrière, pour être sûr que l'on obtient les mêmes résultats.

- Essai 22: on réalise des sauts de température d'air soufflé, d'abord chaud puis froid.

- Essai 25 - 29 : ces deux essais sont identiques, ils ont été réalisés à un jour d'intervalle à la même heure. La différence entre les températures cutanées ne dépasse pas 2°C, les sensations, elles aussi, restent très voisines.

*** Essai PSA essai N°28**

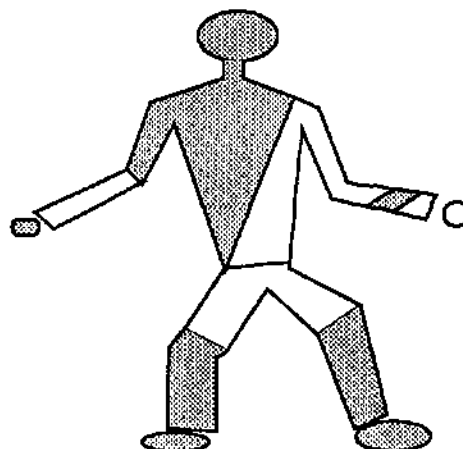
L'essai 28 correspond à un test de qualification de la gamme PSA, les amplitudes de variations sont grandes, puisque la totalité de la gamme de sensation a été couverte.

II Tableaux Récapitulatifs

Sur les trois pages suivantes, des tableaux récapitulatifs, donnent les conditions expérimentales réalisées en Suède durant les quatre jours; il faut noter que, contrairement aux expériences faites jusqu'à maintenant, les durées sont de deux heures et sont alors séparées en 4 phases au lieu de 3 habituellement

III. Mesures du flux solaire transmis dans la voiture

Mesures effectuées en Suède en octobre 1993. Sur le dessin ci-contre les parties blanches correspondent aux surfaces ensoleillées.



Pour les différentes valeurs des puissances solaires affichées nous avons mesuré les densités de flux sur la voiture et sur le conducteur. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un pyranomètre

	<i>milieu pavi</i>	<i>côté D, AR</i>	<i>côté D, AV</i>	<i>côté G, AV</i>	<i>côté G, AR</i>	<i>Pare brise</i>	<i>intérieur, Volant</i>	<i>intérieur, Pla.de.bo</i>
500	670	545	350	569	370	575	187	252
750	683	626	423	651	488	838	350	375
1000	862	1278	822	928	830	1041	447	496

Densité de flux enregistrées sur la voiture (en Watts / m²)

On peut constater une grande hétérogénéité spatiale et le manque de proportionnalité entre les puissances affichées et mesurées en un même lieu. Ceci est probablement dû à la méthode de variation de la puissance (extinction de lampes).

	<i>ventre</i>	<i>épaule g</i>	<i>bras d</i>	<i>bras g</i>	<i>main d</i>	<i>main g</i>	<i>cuisse d</i>	<i>cuisse g</i>
500	172,5	187	123	163	172	203	122	122
750	155	219	122	227	276	249	227	200
1000	150	284	244	236	333	333	301	288

Densité de flux enregistrées sur le conducteur (en Watts / m²)

Les flux enregistrés à l'intérieur de la voiture sont bien inférieurs à ceux obtenus à l'extérieur. Cela est dû à l'absorption du rayonnement visible (vitres teintées) et probablement à une réflexion sur les vitres (les rayons lumineux ne viennent pas d'une source à l'infini).

III SIMULATION DES ESSAIS DE SUEDE

Nous avons réalisé l'ensemble des simulations des expériences de Suède. Nous présentons, à la page suivante, un tableau récapitulatif de la différence entre les températures simulées et les températures expérimentales.

On constate une grande différence entre les températures cutanées du tronc, simulées et expérimentales. En regardant les températures expérimentales on s'est rendu compte que pour l'ensemble des expériences, les trois températures relevées sur le tronc sont toutes comprises entre 35 et 36°C ce qui est très élevé. De plus ces températures varient très peu au cours des diverses expériences.

Les simulations que nous avons effectuées ne tiennent pas compte du soleil. Les écarts importants sur la température du bras gauche dans les expériences 18, 19, 20, 26, 25 et 29 nous montrent l'importance du flux solaire pour les parties concernées; ces différences peuvent aller jusqu'à 5°C. La prise en compte des flux solaires dans notre modèle devrait atténuer cette différence.

Essai 28

Nous avons choisi de présenter uniquement les résultats de l'essai 28, qui fait partie de la gamme PSA.

La comparaison entre les températures simulées et les températures cutanées est présentée page 12. Pour modéliser cette expérience nous avons pris comme demi-heure de mise à l'équilibre la période où Francis était à l'extérieur de la voiture avant le début de l'expérience.

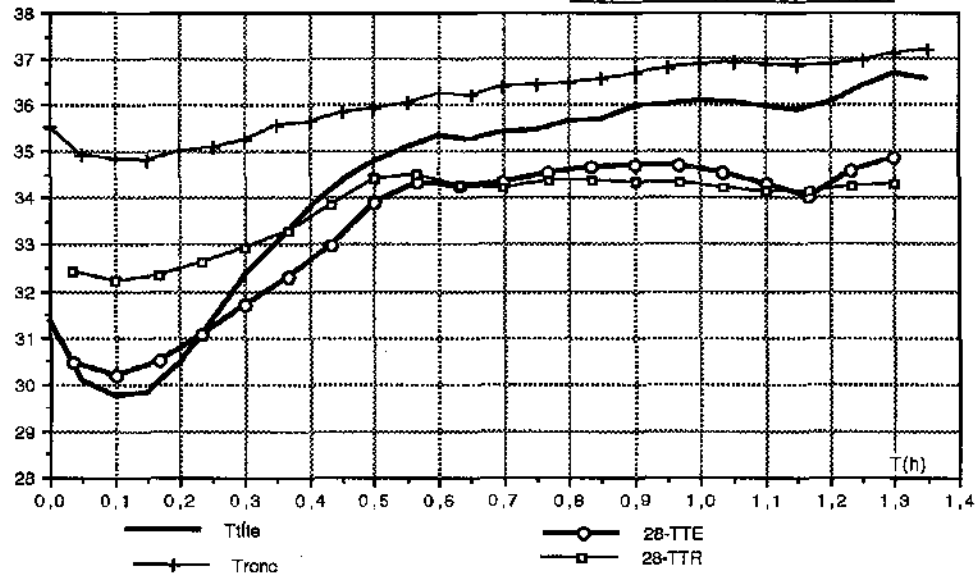
L'erreur la plus importante concerne la température cutanée du tronc; cette différence est due à la valeur élevée des trois températures expérimentales du tronc. Pour une sensation de 1, nous avons une température de 35°C (expérimentalement) alors que pour d'autres essais, en mai 93 par exemple, nous avons une sensation 1 du tronc pour une température de l'ordre de 33°C.

DIFFERENCES ENTRE LES TEMPERATURES SIMULEES ET LES TEMPERATURES DE L'EXPERIENCE

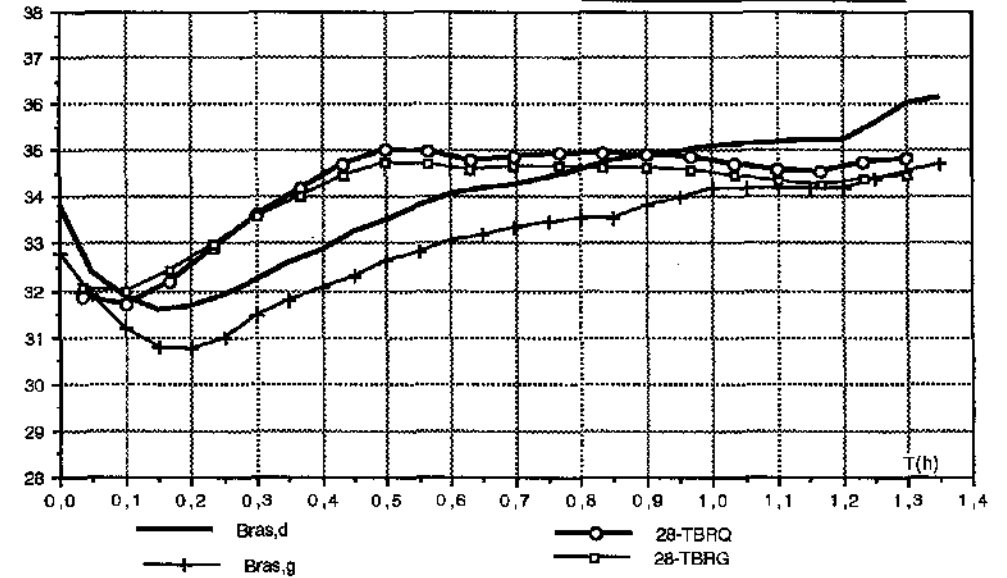
(Températures simulées moins températures expérimentales)

	tête	tronc	bras,d	bras,g	mains	jambes	pieds	global
Essai 18	0 0,6	-2 -1,2	-0,5 0	-3 -1	-4 -2 -0,5	0 0,5 0,8	-1 0 0,3	-1 -0,5 0
Essai 19	0,5 2,5 2	-2 -1	-0,5 -1 -1	-0,3 1 0 -3	0 2 1	2 2	-1 0 2	-0,3 -0,5
Essai 20	0 0,5	-2 -1	0 0,3	-5 0 -3	-1 0 +1	1 2,5	4 2	-0,5 0,4
Essai 21	0,3 -0,5	-1 0	0,2 2 2	0,2 2 2	-2 0 -2	1,3 3 3	1 2 0,5	0 1 1
Essai 22	0 -1 0 2	-1,5-1 -1,5	0 0,5 -1 1	0 1 0 0	-3 0 0	1 1,5 2	2 0 1,5	0 0 1
Essai 23	0,5 0 -0,5	-2 -1 -0,5	-0,5 0 1	-0,5 0 1	3 2,5 2	0,5 1 2	3 3 2 3	-0,5 0 0,5
Essai 24	-0,5 0 0	-2,5 -1 -0,5	1 1,5 2	0,5 0,5	-2 -1,5 0	1 1,5 2,5	4 3 2,5	-1,5 -1,5 -1
Essai 25	-0,5 -0,5 0	-2 -1,5 -1,5	-1,5 -2 -1	-2 -2 -1	-2,5 -2 -1	-1,5 -0,5 0	-3 -1 -3	-1,5 -1,5 -1
Essai 26	0 0 0	-1,5 -1 -0,5	0 1 0,5	0 1 0 -1	-1,5-2-1,5	1 0,5 0,5	-1 -1,5 0 1	-1 0 -0,5
Essai 27	0 0 0	-1,5 -1 -1	0 0 0	-0,5 0 0,5	-1,5 0 0	0 0,5 1	-1 -0,5 0	-1 -0,5 0
Essai 28	0 -1,5 -1	-1,5 -2 -3	1 2 3 0,5	1 2 1 -0,5	0 -2 -5 -4	4 2 0 -0,5	1 2 3 3	1 0 0 -1
Essai 29	-1 -1,5 -1	-1 -1,5 -1	-2 -2,5 -2	-2,5 -2-2,5	-3,5 -1,5 -1	-0,5 -1 0	-2,5 -1 -3	-1 -1,5 -1
Essai 30	-1 -0,5	-1,5 -1 -0,5	-1 -0,5 -1	-1,5 -0,5 -1	-2 -1 0	0,5 1 1	-1,5 -1 0	-1,5 0 0
Essai 31	-1 0 0,5	-2 -1 -0,5	-1,5 -1 0	-1,5 -1 -0,5	-3 -2,5 -2	0 0 0	-2,5 -3 -3	-1 -1 -0,5
Essai 32	-1 -1	-2 -1,5 -1	-1 -0,5 -1	-0,5 0 -0,5	-4 -2,5 -1	0 1 1	-1 -1,5 0	-1 -0,5 -0,5

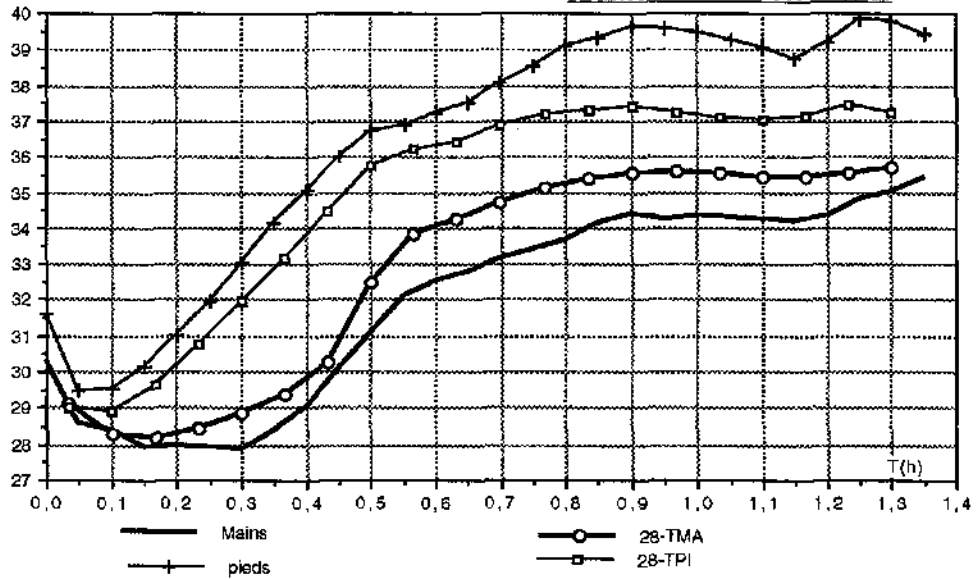
Données de "CR-Tsk-28"



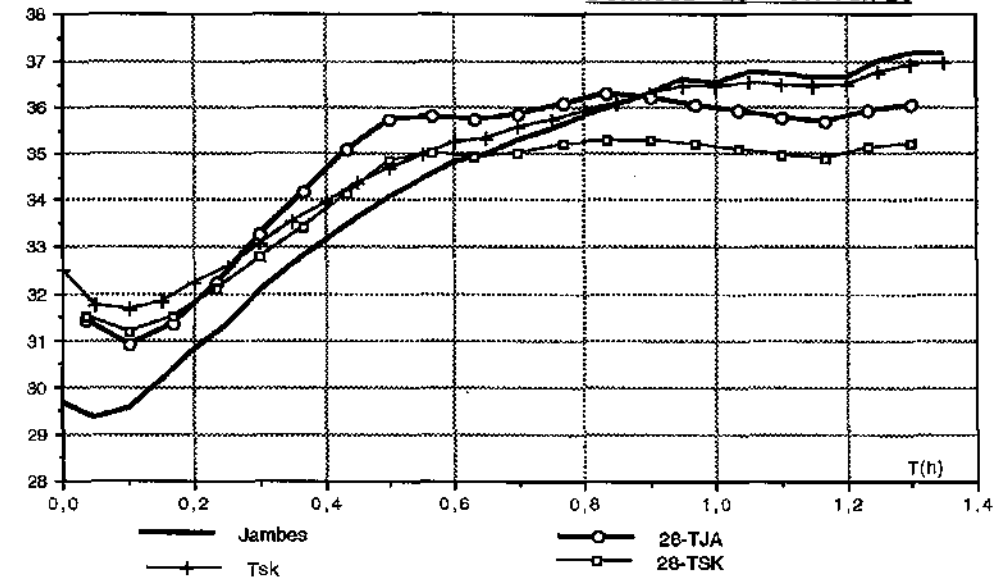
Données de "CR-Tsk-28"



Données de "CR-Tsk-28"



Données de "CR-Tsk-28"



2ème Partie - Sensations thermiques

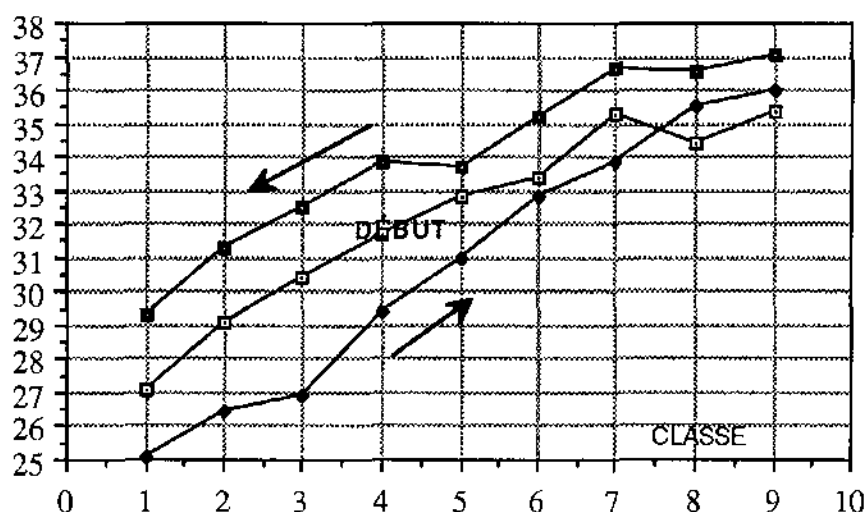
I. LES ESSAIS D'AMÉLIORATION

La comparaison des résultats expérimentaux et calculés à partir des tableaux "Montée" et "Descente" établis précédemment montre des écarts importants, pouvant atteindre 4 points. Ces écarts peuvent provenir d'une erreur sur les températures de peau calculées par MATHER ou d'une mauvaise adéquation du tableau Température de peau/Sensation que nous avons établi expérimentalement avec les résultats de Mai.

Un tableau expérimental établi à partir de la totalité des expériences de Mai et de Suède risquait de donner des résultats voisins, puisque les expériences similaires de ces deux séries d'expériences donnaient des résultats comparables. Nous avons donc cherché une autre approche plus performante.

La première tentative consistait à séparer les différents types d'essais : essais avec prépondérance de la convection, du rayonnement, du soleil ou tout mélangé. Cette approche, suggérée par l'interprétation des expériences de Mai, n'a rien donné.

Puis, nous avons tenu compte du fait que la séparation Montée-Descente ne semblait pas s'appliquer pour la première partie de l'essai, pour laquelle il paraissait nécessaire de créer un troisième tableau intermédiaire, valable aussi bien en montée qu'en descente. La figure ci-dessous donne la relation moyenne, pour les mains, établie à partir de toutes les expériences disponibles.

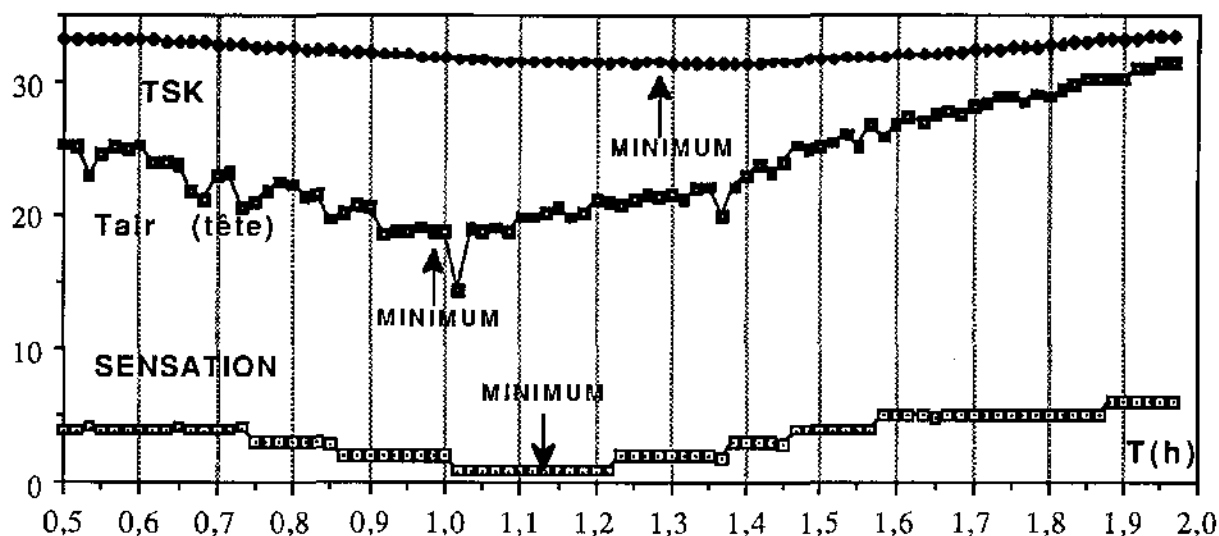


Mise à part l'anomalie constatée pour la classe 8 de la courbe marquée "DÉBUT", on constate bien que la première variation après la période de stabilisation, que ce soit en montée (de 5 à 9) ou en descente (de 5 à 1) appartiennent à une seule et même courbe intermédiaire entre Montée et Descente. Les résultats d'une généralisation de cette approche n'ont pas été à la hauteur de nos espoirs : nous avons dû abandonner cette méthode qui, d'ailleurs, compliquait passablement le problème.

Une troisième tentative nous a été suggérée par la constatation que lors de la période de stabilisation, les températures de peau pouvaient différer de 1 ou 2 degrés d'une expérience à l'autre,

alors que la sensation exprimée était toujours la même (5). Nous avons alors essayé de tenir compte de ce décalage à l'origine en augmentant ou diminuant systématiquement les températures mesurées. Cette tentative s'est soldée par un échec.

Les réflexions induites par ces différents essais ont toutefois été utiles et nous ont amenés à prendre en compte un autre paramètre, que beaucoup soupçonnaient de jouer un rôle important sans l'avoir jamais étudié réellement, la température de l'air inhalé. Cette influence apparaît aussi sur la courbe ci-dessous (expérience 21) où on voit que le minimum des sensations est bien situé entre le minimum des températures de peau (ici, température moyenne de peau) et la température de l'air au niveau de la tête.

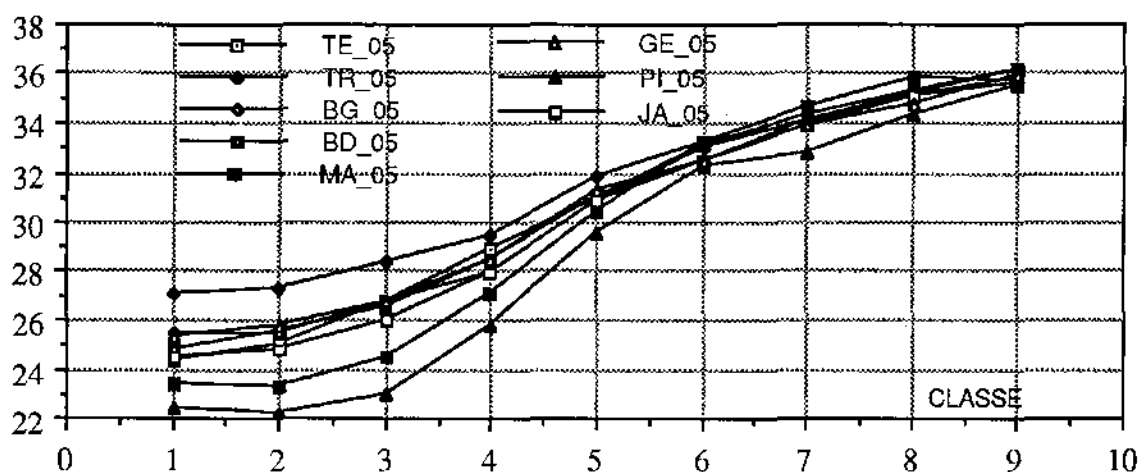


II LE NOUVEAU TABLEAU "SENSATIONS/TEMPÉRATURES"

Nous avons alors établi un nouveau tableau de relations entre les sensations ressenties par Francis et la moyenne entre la température de peau de chaque partie du corps et la température de l'air au niveau de la tête. Pour cela, nous avons utilisé toutes les expériences de Suède (excepté l'essai 28, qui est une gamme de qualification et ne doit donc pas servir à établir le modèle). Le tableau ci dessous donne donc les relations $S = f((T_{sk} + T_{tête})/2)$, avec les bornes extrêmes des intervalles de variation (20 et 39 °C)

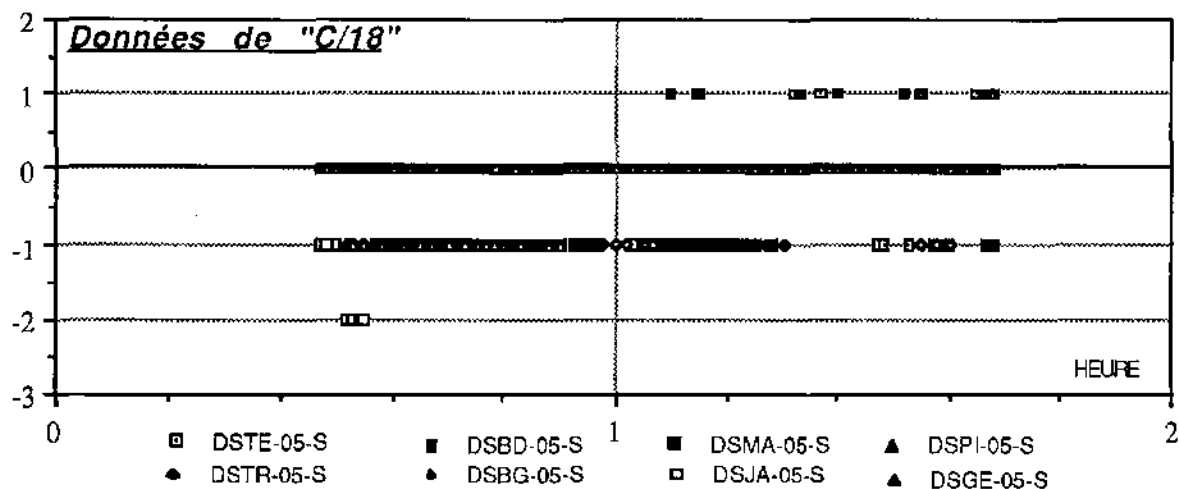
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
TETE	20	24.4	25.0	26.7	29.0	31.0	33.1	34.3	35.2	36.2	39
TRONC	20	27.0	27.3	28.4	29.5	31.8	33.2	34.0	35.2	36.2	39
BRAS D	20	24.8	25.5	26.6	28.4	31.1	32.5	34.1	35.1	35.9	39
BRAS G	20	25.5	25.9	26.2	27.9	30.9	33.1	34.1	35.1	36.1	39
MAINS	20	23.3	24.0	25.3	27.1	30.4	33.3	34.6	35.7	35.9	39
JAMBE	20	24.5	24.9	26.0	28.0	30.1	32.5	33.9	35.1	35.7	39
PIEDS	20	22.2	22.4	23.6	25.7	29.6	32.2	32.8	34.4	35.5	39
GLOBAL	20	25.3	25.8	26.8	28.5	31.2	32.5	33.9	34.7	35.9	39

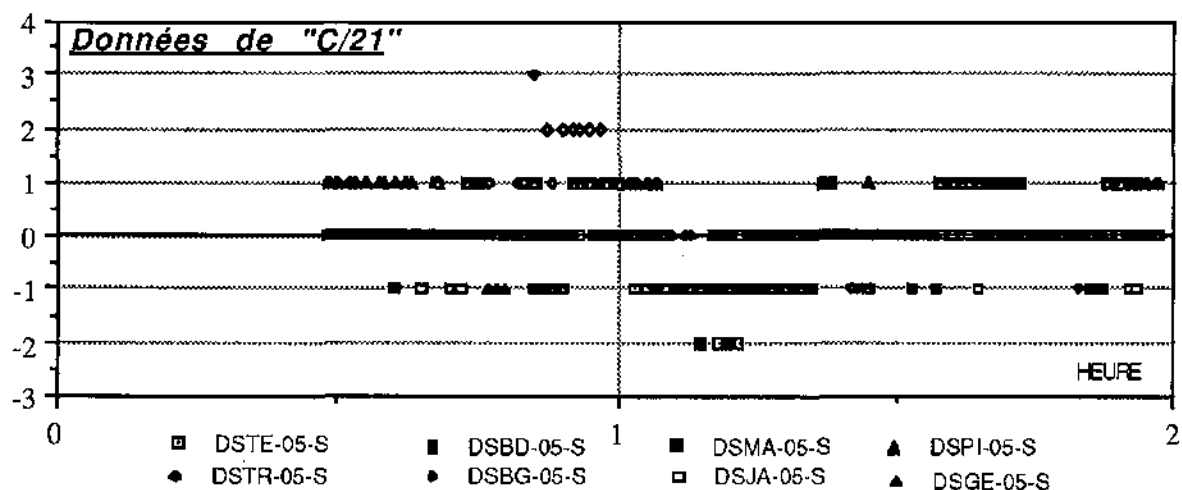
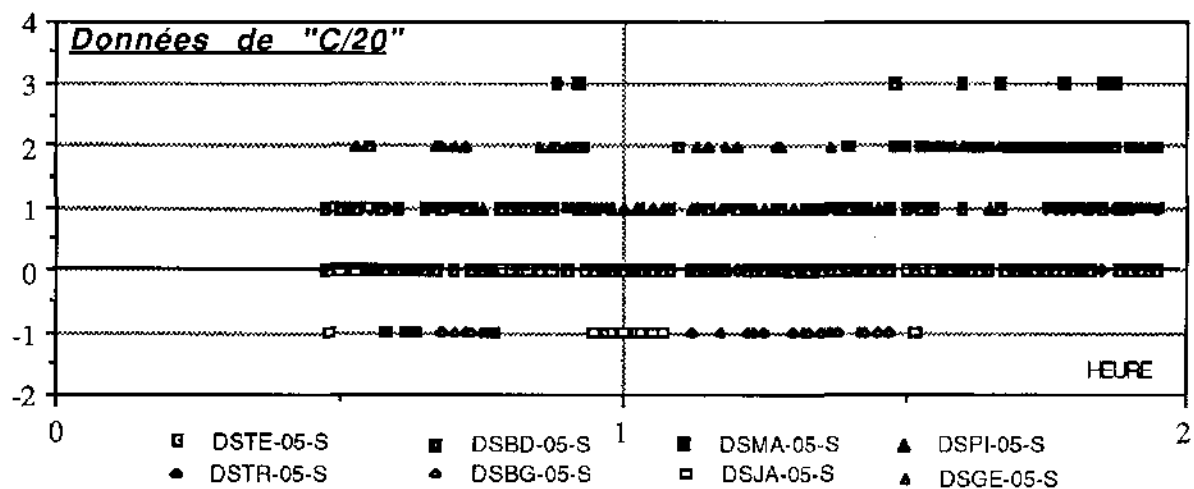
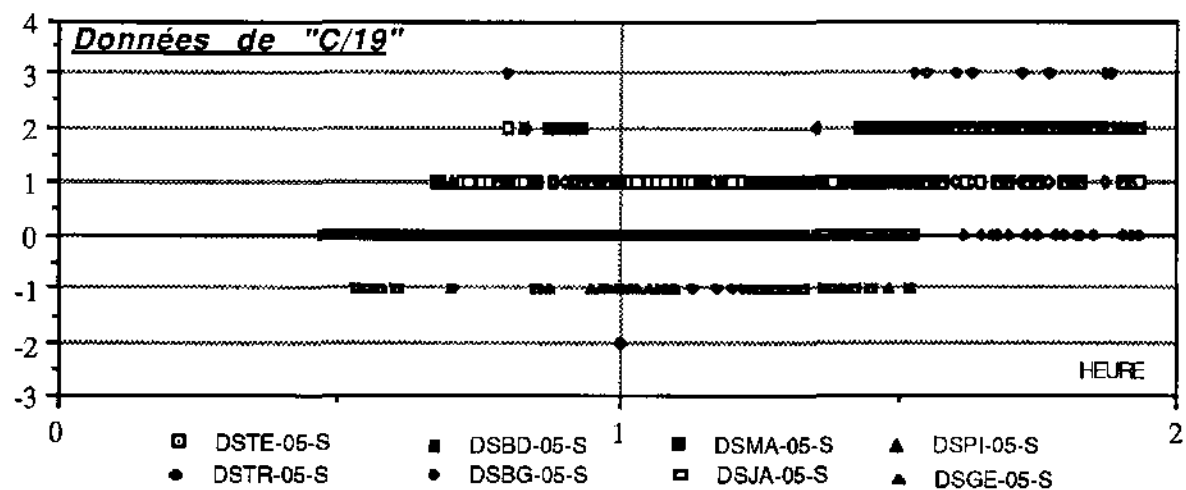
On en tire les courbes suivantes:

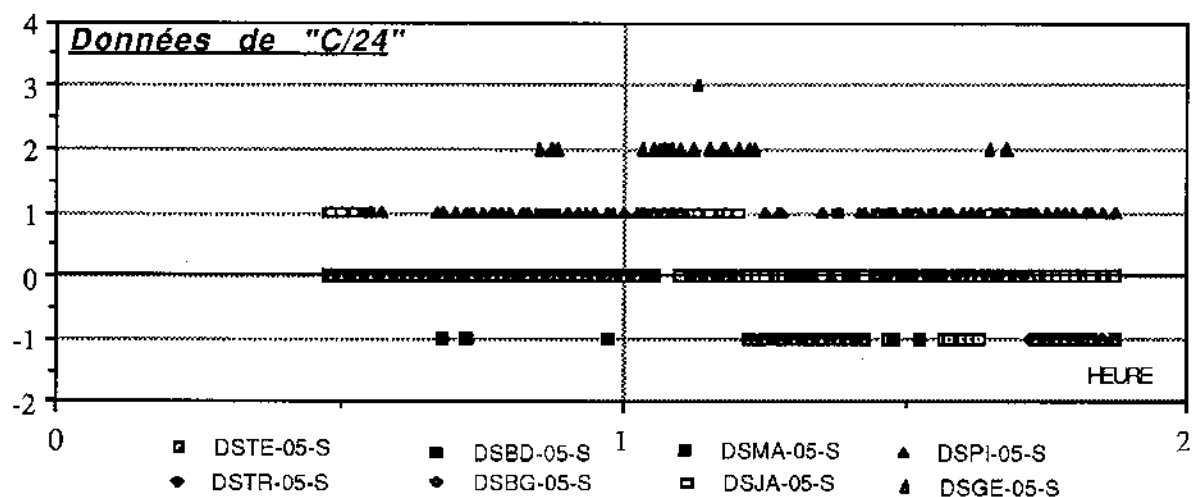
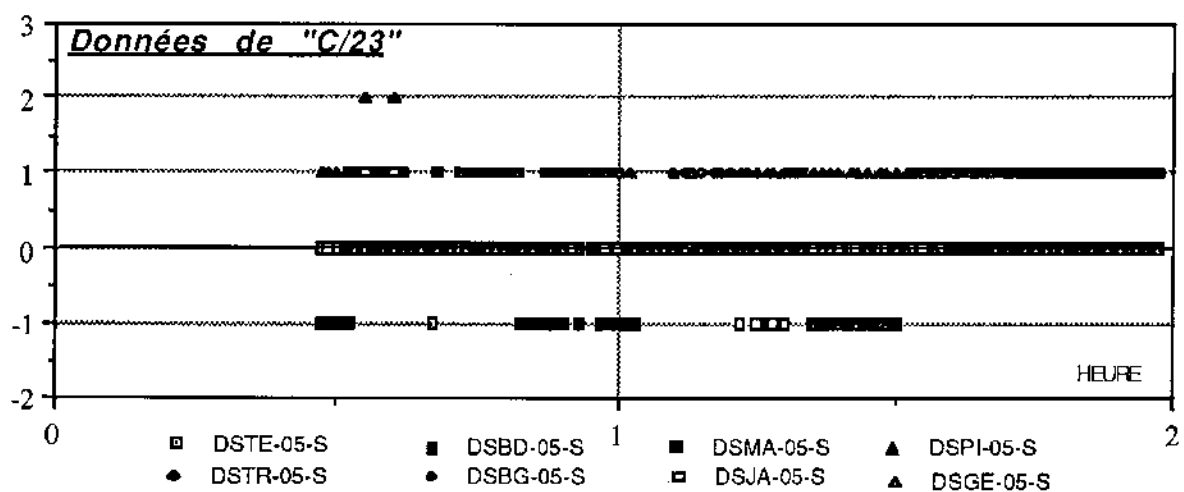
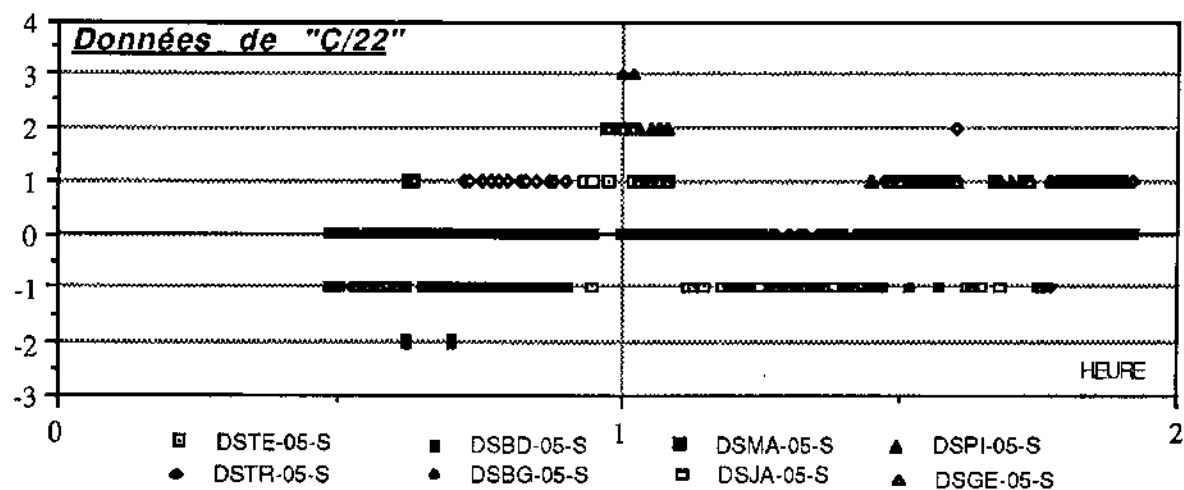


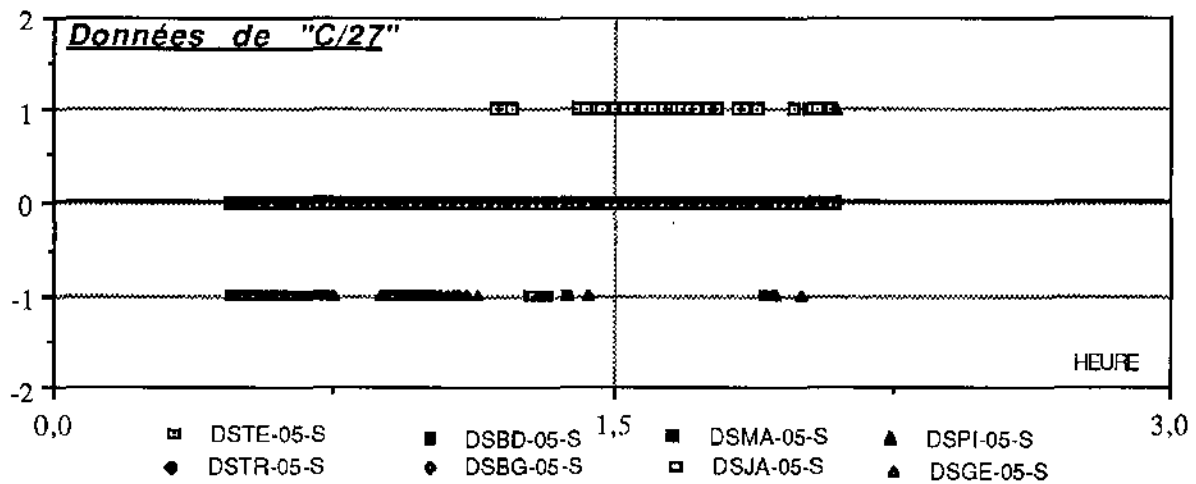
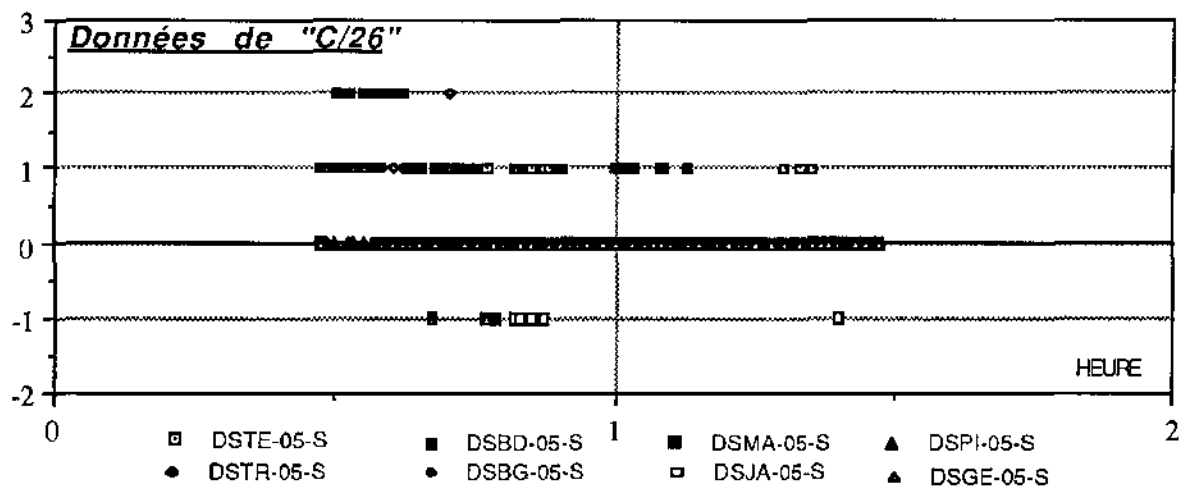
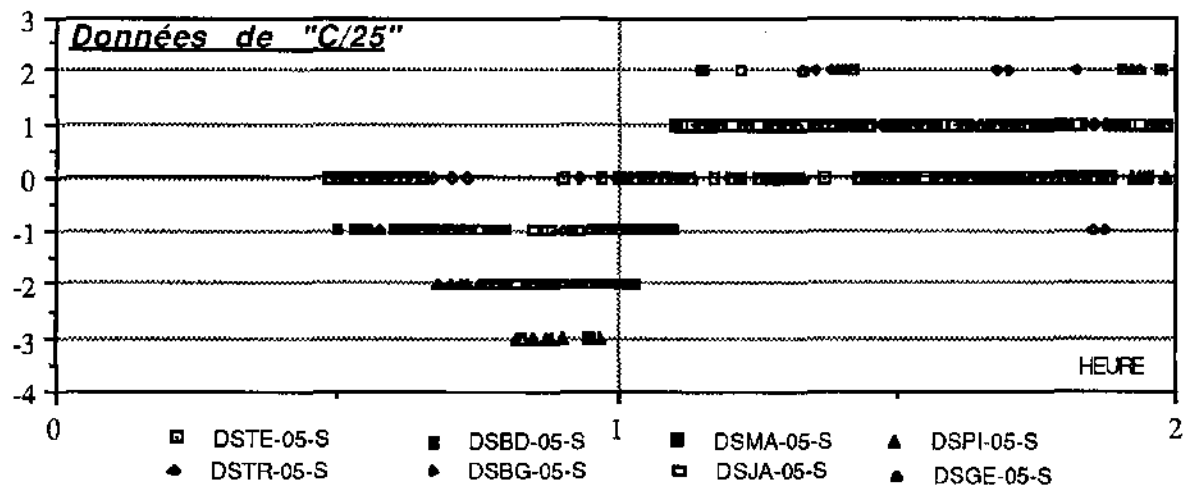
Pour vérifier la pertinence de ce tableau, nous avons comparé, pour toutes les expériences de Suède (excepté l'essai 28), la sensation mesurée et la sensation calculée avec ce tableau à partir des températures de peau mesurées. On a porté sur les figures suivantes les différences entre ces deux valeurs, pour toutes les parties du corps et pour toutes les expériences (excepté l'essai 28).

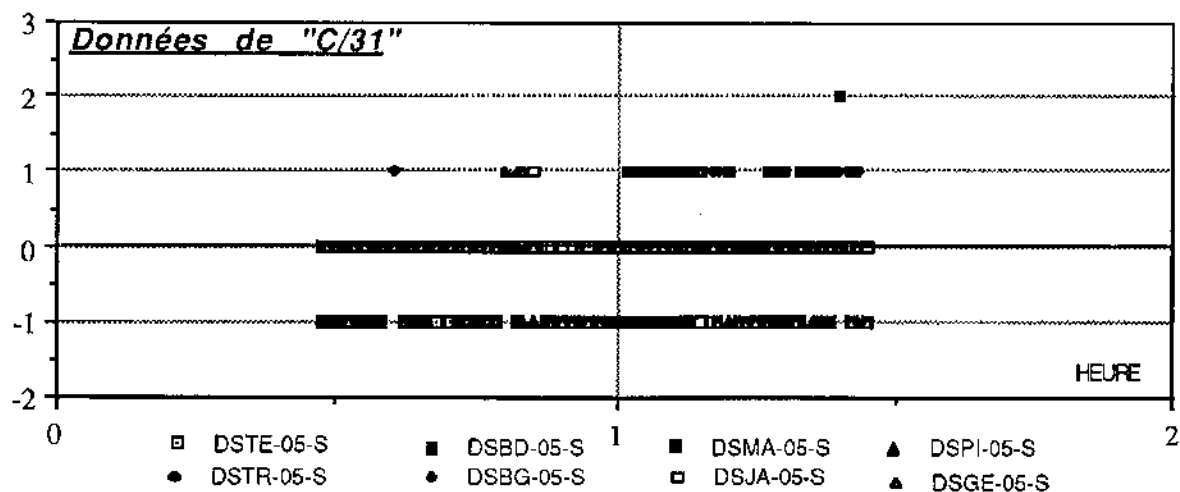
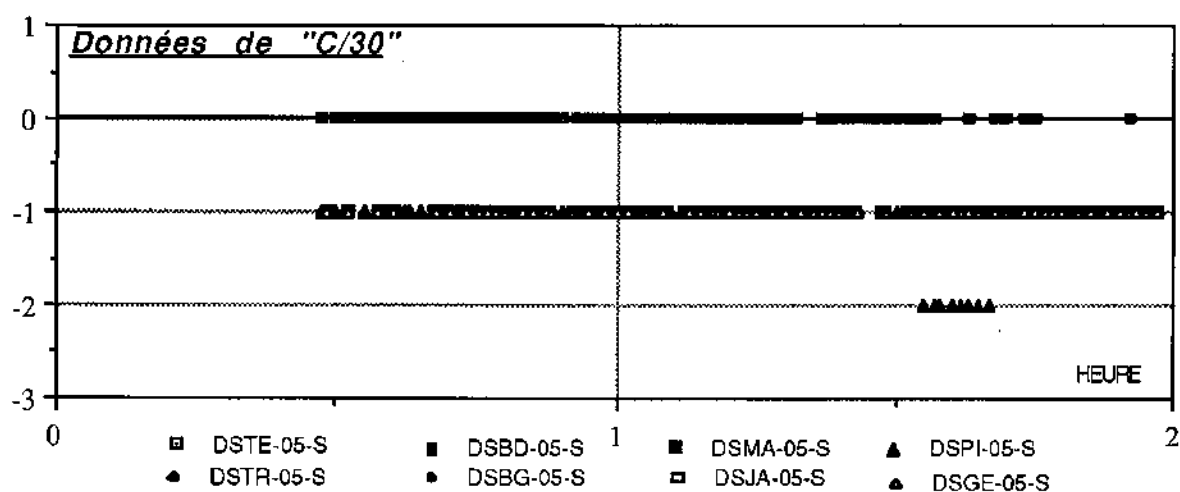
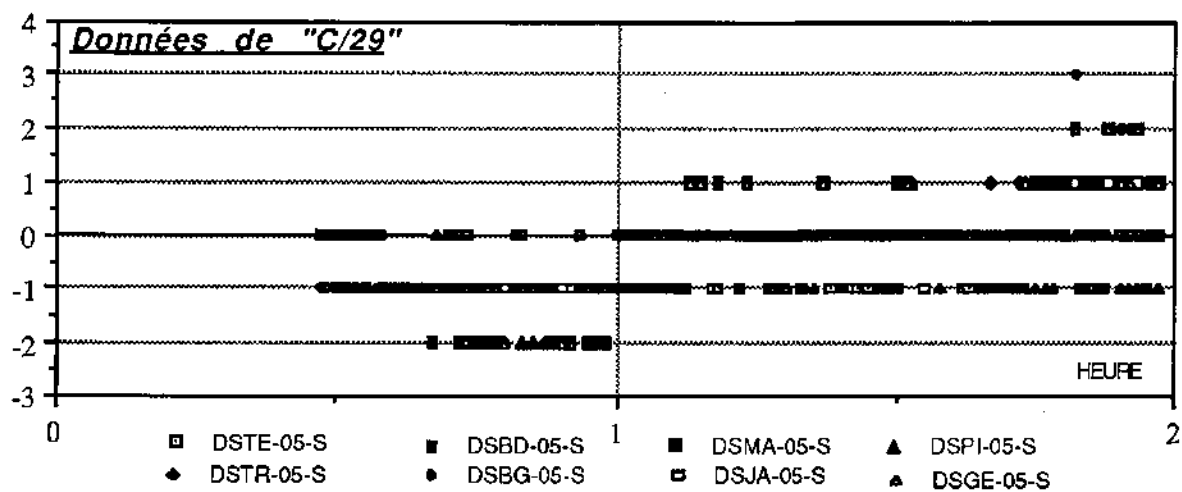
Les points se répartissent généralement entre -1 et +1 ; l'écart atteint plus rarement 2 ou -2, surtout pour les parties du corps dont les températures ont toujours posé des problèmes : mains, bras gauche en présence de soleil, par exemple.

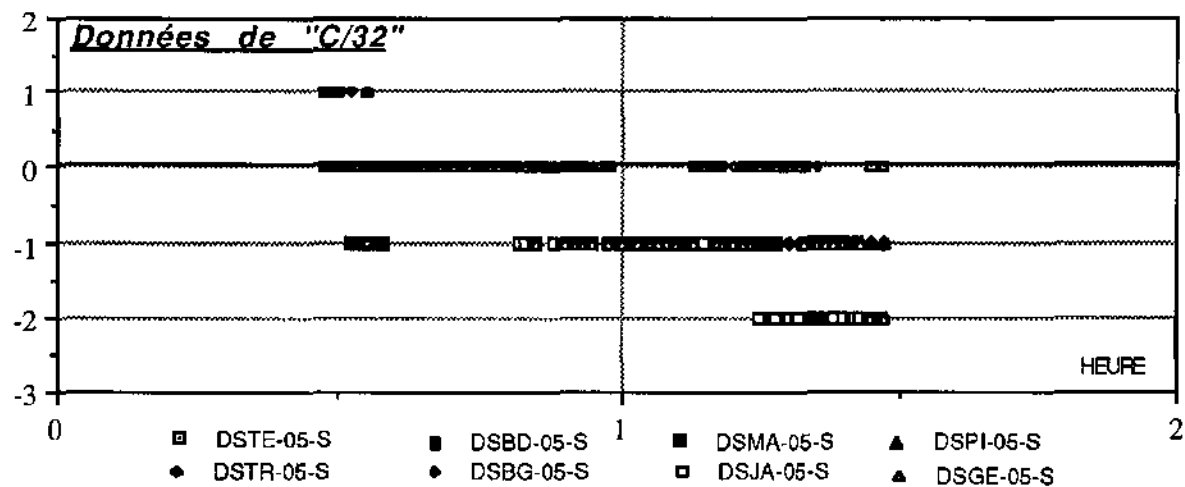






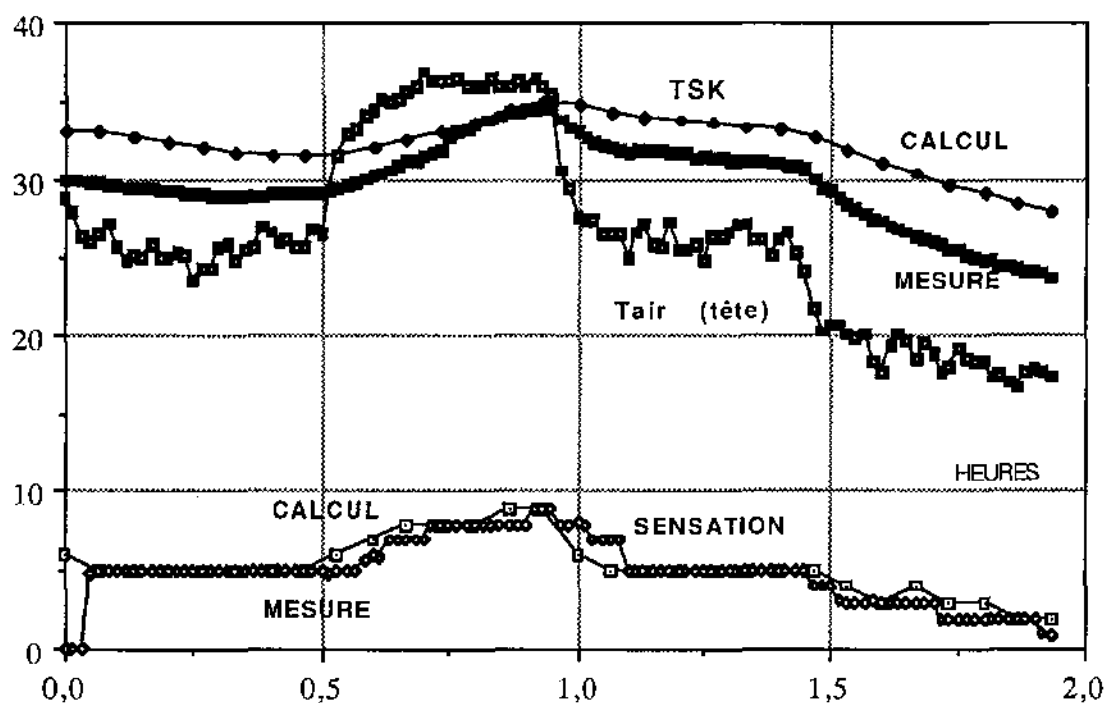


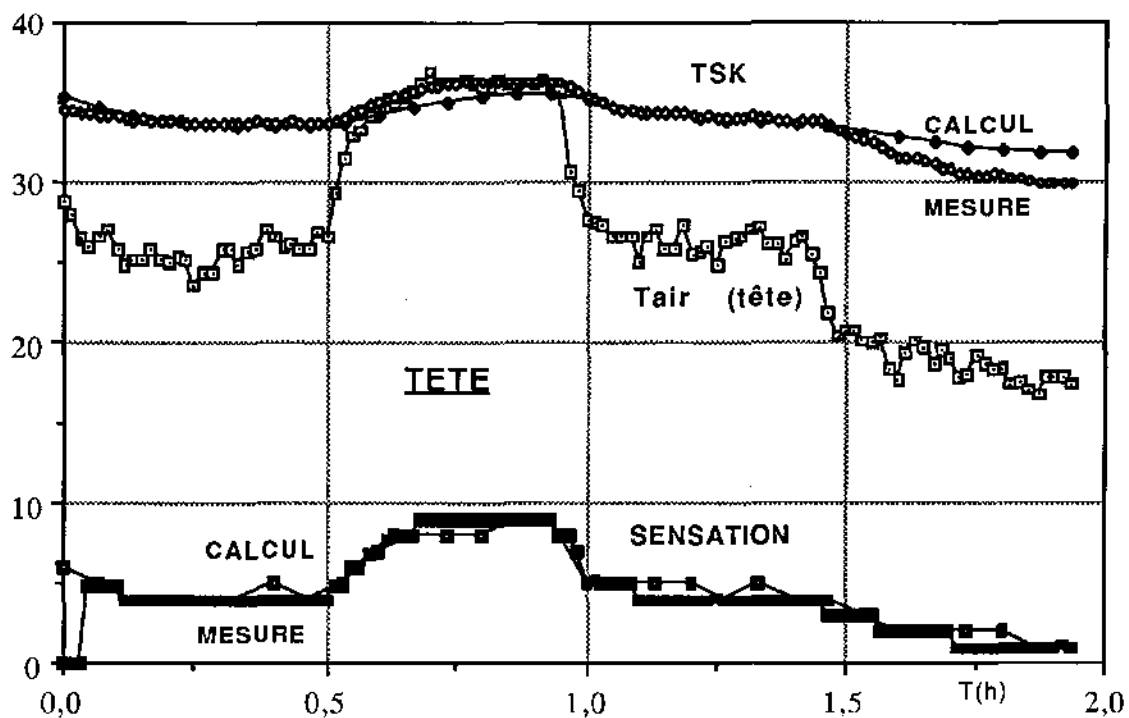




III VÉRIFICATIONS DU BIEN-FONDÉ DU NOUVEAU TABLEAU

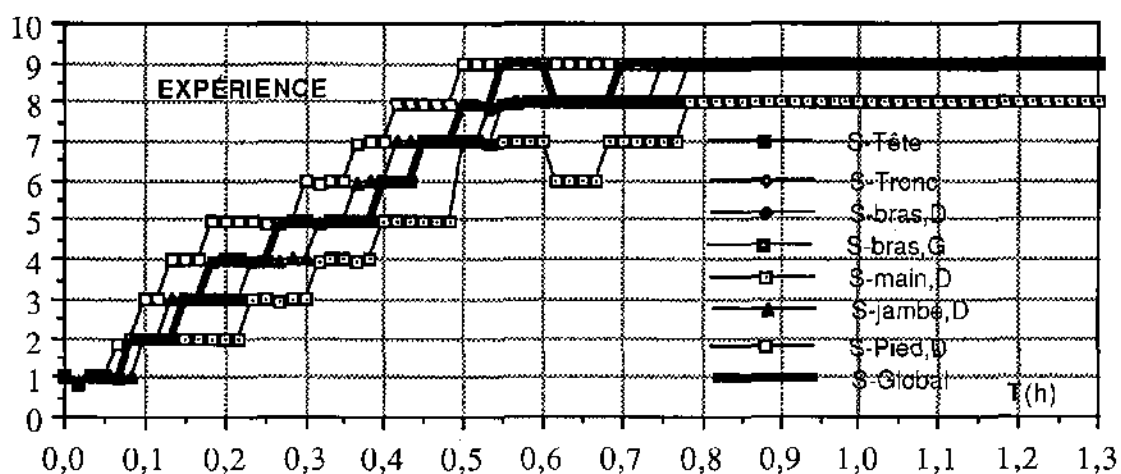
Nous devons vérifier que la sensation ressentie est bien liée à une moyenne entre les températures de peau et la température de l'air au niveau de la tête. Pour cela, nous avons effectué une simulation sur l'essai 22, où la température de l'air subit des variations brutales. Nous portons sur les deux figures suivantes les résultats pour deux parties du corps : la tête et les pieds. Sur chaque figure, nous avons porté : la température de peau TSK, calculée et mesurée, la température d'air, et les sensations, mesurées et calculées..

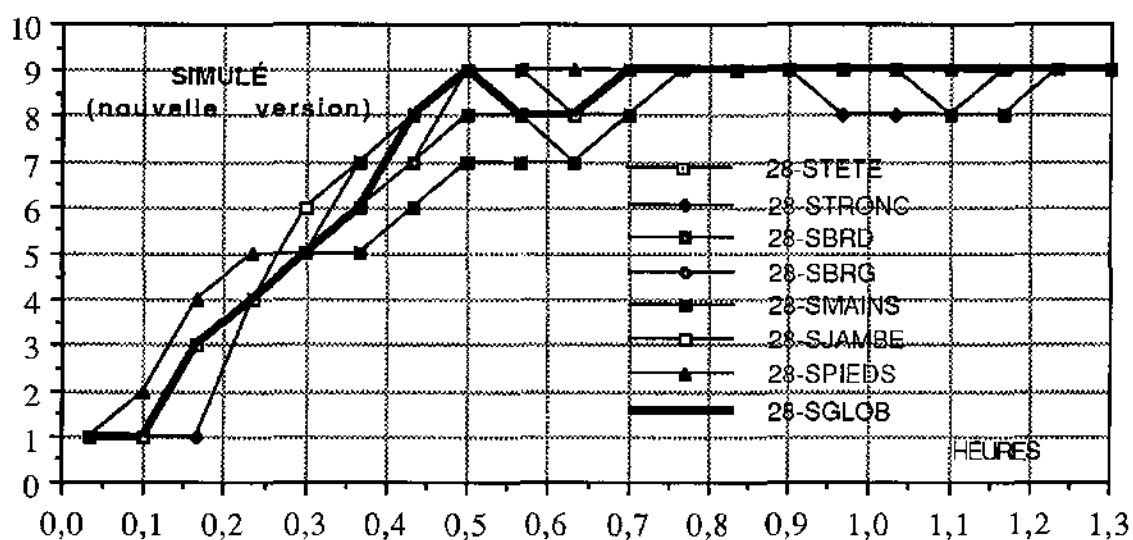
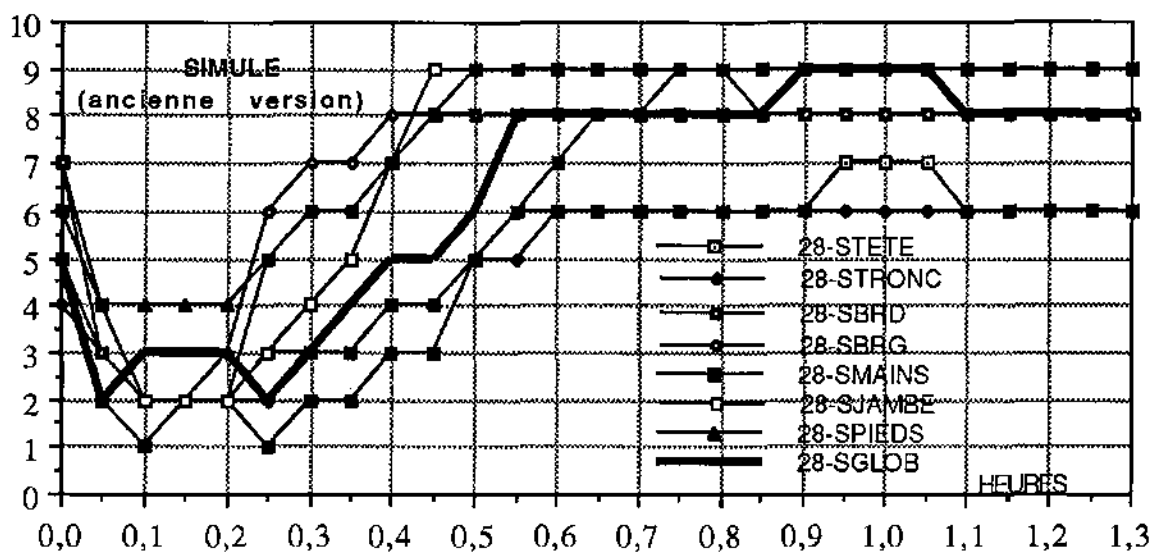




On peut voir sur ces courbes que la sensation est bien représentée par une combinaison des températures de peau et d'air au niveau de la tête. Il faudrait évidemment chercher les proportions la plus pertinentes, mais il est fort probable que cela dépendra du type d'expérience. Aussi, nous nous sommes contentés de prendre la moyenne arithmétique.

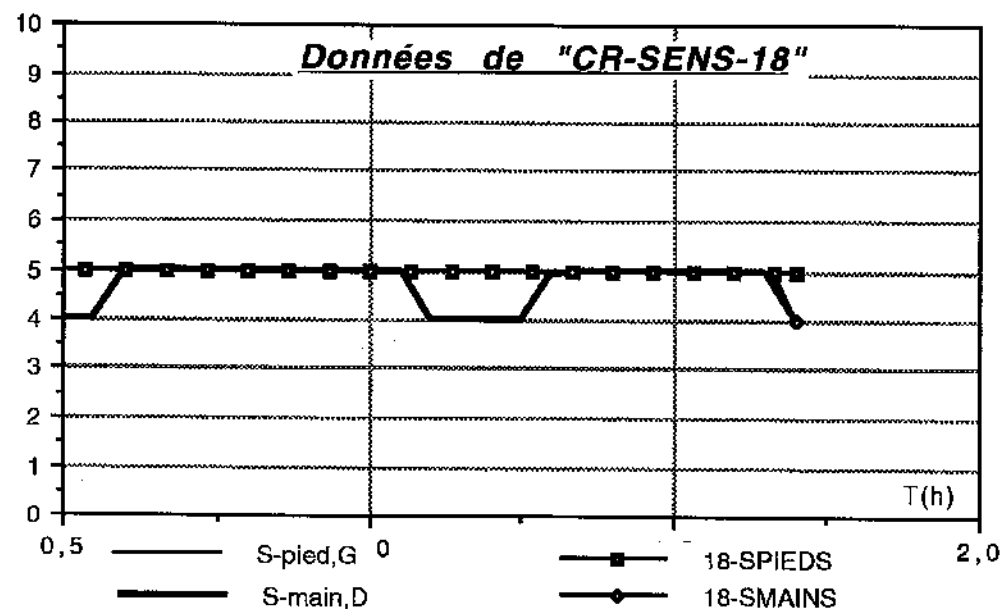
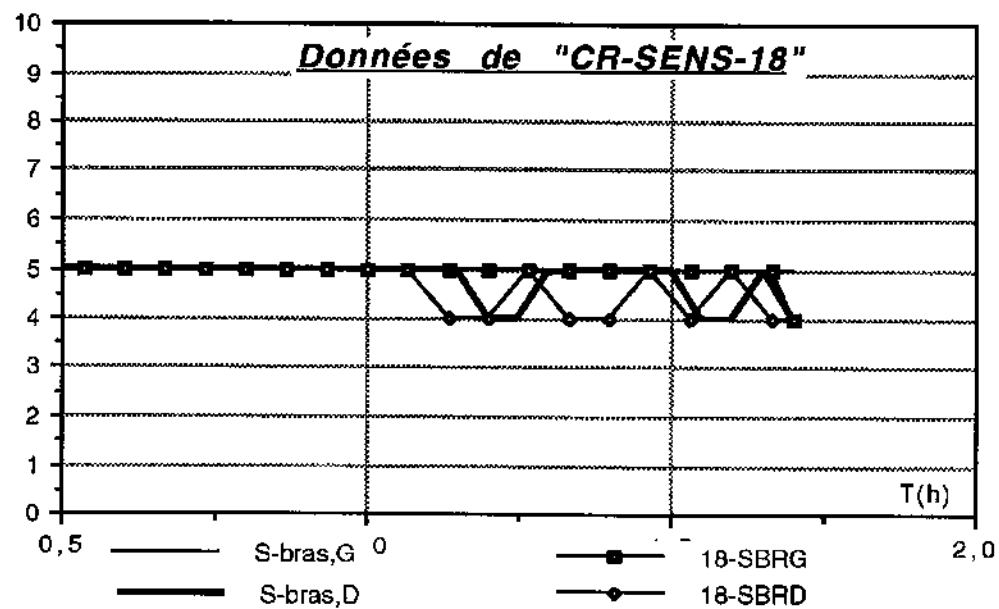
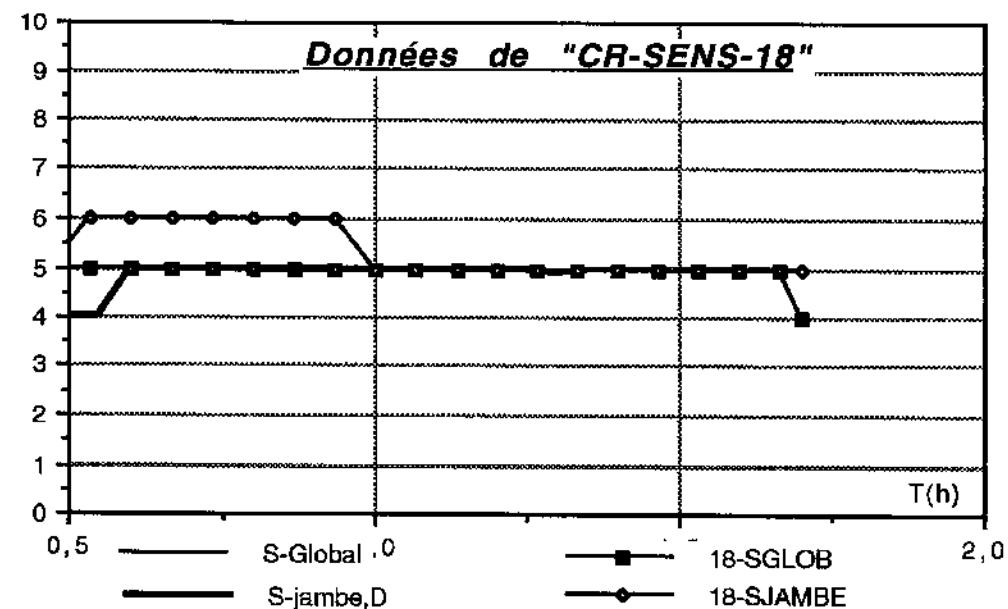
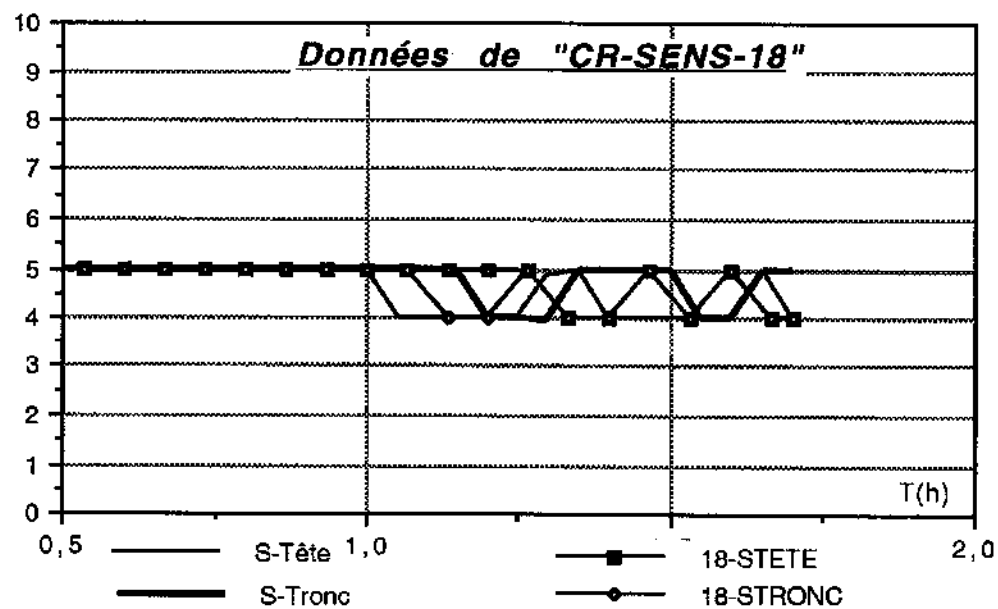
Nous avons simulé l'essai 28, une gamme PSA, avec cette nouvelle technique de calcul des sensations et comparé les résultats avec ceux de la simulation utilisant l'ancienne méthode de calcul des sensations. (Voir les trois figures suivantes). On peut constater une nette amélioration des résultats de la simulation, y compris pour les segments du corps tels que les pieds.

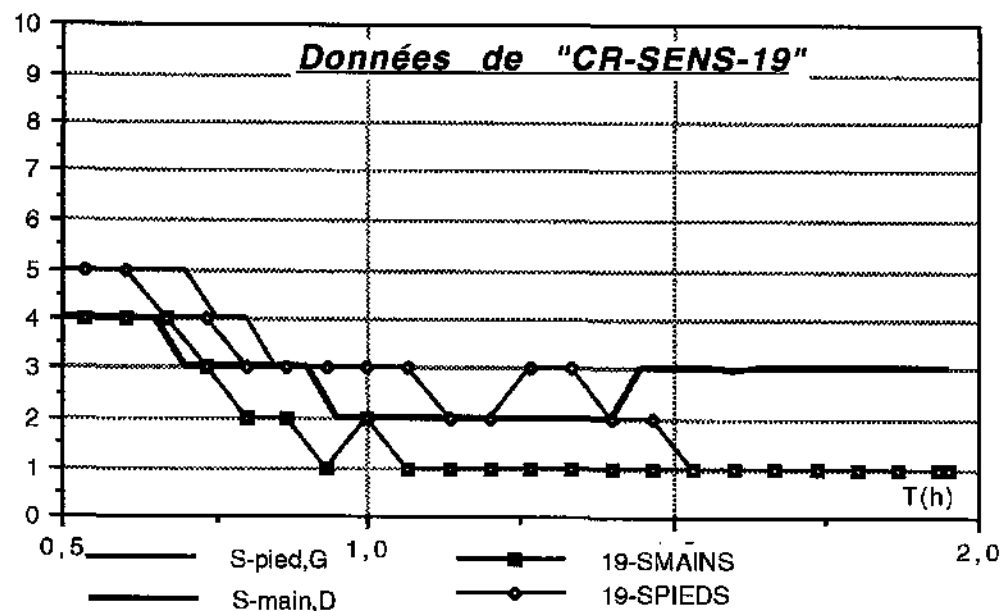
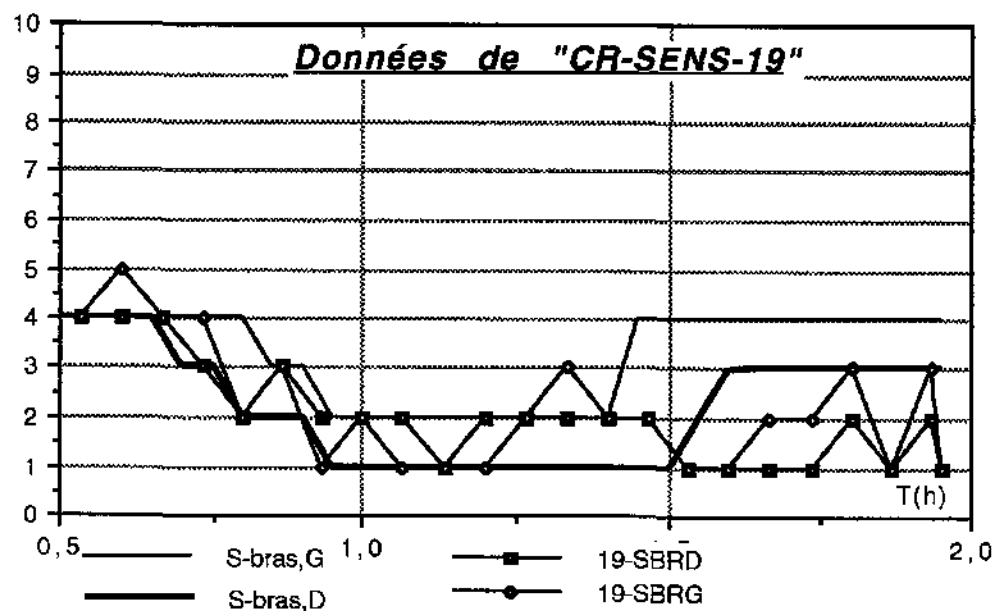
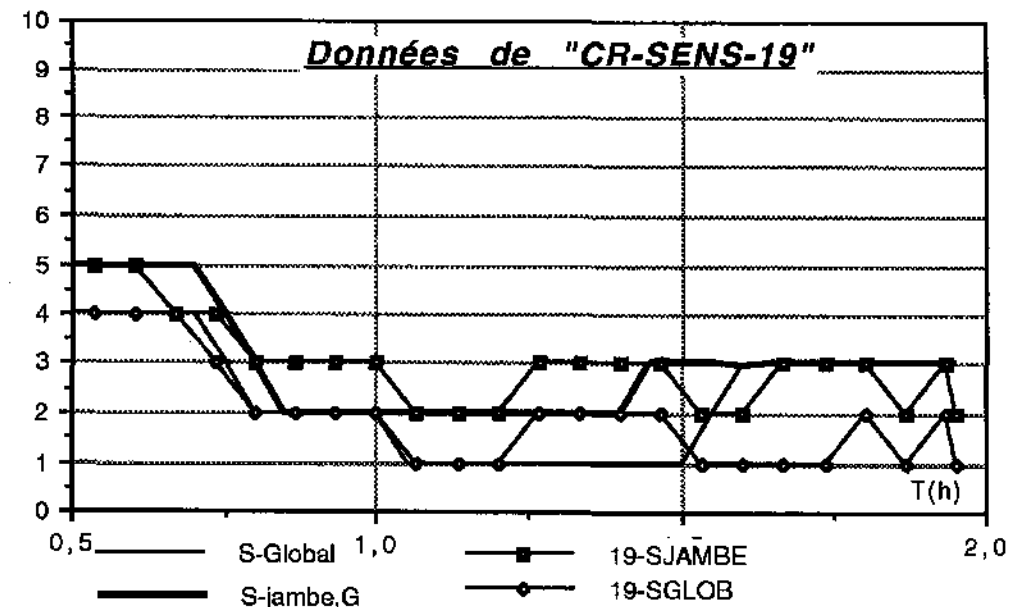
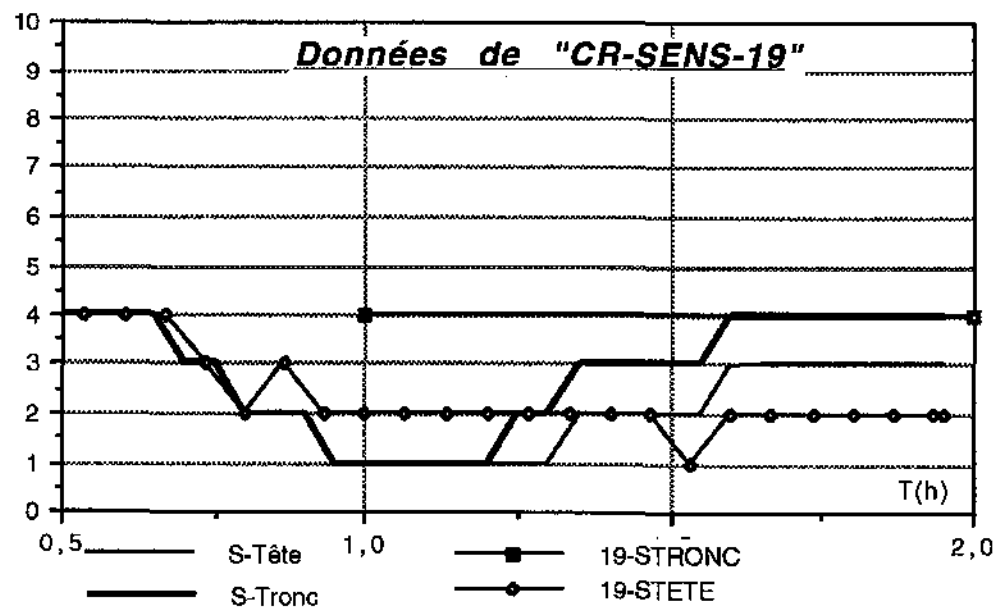


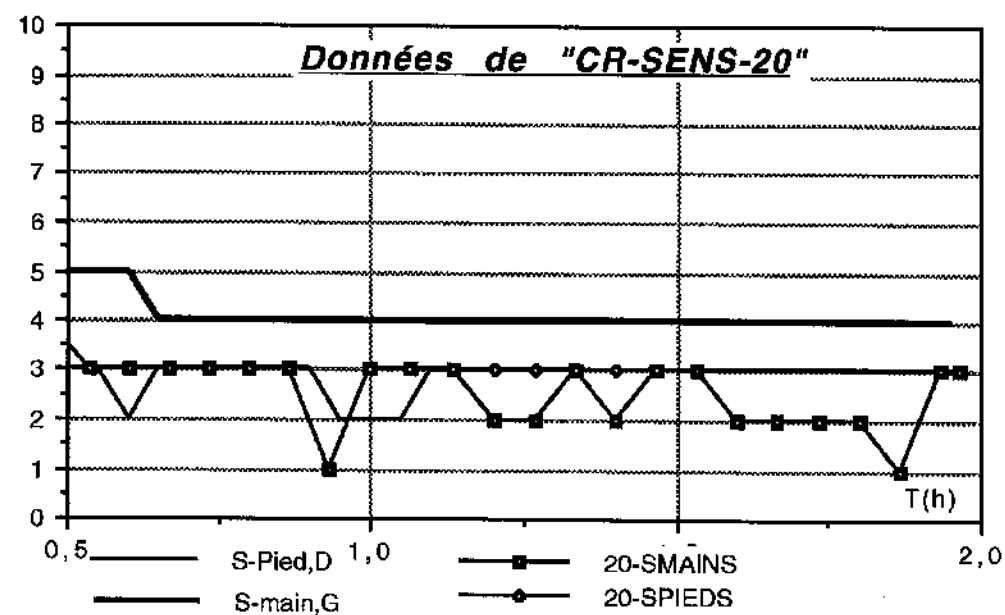
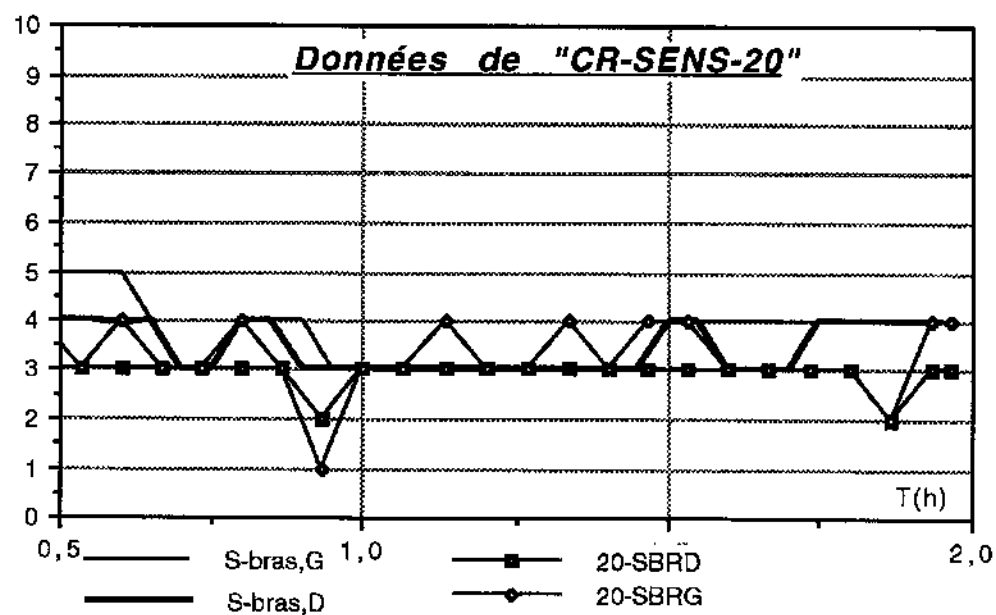
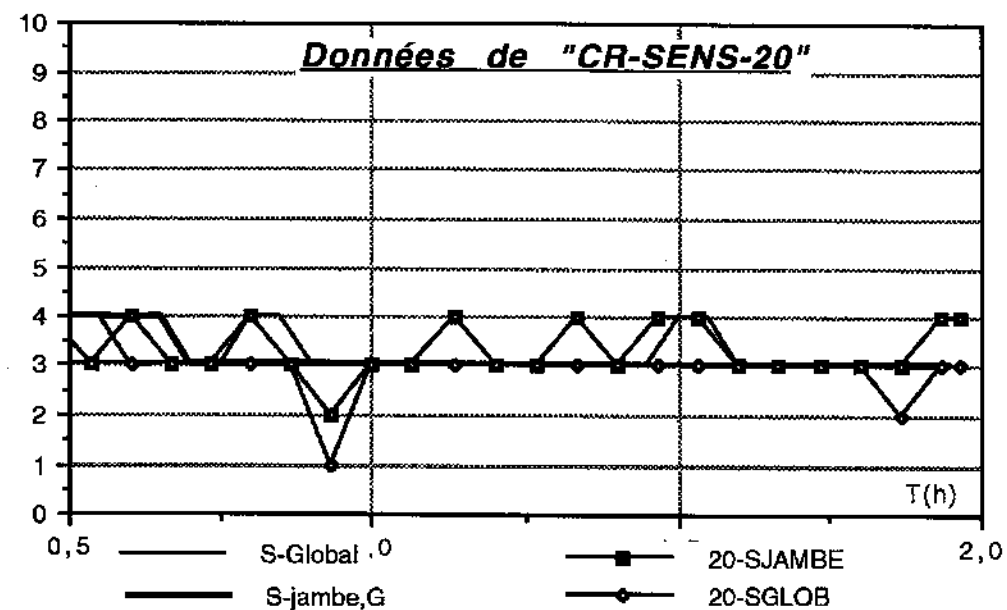
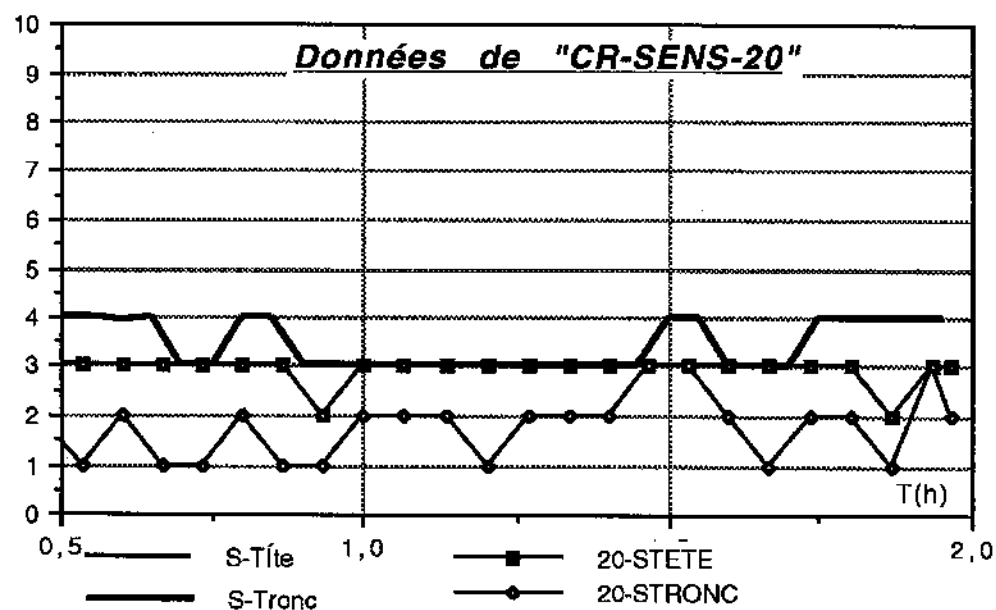


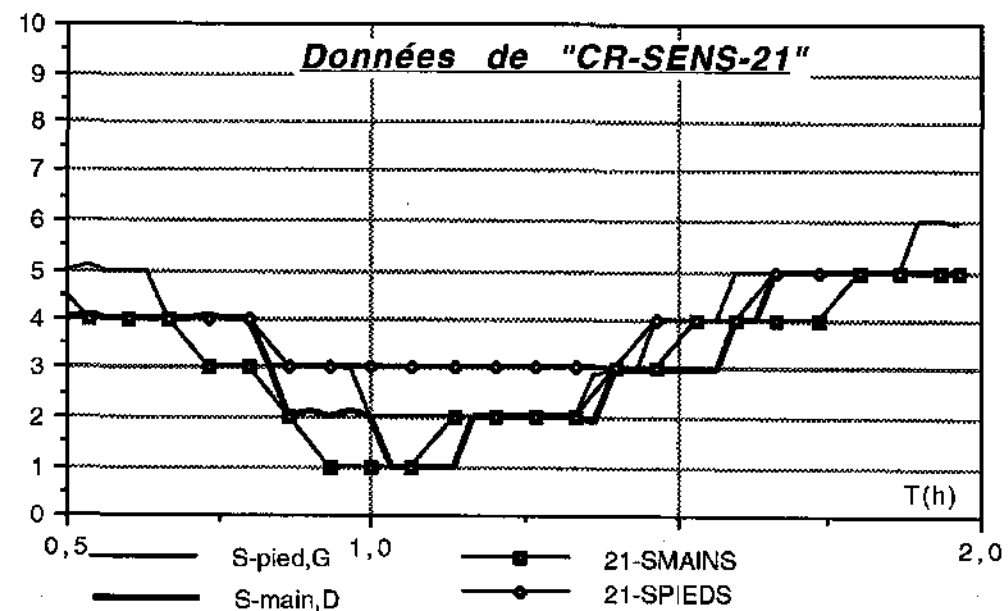
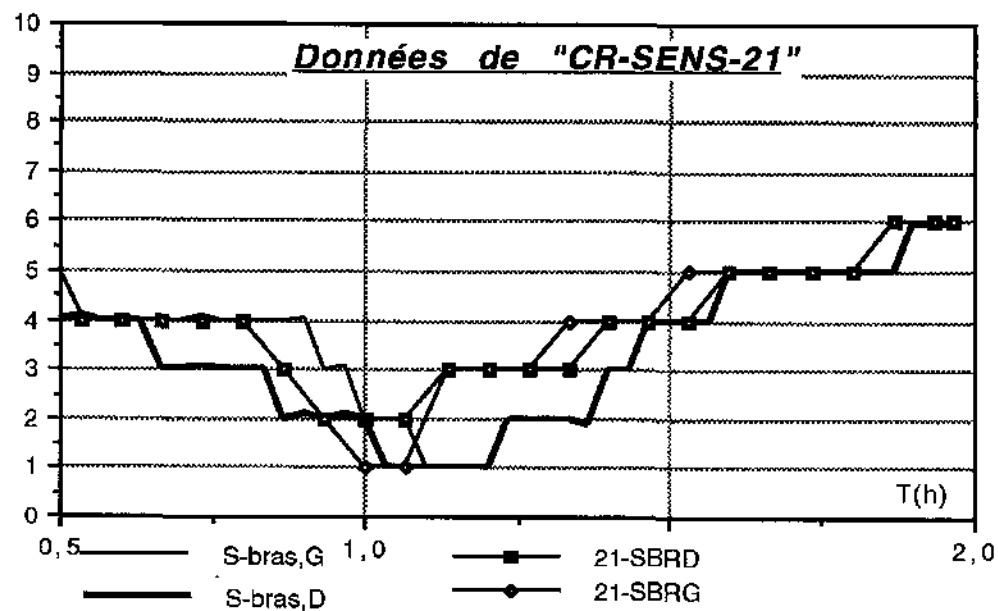
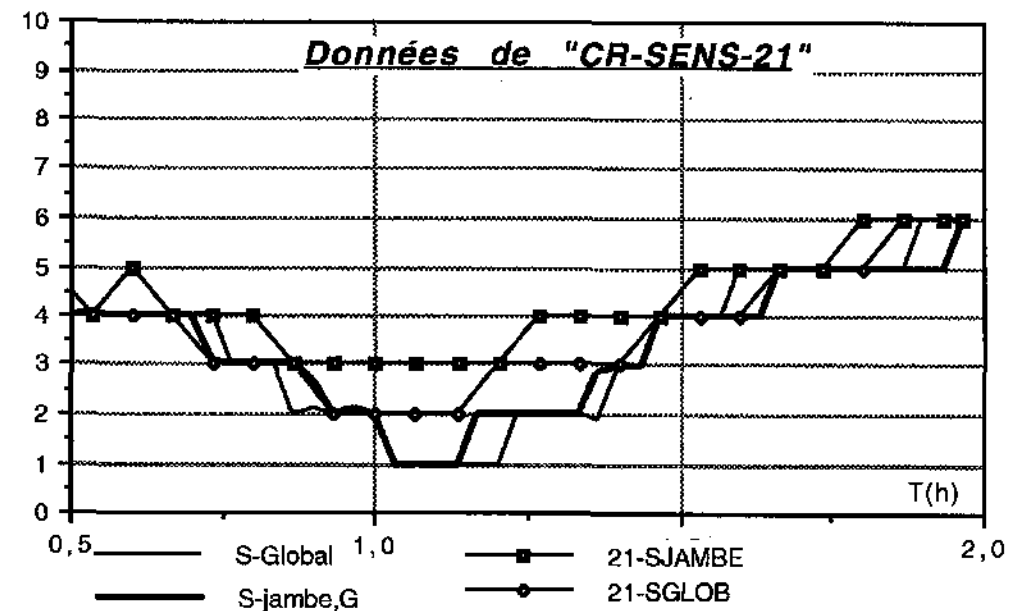
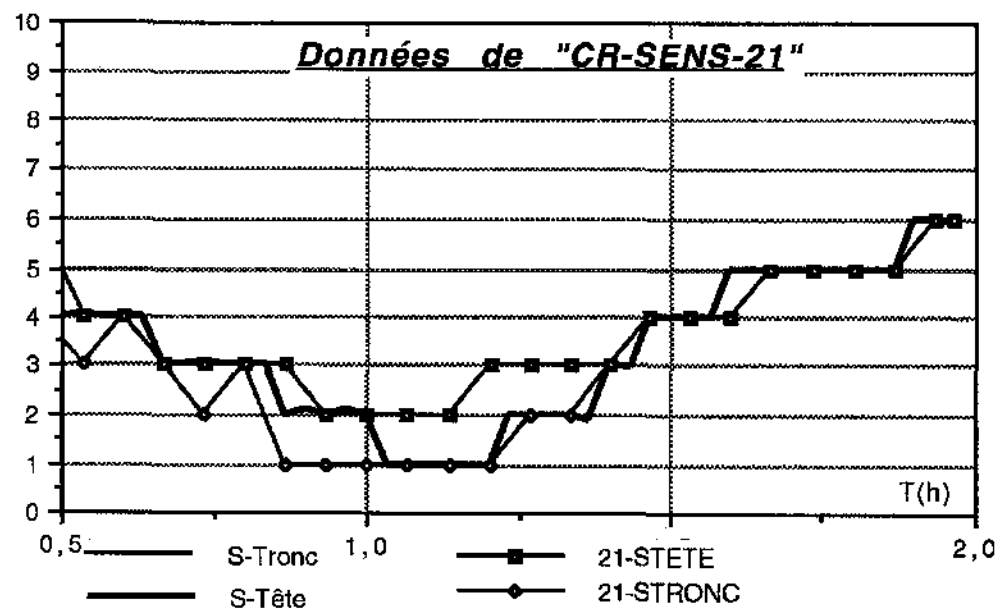
IV Simulation des sensations des essais de suède

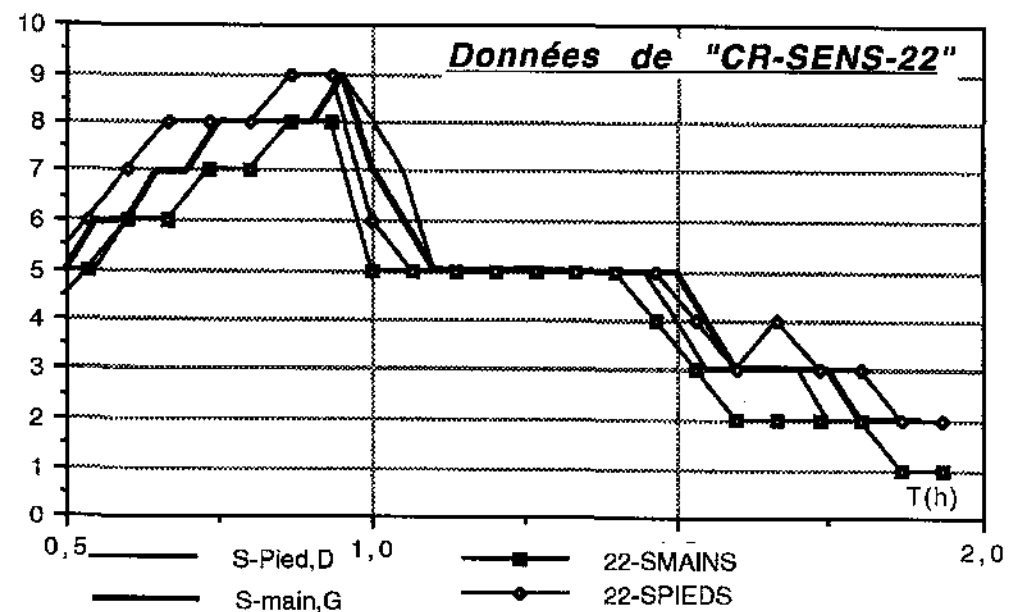
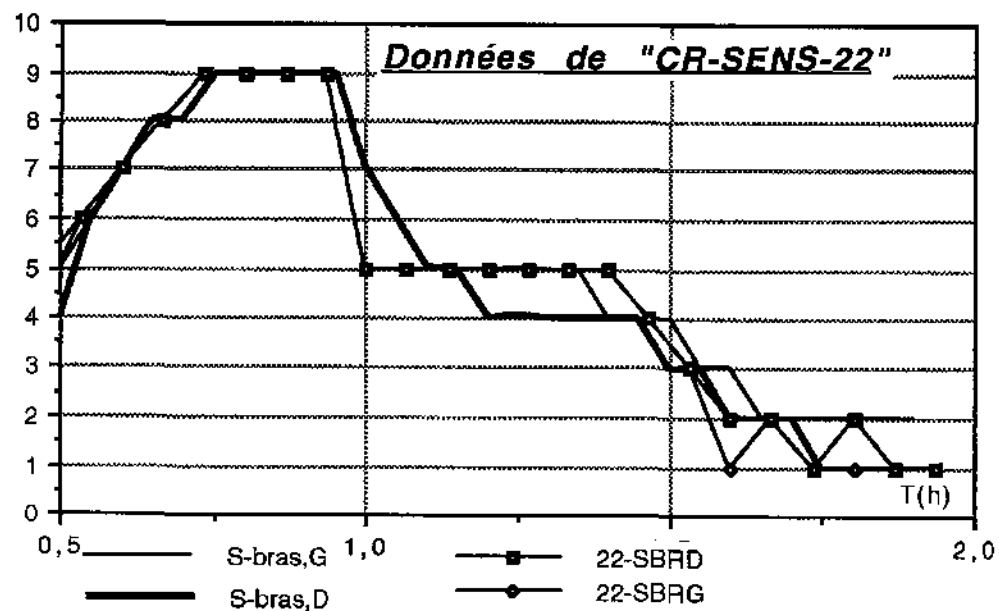
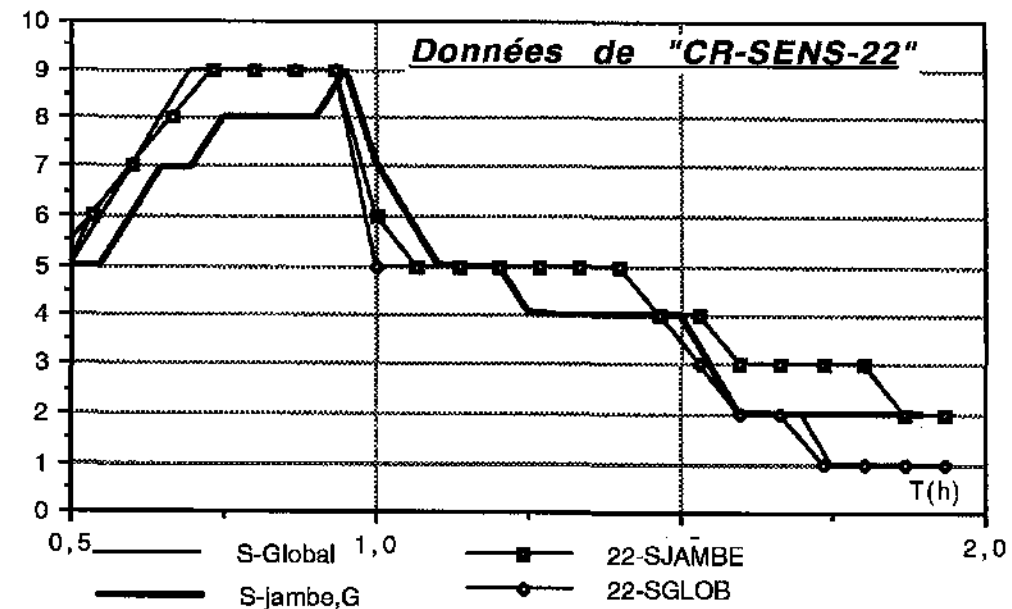
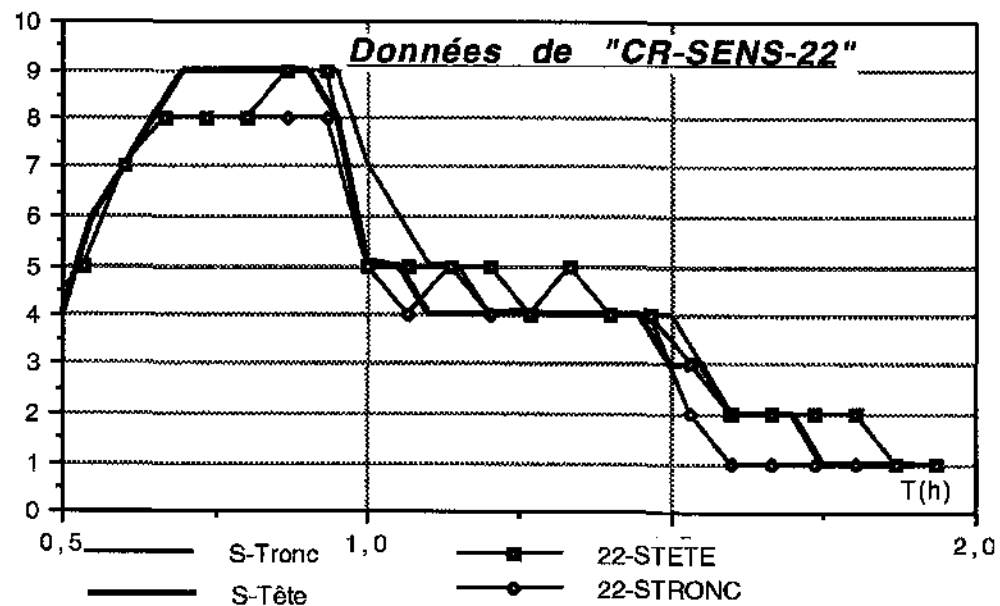
Nous avons réalisé les simulations de l'ensemble des expériences de Suède, dans les courbes qui suivent nous présentons les sensations calculées avec le modèle MATHER et les sensations expérimentales.

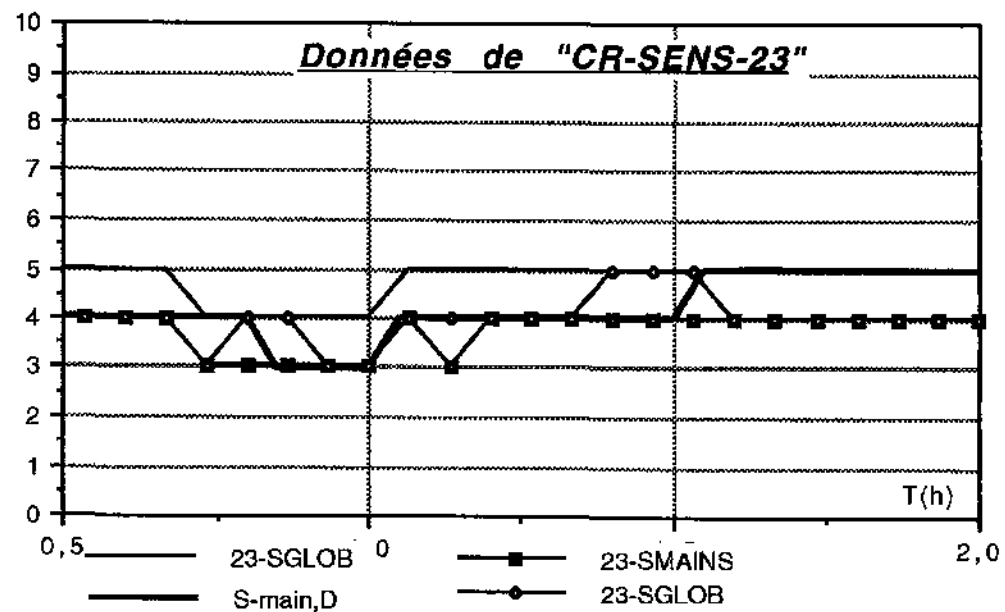
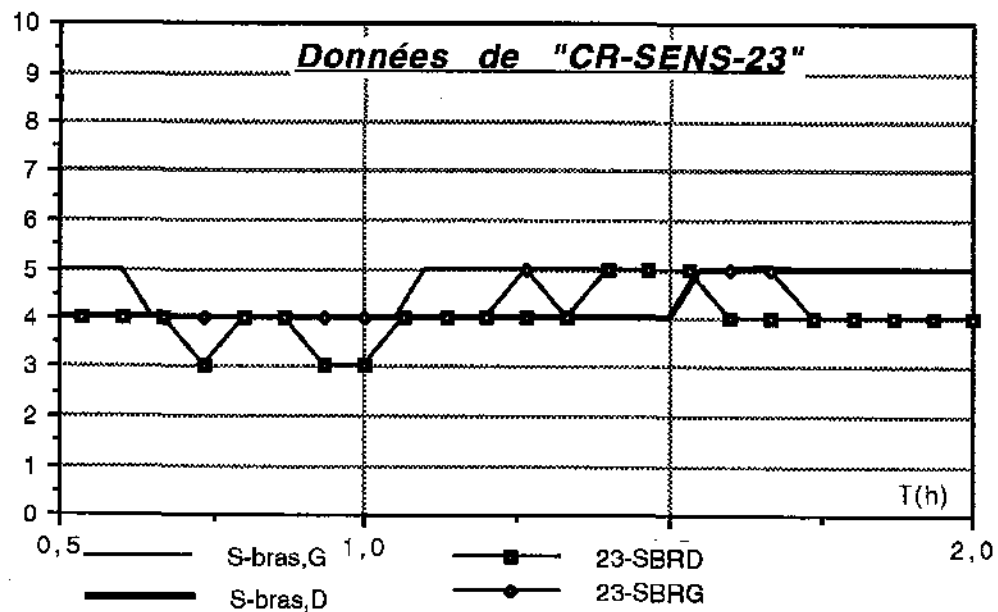
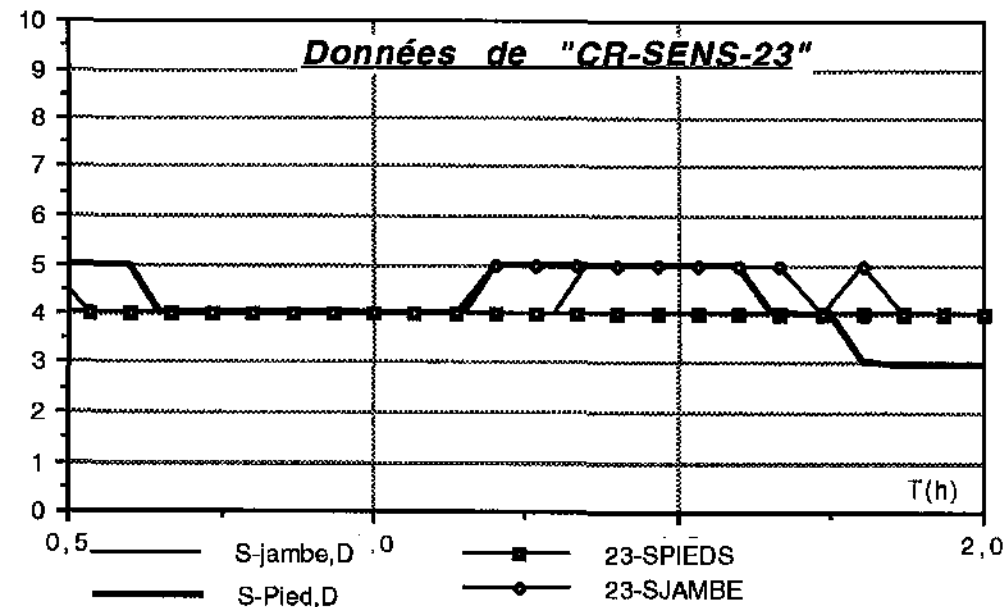
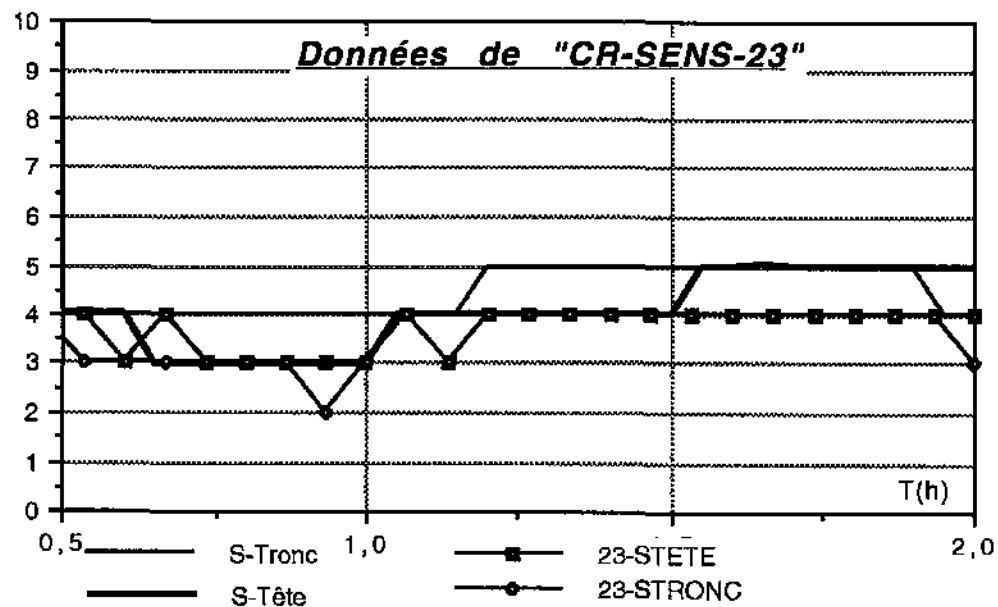


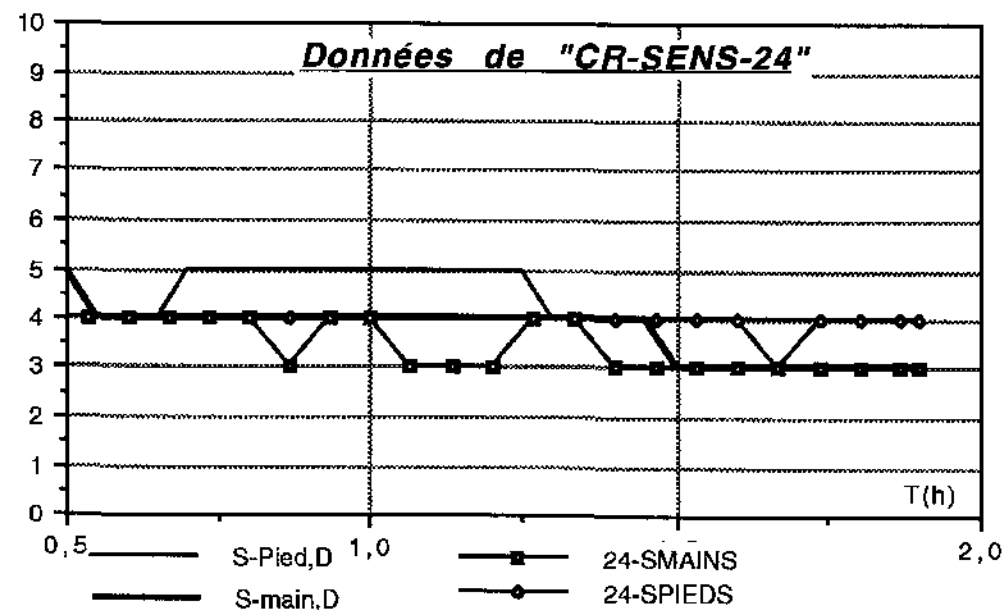
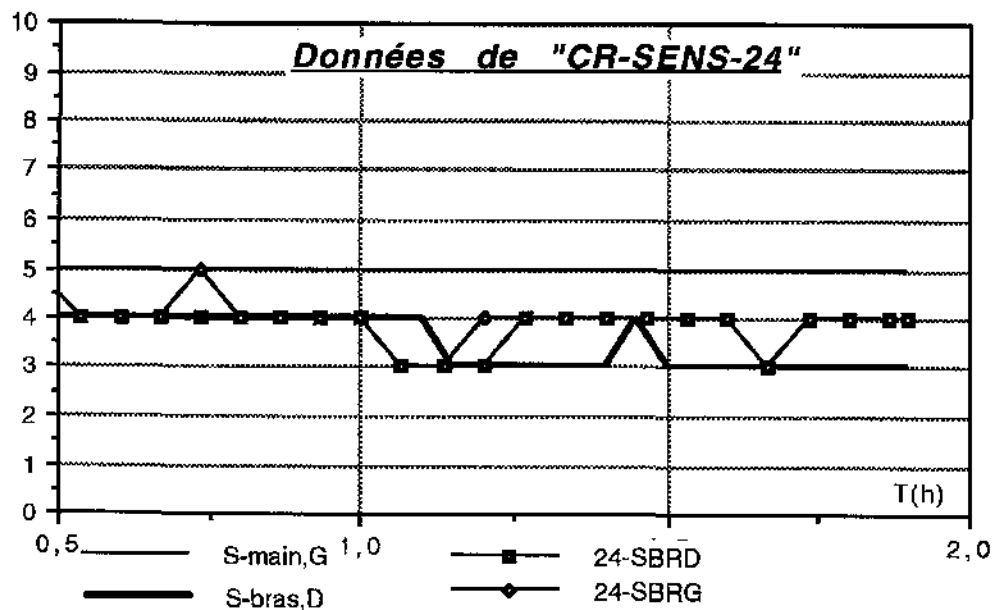
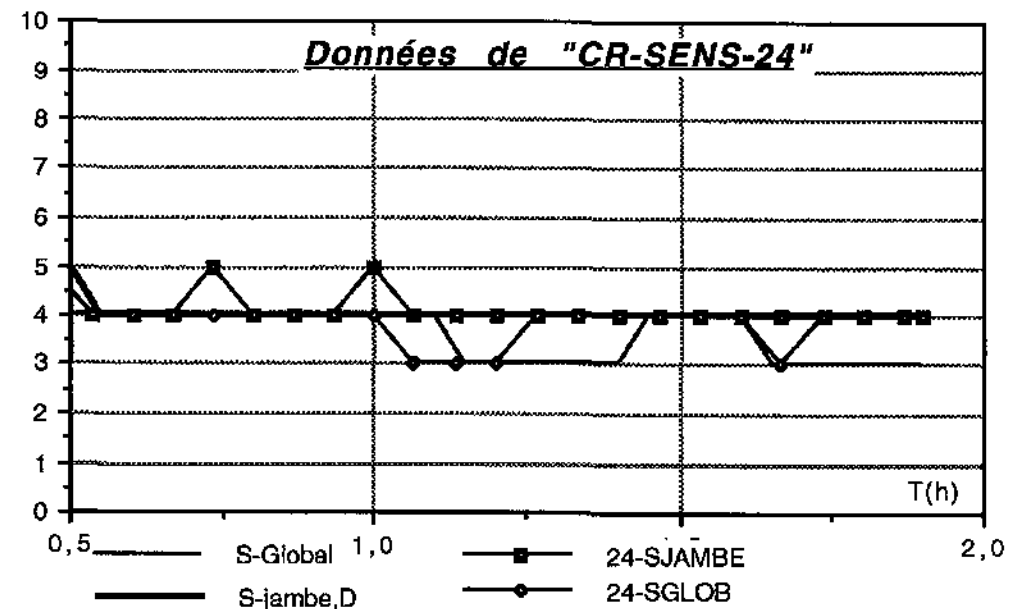
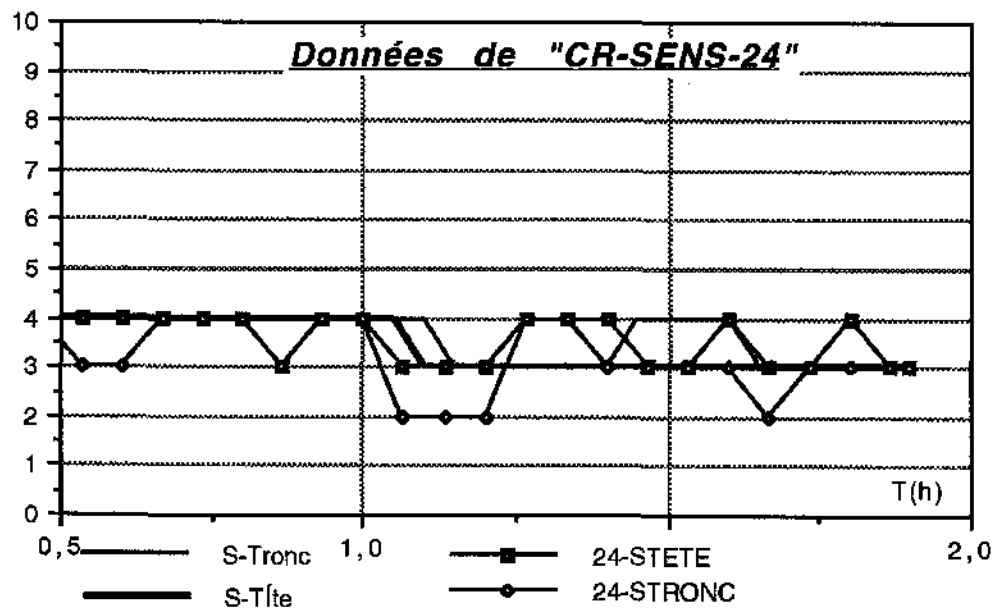


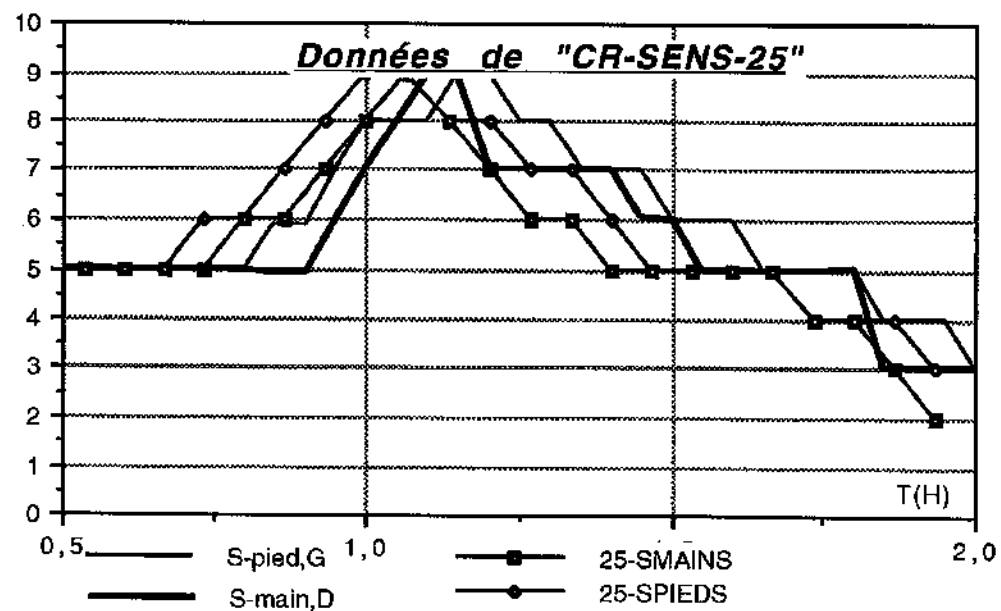
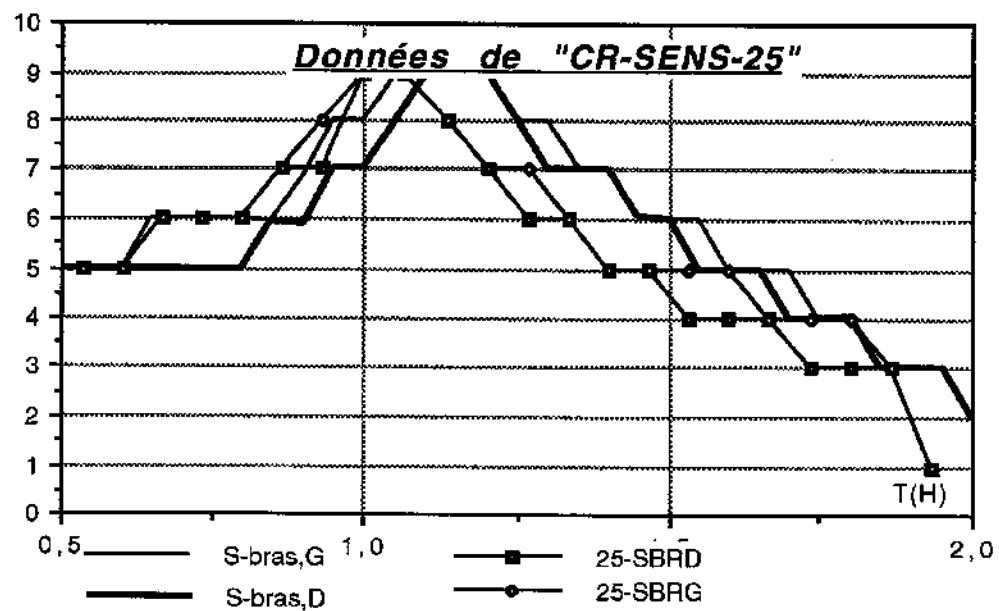
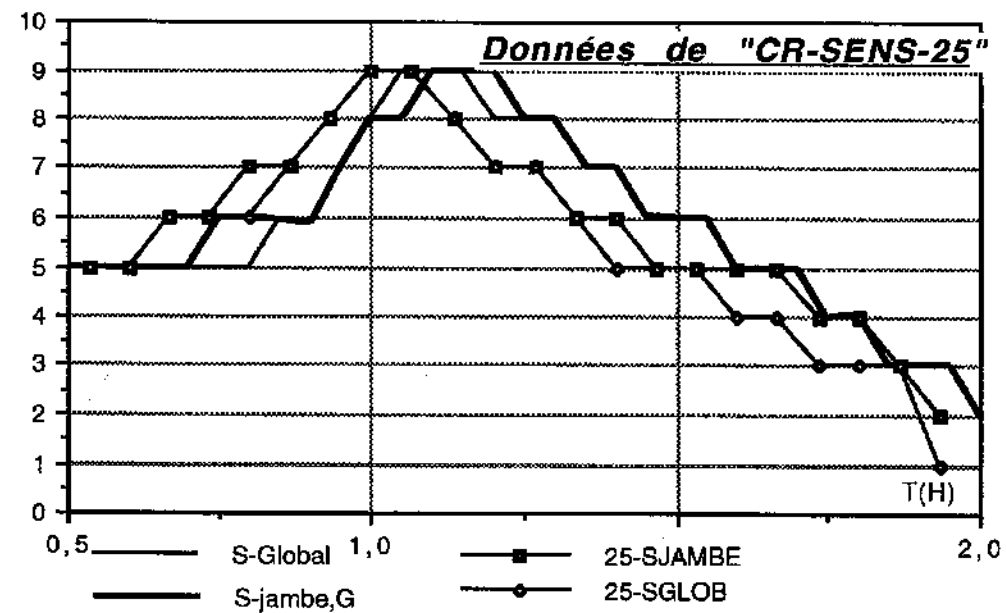
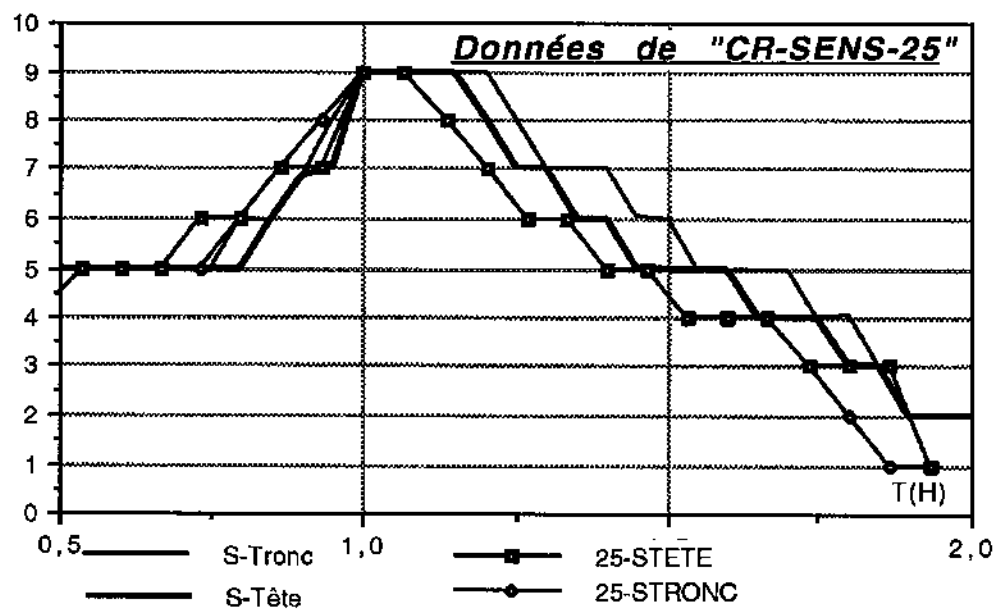


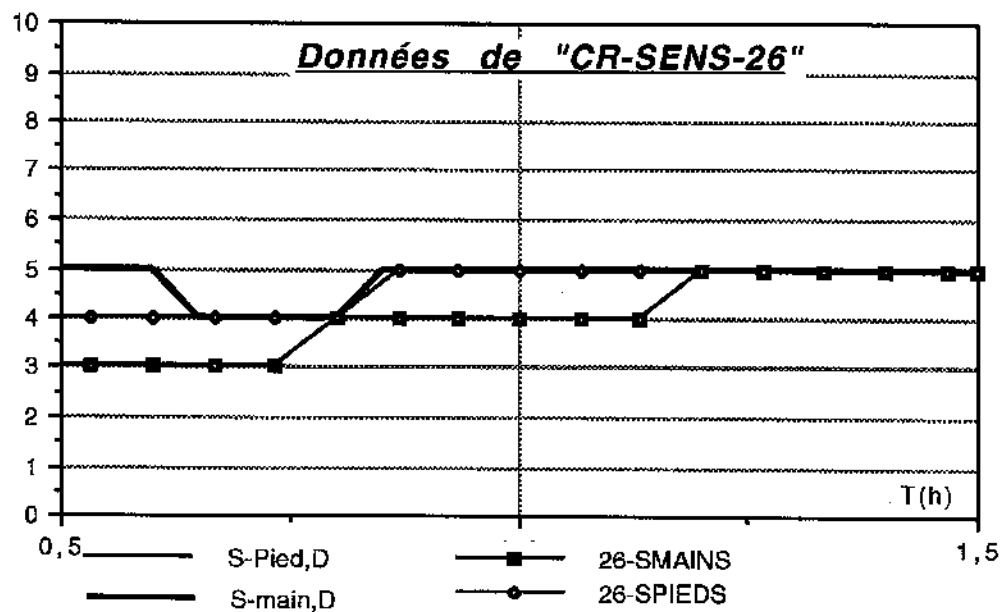
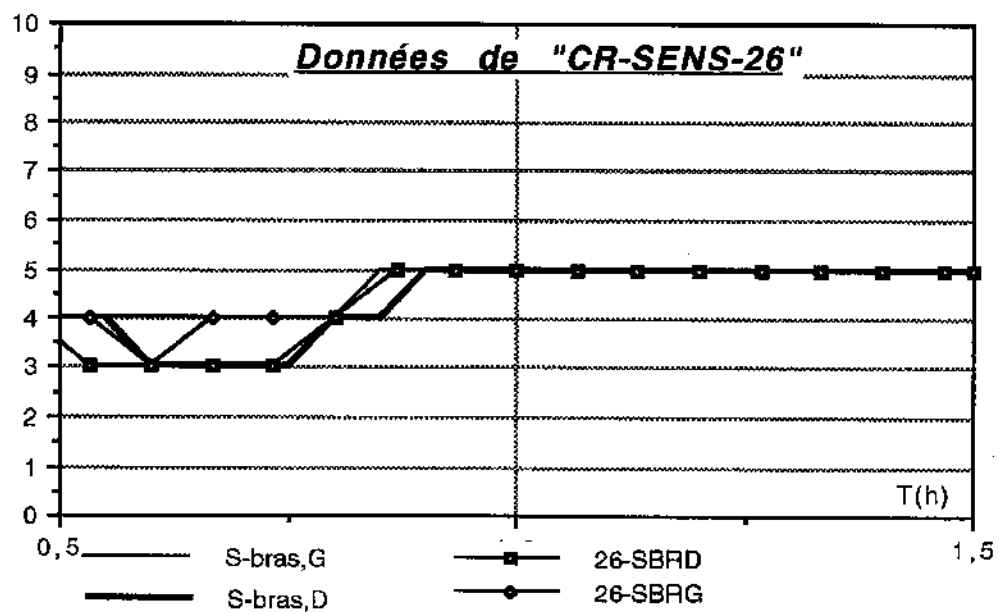
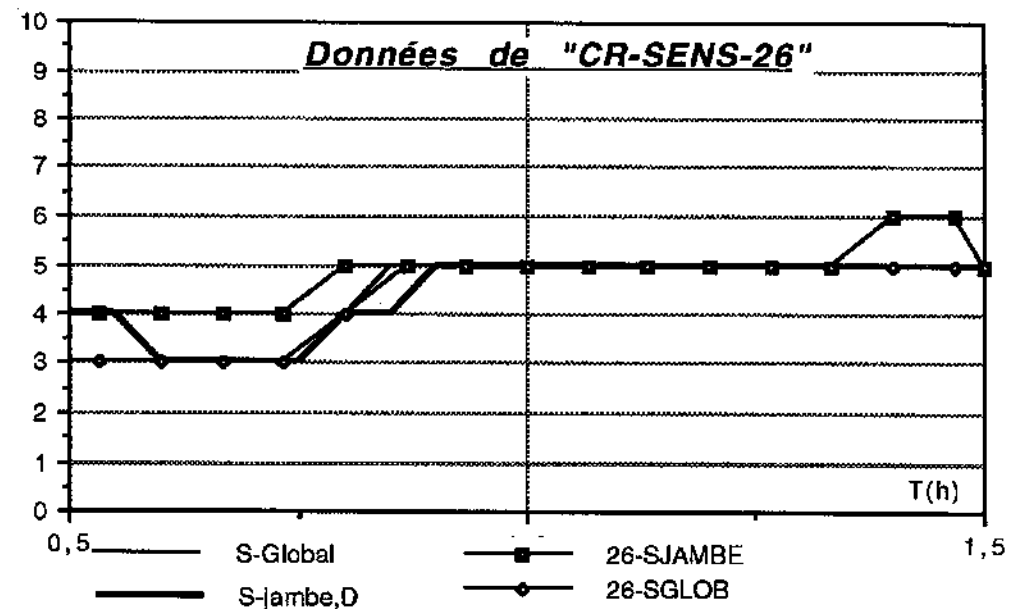
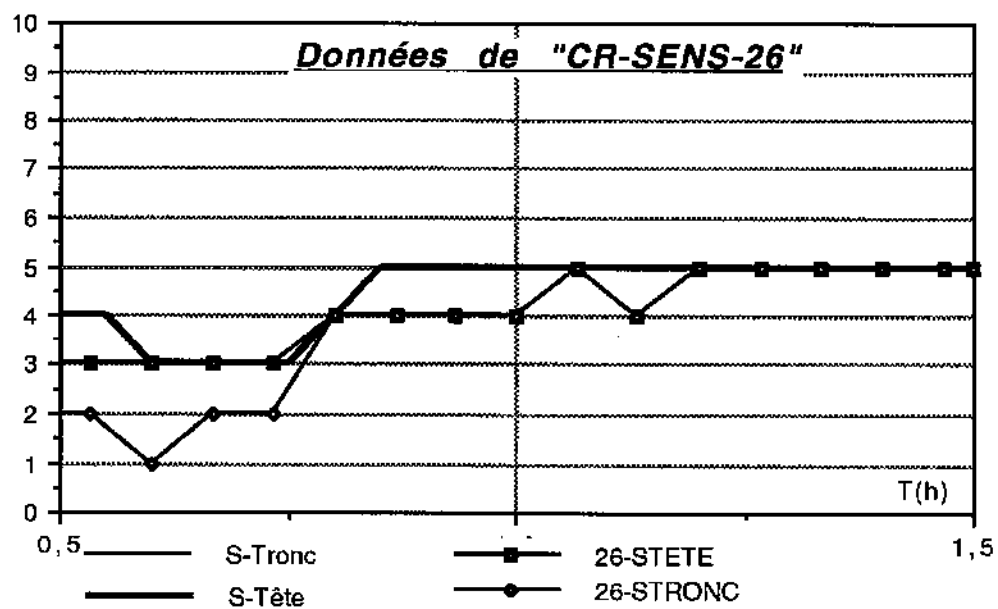


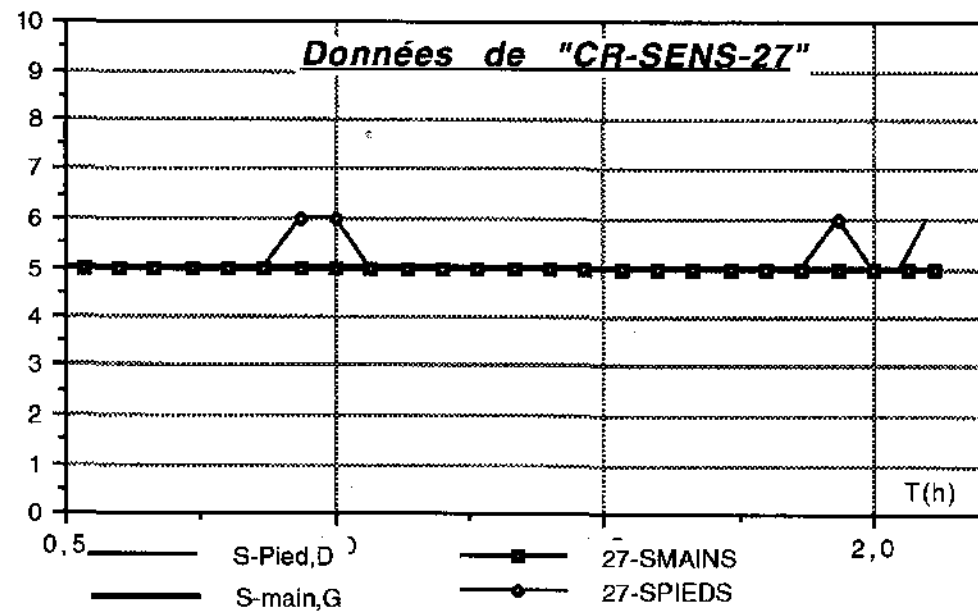
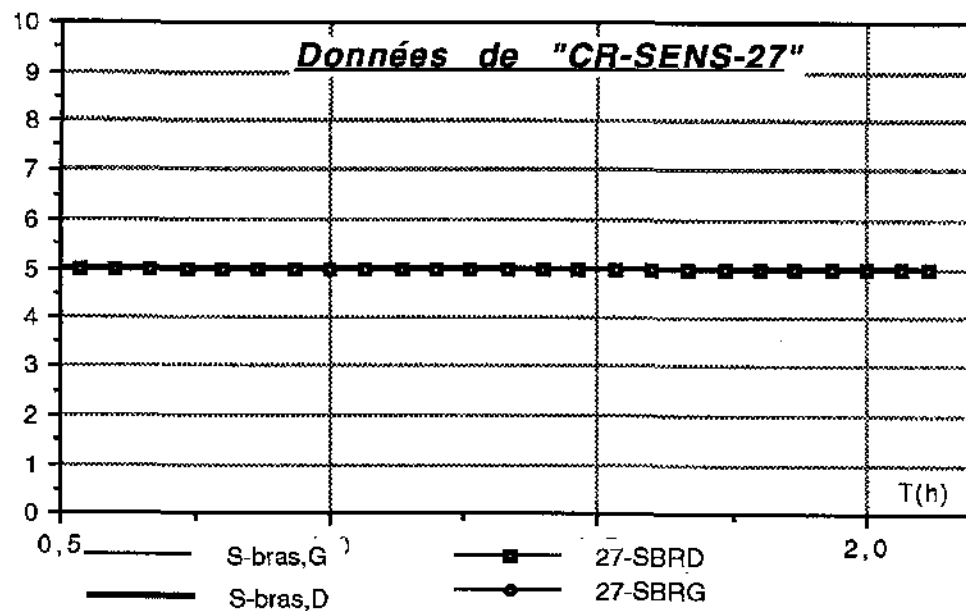
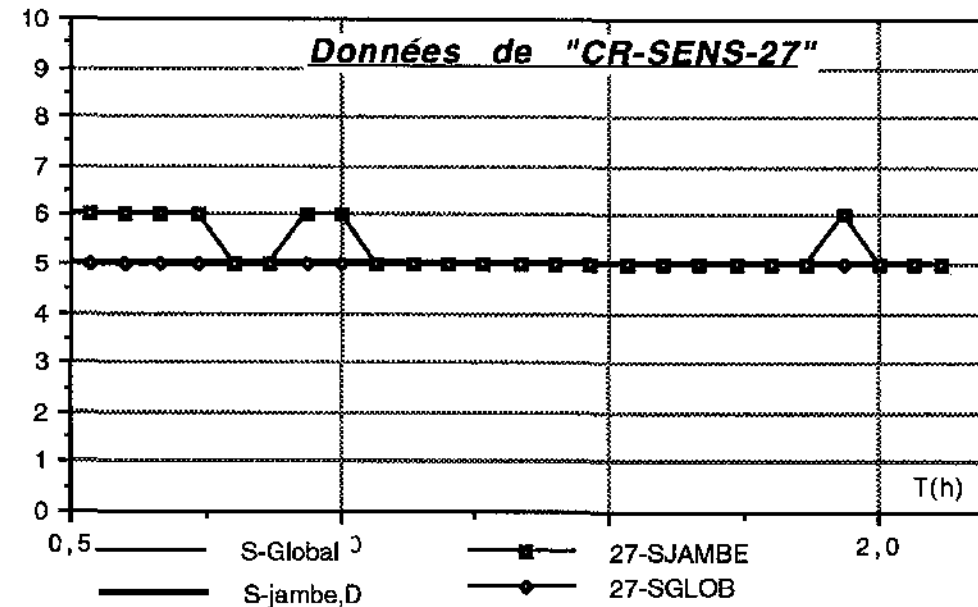
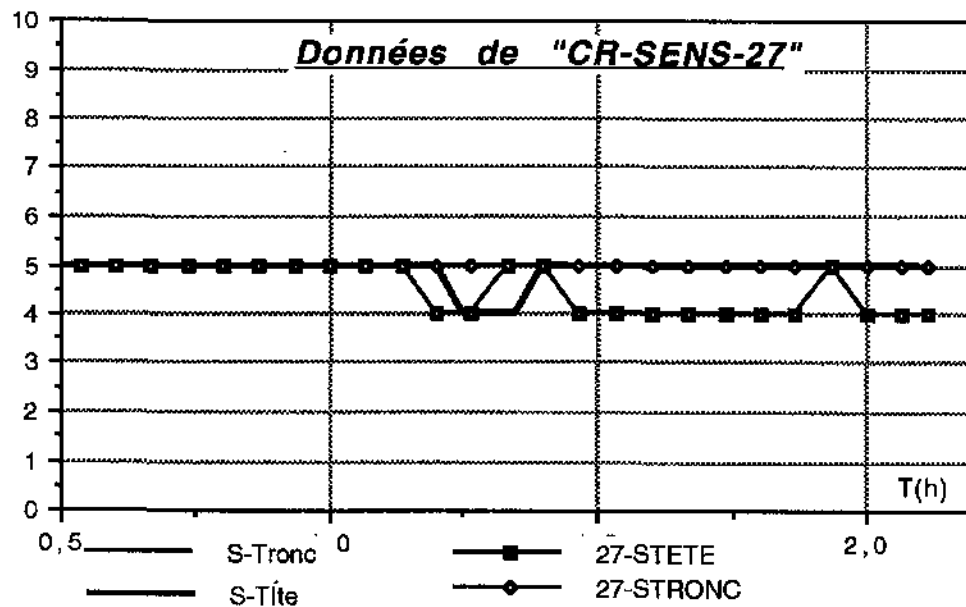


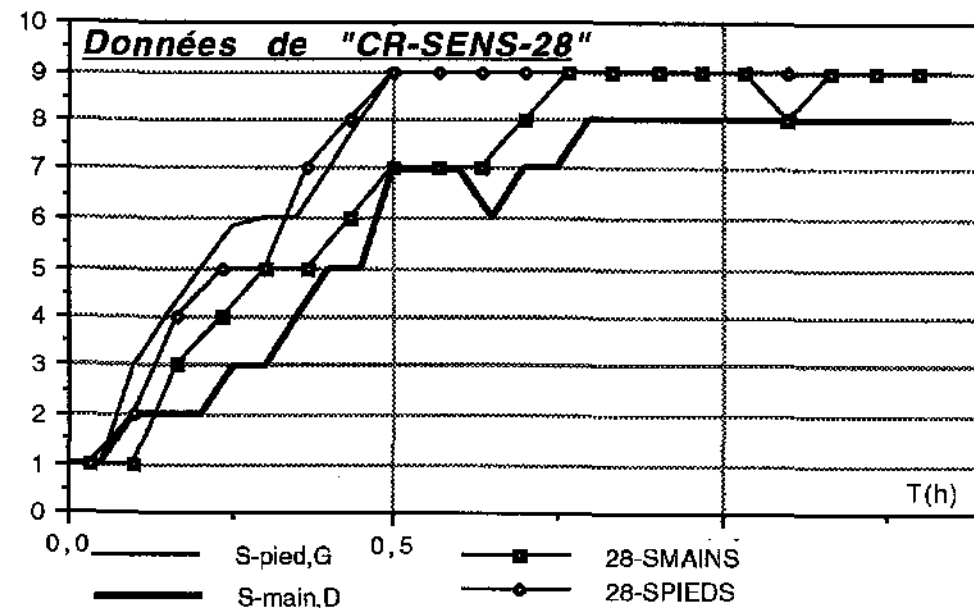
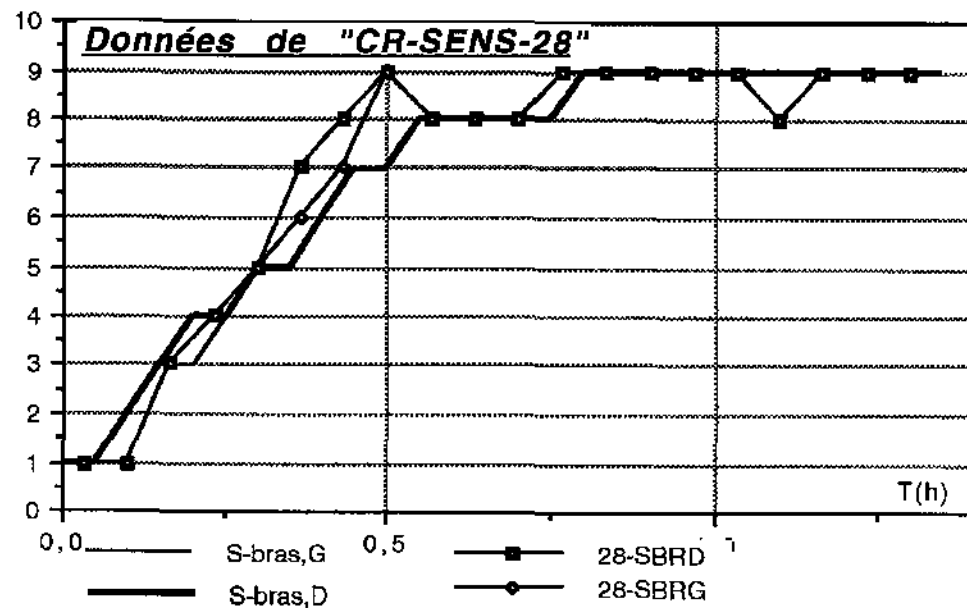
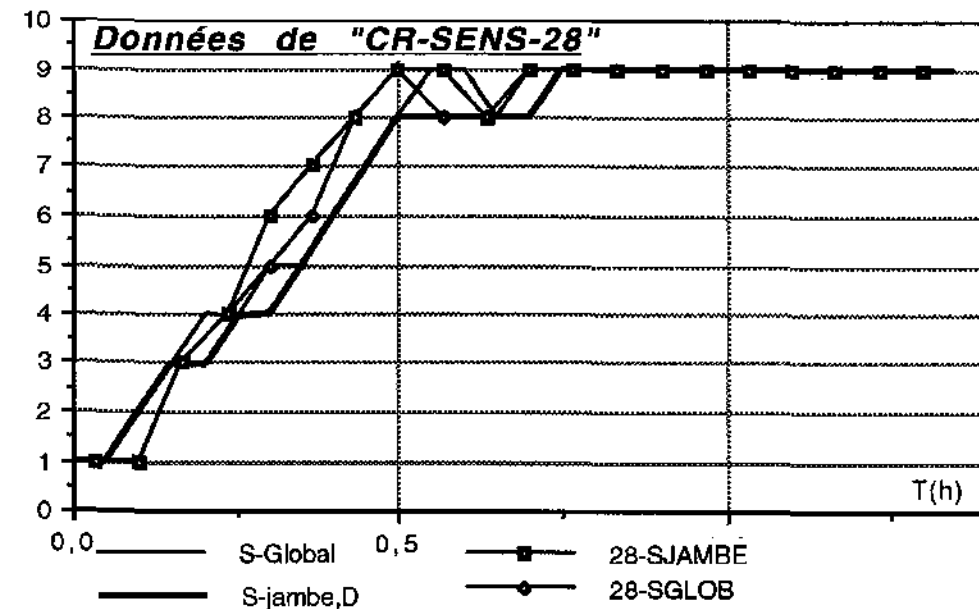
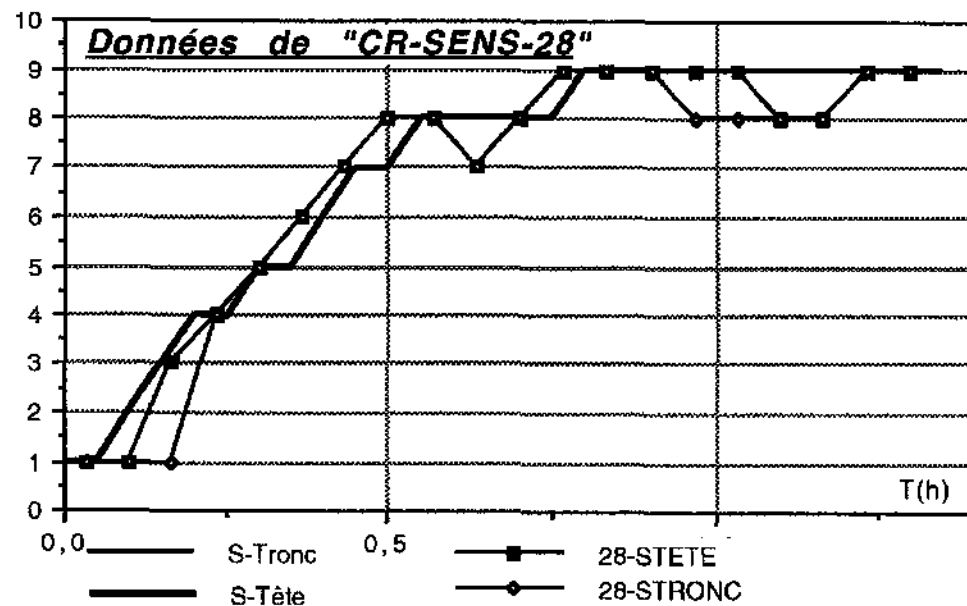


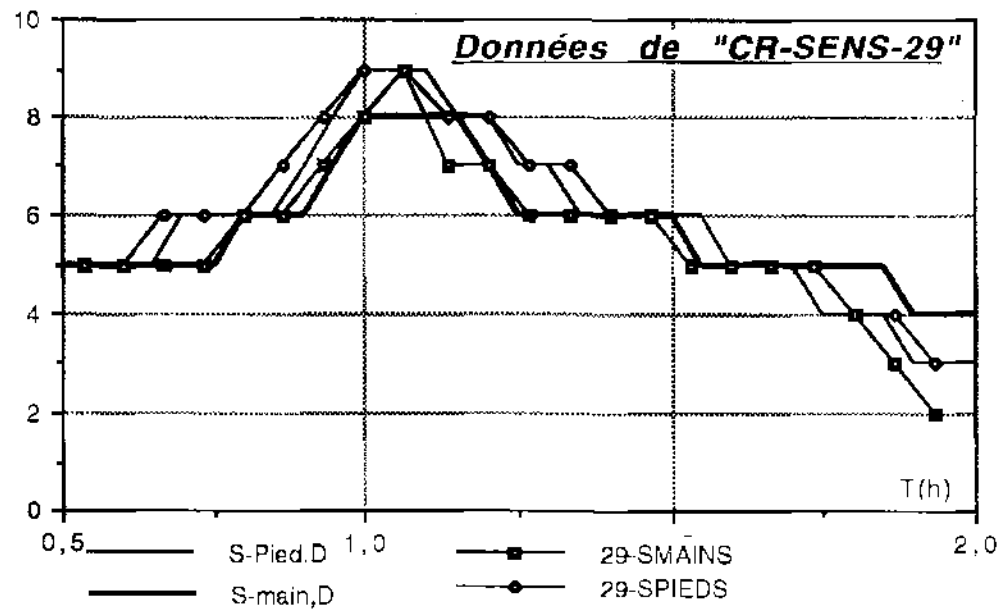
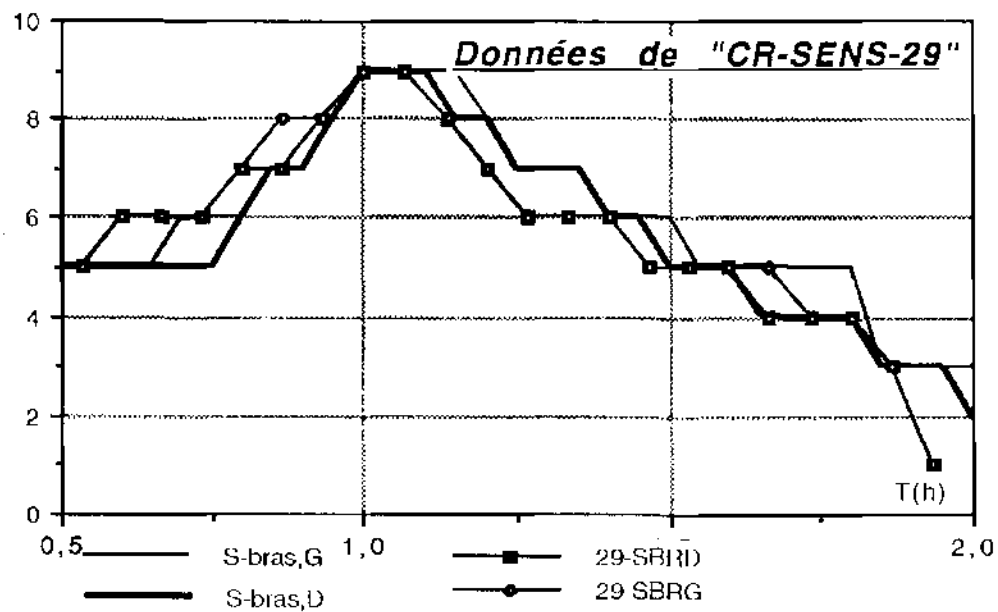
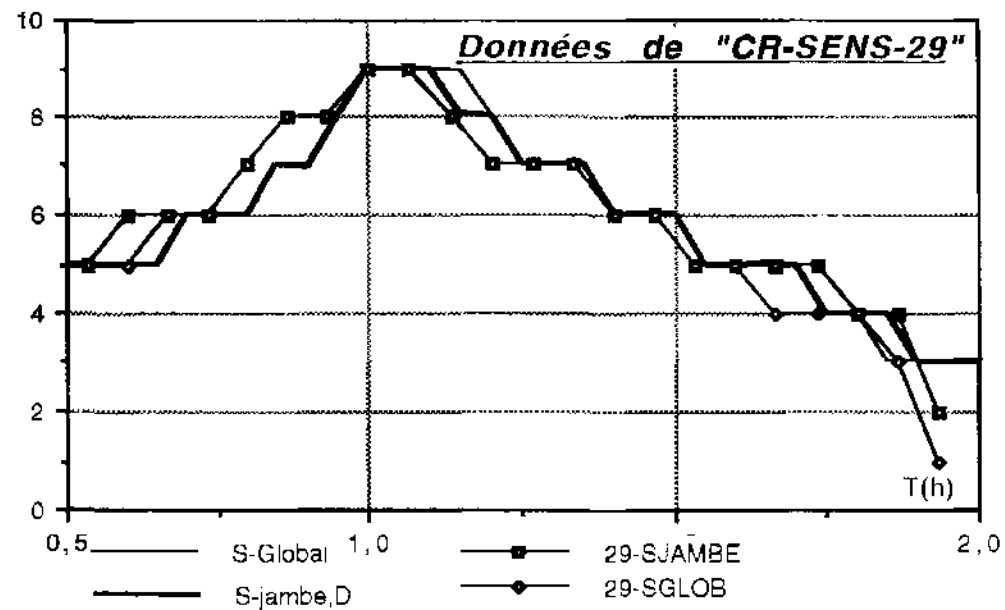
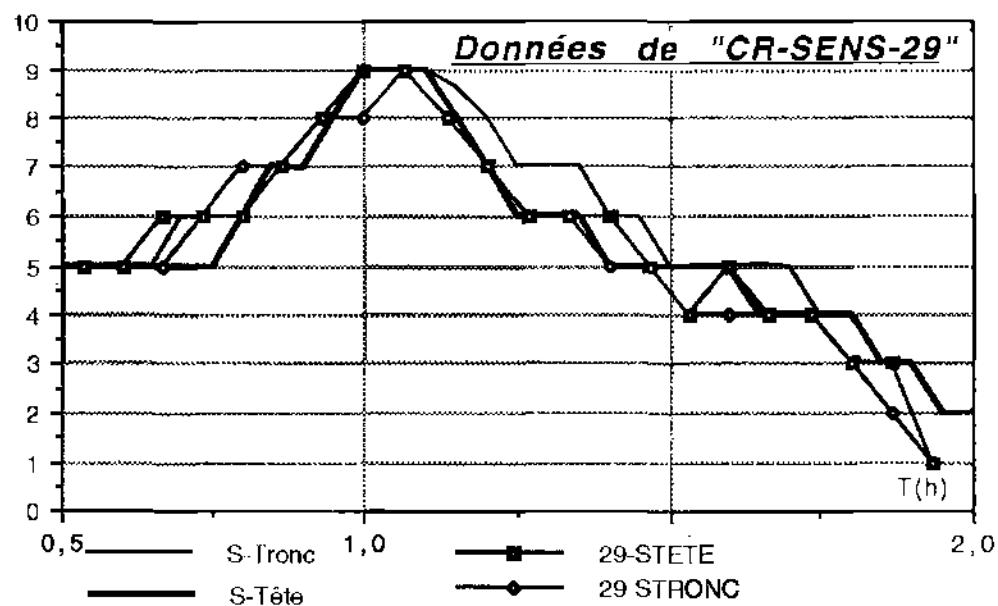


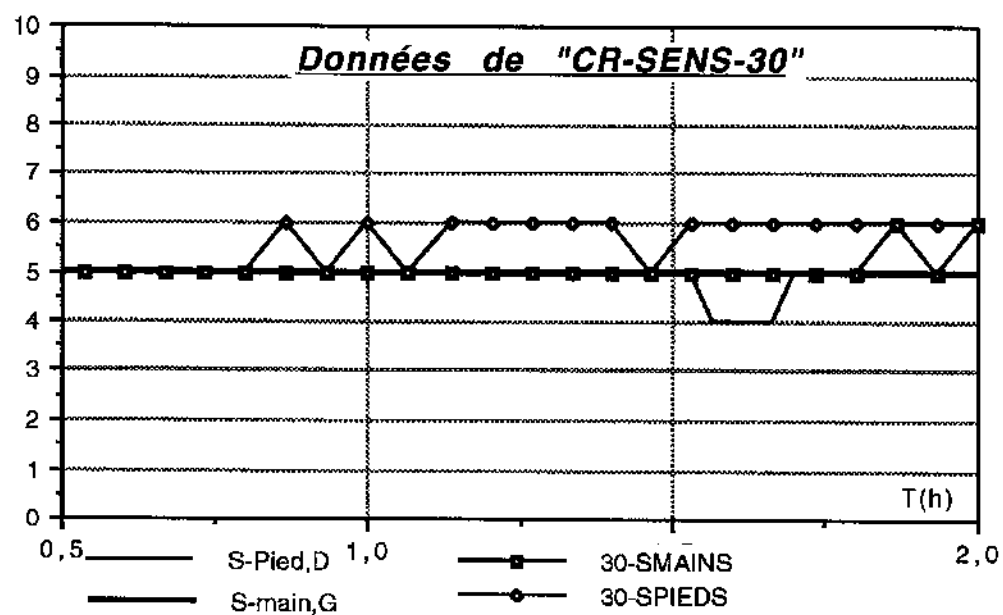
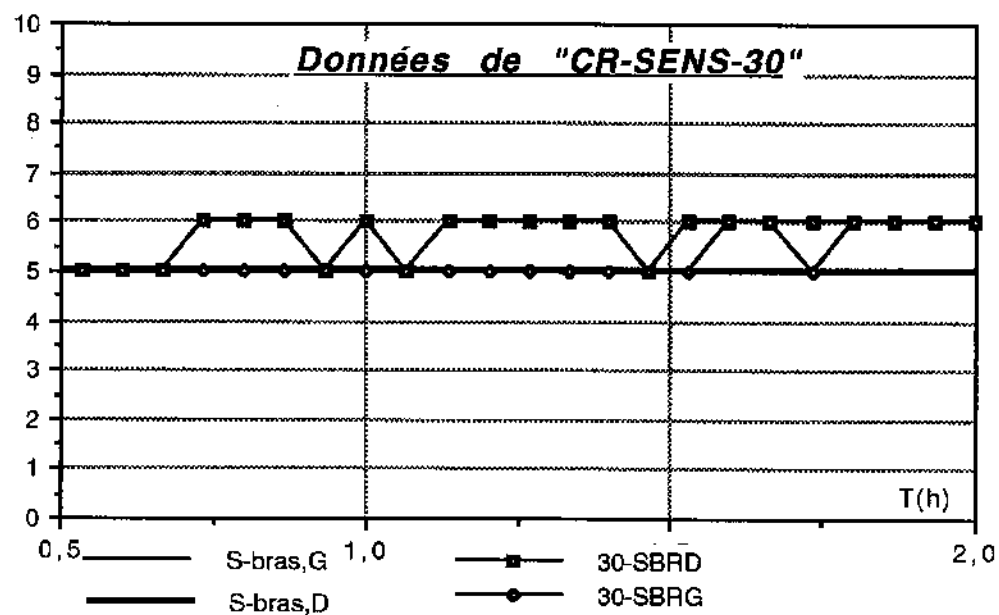
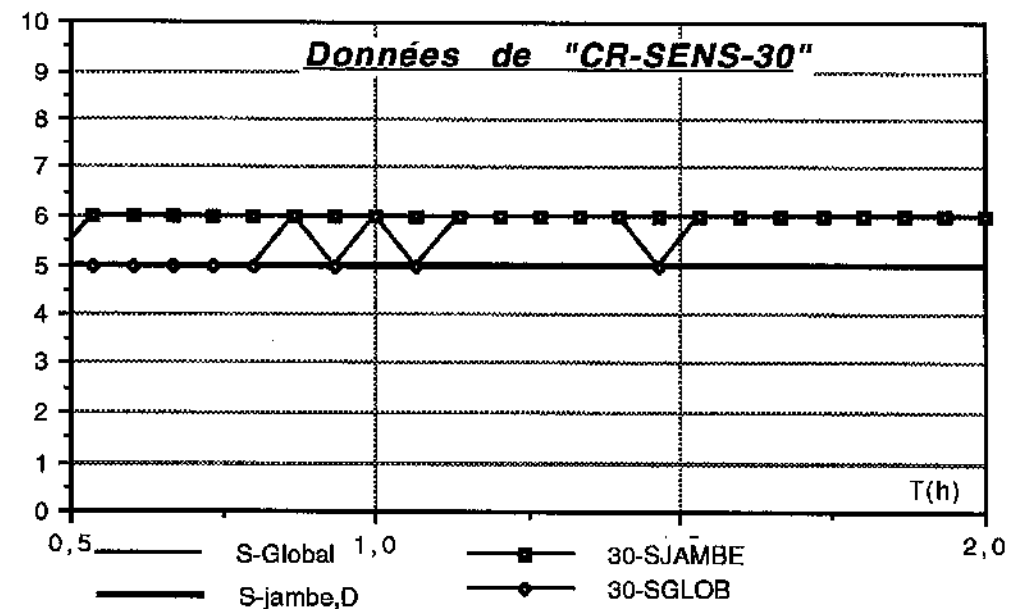
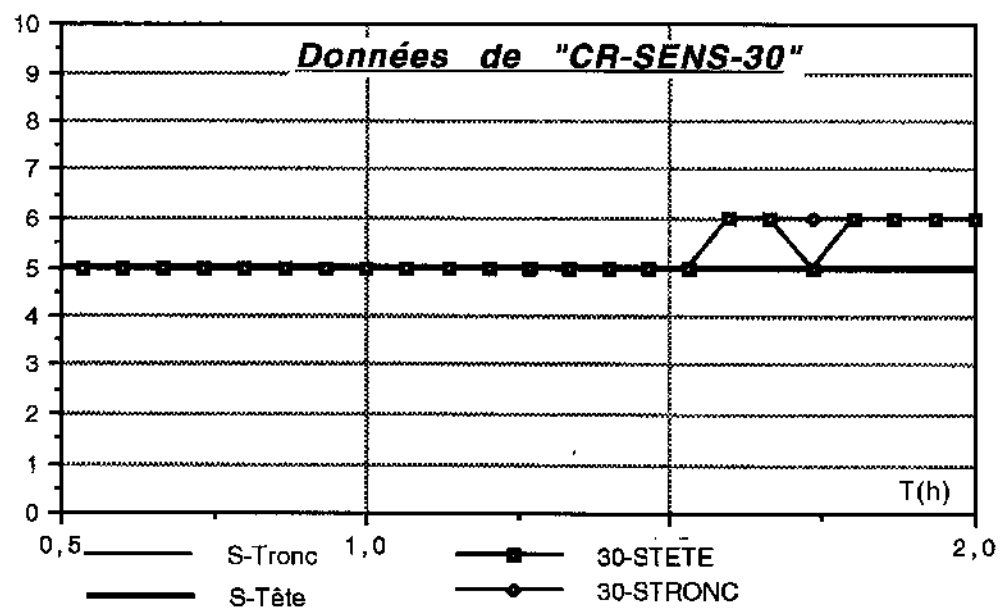


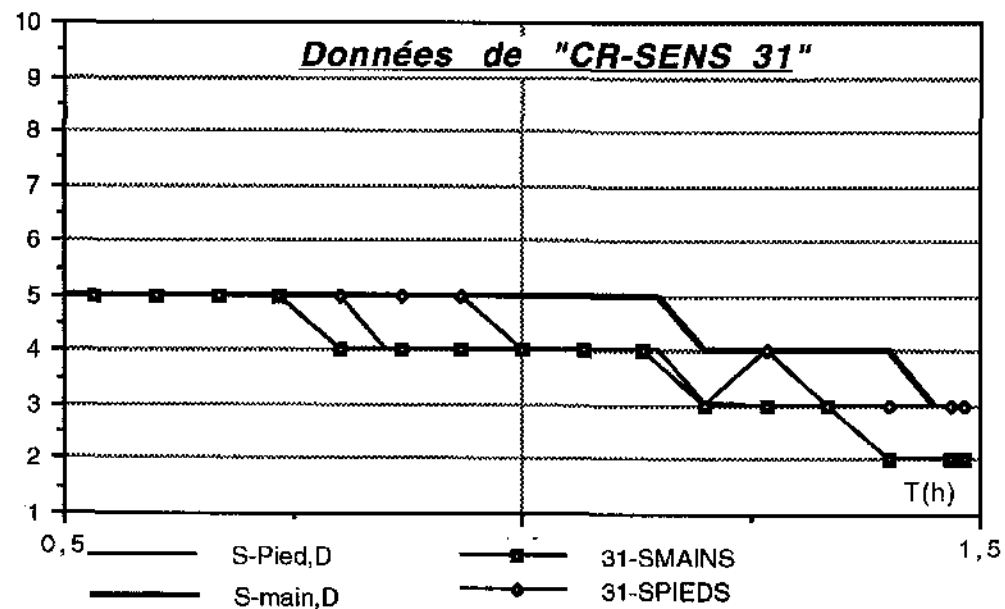
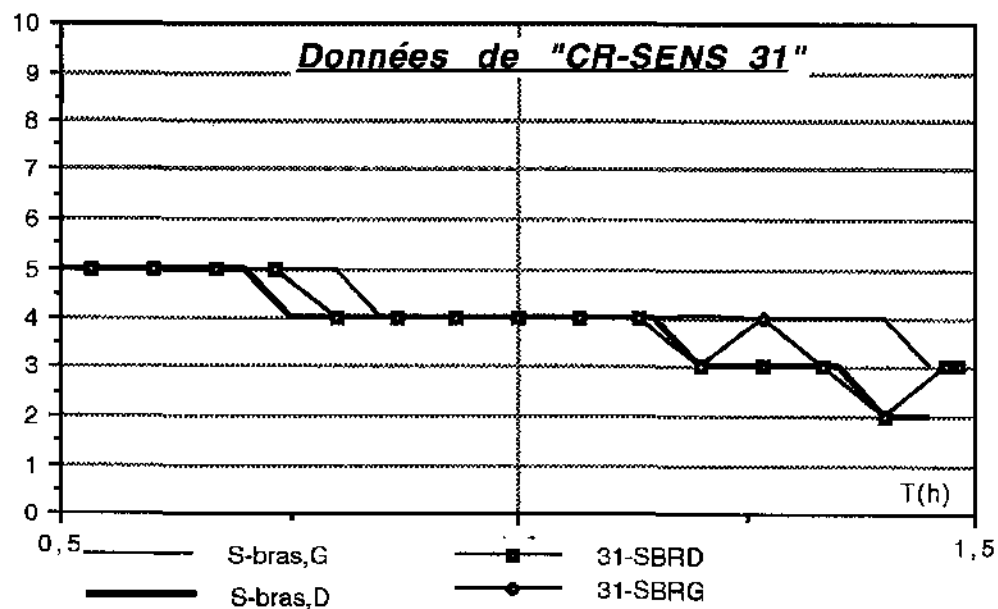
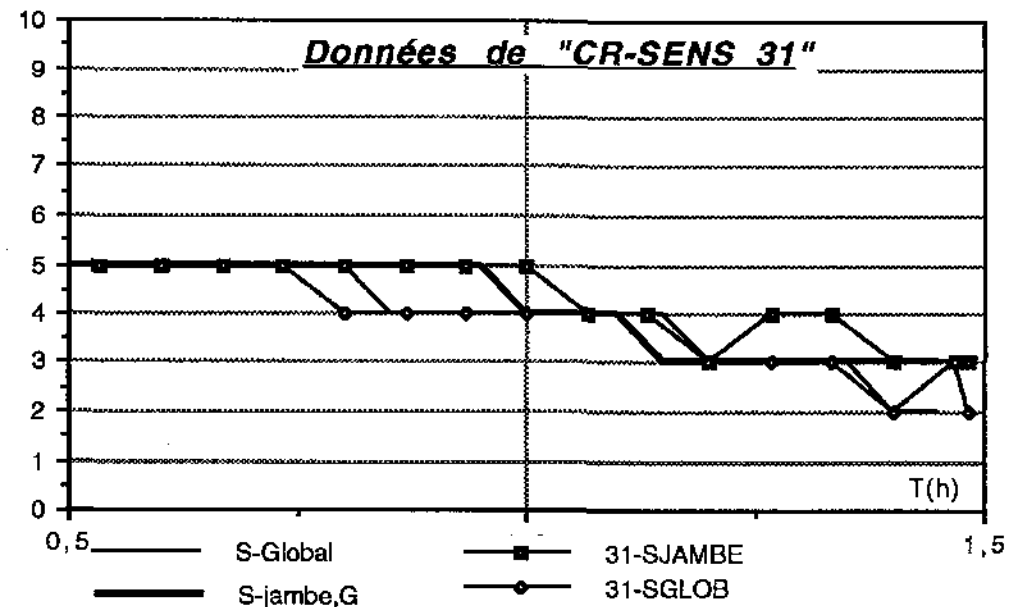
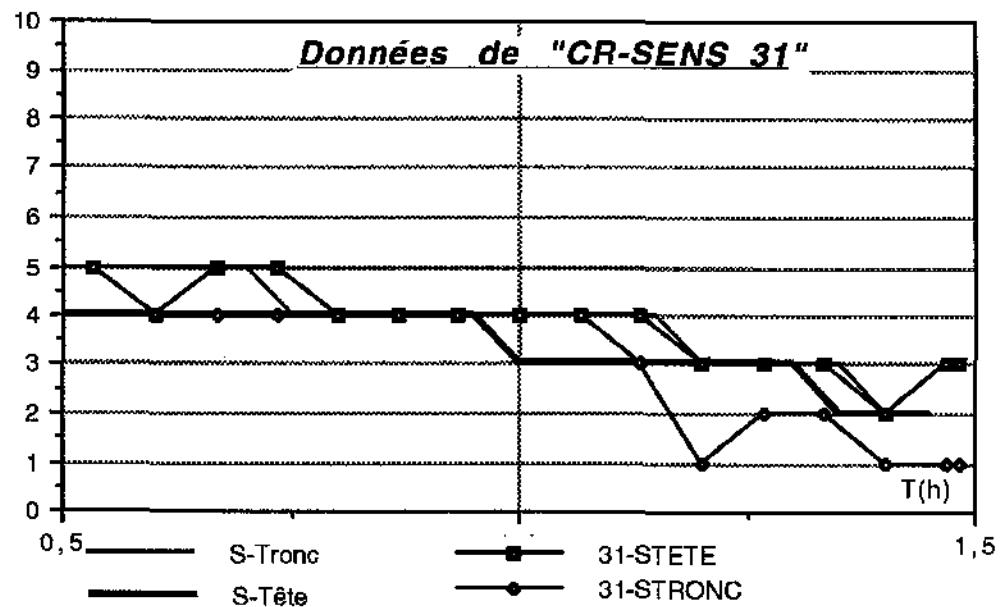


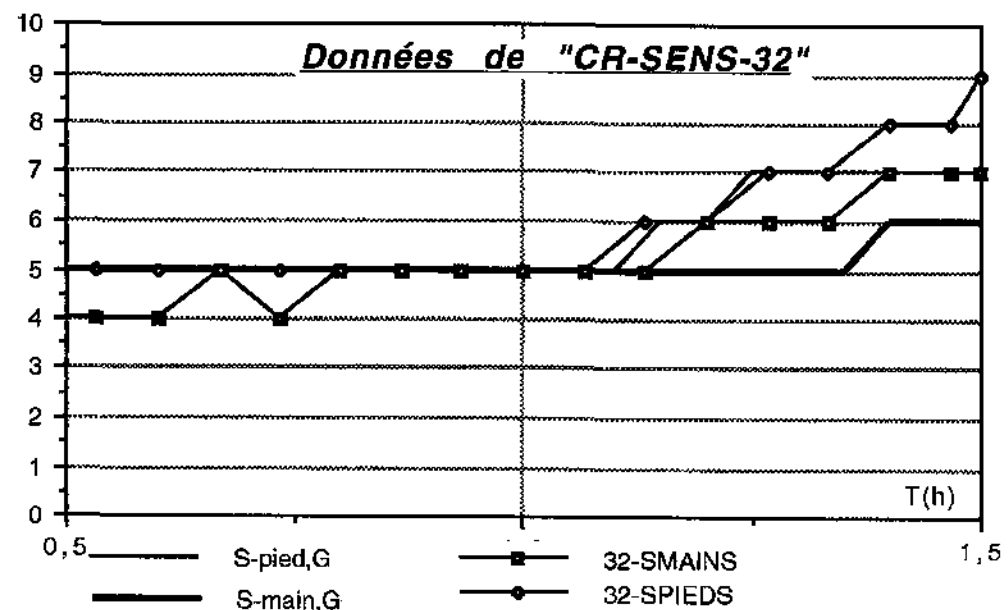
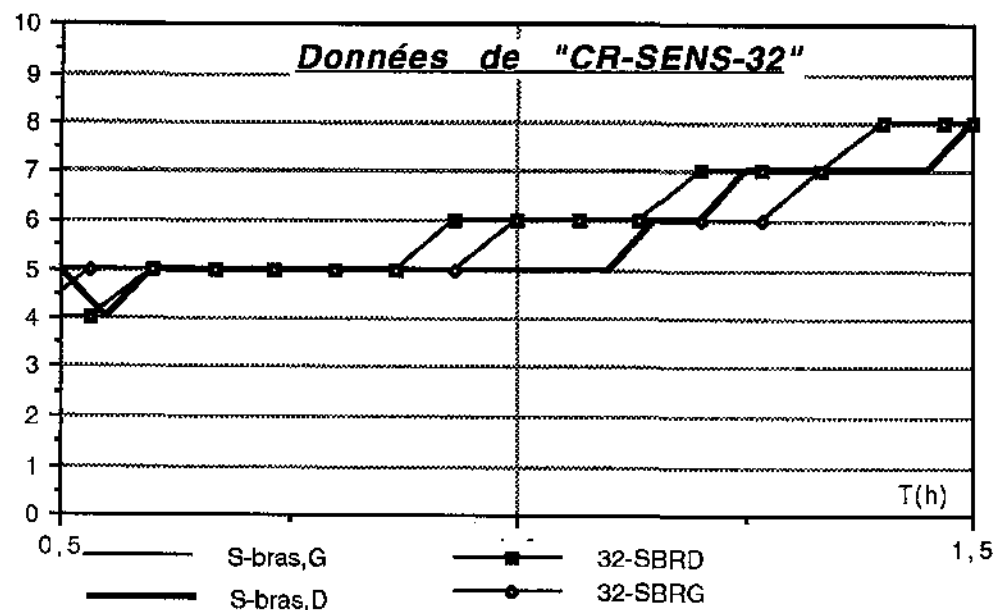
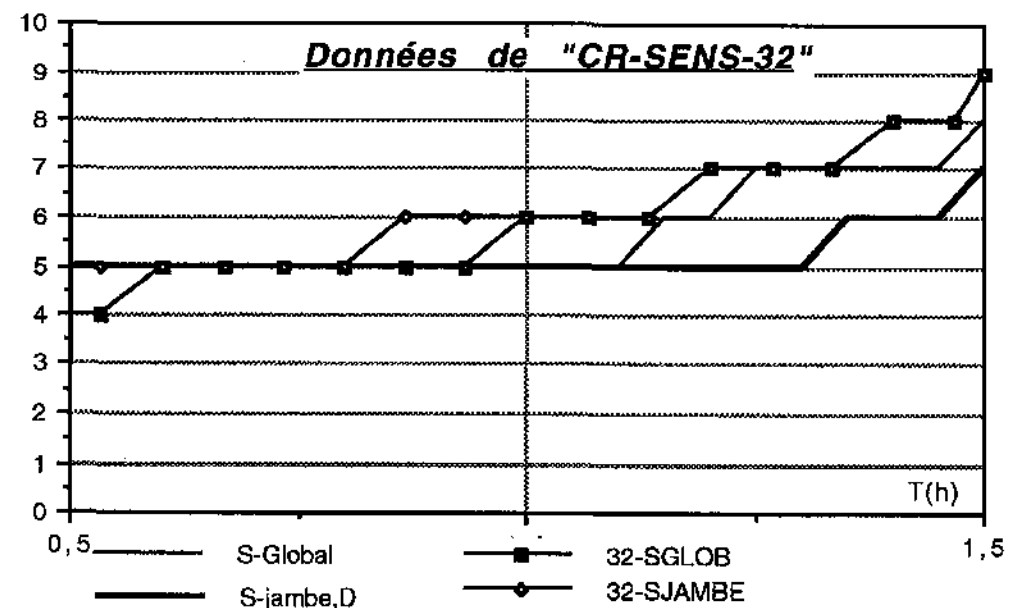
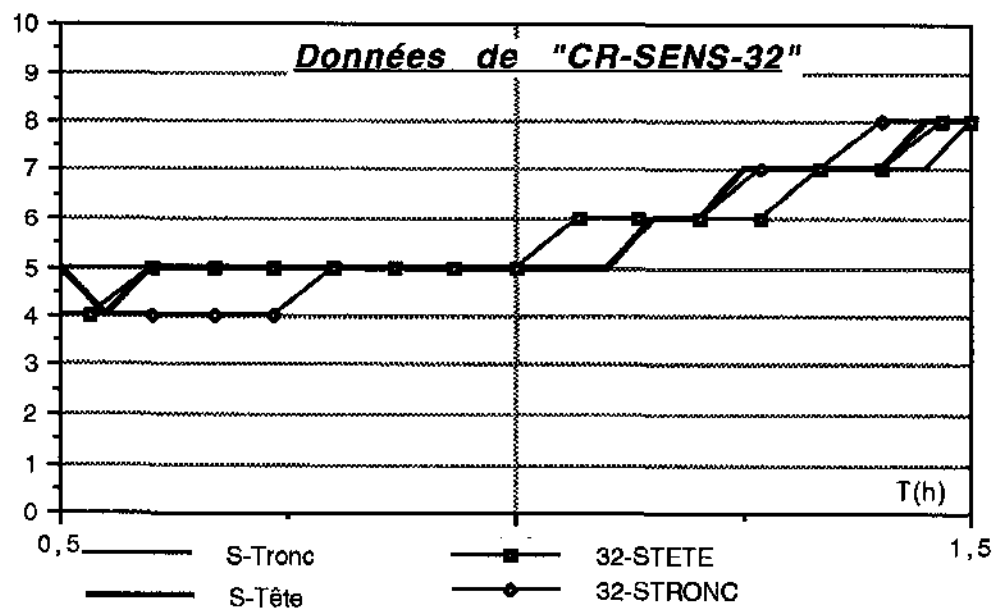












Récapitulatif des essais de SUEDE 1993 (n°1)

	Essai 18 Saut de soleil positif air chaud				Essai 19 Saut de soleil positif air frais				Essai 20 Saut de soleil négatif air frais				Essai 21 Identique aux 11 et 13			Essai 22 Saut de température d'air			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I 30mn	II 45mn	III 45mn	I	II	III	IV
Tve	→15	↗20	↘15	→15	→22				→15				→15	15↘11	11↗25	→20			
Vve	100				100				100				100			100			
HRve	15	20	15	15	→14				→13				70	70	70↗90 90↘70	→50			
Soleil	0	1000	1000↘0		0	0	1000		→1000	0	0↗1000		0			0			
Souf	bilevel				bilevel				bilevel				bilevel			bilevel			
U-pul	8				8				4				6			8			
Ts,pi	25↗30	30↘23	27↗23		30↘25	25↘10	10↘5		5	13	13	13↘5	23	25↘6	6↗40	22	46	22	5
Ts,ae	25↗30	30↘23	27↗23		30↘25	25↘10	10↘5		5	13	13	13↘5	23	25↘6	6↗40	22	46	22	5
T,deg	-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thab	25				15				15				21	21↘12	12↗30	25	37	24	12
HRha	18	18	16		23	23↘14	13	12	15↗20	20↗25	25	25↘20	33	↗50	50↘25	20↗30	30↘12	12↗30	30↗50
VTsk	→	↗	↘		→	↗	↘		→	↗	↘		→	↗	↘	→	↗	↘	

Récapitulatif des essais de SUEDE 1993 (n°2)

	Essai 23 Modes de soufflages				Essai 24 Vitesses de soufflage				Essai 25 Identique au 29			Essai 26 Tous constant bas puis haut				Essai 27 Echange par rayon ¹ croissant			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III 1h	I 45mn	III 45mn	I	II	III 1h30mn	I	II	III
Tve	→ 25				→ 25				→ 15 15↗ 22 ↘ 7			7 ↘ 5 5 ↗ 7		→ 16 5 ↘ 15					
Vve	100				100				100			100		100		100			
HRve	→ 50				→ 50				→ 45			35↗ 50 50 50 50↗ 60		40 40 ↘ 10					
Soleil	0				0				0			0		500		0			
Souf	bilevel	aérateur	bilevel	pieds	bilevel				bilevel			bilevel		bilevel		bilevel			
U-pul	4				2	6	8	10	6			6		10		6 10mn			
Ts,pi	20 ↘ 16	-	18 ↗ 15	5	20 ↘ 19	18 ↘ 14	16 ↗ 14	16	20 ↗ 25	40 ↗ 25	40 ↘ 5	20	30	34	37	40 ↗ 37	37	37	40
Ts,ae	20 ↘ 16	7	18 ↗ 15	-	20 ↘ 19	18 ↘ 14	16 ↗ 14	16	20 ↗ 25	40 ↗ 25	40 ↘ 5	20	30	25	25↗ 31	40 ↗ 37	37	37	40
T,deg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thab	30 ↘ 25	25 ↘ 13	13 ↗ 33	20	25 ↘ 13	15 ↗ 18	13 ↗ 33	25	25 ↗ 36	36 ↘ 10	18	25	28	28	27	27	27	27	27
HRha	20 ↗ 30	15 ↗ 18	20 ↘ 16	35 ↘ 25	20 ↗ 30	35	35 ↘ 25	20 ↗ 25	25 ↘ 15	15 ↗ 40	35	35 ↘ 20	15	15	15	0	0	0	0
VTsk	→	→	→	→	→	→	→	↘	→	↗	↘	→	↗	→	↗	→	↗	↗	↗

Récapitulatif des essais de SUEDE 1993 (n°3)

	Essai 28 Gamme PSA						Essai 29 comme le 25			Essai 30 Rayonnement décroissant				Essai 31 convection croissant		Essai 32 convection décroissant	
	I 30mn	II 5mn	III 20mn	IV 10mn	V 10mn	VI 20mn	I	II	III 1h	I	II 1h 30mn			I	II 1h	I	II 1 h
Tve	→ - 18						→ 15	↗ 23	23 ↘ 7	→ 5	5 ↗ 27				22	22	
Vve	45	0	90	90	90	0	100			100				100		100	
HRve	50						50	50	50	→ 47				→ 47		→ 50	
Soleil	0						500	↗ 1000	1000 ↘ 0	0				0		0	
Souf	Pieds						bilevel			bilevel				bilevel		bilevel	
U-pul	12	12	12	8	0	12	6			6				8		8	
Ts,pi	10 ↗ 65	65 \ 52	52 ↗ 61	61 ↗ 69	74	74 \ 50	22	22 ↗ 40	40 ↘ 5	35	35	33	28	29 \ 25	25 ↘ 7	20	20 ↗ 45
Ts,ae	-	-	-	-	-	-	22	22 ↗ 40	40 ↘ 5	35	35	33	28	29 \ 25	25 ↘ 7	20	20 ↗ 45
T,deg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thab	15 ↗ 38	38	40	40	35	40	22	22 ↗ 35	35 ↘ 11	27				25	25 ↘ 13	20	20 ↗ 35
HRha	25 \ 0	0	0	0	0	0	25	25 \ 15	15 ↗ 40	23				25	25 ↗ 50	35	35 ↘ 20
VTsk	↗	→					→	↗	↘	↘	↗	↘	↘	→	↘	→	↘
							25	38	15	25	38	15					

UNIVERSITE PAUL SABATIER



P.S.A. - VALEO - LESETH

MATHER

Modèle de Mannequin thermique - Thermorégulation Humaine - Sensations thermiques

Rapport Final Juin 1994

Laboratoire Etudes des Systèmes et Environnement Thermique de l'Homme
Université Paul Sabatier - 118, Route de Narbonne - 31062 Toulouse Cedex

MATHER

Modèle de Mannequin thermique - Thermorégulation Humaine - Sensations thermiques

INTRODUCTION.....	4
-------------------	---

1ère Partie - Evolution du modèle MATHER HIVER

I.	LE MODÈLE DE THERMORÉGULATION	
	I.1. Généralités sur les modèles et choix du modèle de départ.....	5
	I.2. Premier tests sur le modèle existant.....	6
	I.3. Asymétrisation, séparation des deux bras.....	7
II.	LES TRANSFERTS CONDUCTEUR-HABITACLE	
	II.1. Le siège.....	8
	II.2. Echanges convectifs et vitesses d'air.....	9
	II.3. Rayonnement infra-rouge.....	10
	II.4. Rayonnement Solaire.....	11
III.	LA REPRÉSENTATION DES VÊTEMENTS	
	III.1. Evolution du modèle vêtements.....	12
	III.2. Echanges de chaleur au niveau des vêtements.....	16
	III.3. Description des vêtements utilisés.....	19
IV.	LES SENSATIONS	
	IV.1. Evolution du modèle de sensation.....	17
	IV.2. Le modèle final.....	18

2ème Partie - Les Essais

I.	Généralités sur les expériences en soufflerie.....	20
II.	Essais d'Octobre 1992 : la Verrière.....	21
III.	Essais de Novembre 1992 : la Verrière.....	23
IV.	Essais de Mai 1993 : la Verrière.....	25
V.	Essais d'Octobre 1993 : Suède.....	25
VI.	Essais de Janvier 1994 : la Verrière.....	28
VII.	Récapitulatif de tous les essais.....	29

3ème Partie - Résultats de simulation

I.	LES GAMMES PSA	
	I.1 Essai n°28.....	32
	I.2 Essai n°38.....	33
	I.3 Essai n°39.....	34
II.	LES AUTRES ESSAIS	
	II.1. Essais n°11, 13 et 21.....	34
	II.2. Essai n°20.....	36
	II.3. Essai n°29.....	36
III.	CONCLUSIONS.....	36
	COMPARAISONS SIMULATIONS / EXPÉRIENCES.....	37

ANNEXES

INTRODUCTION

Ce rapport final fait la synthèse de tout le travail effectué durant la première phase d'un contrat dont le but était de mettre au point un modèle mathématique capable de représenter le comportement thermique d'un conducteur dans son véhicule. L'étude a été menée pour PSA par M. DUVEAU et pour VALÉO par M. DAUVERGNE, avec l'aide de M. ROBIN (ACOTECH). Le travail de recherche a été effectué pour le LESETH (Université Toulouse III) par Frédéric ALTHABÉGOÏTY, Alain CORDIER, Françoise MONCHOUX, Guy SERIN, Françoise THELLIER .

Le travail n'a pu être réalisé que grâce à la compétence et au savoir-faire des personnes qui y ont participé et qui n'ont pas hésité à s'impliquer profondément dans les tâches qui leur revenaient. Leur esprit d'équipe, leur bonne volonté et, parfois aussi, leur patience, ont permis d'effectuer dans une ambiance toujours très sympathique et efficace un travail qui s'écartait bien souvent de leurs préoccupations habituelles, avec tout ce que cela comporte d'efforts d'adaptation et de travail supplémentaire.

Francis CARLIER, l'"essayeur", a joué un rôle essentiel, particulièrement délicat et pénible. Cette étude lui doit beaucoup et nous l'en remercions vivement. Nous voulons également remercier MM. Bernard DAVID et Patrick BACH (PSA), M. Jean-Claude DEFFIEUX (VALÉO) ainsi que MM. Michel LAURENS et Jean-Claude NEYROU (LESETH), qui ont pris une part décisive au bon avancement de l'étude.

L'excellent travail fait par les équipes techniques des souffleries de La Verrière (MM. J.M. CAUDE, B. PERESSON, P. PRUD'HOMME, P. BASTIEN, L. BROSSERON, J. ROULAUD, P. CORDIER et M. MORENO) et de Suède (M. Lars FOGELBERG et son équipe) doit être souligné ici, car la qualité des résultats obtenus leur doit beaucoup.

Le rapport est composé de trois grandes parties :

- La première fait le point sur l'état du modèle, après indications sur les démarches suivies et les diverses modifications que nous lui avons apportées.
- La deuxième partie donne des précisions sur les techniques expérimentales utilisées et décrit les 36 expériences réalisées.
- La troisième partie présente les résultats de simulation des essais de gammes PSA, puis de quelques autres essais significatifs.

Enfin, une annexe technique reprend toutes les mesures faites lors des expériences, le traitement des données et le mode d'emploi des programmes. Les modèles (MATHER-Hiver et Échanges Radiatifs) sont décrits en détail dans cette annexe.

I. LE MODÈLE DE THERMORÉGULATION

I.1. Généralités sur les modèles et choix du modèle de départ

Avant de démarrer cette étude, une recherche bibliographique a été faite, afin de trouver parmi les modèles de thermorégulation humaine existants le mieux adapté à nos besoins. Ce modèle doit être capable de calculer les principales variables physiologiques des différentes parties du corps (température interne, températures et mouillures cutanées, ...) et les réactions de thermorégulation (transpiration, frisson, ...), afin d'en déduire les sensations thermiques locales et globale. Les données d'entrée du modèle sont les caractéristique physiques de l'environnement auxquelles le sujet est exposé (température de l'air et des parois, humidité, vitesse de l'air, etc.).

Lavoisier, au 18^{ème} siècle, fut le premier à établir que l'homme produit de la chaleur et que le système de thermorégulation est capable de maintenir la température interne du corps constante dans des conditions assez variées. Le plus ancien modèle de thermorégulation a été publié par Burton en 1934, qui fut le premier à appliquer les équations de transferts de chaleur et de masse à l'intérieur du corps humain. De nos jours il existe environ 100 modèles dont l'approche et la complexité sont différentes. Bien que presque tous soient basés sur le même principe, ils ont des domaines de validité très différents, il faut donc être prudent. La plupart des modèles ont été faits par des physiologistes, qui ont essayé de représenter au mieux le corps humain et d'en tirer des indices de contraintes thermiques, ce qui ne nous suffit pas.

Les modèles simples sont de loin les plus répandus ; ils sont validés par un grand nombre d'expériences et valables en régime transitoire. Leur inconvénient majeur est qu'ils ne sont fiables que pour des conditions d'ambiance homogènes, ce qui ne correspond pas à nos conditions et qu'ils ne donnent pas de résultat local (pieds, tête, main, etc.).

Très peu de modèles complexes sont utilisés par d'autres personnes que l'auteur, pour différentes raisons : manque de connaissances, de confiance, de données d'entrée/sortie ou simplement manque de versions "prêtes à l'emploi" disponibles. Il faut noter que plus un modèle est compliqué, plus il a besoin de données détaillées difficiles à obtenir. D'autre part très peu de modèles sont disponibles sous forme informatique, voire même en version complète au niveau des équations. La plupart du temps il ne s'agit que de descriptions du mode de fonctionnement général, de modifications faites par rapport aux versions précédentes ou d'équations trop globales, sans précision sur les paramètres, ne nous permettant de retranscrire le modèle sous forme informatique.

Aucun modèle, excepté TRIM mis au point au LESETH et dédié à l'habitat, ne donne les sensations thermiques. Par ailleurs, il n'existe apparemment aucun modèle prenant en compte les problèmes d'expositions au soleil, ou d'échanges par conduction avec des matériaux autres que les combinaisons à liquide de refroidissement utilisées dans l'espace.

L'étude bibliographique a montré que le modèle de Kuznetz est le plus proche de nos préoccupations. Ce modèle a été réalisé par la NASA mais nous n'avons pas encore réussi à nous le procurer. Les publications qui ont été faites à ce sujet ne donnent que très peu de détails il nous est impossible de le reconstituer

Nous nous sommes donc orientés définitivement vers l'amélioration de MARCL, développé au LESETH. Ce modèle, que nous connaissons bien, est basé sur celui de Stolwijk, dont sont issus la quasi-totalité des modèles créés depuis 1970, dont celui de Kuznetz.

Les modèles MARCL (Modèle de thermorégulation humaine) et TRIM (Modèle de sensations thermiques développé également au LESETH) ont donc été notre base de départ et ont été modifiés en fonction des besoins, à partir de la version que nous possédions en début de contrat (cf. rapport n°1). Au cours de l'étude, nous avons eu en permanence une version fonctionnelle et à jour du modèle.

I.2. Premiers tests sur le modèle existant

Afin de faire une étude de faisabilité nous avons décidé de procéder à des essais du logiciel MARCL, sur une configuration homme-voiture plausible. A cet effet, nous avons modélisé l'habitacle de la BX, d'après les données fournies par Valéo, avec des données de températures et de vitesses d'air tirées des expériences réalisées en juillet 1991. En attendant le modèle de Valéo pour les échanges infra-rouge, nous avons utilisé le logiciel IR du LESETH. Cet ensemble, malgré ses imperfections, a permis de déterminer les grandeurs importantes à mesurer lors des essais.

Notre logiciel de calcul des échanges infra-rouges n'acceptant que 30 surfaces, nous avons dû réduire l'habitacle de la BX à 9 surfaces, puisque le corps humain nécessite 21 surfaces.

Dans l'expérience simulée, le conducteur est préalablement à l'équilibre thermique dans une ambiance neutre. Son entrée dans la voiture correspond à une baisse importante de la température ambiante, suivie d'une remontée en température, puis d'une baisse temporaire au niveau des pieds uniquement. Les températures de paroi et d'air sont celles mesurées lors des expériences. Les résultats ont montré que l'allure générale des courbes était respectée, la position relative des courbes ne l'étant pas toujours, de même que l'amplitude des variations. Ces résultats de simulations nous ont amené à diverses réflexions :

- L'habillement n'étant pas connu, nous avons pris des valeurs d'isolation vestimentaire qui nous semblaient plausibles, mais qui peuvent s'éloigner de la réalité. Le vêtement doit donc être défini avec précision et doit rester le même au cours de tous les essais.

- Les seules températures d'air disponibles étaient celles au niveau des pieds et du siège ; nous avons supposé que toutes les parties du corps, excepté les pieds, étaient dans de l'air à cette dernière température. Cette hypothèse est largement insuffisante. Il conviendra de bien mesurer tous les paramètres des expériences futures.

- Les points de mesures des températures cutanées sont importants. Ce problème est bien connu des physiologistes : il faut trouver un emplacement qui soit représentatif pour chaque segment.

- Les valeurs calculées sont évidemment sujettes à caution. Toutefois, on a tiré des conclusions intéressantes sur les sensibilités respectives des diverses parties ce qui nous a permis de lister les variations à imposer aux paramètres.

I.3. Asymétrisation - séparation des deux bras

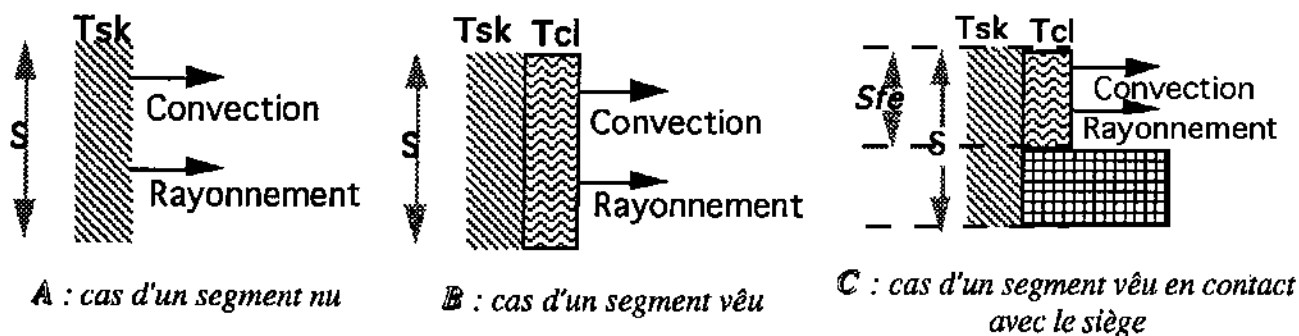
L'influence du rayonnement et notamment, du rayonnement solaire, doit se manifester avec un poids différent sur les deux côtés du corps. Aussi a-t-il été décidé dès le début de procéder à l'asymétrisation du mannequin thermique, afin de séparer les deux bras, droit et gauche, qui étaient groupés dans la version d'origine.

Pour cela, il a fallu intervenir sur le modèle de thermorégulation lui-même et sur le logiciel qui gère les échanges infra-rouges. Cette modification a été la première spécifiquement faite pour l'application du modèle au véhicule et a donné naissance à MATHER (modèle de MANnequin THERmique)

Des simulations ont été faites dans les mêmes conditions que pour les tests précédents (sans rayonnement solaire, car ce type de rayonnement n'est pas encore pris en compte dans le modèle). La température et la vitesse de l'air étant la même sur les deux bras, mais le bras gauche étant plus près que le bras droit d'une vitre froide, on doit observer un écart sur les sensations des bras. Les résultats montrent que l'asymétrisation influe très peu sur les sensations globale et locales autres que les bras. Par contre il est clair que la séparation des bras est nécessaire pour une estimation correcte des sensations locales. Cette rapide analyse des phénomènes permet de saisir la complexité de phénomènes entraînant des sensations difficilement prévisibles sans simulation.

II. LES TRANSFERTS CONDUCTEUR-HABITACLE

Pour le calcul des transferts de chaleur et de masse entre le conducteur et la voiture, trois configurations sont envisagées : un segment peut être nu, vêtu, ou en contact avec le siège.



- A** Segment nu : les échanges ont lieu sur une surface S de peau à température T_{sk}
B Segment vêtu : les échanges ont lieu sur une surface $S.fcl$ de vêtement à température T_{cl}
C Segment vêtu en contact avec le siège : les échanges avec l'air ambiant ont lieu sur une surface S_{fe} de vêtement à température T_{cl} . Les échanges avec le siège ont lieu sur une surface S_{cont} .

$$S_{fe}(i) = S(i) fcl(i) (1 - P_{cont}(i))$$

$$S_{cont}(i) = S(i) \cdot P_{cont}(i)$$

$S(i)$	surface du segment i
$S_{fe}(i)$	surface d'échange avec l'extérieur pour le segment i
$S_{cont}(i)$	surface d'échange avec le siège pour le segment i
$P_{cont}(i)$	pourcentage de la surface (i) en contact avec le siège.

Remarque : Nous n'avons pas envisagé le cas de segment nu en contact avec le siège, car les segments nus sont la tête et les mains.

II.1. Le siège

Une étude est actuellement en cours en ce qui concerne les transferts de masse et de chaleur dans le siège, en régime dynamique. Lors des expériences, nous avons mis un fluxmètre dans le dos du conducteur, pour estimer le flux de chaleur perdu à ce niveau. En fait, ce flux est assez important dans les premiers instants, au moment où le conducteur s'assied sur le siège, mais il s'annule très rapidement, en quelques minutes.

En première approximation, nous avons donc considéré que le siège est un parfait isolant thermique, et que le flux perdu par le dos en contact avec le siège est nul. En ce qui concerne les transferts d'humidité, dans les conditions que nous avons étudiées jusqu'à présent, le conducteur transpire peu ; d'autre part l'humidité relative de l'air est faible. Nous avons donc pris en première hypothèse que le siège ne limite pas les transferts d'humidité, et que toute l'eau produite au niveau de la peau peut être évaporée.

Ces hypothèses ne sont valables que pour les conditions d'hiver et en régime permanent. Pour les conditions d'été lorsque le sujet transpire plus, il sera impossible de négliger l'absorption d'eau dans le tissu lui-même et donc sont effet limitatif sur l'évaporation de la sueur.

II.2. Echanges convectifs et vitesses d'air

Les échanges convectifs sont importants puisqu'en hiver ils représentent environ la moitié des échanges de chaleur. D'autre part il faut noter que même si l'air chaud pulsé réchauffe les parois, l'augmentation de la température d'air est le seul moyen d'atteindre des conditions de confort lorsque les températures de surface sont très basses.

Il est donc important de connaître les vitesses d'air avec une bonne précision. Le logiciel de calcul aérodynamique n'étant pas encore disponible, nous avons mesuré les vitesses d'air au voisinage du conducteur dans les différentes configurations de soufflage dans la voiture.

Les mesures de vitesse d'air ont été effectuées à l'aide d'un anémomètre à fil chaud

- La voiture est dans une pièce close, sans vent et la température ambiante est d'environ 20°C. Il n'a pas été jugé nécessaire de placer le véhicule dans la soufflerie car celui-ci étant neuf les courants d'air parasites qui pourraient se produire avec un vent extérieur sont supposés négligeables.

- Le pulseur d'air de la voiture est alimenté par une alimentation stable de 12, 8 ou 4 volts.

- Les différents types de soufflage ont été testés (dégivrage, pieds-dégl, ...)

- Le moteur de la voiture est arrêté.

Pour 12 configurations nous avons relevé la vitesse d'air en 12 points qui correspondent aux points de mesure des températures d'air relevées au voisinage du conducteur. Du fait de la protection de l'anémomètre, les sondes se trouvent à une distance de 2 à 2,5 cm des habits du conducteur. De plus ces sondes étant montées au bout d'une tige de 60 cm il n'a pas toujours été facile de la positionner sur le conducteur. Tous les résultats utiles sont dans l'annexe.

Les valeurs mesurées ont été utilisées dans le modèle. Il faut noter qu'une étude complémentaire est à envisager, en effet les échanges convectifs sont calculés d'après l'expression :

$$\Phi_{\text{conv}(i)} = h_c(i)(T_{\text{cl}(i)} - T_{\text{air}(i)}) \quad (\text{W/m}^2)$$

$T_{\text{air}(i)}$ température de l'air mesurée à proximité du segment i au cours de chaque expérience

$T_{\text{cl}(i)}$ température de surface des vêtements calculée par le modèle,

$h_c(i) = h_0(i) V_{\text{air}(i)}^{0.5}$ cette expression a été établie pour l'habitat. Selon plusieurs auteurs l'exposant peut varier selon le type d'écoulement, de même que les valeurs de $h_0(i)$.

La vitesse d'air n'a été mesurée qu'une seule fois pour des conditions différentes des expériences en soufflerie. Or elle est influencée par la vitesse du vent dans la veine (représentant la vitesse de déplacement du véhicule). Nous avons tenu compte de ce fait mais de façon tout à fait empirique, à partir de courbes donnant la vitesse d'éjection au niveau des pulseurs en fonction de la vitesse du véhicule.

Il faut noter que ce coefficient de convection h_c intervient dans les échanges convectifs et également dans les échanges évaporatifs. Son manque de précision risque d'être crucial pour les conditions d'été.

II.3. Rayonnement infra-rouge

Etant donné la proximité des surfaces qui peuvent être à des températures très différentes les unes des autres, il faut calculer avec précision les échanges radiatifs dans l'infra-rouge.

Le calcul des échanges radiatifs est décomposé en deux parties : le calcul des facteurs de forme, purement géométrique, puis le bilan radiatif entre les différentes surfaces à partir des facteurs de formes. Les deux étapes sont exécutées séparément.

Géométrie de l'ensemble et calcul des facteurs de forme. A partir du fichier C.A.O. de la ZX et de celui d'un mannequin, nous avons réalisé une géométrie spécifique au calcul des transferts radiatifs entre le conducteur et la voiture. Nous avons cependant dû faire certaines hypothèses, afin de simplifier la géométrie complexe de l'ensemble.

- Etant donné qu'il n'y a pas de transferts radiatifs sur les surfaces du conducteur qui sont en contact avec le siège, nous avons supprimé ces parties inutiles au calcul du rayonnement .

- Pour des raisons évidentes, il est important de décrire finement la géométrie des surfaces qui "voient" le plus le conducteur. Ainsi la partie avant de l'habitacle est restée proche de la réalité alors que la partie arrière a été largement simplifiée.

A partir de cette géométrie, les facteurs de formes sont calculés par le programme "FCTFRM". Ce programme calcule les facteurs de forme en considérant que le rayonnement est émis selon une demi-sphère dont le centre est situé au centre de la surface rayonnante. La surface de la demi-sphère est découpée en plusieurs triangles sphériques qui déterminent les angles solides dans lesquels sont émis les rayons.

Le calcul des facteurs de forme est d'autant plus précis que les surfaces des triangles sont plus homogènes et les angles solides de tir petits. Un premier programme est utilisé pour triangulariser l'ensemble des surfaces. Le programme "FCTFRM" a la particularité de pouvoir regrouper les différentes surfaces ayant des températures identiques. Chaque surface devant être isotherme, nous avons tenu compte des différentes répartitions en températures mesurées (cf. rapport n°2 et annexe).

La géométrie obtenue comprend environ 300 surfaces élémentaires différentes, que nous avons regroupées en 27 familles de température : 20 pour le véhicule et 7 pour le conducteur. Nous obtenons une matrice de facteur de forme de dimension 27×27 . La valeur des facteurs de formes "surfaces habitacle \Rightarrow surfaces conducteur" permet d'avoir une idée de l'influence qu'aura chaque surface sur les échanges radiatifs. Les facteurs de forme $F(i,i)$ ne sont pas nuls, car il s'agit de groupe de surfaces qui ne sont pas forcément coplanaires. Le temps de calcul de ces facteurs de forme est assez long (60h. sur SUN), mais en fait il n'est réalisé qu'une fois, puis stocké dans un fichier qui sera utilisé par le modèle d'échanges radiatifs.

Modèle d'échanges radiatifs. La méthode de calcul est basée sur les flux nets. La description complète est donnée en annexe, nous rappelons tout de même certaines hypothèses :

- Les surfaces sont opaques au rayonnement infra-rouge, elles sont grises et diffusantes en émission et en réflexion.

- Leurs propriétés radiatives sont indépendantes de la direction d'émission

$$\epsilon = \alpha = 1 - \rho$$

ϵ émissivité, α absorptivité, ρ coefficient de réflexion

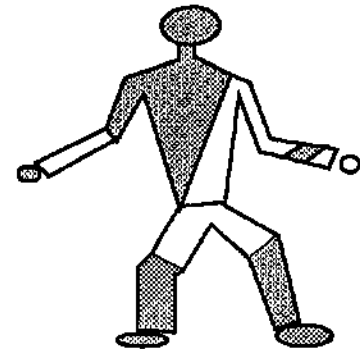
- Chaque surface considérée est isotherme, la surface i est à température T_i

- Le flux incident venant des autres surfaces est réparti uniformément.

- le milieu traversé par le rayonnement est considéré comme parfaitement transparent, et ne participe donc pas aux échanges.

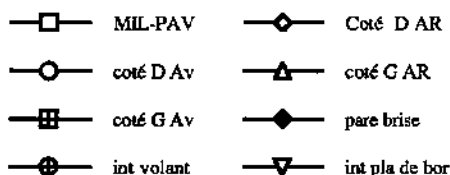
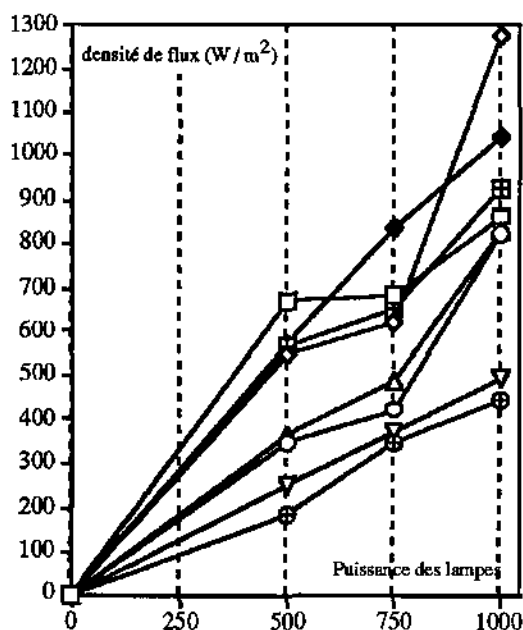
II.4. Rayonnement Solaire

Pour le rayonnement solaire nous disposons uniquement des valeurs de densité de flux mesurées, sur le véhicule et sur le conducteur, lors des expériences en Suède en octobre 1993. Aucune mesure n'a été effectuée à la Verrière et il faut noter que les caractéristiques des lampes sont très différentes. A partir de ces densités de flux reçues sur chaque segment corporel, nous avons calculé les flux reçus par chaque segment en fonction du pourcentage de surface éclairée estimée.

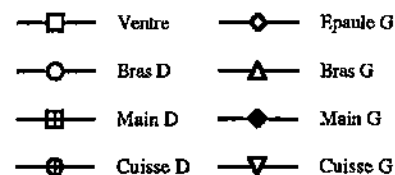
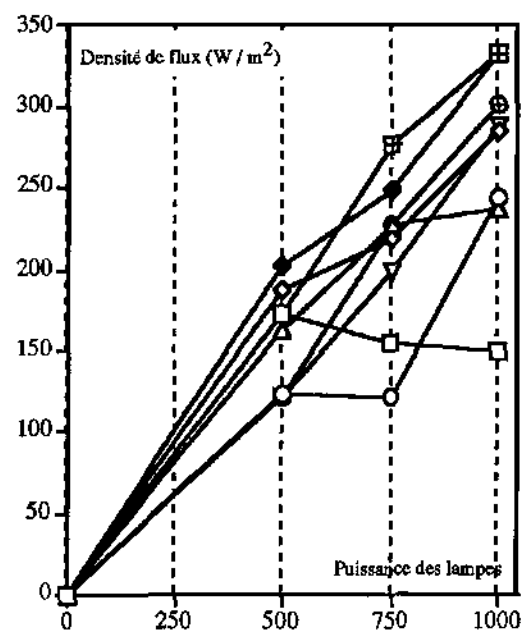


Les parties blanches correspondent aux zones éclairées.

Les Graphes ci-dessous donnent les valeurs mesurées à l'aide d'un pyranomètre en fonction de la puissance d'alimentation des lampes (Plampes). On peut noter que l'évolution des flux mesurés n'est pas linéaire en fonction de la puissance certaines valeurs sont très certainement fausses, à cause d'une mauvaise orientation du pyranomètre, ou un léger déplacement entre deux mesures.



Densités de flux mesurées sur le véhicule



Densités de flux mesurées sur le conducteur

Nous avons utilisé les expressions suivantes, pour calculer les flux locaux.

$$\Phi_{\text{tronc}} = \frac{(\Phi_{\text{épaule}} + \Phi_{\text{ventre}})}{2} S_{\text{tronc}} \cdot P_{\text{tronc}}$$

$$\Phi_{\text{bras-D}} = \Phi_{\text{bras-D}} S_{\text{bras-D}} \cdot P_{\text{bras-D}}$$

$$\Phi_{\text{bras-G}} = \Phi_{\text{bras-G}} S_{\text{bras-G}} \cdot P_{\text{bras-G}}$$

$$\Phi_{\text{mains}} = \Phi_{\text{mains}} S_{\text{mains}} \cdot P_{\text{mains}}$$

$$\Phi_{\text{Jambes}} = \frac{(\Phi_{\text{cuisse D}} + \Phi_{\text{cuisse G}})}{2} S_{\text{Jambes}} \cdot P_{\text{Jambes}}$$

avec Φ : Flux solaire

ϕ : Densité de flux mesurée

S : Surface du segment

P : Pourcentage de la surface éclairée

$$P_{\text{tronc}} = 15 \%$$

$$P_{\text{bras-D}} = 20 \%$$

$$P_{\text{bras-G}} = 40 \%$$

$$P_{\text{mains}} = 25 \%$$

$$P_{\text{Jambes}} = 25 \%$$

Ces relations nous ont permis de tracer les courbes ci-contre. Puis nous avons linéarisé la relation entre les flux et la puissance des lampes.

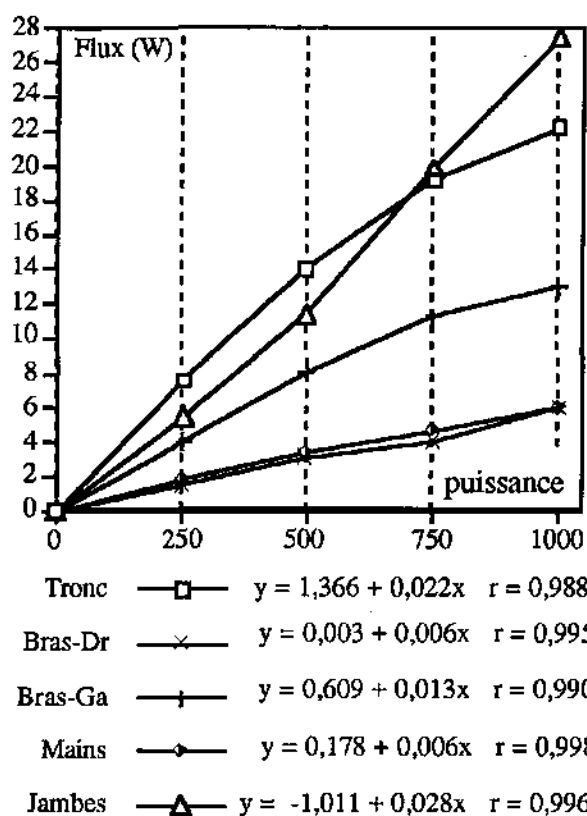
Nous avons finalement déduit les relations suivantes :

$$\Phi_{\text{tronc}} = 0,022 P_{\text{Lampes}}$$

$$\Phi_{\text{bras-G}} = 0,013 P_{\text{Lampes}}$$

$$\Phi_{\text{bras-D}} = \Phi_{\text{mains}} = 0,006 P_{\text{Lampes}}$$

$$\Phi_{\text{Jambes}} = 0,028 P_{\text{Lampes}}$$



Flux reçu sur chaque segment en fonction de la puissance d'alimentation des lampes.

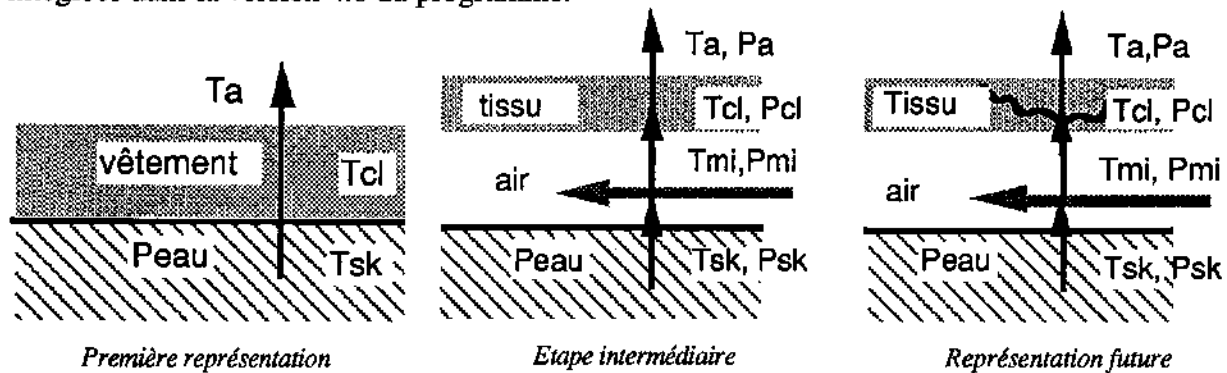
III. LA REPRÉSENTATION DES VÊTEMENTS

III.1. Evolution du modèle vêtement

Les vêtements étant le lieu de tous les échanges avec le milieu environnant, il est important de déterminer avec exactitude leur température et leur humidité. Les modifications sur la représentation des vêtements ont été imposées par l'apparition de problèmes liés au manque de données sur les caractéristiques locales des vêtements. Nous nous sommes tournés vers une description plus fine nécessitant les caractéristiques des tissus. Ces données sont assez nombreuses mais pas toutes accessibles, il faut alors faire des hypothèses sur la composition exacte des habits portés par Francis.

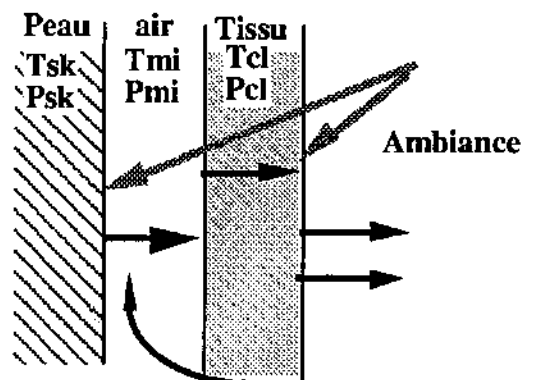
Dans une première approche, le vêtement était composé d'une couche unique collée contre la peau et les transferts de masse et de chaleur étaient calculés en régime permanent et découplés (cf. rapport n°1). Puis la ventilation sous vestimentale a été ajoutée, en considérant la présence d'une lame d'air entre le tissu et la peau, les transferts de masse étant toujours représentés par des équations de régime permanent (cf. rapport n°4).

Les futures modifications prendront en compte non seulement la ventilation sous-vestimentale, mais aussi l'effet de tampon qui représente la faculté d'un tissu à absorber puis à désorber de l'eau. Ce phénomène n'est pas très important en conditions froides, mais le devient lorsque le sujet transpire beaucoup et que la pression de vapeur dans l'air est plus élevée (conditions d'été). Dans ce nouveau modèle de vêtements il y aura couplage entre transferts de chaleur et de masse, car les phénomènes de sorption d'humidité provoquent des dégagements de chaleur. Nous manquons actuellement de données pour valider avec précision ces dernières modifications, elles ne sont donc pas encore intégrées dans la version 4.0 du programme.



III.2. Les échanges au niveau des vêtements

Pour la plupart des segments, les échanges avec le milieu environnant ont lieu sur la surface des vêtements. Pour améliorer la prise en compte des habits dans le modèle on divise la couche de vêtements en deux : une couche d'air entre la peau et le tissu puis une couche de tissu. Chaque couche est homogène et isotherme, les transferts entre deux couches ont lieu à l'interface. Dans la couche d'air on suppose qu'il y a un débit d'air qui dépend des ouvertures des vêtements, de leur perméabilité à l'air et de la vitesse du vent à la surface des vêtements.

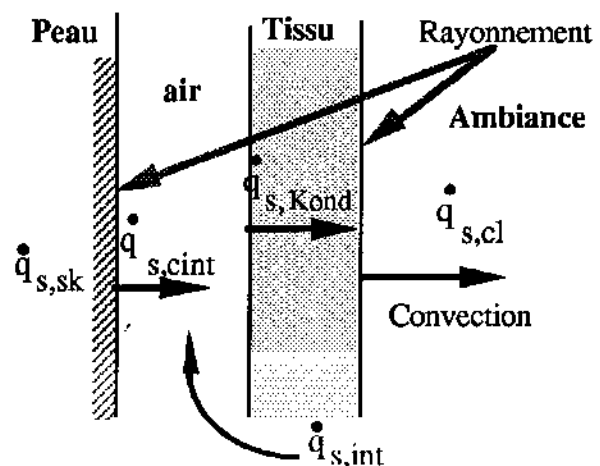


Transferts de chaleur sensible

Il faut noter que dans cette nouvelle version nous tenons compte du rayonnement solaire, qui arrive à la surface des vêtements mais dont une partie atteint la peau en passant à travers le tissu.

- $\dot{q}_{s,sk}$ Transferts au niveau de la peau. La peau est en contact avec le milieu intérieur et reçoit une part de rayonnement passant à travers le tissu :

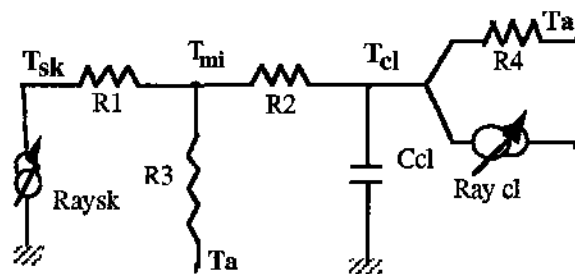
$$\dot{q}_{s,sk} = \dot{q}_{s,cin} + Ray_{sk}$$



Représentation schématique des transferts de chaleur

- * $\dot{q}_{s, \text{cin}}$: échange convectif entre la peau et l'air sous vestimental.
- * Ray_{sk} : somme du rayonnement solaire et infra rouge, calculé en fonction de la température de peau, qui passent à travers le tissu, il faut alors tenir compte de sa transparence.
- $\dot{q}_{s, \text{int}}$ La convection interne sous vestimentale est due au renouvellement d'air sous-vestimental et dépend des caractéristiques de l'air et de son débit, donc de la coupe et de la porosité du vêtement.
- $\dot{q}_{s, \text{Kond}}$ La conduction à travers le tissu dépend de la conductivité thermique du tissu lui même.
- $\dot{q}_{s, \text{cl}}$ Transferts à la surface du tissu : $\dot{q}_{s, \text{cl}} = \text{Conv} + \text{Ray}_{cl}$
 - * Conv : Convection à la surface du tissu, qui dépend de la température et de la vitesse de l'air.
 - * Ray_{cl} : Flux radiatif total à la surface du tissu. Le flux infra-rouge est calculé en fonction de la température du tissu. Le rayonnement solaire est calculé selon la méthode décrite plus haut.

Pour simplifier les calculs des températures et des flux, nous faisons l'analogie avec le circuit électrique suivant : R_1 , R_2 , R_3 et R_4 sont des résistances thermiques.



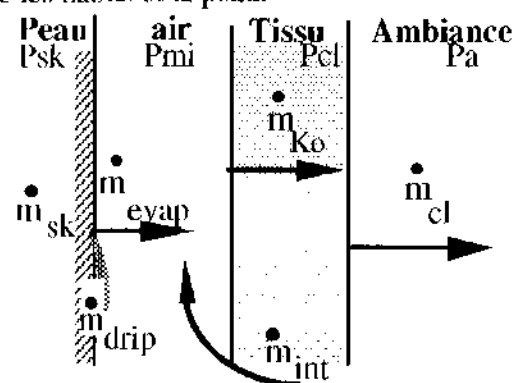
- Le bilan thermique des deux couches nous donne les équations suivantes :
 - * Pour la couche d'air à température T_{mi} : $\dot{q}_{s, \text{cin}} + \dot{q}_{s, \text{int}} - \dot{q}_{s, \text{cond}} = 0$
 - * Pour la couche de tissu à température T_{cl} : $\dot{q}_{s, \text{cond}} - \dot{q}_{s, \text{cl}} = C_{cl} \cdot \frac{dT_{cl}}{dt}$
 $C_{cl} (dT_{cl}/dt)$ Chaleur stockée dans le tissu, C_{cl} capacité calorifique totale du tissu.

Transferts de chaleur Latente

Les pertes de chaleur par évaporation au niveau de la peau peuvent s'écrire : $E = Q_L \cdot \dot{m}_{\text{evap}}$ avec : Q_L , Chaleur latente et \dot{m}_{evap} , masse d'eau évaporée à la surface de la peau.

De même que pour les transferts de chaleur, on a modifié le calcul des transferts de masse au niveau de la peau en tenant compte de la couche d'air entre les habits et la peau.

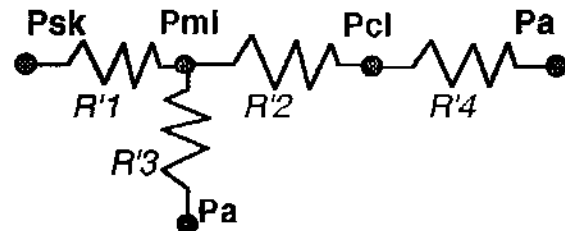
Le phénomène moteur dans les transferts de masse est la différence de concentration en vapeur d'eau ou la différence de pression. Pour pouvoir calculer l'évaporation au niveau de la peau, il faut donc connaître les pressions de vapeur dans les différentes couches. On suppose que l'eau est vaporisée au niveau de la peau et migre ensuite sous forme de vapeur. On a le schéma suivant avec \dot{m} , débit massique d'eau



Représentation schématisée des transferts de masse

- \dot{m}_{sk} : débit massique de l'eau produite au niveau de la peau : $\dot{m}_{sk} = \dot{m}_{evap} + \dot{m}_{drip}$
 \dot{m}_{sk} eau produite au niveau de la peau, déterminée par les réactions thermophysiques
 \dot{m}_{evap} eau évaporée qui migre à travers le tissu,
 \dot{m}_{drip} eau non évaporée qui ruisselle sur la peau.
- \dot{m}_{int} : débit de l'eau échangée dans la couche d'air. Ce débit massique dépend de la vitesse du renouvellement d'air sous vestimental, et des caractéristiques de l'air.
- \dot{m}_{ko} : débit de l'eau échangée à travers le tissu. Cette quantité dépend de la perméabilité du tissu lui-même, donc du mode de tissage, de la compositions des fibres,...
- \dot{m}_{cl} : débit de l'eau échangée à la surface du tissu. Cette quantité d'eau dépend de la pression de vapeur dans l'air à proximité du tissu, donc de la vitesse de l'air.

Par analogie avec les transferts de chaleur, on représente les transferts d'humidité à l'aide d'un circuit électrique. R'_1, R'_2, R'_3, R'_4 sont des résistances aux transferts de vapeur.



• **Bilan massique** : L'égalité entre les flux entrants et les flux sortants dans la couche d'air intermédiaire nous donne les équations suivantes :

$$\text{Bilan massique de la couche d'air : } \dot{m}_{evap} + \dot{m}_{int} - \dot{m}_{ko} = 0$$

$$\text{Bilan massique au niveau du tissu } \dot{m}_{ko} - \dot{m}_{cl} = 0$$

Remarque : Pour l'instant nous ne tenons pas compte de l'eau emmagasinée dans le tissu. Cette variable est difficile à cerner, car elle dépend d'un très grand nombre de paramètres, tel que le type de tissage et la nature des fibres composant le tissu. Dans la plupart des modèles, les vêtements sont décrits par deux paramètres, l'isolement intrinsèque et un indice de perméabilité. Cependant, ces deux variables sont insuffisantes pour traduire les conditions dynamiques. Un tissu hygroscopique peut emmagasiner une quantité d'eau soit à l'état de vapeur (mv) soit sous forme d'eau liquide (mli). Les fibres textiles elles mêmes ont, en outre, la capacité d'absorber un certain pourcentage d'eau (mab).

$$M = mab + mv + mli$$

Si on tient compte de la masse d'eau emmagasinée dans le tissu sous toutes ses formes, il faut tenir compte de l'effet de sa variation. En plus des modifications directes sur les transferts de masse, il y a couplage avec les transferts de chaleur, soit par modification directe des caractéristiques thermiques, soit par apport de chaleur. En effet, lors de l'absorption ou la désorption, ou encore de l'évaporation ou la condensation dans le tissu, l'eau absorbe ou dégage de la chaleur qui modifie le bilan thermique. Ces phénomènes sont regroupés sous le terme d'"effet tampon".

Dans une premier temps, nous considérons que le tissu n'emmagasine pas d'eau. Dans la plupart des conditions expérimentales sur lesquelles nous avons travaillé cette hypothèse se justifie,

surout pour les zones qui ne sont pas en contact avec le siège. Dans une grande partie des essais, les conditions ne sont pas suffisamment chaudes pour que le conducteur transpire beaucoup et imbibent suffisamment le tissu pour entraîner des modifications notables du bilan thermique. Pour certaines configurations plus chaudes, il est certain que cette hypothèse simplificatrice au niveau des vêtements et surtout du siège peut expliquer des écarts entre résultats expérimentaux et simulation.

III.3. Descriptions des vêtements utilisés

Compte tenu des impératifs "réalistes" pour les expériences et des données disponibles dans la bibliographie, la tenue vestimentaire a été déterminée en trois temps.

- PSA/VALÉO nous a fait parvenir la description de la "tenue classique" portée habituellement par les essayeurs.

- Nous avons calculé l'isolement thermique de cette tenue mais, d'après les études sur le confort, elle s'est avérée trop chaude et risquait de masquer les problèmes d'inconforts locaux

La "tenue classique" a donc été modifiée, une nouvelle tenue a été proposée. Nous avons décidé de retirer le veston prévu au départ.

- Les vêtements conformes à nos demandes ont été achetés, la seule différence notable est le pull qui n'a pas la même composition que celui prévu, (il est composé de 20% laine-80% nylon au lieu de 80% laine-20% nylon), nous avons tout de même été obligés de garder les mêmes caractéristiques thermiques car cette composition de tissu n'est pas répertoriée dans les normes.

La tenue finalement adoptée et qui est restée la même pour toutes les expériences, a les caractéristiques suivantes :

- **Slip et Maillot de corps** : jersey tricot trame, 100% coton
- **chemise** : chemise manches longues, avec col, sergé coton
- **pull** : manches longues, ras en V, jersey tricot tramé, 20% laine-80% nylon
- **pantalon** : droit ajusté, tweed, 50% laine -50%polyester
- **chaussettes** : mi-chaussettes de ville, 75% acrylique, 25% nylon
- **chaussures** de ville, à semelle rigide en vinyle

Les caractéristiques de chaque pièce de vêtements, données en annexe, ont été déterminées à l'aide de la norme internationale ISO et les recommandations de l'ITF - Institut des Textiles de France.

IV. LES SENSATIONS

IV.1 Evolution du modèle de sensation

Nous passons en revue assez rapidement les différentes étapes de notre réflexion concernant l'estimation des sensations thermiques.

A partir des expériences de novembre 1992, on a tenté d'écrire un premier tableau de relation entre la température moyenne de peau et la sensation globale, dans l'échelle à 9 points utilisée pour les voitures (le précédent tableau utilisé dans TRIM pour l'habitat comportait une échelle en 7 points, cf rapport n°3). Il faut rappeler également que nous n'avons pas tenu compte des expériences d'octobre car la "boîte à sensations" n'était pas la même.

Il nous a paru utile de faire un premier essai, sur la température moyenne de peau et la sensation globale, pour se faire une idée générale de son aspect et pour déterminer où devaient porter nos efforts. Nous sommes partis de la totalité des valeurs expérimentales des essais du mois de novembre, après la période d'équilibre. Les courbes brutes de sensations en fonction des températures montrent une grande dispersion des points.

Après plusieurs essais de clarification, nous nous sommes aperçus qu'une meilleure représentation pouvait être faite en séparant les mesures en cours de montée et en cours de descente en température cutanée. On a pu constater que si l'écart entre montée et descente disparaît pour les hautes températures, il peut atteindre 2 points de sensation pour les basses températures. On tire de ces courbes le tableau de relation Température/Sensation suivant.

Sens. globale		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Montée	28,7	29,7	30,7	31,7	32,9	33,9	34,3	35,0	35,4	35,7	36,0
Descente	29,5	30,8	32,0	33,0	33,6	34,2	34,8	35,0	35,2	35,4	36,0

La relation entre la sensation et la température mesurée, proposée dans le tableau ci-dessus, peut paraître tout à fait satisfaisante, puisqu'elle donne un écart à l'expérience compris dans une fourchette de + ou- 1. Toutefois, il faut bien remarquer qu'il s'agit de la température moyenne et de la sensation globale (les valeurs locales sont peut être plus difficiles à maîtriser), et qu'il faut aussi tenir compte des écarts entre la température mesurée et celle calculée par le modèle, pour avoir l'écart complet entre calcul et expérience.

A partir des valeurs expérimentales des températures et des sensations, nous avons, pour chaque expérience, calculé la valeur moyenne des températures locales qui donnent chaque classe de sensation, pour chaque segment du corps et pour la valeur globale. De plus, nous avons tenu compte de la différence entre les valeurs trouvées lors d'une montée ou d'une descente en température.

Nous avons pu tirer de nombreuses conclusions, mais la remarque essentielle qui peut être faite est que la dispersion des résultats est telle qu'il paraît difficile d'en tirer des règles simples

significatives! Nous avons toutefois essayé de prendre des valeurs moyennes, en tenant compte des remarques faites sur les valeurs trop différentes des autres.

On a pu constater que la température correspondant à une classe donnée lors d'une descente en température est supérieure à ce qu'elle est à la montée. La remarque déjà faite pour la sensation globale semblait donc vérifiée. Il faut noter qu'il s'agit d'écarts importants et que la prise en compte de cet effet apparaissait bien justifiée. Toutefois, la comparaison des résultats expérimentaux et calculés à partir des tableaux "Montée" et "Descente" établis précédemment montre des écarts importants, pouvant atteindre 4 points. Ces écarts pouvaient provenir d'une erreur sur les températures de peau calculées par MATHER ou d'une mauvaise adéquation du tableau "Température de peau/Sensation" (cf. rapport n°4).

Un tableau expérimental établi à partir de la totalité des expériences de Mai et de Suède risquait de donner des résultats voisins, puisque les expériences similaires de ces deux séries d'expériences donnaient des résultats comparables. Nous avons donc cherché une autre approche plus performante.

La première tentative consistait à séparer les différents types d'essais : essais avec prépondérance de la convection, du rayonnement, du soleil ou tout mélangé. Cette approche, suggérée par l'interprétation des expériences de Mai, n'a rien donné.

Puis, nous avons tenu compte du fait que la séparation Montée-Descente ne semblait pas s'appliquer pour la première partie de l'essai, pour laquelle il paraissait nécessaire de créer un troisième tableau intermédiaire, valable aussi bien en montée qu'en descente. En effet, on constate bien que la première variation après la période de stabilisation, que ce soit en montée (de 5 à 9) ou en descente (de 5 à 1) appartiennent à une seule et même courbe intermédiaire entre Montée et Descente. Les résultats d'une généralisation de cette approche n'ont pas été à la hauteur de nos espoirs : nous avons dû abandonner cette deuxième tentative qui, d'ailleurs, compliquait passablement le problème.

Une troisième tentative nous a été suggérée par la constatation que lors de la période de stabilisation à la neutralité thermique, les températures de peau pouvaient différer de 1 ou 2 degrés d'une expérience à l'autre, alors que la sensation exprimée était toujours la même (5). Nous avons alors essayé de tenir compte de ce décalage à l'origine en augmentant ou diminuant systématiquement les températures mesurées. Cette tentative s'est soldée par un échec.

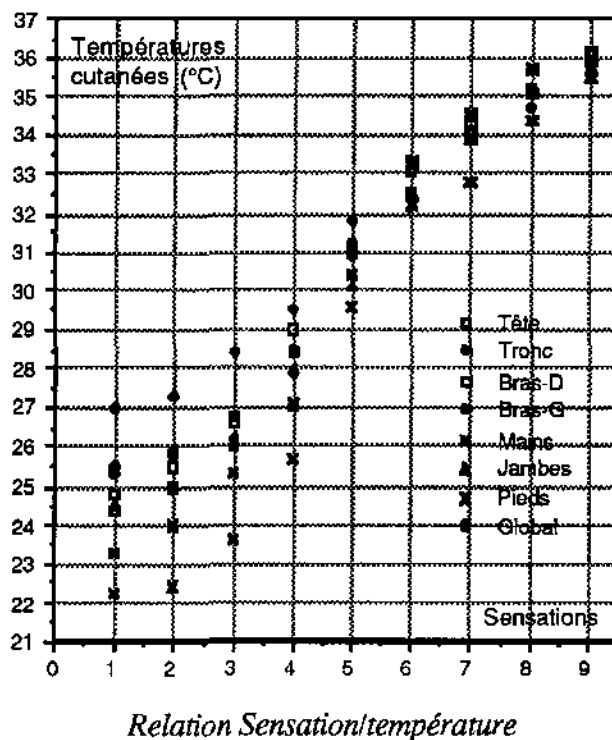
IV.2 Le modèle final

Les réflexions induites par ces différents essais ont toutefois été utiles et nous ont amenés à prendre en compte un autre paramètre, que beaucoup soupçonnaient de jouer un rôle important sans l'avoir jamais étudié réellement, la température de l'air inhalé. Cette influence apparaît nettement si on compare l'évolution des températures cutanées, de la température de l'air inspiré et des sensations : on voit que les extremums des sensations sont bien situés entre les extremums des températures de peau et de la température de l'air au niveau de la tête.

Nous avons alors établi un nouveau tableau de relations entre les sensations ressenties par Francis et la moyenne entre la température de peau de chaque partie du corps et la température de l'air au niveau de la tête. Pour cela, nous avons utilisé toutes les expériences de Suède (excepté l'essai 28, qui est une gamme de qualification et ne doit donc pas servir à établir le modèle).

Nous avons choisi une relation du type : $S = f((T_{sk} + T_{atête})/2)$.

Le tableau ci-dessous et la courbe ci-contre donnent les relations avec les bornes extrêmes des intervalles de variation, 20 et 39 °C, fixées de façon arbitraire.



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Tête	20	24.4	25.0	26.7	29.0	31.0	33.1	34.3	35.2	36.2	39
Tronc	20	27.0	27.3	28.4	29.5	31.8	33.2	34.0	35.2	36.2	39
Bras-D	20	24.8	25.5	26.6	28.4	31.1	32.5	34.1	35.1	35.9	39
Bras G	20	25.5	25.9	26.2	27.9	30.9	33.1	34.1	35.1	36.1	39
Mains	20	23.3	24.0	25.3	27.1	30.4	33.3	34.6	35.7	35.9	39
Jambes	20	24.5	24.9	26.0	28.0	30.1	32.5	33.9	35.1	35.7	39
Pieds	20	22.2	22.4	23.6	25.7	29.6	32.2	32.8	34.4	35.5	39
Global	20	25.3	25.8	26.8	28.5	31.2	32.5	33.9	34.7	35.9	39

Il faudrait chercher les proportions les plus pertinentes, mais il est fort probable que cela dépende du type d'expérience. Aussi, nous nous sommes contentés de prendre la moyenne arithmétique.

Cette relation est, de toutes les tentatives, de loin la plus satisfaisante. Les résultats donnés dans la troisième partie sont obtenus grâce à cette méthode.

2ème Partie - Les Essais

I - GÉNÉRALITÉS SUR LES EXPÉRIENCES EN SOUFFLERIE

Dans ce chapitre il s'agit de faire un récapitulatif des essais effectués en soufflerie à la Verrière et en Suède, soit 36 configurations au total et d'en tirer les conclusions au niveau expérimental

Presque tous les essais sont décomposés en 3 ou 4 phases : une première phase de mise en équilibre thermique (1/2 heure), puis variation du paramètre à étudier. En général un seul paramètre est modifié à la fois, mais il entraîne le plus souvent la variation de beaucoup d'autres. Les essais finalement effectués ne correspondent pas toujours à ceux prévus. Il est donc indispensable de donner une description la plus précise possible du déroulement des expériences.

Variables enregistrées et traitements des données Pour chaque essai les données enregistrées sont les mêmes, un récapitulatif de toutes les données se trouve dans l'annexe.

Les données sont enregistrées par pas de temps de 30 secondes. Il est impensable de garder un pas de temps aussi faible pour analyser les résultats et les comparer aux simulations : on gardera un pas de 1 minute.

Le traitement se fait en trois temps :

- La première étape consiste à noter les données défectueuses et à rectifier si possible les erreurs d'enregistrement. Les données défectueuses pour tout l'essai ont été soit remplacées par 0, soit par la variable la plus proche (par exemple température cuisse droite remplaçant cuisse gauche). S'il s'agit d'une donnée défectueuse pour un seul pas de temps on prendra la valeur moyenne entre les deux pas de temps d'avant et d'après.
- Deuxième étape : regrouper les données semblables (pour des raisons de compatibilité avec le modèle : par exemple, calcul de la température moyenne des jambes à partir de cuisse et du tibia)
- Troisième étape : obtenir des fichiers de données plus réduits.
 - des fichiers regroupant les conditions thermiques dans la veine et la voiture, qui sont les conditions auxquelles est soumis l'essayeur, et seront donc les fichiers d'entrée des simulations. Cela fait trois fichier : deux pour les températures de surfaces, et un pour les température d'air.
 - un fichier regroupant les données physiologiques et les jugements pour faire des comparaisons avec les sorties du programme.

Dans les fichiers d'origine les temps sont réels (en heure, minute, seconde), afin d'avoir des fichiers comparables entre eux. Tous les temps sont donnés avec pour origine ($t=0$) le début de la phase I. Tous les essais sont numérotés par ordre chronologique, leur titre correspond à la variable étudiée ou à l'effet désiré.

• Dispositif expérimental commun aux essais : Les essais ont été réalisés avec une Citroën ZX, dans la soufflerie de VALÉO thermique à la Verrière ou en Suède.

- L'essayeur Francis participant à toutes les expériences, pèse 85 kg, et mesure 1,76m, ce qui nous permet de calculer sa surface cutanée d'après l'expression de Dubois

$$A_{du} = 0,203 P^{0,425} H^{0,725} = 2,02 \text{ m}^2 \quad (P : \text{poids}, H : \text{Taille})$$

Ce qui est supérieur à "l'individu standard" prévu dans le modèle (1,89 m²). Il est difficile d'envisager des modifications des paramètres morphologiques du modèle, car tous les paramètres ont été établis par des physiologistes et sont basés sur de très nombreuses expériences.

- Le système de chauffage n'étant pas assez souple a été modifié pour être raccordé sur une chaudière extérieure avec mesure de la température d'entrée et de sortie de l'eau et du débit (Qv).

Le pulseur d'air est raccordé à une alimentation extérieure dont la tension (Upulseur) peut être fixée à 12, 8 ou 4 volts. Un indicateur donne la répartition de soufflage $I_i = 0$ (aération supérieure); $I_i = 5$ (soufflage bilevel); $I_i = 10$ (soufflage sur les pieds).

II. ESSAIS D'OCTOBRE 1992 : LA VERRIÈRE

Ces essais ont été les premiers dans la cadre de ce contrat, ils constituaient un test pour "nous faire la main", par la suite nous ne les avons pas utilisés pour diverses raisons, mais ils nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La phase habillage de l'essayeur est plus longue que prévue : elle dure 1 h 25. Elle comporte la mise en place des 33 thermocouples (27 thermocouples sur la peau et 6 thermocouples au voisinage du corps)

- Instrumentation : Il faut augmenter le nombre des capteurs sur les vitres, afin de déterminer les surfaces que l'on considérera isothermes dans le calcul des échanges IR.

- Températures cutanées : Il faut augmenter le nombre de prises de température sur la peau, en n'utilisant qu'un seul thermocouple par point de mesure au lieu de 3. Il est décidé de prévoir 20 thermocouples (K ; 100 µm) pour la peau et 12 pour l'air au voisinage du corps. Ces thermocouples se terminent au niveau de la ceinture, à droite ; ils sont regroupés en 4 blocs de 8 connecteurs mâles. Dans presque tous les essais, toutes les températures cutanées évoluent de la même façon, sauf les pieds qui ont tendance à varier de manière différente. Il semblerait que nous n'ayons pas réalisé dans cette série d'expériences des configurations ayant entraîné des résultats très hétérogènes au niveau confort thermique.

Dans toutes les configurations, les mains et les pieds ont une plus grande amplitude de variation, ce qui est normal car ce sont les segments les plus sensibles aux variations climatiques ; de plus, ces variations y sont plus importantes qu'ailleurs.

Le tronc a en général la température la plus haute. Ceci est probablement dû à l'isolement vestimentaire qui est important.

- Sensations : Pendant la phase de mise en équilibre thermique de Francis et du véhicule, on a procédé à l'étalonnage de la boîte à sensation. Les sensations enregistrées à travers une boîte munie de 8 potentiomètres délivrant une tension entre 0 et 8 volts par paliers de 1 volt. Les Huit jugements

thermiques correspondent aux 7 segments (tête, tronc, bras droit, bras gauche, mains, jambes, et pieds) plus le jugement global.

Il semble, après étalonnage, qu'il y ait une assez grande dispersion entre la sensation exprimée et celle indiquée par le potentiomètre. Il faut noter aussi que les enregistrements ne semblent pas être reproductibles, c'est à dire que pour la même sensation exprimée, si l'on vient par valeur inférieure ou supérieure, on n'obtient pas le même résultat en valeur enregistrée. Il a donc été impossible de tenir compte de ces enregistrements par la suite.

Il est difficile de tirer des conclusions très précises sur les sensations étant donné les erreurs dues à la boîte. Certains points peuvent être mis en évidence :

- Il existe quelques points aberrants qu'il faut éliminer.
- même si les températures locales évoluent en même temps, il peut y avoir presque une demi heure de décalage entre les variations des sensations de différents segments.
- les corrélations entre température et sensation sont beaucoup plus nettes pour certains segments. Par exemple pour la tête. Par contre pour le tronc, il paraît difficile de tirer une loi ; ceci est peut être dû au fait que le tronc est très couvert, et que la vitesse d'air est assez faible.
- La zone de sensation neutre est de loin la plus étendue, il faut tout de même noter que c'est la zone pour laquelle nous avons le plus de points.

La "boîte à sensations" a par la suite été modifiée. Une nouvelle boîte a été mise au point au LESETH et a été utilisée pour tous les autres essais (voir annexe).

• Système de chauffage : La température de l'air soufflé, T_{souf} , est liée au débit d'eau dans la chaudière (Q_v) et au débit du pulseur (U_{puls}), si Q_v diminue à U_{puls} constant, T_{souf} diminue ; si U_{puls} diminue à Q_v constant, T_{souf} augmente (cf. tableau récapitulatif ΔT_{Aero})

U_{puls} influence indirectement les vitesses d'air sur le sujet. Notre but est de faire varier T_{souf} , on peut alors uniquement agir sur $T_{\text{e,aero}}$ ou Q_v . Le réglage de Q_v n'est pas assez précis pour permettre des variations fines de T_{souf} . C'est pourquoi dans certains essais nous n'avons pas obtenu le résultat désiré. Par ailleurs le temps de réponse de $T_{\text{e,aero}}$, (eau venant de la chaudière) est trop long pour pouvoir réellement l'utiliser.

La température à la sortie des bouches de soufflage dépend aussi du type de répartition; lorsqu'on se trouve en position de soufflage Bilevel, les températures de soufflage sur les pieds et des aérateurs sont les mêmes. En position "soufflage pieds" les températures de soufflage des aérateurs n'ont pas réellement de signification, il s'agit plutôt d'une température d'air moyenne à cette endroit, Inversement lorsqu'on est en "soufflage tête"

Conclusions sur les résultats

Etant donné le grand nombre de variables, certaines conclusions sont évidentes soit sur les courbes, soit dans le tableau récapitulatif. Nous ne donnons ici que des conclusions assez générales sur deux des 4 expériences réalisés.

- Expérience 1 - Répartition du soufflage. Le soufflage bilevel donne une température cutanée de la tête plus basse que les deux autres types de soufflage testés (tête et pieds).

- Expérience 3 - Puissance de chauffage. La configuration finalement réalisée ne donne pas le résultat escompté. En effet, le but était de faire varier les températures des surfaces internes du véhicule en faisant varier la température de la veine, mais en fait dans ce cas la température de soufflage varie aussi. Au lieu d'avoir "effet du rayonnement" nous avons en réalité "effet du rayonnement et de la convection", ce qui rend l'analyse des résultats beaucoup plus difficile.

III. ESSAIS DE NOVEMBRE 1992 : LA VERRIÈRE

Suite aux conclusions tirées en octobre nous avons pu fixer une structure expérimentale définitive qui est décrite en annexe et qui a été utilisée pour toutes les expériences. à partir de novembre. Les essais sont numérotés ; certains numéros sont manquant : il s'agit de scénarios envisagés mais non effectués. En novembre, 7 essais ont été effectués sur deux jours, numérotés de 1 à 8 ; le 2 n'a pas été fait. La numérotation sera poursuivie sur l'ensemble des expériences.

- Essai 1 - Humidité Relative. L'humidité relative maximum atteinte dans le véhicule est de 66% au temps $t = 1,7$ h. sur un laps de temps court, de plus la température de l'air soufflé dans le véhicule augmente à partir du temps $t = 1,8$ h. Il est donc difficile de se rendre compte de l'importance de l'hygrométrie sur les sensations car au moment où la température augmente, l'hygrométrie diminue.

- Essai 3 - Température de la veine et habitacle varient dans le même sens. On a variation de deux effets, convection et rayonnement, en même temps : les échanges convectifs dûs au chauffage de l'air soufflé dans la voiture, et les échanges radiatifs dûs aux variations des températures de parois.

La variation de la température extérieure agit directement sur les températures de parois, alors que la variation des températures de l'air soufflé agit directement sur les températures de l'air au voisinage du conducteur.

Afin de déceler un décalage entre les diverses variables, on prend comme repère le passage sur le minimum de température extérieure et de celle de l'air soufflé. Les minimums des températures de surface de la voiture ne sont pas décalées pour les vitrages, par contre pour les intérieurs de portes, le pavillon, la planche de bord et les sièges on a un décalage de 5 à 6 minutes. Les minimums des températures de peau sont décalées d'environ 15 minutes et le décalage des sensations varie entre 5 à 20 minutes.

- Essai 4 - Température de la veine. Pour déterminer l'importance de la convection par rapport au rayonnement il faut essayer de faire varier un seul paramètre à la fois. Dans cet essai on fait varier

uniquement le rayonnement en agissant sur la température extérieure. Du fait qu'il n'y a pas de soufflage qui maintiendrait la température de l'habitacle constant, et que la température de l'air dans l'habitacle varie entre 19°C et 29°C les variations des sensations du conducteur ne sont pas liées qu'aux seules variations du rayonnement. Ce phénomène a déjà été noté pour les essais d'octobre.

On ne remarque pas de dissymétrie entre les températures cutanées du côté droit et gauche du conducteur malgré la présence rapprochée des parois du côté gauche.

La variation de la température extérieure n'affecte pas directement le conducteur ; il commence à sentir qu'il a chaud un quart d'heure après la remontée en température de la veine.

• Essai 5 - Température de l'habitacle. On a une température extérieure constante faible ($T_{\text{veine}} = -18^{\circ}\text{C}$) et une température de soufflage qui passe de 60°C à -10°C puis remonte à 60°C . Ce soufflage d'air chaud entraîne une dispersion des températures de paroi suivant quelles soient proches ou non des courants d'air chauds provenant des aérateurs.

La température à la sortie des aérateurs baisse brutalement au temps $t = 0,7$ h, on remarque que les températures cutanées commencent à baisser également au même pas de temps; par contre les sensations baissent environ 5 mm plus tard. La température d'air soufflé remonte au temps $t = 1,1$ h., on remarque qu'il en est de même pour les températures cutanées et les sensations, il n'y a donc pas de décalage lors de la remontée en température.

• Essai 6 - Soleil. Cet essai sur le rayonnement solaire s'effectue à température extérieure de -18°C , pour des problèmes de planning et d'inertie de la soufflerie.

Etant donné que la température extérieure est basse, on est amené à souffler de l'air chaud dans la voiture pour que le conducteur soit au confort thermique avant que l'on allume les lampes pour simuler le soleil. Ce réchauffement par convection va s'ajouter au réchauffement par rayonnement dès que les lampes sont allumées.

Pour les surfaces vitrées on voit très bien que les sauts en température correspondent au moment où les lampes s'allument ; les thermocouples n'ayant pas été protégés du rayonnement par une couche d'aluminium, il est donc difficile de faire confiance à ces mesures de températures de surface . Pour les surfaces qui ne sont pas soumises au rayonnement solaire, ainsi que pour la température de l'air, on constate une élévation régulière de la température.

Les courbes des températures cutanées montrent dans l'ensemble une élévation régulière, sauf pour la tête où on remarque une pente plus forte aux temps $t = 0,5$ h. et $t = 1$ h., les deux instants où le rayonnement des lampes augmente. Mais il faut relativiser ces résultats car les thermocouples placés sur le front et sur les tempes ne sont pas non plus isolés du rayonnement des lampes.

• Essai 7 - Puissance de soufflage. Ici le paramètre que l'on veut fixer est l'humidité relative dans le véhicule (aux alentours de 30%). La température de la veine augmente en début de phase I ($t=0,5$ h.), les températures de soufflage des aérateurs et les températures de paroi augmentent également en même temps. Les températures cutanées augmentent 5 à 15 minutes plus tard suivant les différentes parties du corps, par contre les sensations augmentent environ 20 minutes plus tard.

• Essai 8 - Tveine et Thab dans le même sens : Cet essai est le même que l'essai 3 avec le sens de variation des températures inversé. Ici, contrairement à l'essai 3, on ne remarque pas de décalage sur les sensations en fonction des variations des températures extérieures et soufflées.

Les variations dans les deux essais (3 et 8) ne sont pas symétriques ces variations passent par des paliers; il est donc difficile de comparer les résultats obtenus contrairement à nos intentions de départ, qui ont motivées ces deux configurations.

IV. ESSAIS DE MAI 1993 : LA VERRIÈRE

Pendant cette campagne d'essais nous avons réalisé 7 essais différents. Le chauffage de l'air soufflé a été modifié et permet une plus grande souplesse d'utilisation.

Essai 9 - Tout constant. Cet essai où tout est constant nous permet d'adapter notre modèle sur Francis dans un cas simple.

Essai 10 - Tveine et soleil . Pour cet essai nous avons essayé d'avoir une température de soufflage constante et une variation des températures de paroi de la voiture importante afin d'étudier l'influence des transferts radiatifs entre Francis et la voiture, et l'incidence que cela pourrait avoir sur les sensations.

Essai 12 - Tveine et soleil . Ici nous avons fait varier l'ensoleillement et la température de la veine afin d'avoir une variation importante des flux radiatifs.

Essai 11 et 13 - Tveine et Thab dans le même sens .Ces deux essais identiques du point de vue des conditions nous ont donnés des réponses différentes de la part de Francis : les températures cutanées de l'essai 13 sont inférieures à celles de l'essai 11, de 1 à 2 degrés sur l'ensemble de la simulation ; de même, on a une différence de sensation qui va jusqu'à 2 points d'écart lorsqu'on est dans la partie la plus froide des expériences.

Essai 14 - Tveine et Thab dans le même sens. Pour cet essai, nous avons inversé le sens de variation de la température de la veine et de la température de l'air soufflé dans la voiture par rapport aux essais 11 et 13. Cela nous permet d'observer les différences dues au changement de sens de variation.

Essai 15 - saut de Qv. Nous avons effectué des sauts de convection important pour étudier la réponse de Francis à des changements importants et rapides des conditions et ainsi étudier le mode transitoire.

V. ESSAIS D'OCTOBRE 1993 : SUÈDE

L'ensemble des quinze expériences (numérotées de 18 à 32) s'est bien déroulé, nous n'avons pas rencontré de problème majeur. Il faut noter que, contrairement aux expériences faites jusqu'à maintenant, les durées sont de deux heures et sont alors séparés en 4 phases au lieu de 3 habituellement

Pendant ces essais nous avons essayé de visualiser les effets de plusieurs paramètres : soleil, différents modes de soufflage, vitesses d'air dans l'habitacle, variations de condition climatique de l'habitacle plus ou moins brusques, influence des transferts radiatifs seuls puis des transferts convectifs seuls. De plus nous avons fait deux essais identiques à un jour d'intervalle et nous avons également effectué un essai identique aux essais 11 et 13 réalisés en mai à la soufflerie de La Verrière afin de comparer les deux souffleries.

*** Le soleil :**

Les lampes solaires n'étant pas à puissance variable, la variation d'intensité sur le véhicule est obtenue en faisant varier le nombre de lampes allumées. Cette méthode engendre une mauvaise répartition du flux solaire reçu par le véhicule aux faibles intensités (cf. Chapitre I)

Nous avons réalisé des expériences qui nous permettent d'évaluer l'importance du soleil sur les sensations et les températures cutanées de Francis, en fonction du climat à l'intérieur de l'habitacle.

- Essai 18 - Saut de soleil positif avec une ambiance chaude. Pour garder la même température dans l'habitacle on a baissé la température de l'air soufflé : Il n'y a aucune variation des sensations pour cette expérience alors que certaines températures cutanées mesurées ont augmenté de plusieurs degrés.

- Essai 19 - Saut de soleil positif avec une ambiance froide. La même expérience a été réalisée mais dans une ambiance plus froide, lorsqu'on "allume le soleil" on passe assez rapidement de la sensation 2 à la sensation 3 ou 4

- Essai 20 - Saut de soleil négatif dans une ambiance froide. Les sensations ont baissé après extinction des lampes.

- Essai 26 - Saut de soleil positif et saut de Thab. On se met au voisinage de l'équilibre frais (sensation 4) puis on réchauffe l'habitacle en soufflant de l'air plus chaud et en allumant les lampes. Ces essais montrent que l'on est plus sensible au soleil dans les ambiances froides que dans les ambiances chaudes. Les parties du corps qui sont au soleil réagissent très vite; ce sont le bras gauche, les cuisses, la partie gauche du tronc et parfois les mains. Lorsque les lampes solaires sont allumées la température du bras gauche augmente : pour un rayonnement de 1000 Watt / m^2 , on atteint une température cutanée mesurée de 38°C , ce qui est très élevé compte tenu de la présence du pull qui protège la peau de l'influence directe du soleil.

Tous ces essais nous ont permis de conclure que le soleil influence surtout les sensations locales des segments directement exposés, et il semblerait que l'influence soit plus nette lorsque l'ambiance est plutôt froide.

*** Répartition du soufflage d'air**

Afin d'estimer l'importance de la convection pour le calcul des températures cutanées et pour les sensations nous avons réalisé deux expériences.

• Essai 23 - Mode de soufflage; Après la période d'équilibre on souffle de l'air frais à la tête, puis une deuxième période pour revenir à l'équilibre et on souffle de l'air frais aux pieds. On retrouve bien le type de répartition du soufflage dans les réponses en sensations et dans les mesures des températures cutanées de Francis.

• Essai 24 - Puissance des pulseur. On augmente la vitesse d'air tout en essayant de garder la même température d'air dans l'habitacle. L'air relativement frais est soufflé avec une vitesse de plus en plus grande, provoque une baisse des températures cutanées et une diminution des sensations.

Ces deux essais nous montrent l'importance de la convection et nous permet de vérifier notre modèle dans des conditions hétérogènes mais restant au voisinage des conditions de confort thermique.

*** Echanges par rayonnement infra-rouge**

Nous avons essayé de faire varier les températures de surfaces tout en gardant la température de l'air ambiant constante afin de mettre en évidence les transferts de flux radiatifs.

• Essai 27 - Tveine baisse. Echanges par rayonnement infra-rouge croissants et température d'habitacle constante. On enregistre une variation des températures de surfaces uniquement sur les parties vitrées de la voiture. On remarque une faible variation des températures cutanées; par contre, il n'y a aucune variation des sensations.

• Essai 30 - Tveine augmente. Echanges par rayonnement infra-rouge décroissants; c'est la même expérience que la 27 mais en sens inverse. Le constat est le même : il n'y a qu'une faible variation des températures cutanées et aucune variation des sensations.

*** Echanges convectifs**

On fait varier la température de l'air soufflé en gardant la température de la veine constante pour caractériser les échanges convectifs.

• Essai 31 - Thab baisse . Les températures cutanées baissent de 1.5°C à 2°C et les sensations passent de 5 à 3 ou 2.

• Essai 32 - Thab augmente. On fait la même expérience que pour l'essai 31 mais en sens inverse. Les températures cutanées augmentent de l'ordre de 2°C et les sensations passent de 5 à 8.

Lorsqu'on regarde les variations des températures de surface, on se rend compte qu'elles dépendent plus de la température d'air soufflé que des variations de température de la veine. Lors de ces essais, toutes les surfaces telles que : intérieur de porte console et tableau de bord ont une température de surface qui varie de plus de 10°C. Il est donc difficile de déterminer la part entre les flux radiatifs et les flux convectifs.

* Grandes amplitudes de variations climatiques

Nous avons réalisé des essais en vue de faire le tableau de sensations avec des variations brusques et des essais où on couvre l'ensemble des sensations.

- Essai 21 - Tveine et Thab dans le même sens. On a réalisé un essai identique aux essais 11 et 13 des expériences de novembre 1993 à la Verrière, et on obtient les mêmes résultats.

- Essai 22 - Saut de Thab. On réalise des sauts de température d'air soufflé, d'abord chaud puis froid.

- Essai 25 - 29 - Tveine et Thab dans le même sens. Ces deux essais sont identiques et en sens inverse du n°21, ils ont été réalisés à un jour d'intervalle à la même heure. La différence entre les températures cutanées ne dépasse pas 2°C, les sensations, elles aussi, restent très voisines.

* Essai 28 - Gamme PSA

L'essai 28 correspond à un test de qualification de la gamme PSA, les amplitudes de variations sont grandes, puisque la totalité de la gamme de sensation a été couverte. Cet essai ne nous sert pas à établir les relations température/sensation mais uniquement à valider le modèle. Il est donc détaillé dans la troisième partie.

VI. ESSAIS DE JANVIER 1994 : LA VERRIÈRE

Pour ces deux derniers jours de soufflerie, 8 essais ont été réalisés dont 2 essais de qualification de la gamme PSA. Ces essais ont pour but de valider notre modèle, pas d'établir le tableau températures/sensations.

* Essai 33 - Tveine et Thab varient dans le même sens + Saut de soleil.

Les températures de veine et d'habitacle démarrent assez bas, puis augmentent en même temps après 1 heure. A 1,5 h., le soleil est "allumé". Le sujet semble s'être refroidi au début ; les sensations commencent à 4 (au lieu de 5 prévu) puis descendent et enfin remontent en même temps que les températures de l'habitacle, mais le sujet n'a jamais chaud même quand le soleil apparaît.

Il faut noter que la température des pieds baisse énormément et de façon continue, elle atteint 22°C en fin d'exposition. Ceci tendrait à prouver que le conducteur a froid.

- Essai 34 - Saut de Thab. Tveine reste constante. On retrouve bien les variations de Thab sur les variations des températures cutanées, et de façon encore plus nette sur les sensations. Les amplitudes sont importantes, puisque toute la gamme de sensation est parcourue.

- Essai 35 - Influence de la température de l'air inspiré. Sur cet essai, le but était de voir l'influence de la température d'air au niveau de la tête. Le soufflage s'est fait uniquement par le haut (soufflage-tête, configuration non utilisée jusqu'alors). La température de la veine restant constante, la température de l'habitacle est alors uniquement liée à l'air soufflé. Les températures cutanées et les

sensations suivent la montée en température de l'habitable. Il faut remarquer que seule la température des pieds reste constante et basse, 24°C. Par contre la température de la tête passe de 33 à 36°C, ce qui est très important pour ce segment.

* Essai 36 - Variation de Tveine et Thab dans le même sens. Cet essai a les mêmes caractéristiques que les essais 11, 13 et 21 mais avec des amplitudes de variation plus marquées. Pour les variables physiologiques, on retrouve les mêmes conclusions que pour les essais n°11, 13 et 21. Par contre toute la gamme de sensations est parcourue.

* Essai 37 - Tveine et Thab en sens inverse. On a fait varier la température de soufflage de façon à compenser les pertes radiatives. Ce qui a pour conséquence d'entraîner peu de variation des sensations, alors que les températures de peau baissent très nettement, surtout pour les segments les plus exposés aux vitres. La tête, les bras et les mains baissent de 3°C, alors que le tronc baisse seulement de 1°C et les pieds ont une augmentation de 1°C. Ces observations tendent bien à confirmer que la température de l'air a une influence directe sur les sensations.




































* Essai 38 - Gamme PSA. Cet essai fait partie des tests normalement effectués sur les systèmes de chauffage. La température de la veine reste constante. Dans la première phase il y a une forte augmentation de Thab qui varie de -10 à 30°C, puis un changement du mode de soufflage. Les températures et les sensations partent de très bas (1 pour toutes les sensations locales), suivent l'évolution de la température de l'habitable et se stabilisent dès que le climat permanent est atteint. Le changement de soufflage de Pieds à Pieds/Dégi, ne semble pas avoir d'influence.



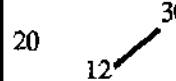
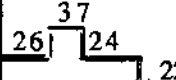
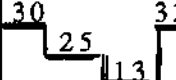
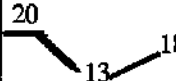
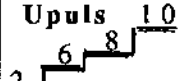
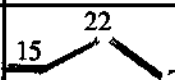
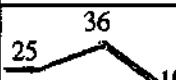



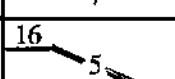

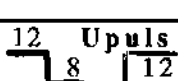
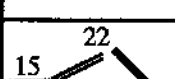
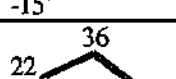


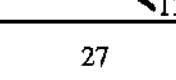

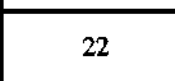

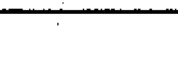

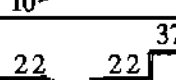
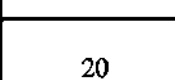

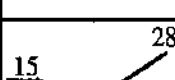
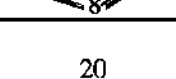
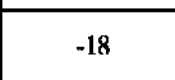
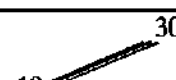
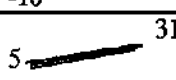
* Essai 39 - Gamme PSA. Il y a une montée très rapide de Thab qui passe de 5°C à 33°C en 10 minutes puis redescend vers 25°C et enfin une légère augmentation régulière pour atteindre 32°C en fin d'essai. Dans cet essai le climat est presque constant au cours de la dernière heure. La température extérieure varie peu, entre 5 et 12°C. Les températures cutanées semblent peu influencées par la montée rapide de Thab et par "l'over shoot". Par contre on retrouve cet aspect sur les sensations. Par la suite les Tsk et Sens suivent de façon régulière la montée de Thab.

* Essai 40 - Thab baisse. La température extérieure reste constante et assez élevée, le soufflage d'air est fort. Après la période de neutralité les sensations baissent pour atteindre 1 en fin d'essai.

VII. RÉCAPITULATIF DE TOUS LES ESSAIS **RÉALISÉS D'OCTOBRE 1992 À JANVIER 1994**

Variables:	T°Veine	Température de la veine
	Thab	Température moyenne de l'air dans l'habitable
	Souff	Bil : Bilevel ; Pi/D : Pieds - Dégivrage
	Upuls	tension pulseur
	Soleil	Puissance d'alimentation des lampes

dat	n°	Paramètres variants			Noms et remarques	souff U _{puls}
		T° Veine	T° Hab	autre		
O C T.	10 1	-18	26	Soufflage Haut-Bil - Pieds	Répartition Soufflage	XX 12
	10 2	-18	23 	12 Upuls 	Vitesse Soufflage	Bil XX
	10 3	-18	27 	480 Qv 300 	Puissance Soufflage	Bil 8
	10 4	-18 	27 		Rayon ^t décroissant	Bil 8
N O V E M B R E	1	-18	23 	90 HR 20 	Humidité Relative	Bil 4-6
	3	15 	30 		Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens	Bil 4
	4	21 	26 		Rayon ^t	Bil 0
	5	-18	30 		Conv ^{ct}	Pi/D 8
	6	-18	15 	Soleil 1000 0 	Soleil	Pi/D 8
	7	0 	23 		Rayon ^t décroissant	Pi/D 8
	8	20 	32 		Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens Inverse de n°3	Pi/D 8
	9	-18	23		tout constant	Bil 6
M A I	10	22 	23 	Soleil 1000 500 	Rayon ^t & Soleil	Bil 6
	11	15 	20 		Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens	Bil 6
	12	21 	27 	Soleil 0 	Rayon ^t + soleil	Bil 8
	13	15 	20 		Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens Identique au n°11	Bil 6
	14	16 	21 		Conv ^{ct} & Rayon ^t	Bil 6
	15	0	20 		Conv ^{ct} par saut	Bil 8
	18	15 	25	Soleil 0 	Soleil air chaud	Bil 8
	19	22	15	Soleil 0 	Soleil air froid	Bil 8

O C T O B R E	20	15	15		Soleil air frais	Bil 4
	21				Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens Identique aux n° 11 & 13	Bil 6
	22	20			Conv ^{ct} par saut	Bil 8
	23	25		Ii	Mode soufflage (Bil - Acr- Bil-Pieds)	XX 4
	24	25			Vitesse Soufflage	Bil XX
	25				Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens+Soleil Identique au n° 29	Bil 6
	26	7			2 phases constantes	Bil 6
	27		27		Rayon ^t croissant	Bil 10
	28	-18			Gamme P.S.A.	Pieds XX
	29				Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens+Soleil Identique au n° 25	Bil 6
	30		27		Rayon ^t Décroissant complémentaire du n° 27	Bil 6
	31	22			Conv ^{ct} croissant	Bil 8
S U E D E	32	22			Conv ^{ct} Décroissant Complémentaire du n°31	Bil 8
	33				Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens+Soleil	Pi/D 6
	34	20			Conv ^{ct} par sauts	Bil 8
	35	20			Influence de Tair,tête	Tête 8
	36				Conv ^{ct} & Rayon ^t même sens Identique aux n° 11 ,13 et 21	Bil 6
	37		20		Rayon ^t Croissant	Pi/D 6
	38	-18		Pieds - Pi/D	Gamme P.S.A.	XX 12-4-4
	39			Dégi - Pieds - Bil.	Gamme P.S.A.	XX 12-6-6
1 9 9 4	40	20			Conv ^{ct} Croissant	Pi/D 12

3ème Partie - Résultats de simulation

Parmi les 36 essais réalisés nous en avons sélectionné 7, car il est impossible de présenter tous les résultats. Les essais suivants ont été choisis pour des raisons bien précises.

- Les 3 premiers essais, n°28, 38 et 39 correspondent à des gammes de qualification de PSA. Ces essais ne nous ont pas servi à établir le relation Température/Sensation, mais uniquement à valider le modèle dans sa version finale.

- Les essais n°11, 13 et 21, correspondent aux mêmes conditions. Les n°11 et 13 ont été réalisés en mai 1993 à La Verrière, et le n°21 en octobre 1993 en Suède. La comparaison des résultats de simulation avec plusieurs résultats expérimentaux nous permet d'analyser la reproductibilité des expériences, et de voir qu'elle est la précision que l'on peut attendre du logiciel.

- L'essai n°20, où la variation des conditions climatiques est essentiellement due au soleil.

- L'essai n°29 présente de fortes variations climatiques (températures de veine et d'habitacle simultanément), mais aussi des variations d'ensoleillement de grande amplitude

Les conditions expérimentales sont récapitulées dans des tableaux en annexes. Toutes les courbes (températures et sensations) de comparaison Simulation-Expérience sont données à la fin du chapitre. Les notations précédées d'un chiffre correspondent aux simulations. Par exemple, la notation: 21-STETE signifie "Sensation simulée de la tête, expérience 21", alors que S-TETE signifie "Sensation mesurée de la tête, expérience 21"

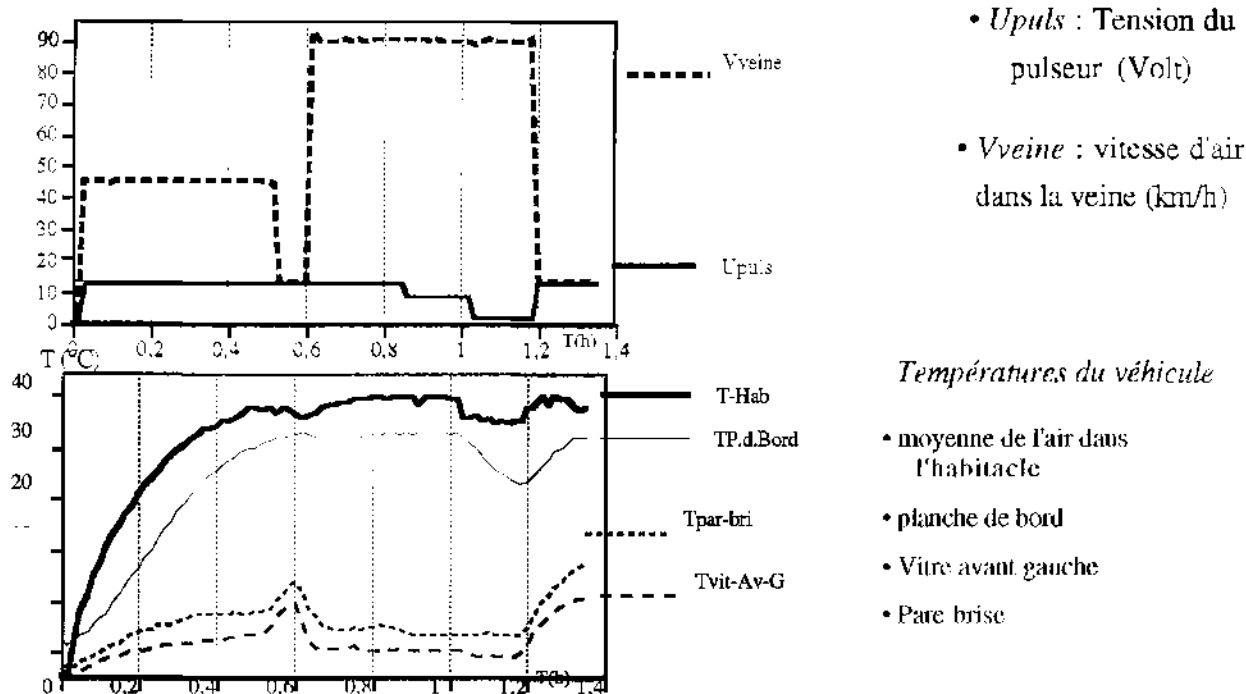
I. LES GAMMES PSA

I.1 Essai n°28

Pour cet essai les conditions climatiques extérieures sont constantes, pas de soleil, température de la veine basse : -18°C. La voiture a été chambrée dans cette ambiance. Le type de soufflage reste le même, soufflage-pieds. Par contre, comme l'indique la figure ci-après, la vitesse d'éjection de l'air des pulseurs (voir Upuls) et la vitesse du véhicule (Vveine) varient plusieurs fois par palier. La variation de Vveine entraîne des variations voisines de 10°C des zones vitrées (cf. Tpare brise et Tvitre-avant), mais aucune pour les parties pleines (Tplanche-de-bord). L'arrêt des pulseurs entraîne une baisse de 4 à 6 °C de la température d'air moyenne dans l'habitacle (Thab) et des surfaces pleines (Tplanche-de-bord).

Il faut noter que lorsque le conducteur entre dans la voiture, presque toutes les températures de l'habitacle sont entre -10 et 0°C, ce qui donne des températures cutanées très basses et des sensations égales à 1 pour les 10 premières minutes. Après une demi heure, les conditions climatiques sont relativement stables et chaudes (Thab entre 35 et 40°C). Les températures cutanées montent, sans se

stabiliser en fin d'exposition, par contre les sensations restent presque toutes à 9 pour la dernière demi heure.



Les graphes de comparaison entre les températures cutanées simulées et celles des expériences (voir pages 38 et 39) montrent une assez bonne corrélation sauf pour le tronc, où nous avons déjà remarqué une température mesurée élevée pour l'ensemble des essais de Suède. Toutefois on remarque qu'à partir du temps $t = 0,5h$, les températures cutanées simulées cessent d'augmenter alors que pendant l'expérience l'ensemble des températures cutanées gagne 1 à 2 °C. Le mode d'évacuation de chaleur prépondérant à partir de $t=0,5 h$ est la sudation ; le manque de données et la prise en compte simplifiée des transferts humides au travers des vêtements et surtout le siège ne nous permettent pas d'avoir une simulation plus précise dans ce cas, rare en condition hivernale (sensation étouffante dans la voiture). Les différences entre les sensations exprimées par Francis au cours de l'expérience et les sensations calculées sont d'un point sur l'échelle de sensation.

I.2 Essai n°38

Les conditions extérieures sont les mêmes que pour l'essai n°28. La vitesse d'air dans la veine, le mode et la vitesse de soufflage sont modifiés au cours de l'essai. L'air est très froid au départ (-10°C) mais il atteint une température haute et stable très rapidement.

Les résultats pour cette expérience sont plus médiocres (voir pages 40 et 41). Les différences entre températures simulées et expérimentales atteignent 5°C pour les mains. Lorsque Francis monte dans la ZX, celle-ci est chauffée à -18°C, il passe brusquement d'une ambiance neutre ($T_{air} : 25^{\circ}C$) à une ambiance froide. Dans les simulations nous ne tenons pas compte des transferts avec le siège, qui est ici très froid au départ et met 20 minutes avant de se stabiliser à la température du dos.

Par rapport aux moyennes effectuées sur l'ensemble des essais une température globale de 32°C correspond plus à une sensation de 3-4 que de 5-6.(voir tableau Température/Sensation).

Les conditions thermiques au début de l'essai n°28 et 38 sont très proches, les températures cutanées simulées le sont donc également. Par contre si on compare les températures expérimentales, le tronc, par exemple, démarre à 31-32°C pour l'essai 38 mais à 35°C pour l'essai 28. Il en est de même pour presque tous les autres segments. Il semble donc que l'état physiologique de l'expérimentateur n'était pas du tout de même en rentrant dans le véhicule dans les deux cas.

Malgré cette différence importante entre les températures, les sensations simulées sont bien meilleures : la différence n'est que d'un point sur l'échelle en sensation. On retrouve bien la sensation 5-6 proche de la neutralité sur la deuxième partie de l'expérience.

I.3 Essai n°39

Dans cet essai les conditions climatiques extérieures correspondent plutôt à des conditions de printemps (Tveine entre 6 et 12°C), sans soleil. Le mode de soufflage change à chaque phase, par contre la température de l'habitacle est élevée et varie peu, entre 28 et 32°C, sauf lors des 5 premières minutes (voir pages 42 et 43).

L'écart entre les températures cutanées simulées et expérimentales est beaucoup plus faible que pour l'essai précédent. Seules les jambes ont une différence de 3°C en début de simulation.

Les sensations calculées ont une bonne correspondance avec l'expérience, seul l'"over shoot" constaté pour la sensation de la tête lors de l'expérience n'apparaît pas lors de la simulation.

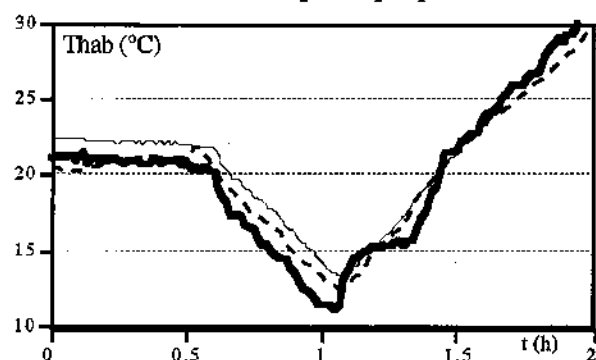
Remarque sur les 3 essais PSA : Nous avons déjà souligné l'importance des vitesses d'air. Il faut noter qu'au cours de ces essais la vitesse d'air dans la veine a varié (essai-28 : 45 / 0 / 90 / 0 km/h ; essai-38 : 45 / 90 / 45 km/h ; essai-39 : 45 / 120 km/h). Nous ne connaissons pas bien les relations entre vitesse du véhicule, vitesse de soufflage et vitesses autour du conducteur. Ces vitesses véhicule n'ont jamais été utilisées lors des autres essais, nous n'avons donc aucun moyen de contrôle.

II. LES AUTRES ESSAIS

II.1. Essais 11, 13 et 21

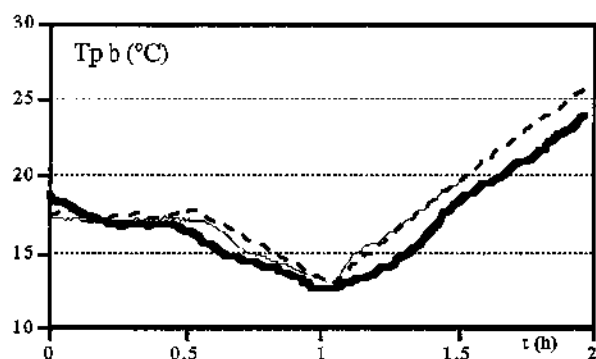
Nous avons réalisé ces trois essais identiques afin de déterminer la plage d'erreur des Tsk et des sensations mesurées dans des conditions presque similaires mais à des moments différents. Sur les deux figures ci-dessous nous avons représenté deux températures qui sont représentatives des différences de conditions thermiques entre les trois essais. Il faut noter que les différences ne sont pas toujours négligeables, par exemple 2°C de dispersion pour Thab lors la période de neutralité. Les

résultats que nous présentons (voir pages 44 et 45) ont été effectués avec l'essai 21 car cet essai nous fournit les données les plus "propres".



— Thab-11
- - - Thab-13
— Thab-21

*Température moyenne de
l'air pour les 3 essais*

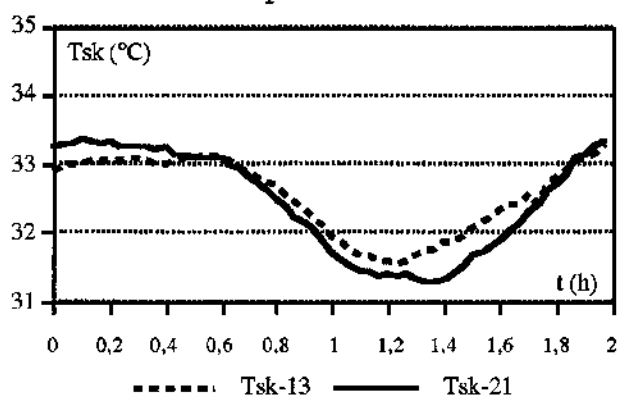


— Tp b-11
- - - Tp b-13
— Tp b-21

*Température du pare brise
milieu bas pour les 3 essais*

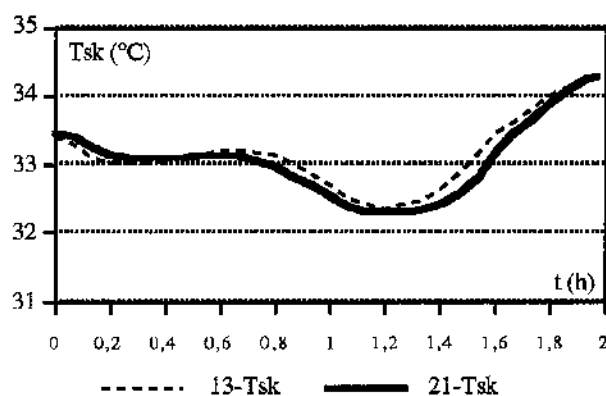
Sur les figures ci-dessous nous avons représenté la température moyenne cutanée et la sensation globale pour les essais 13 et 21. Ces résultats sont donnés dans le cas réel et simulé.

Expérience

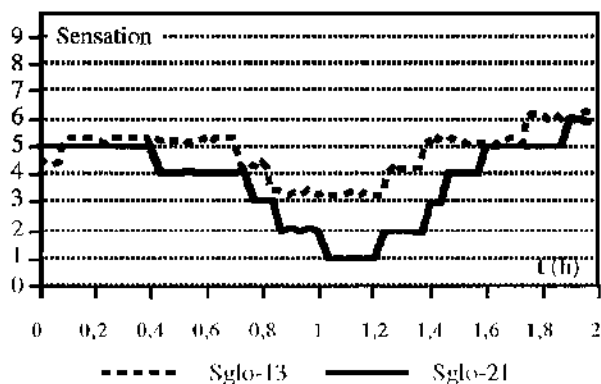


- - - Tsk-13 — Tsk-21

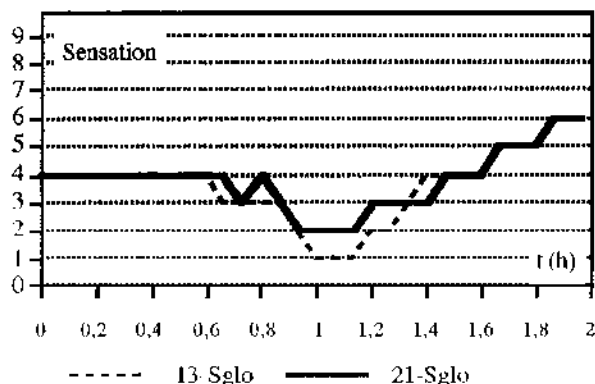
Simulation



- - - 13-Tsk — 21-Tsk



- - - Sglo-13 — Sglo-21



- - - 13-Sglo — 21-Sglo

Comparaison entre les essai 13 et 21 expérience et simulation

Au cours des expériences, les températures cutanées peuvent être différentes, jusqu'à 2°C d'écart. Il en est de même pour les sensations (2 points). Par contre les résultats de simulations sont beaucoup plus proches (écart entre températures inférieurs au demi degré pour tous les segments).

II.2. Essai 20

L'intensité du soleil passe de 0 à 1000 watts/m² en 1 heure. On constate bien une remontée en température pour les parties ensoleillées du mannequin (voir pages 46 et 47). L'ensoleillement sur certains segments semble surestimé notamment sur les mains. Pourtant la température des mains mesurée montre une très forte variation au début de l'essai, tout a fait inexpliquée, et que le modèle ne reproduit pas. La modélisation du soleil sur MATHER est pour l'instant réalisée de manière assez sommaire mais les premiers résultats sont encourageants.

II.1. Essais 29

Bien que l'on ait fait intervenir le soleil dans la simulation, les températures cutanées simulées restent en dessous des températures relevées lors de l'expérience, mais cet écart est faible. L'écart en température ne perturbe pas les résultats en sensation où la différence ne dépasse pas un point (voir pages 48 et 49).

Il faut remarquer que bien que les températures des bras simulées et expérimentales soient différentes, on retrouve bien les écarts bras droit bras gauche, le bras gauche étant plus chaud car plus exposé au soleil.

III. CONCLUSIONS

Les résultats présentés ici montrent que la fiabilité du code, pour ce qui est des sensations, est satisfaisante, malgré des différences entre températures cutanées expérimentales et simulées qui peuvent être importantes. Toutefois même si les valeurs absolues montrent des différences, les sens de variation et les amplitudes sont en général corrects.

L'asymétrisation du modèle était indispensable, puisque quand le climat extérieur est froid et qu'il n'y a pas de soleil, le bras gauche est plus froid que le droit. A l'inverse dès qu'il y a du soleil le bras gauche est nettement plus chaud. Ce phénomène est bien pris en compte par le modèle ; il semblerait tout de même que le rayonnement infra-rouge soit légèrement sous-estimé.

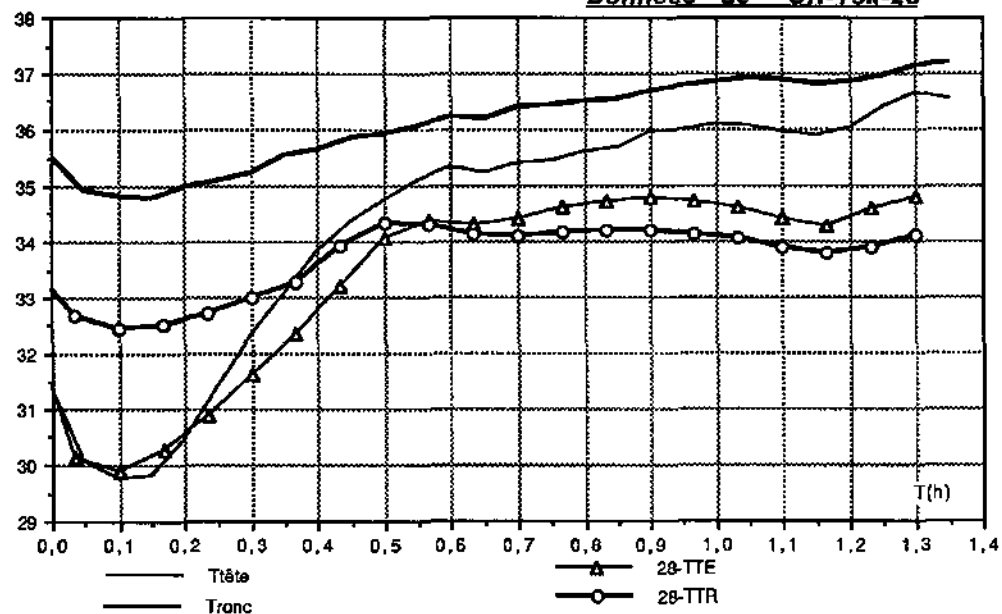
La prise en compte d'un certain nombre de facteurs, tel que le siège, pour l'instant traité grossièrement, devrait apporter une amélioration au modèle. Toutefois les expériences 11, 13, et 21 nous montrent les limites de la précision que l'on peut obtenir.

Le fichier des paramètres physiologiques employé a été mis au point pour un individu standard "virtuel", qui ne correspond pas exactement à notre essayeur. Francis devrait être classé par rapport à une échelle statistique classique (PMV ou autre), ou situé parmi un panel de plusieurs personnes plus représentatif d'un utilisateur moyen.

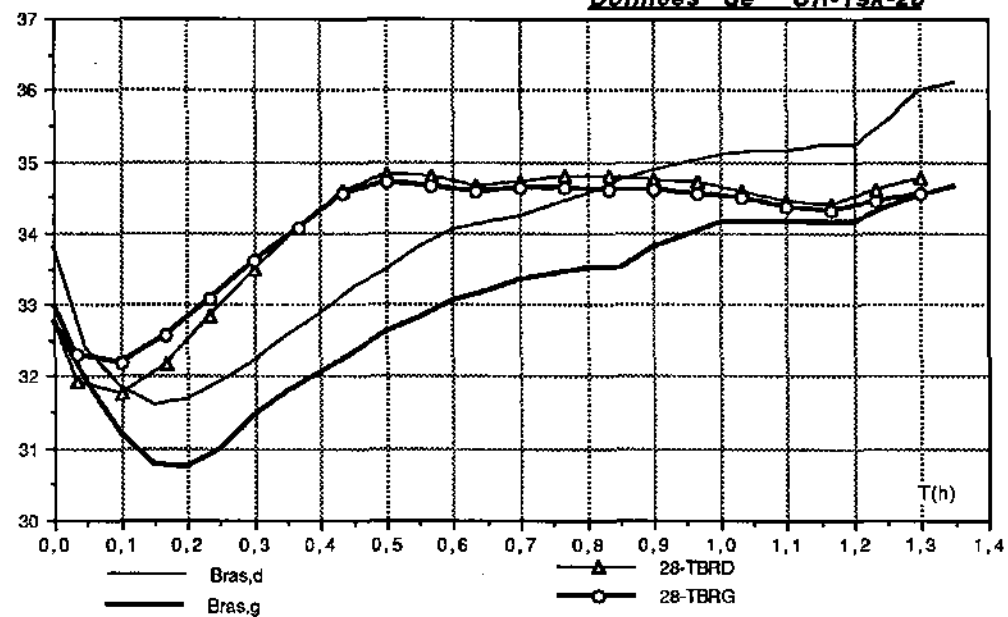
COMPARAISONS

SIMULATION/EXPÉRIENCES

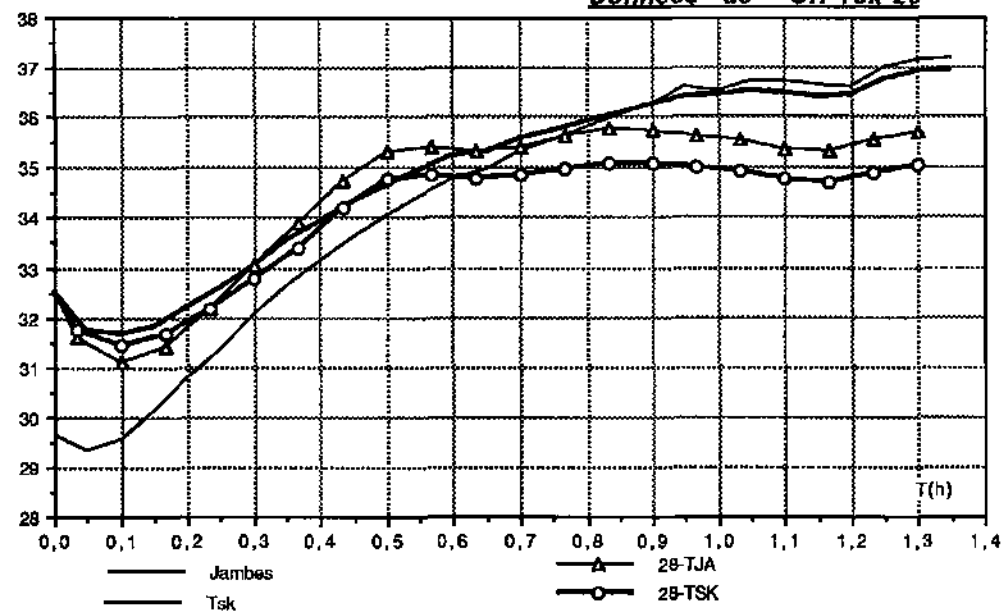
Données de "CR-Tsk-28"



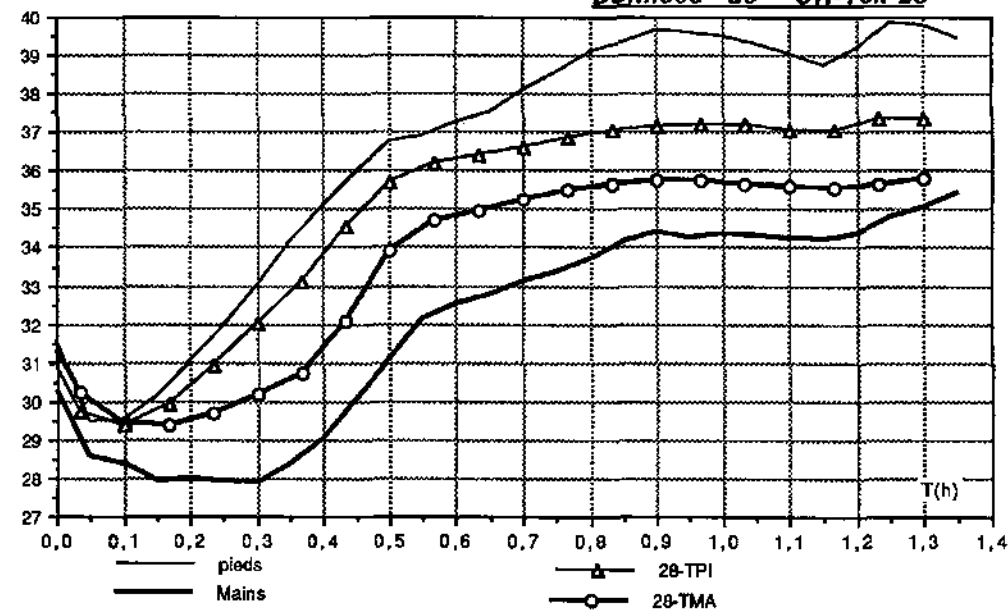
Données de "CR-Tsk-28"



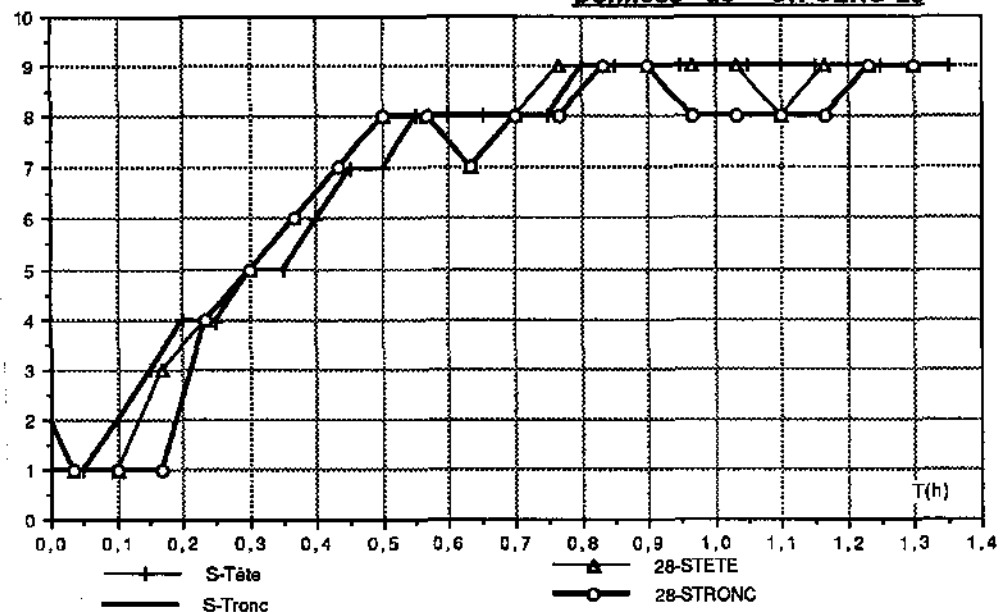
Données de "CR-Tsk-28"



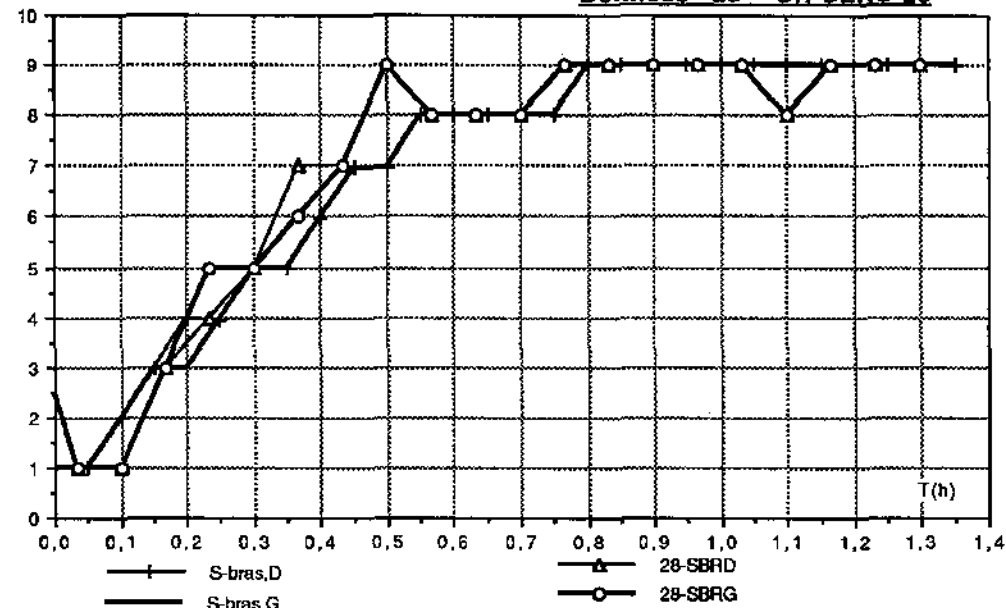
Données de "CR-Tsk-28"



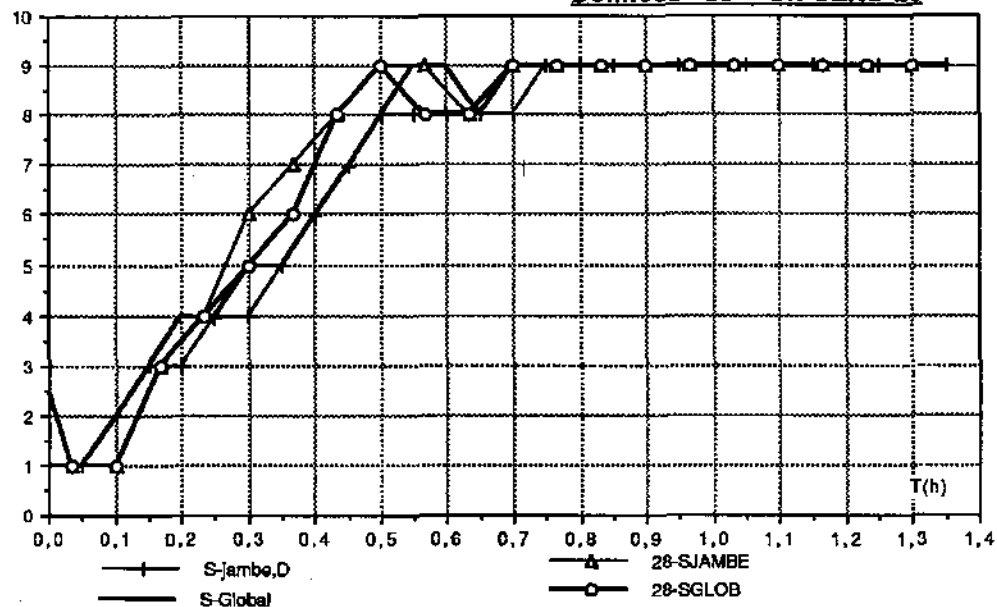
Données de "CR-SENS-28"



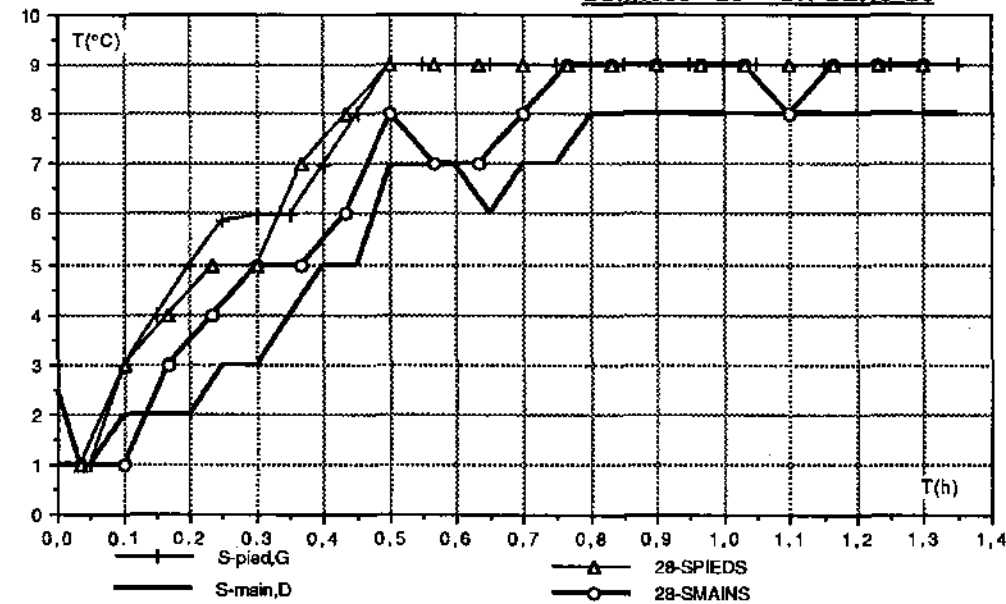
Données de "CR-SENS-28"



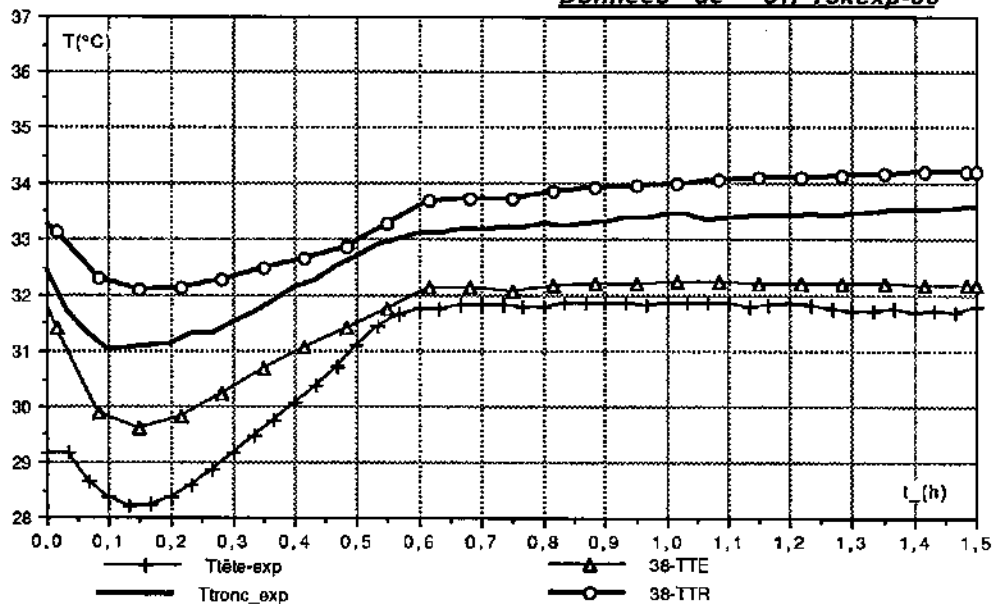
Données de "CR-SENS-28"



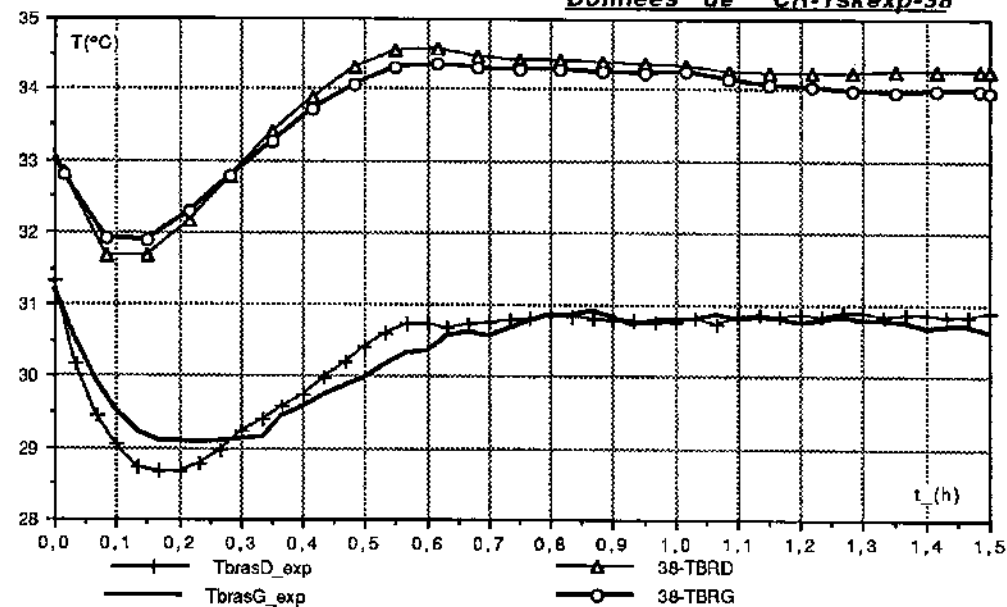
Données de "CR-SENS-28"



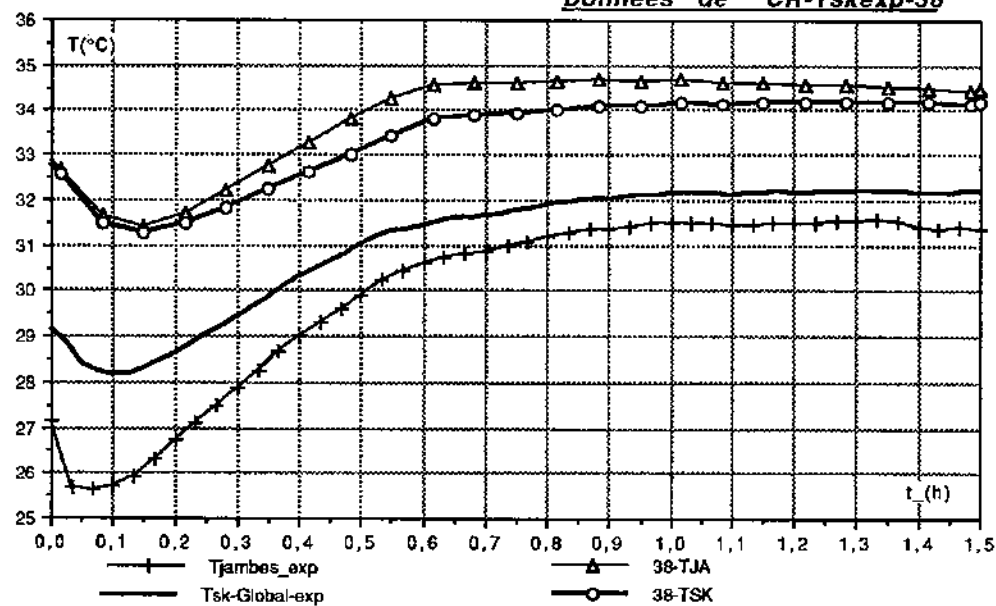
Données de "CR-Tskexp-38"



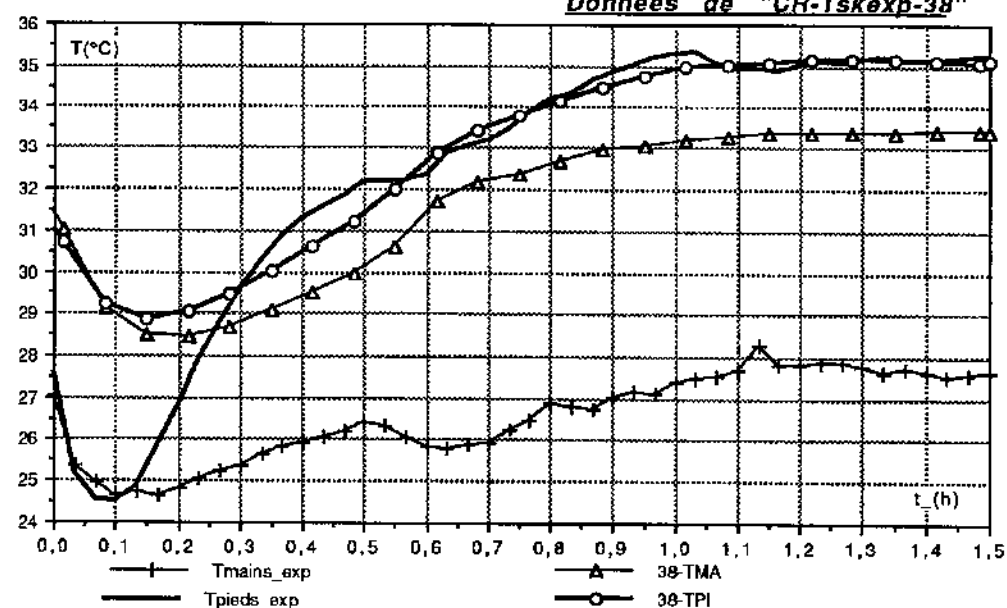
Données de "CR-Tskexp-38"



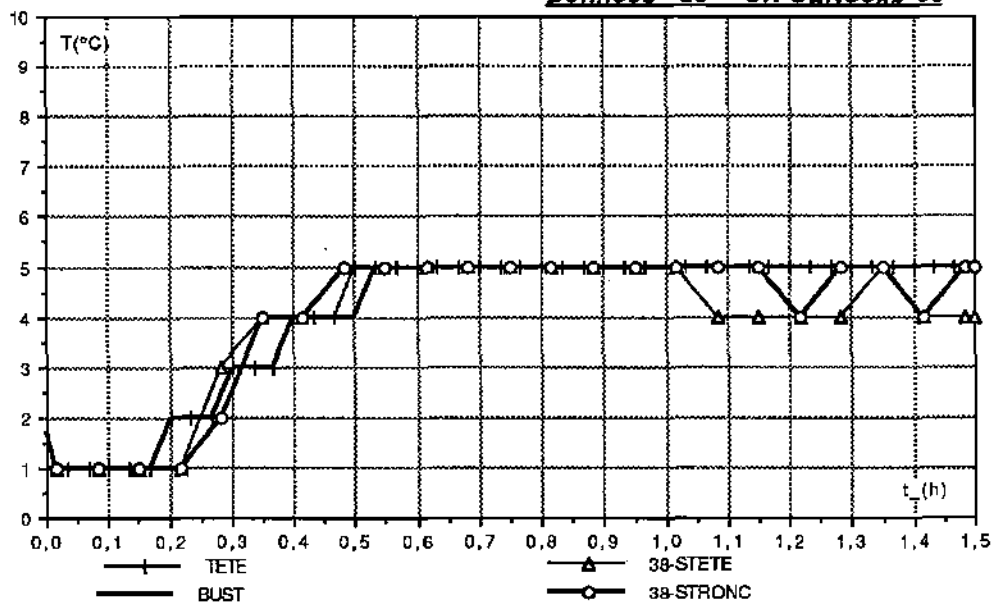
Données de "CR-Tskexp-38"



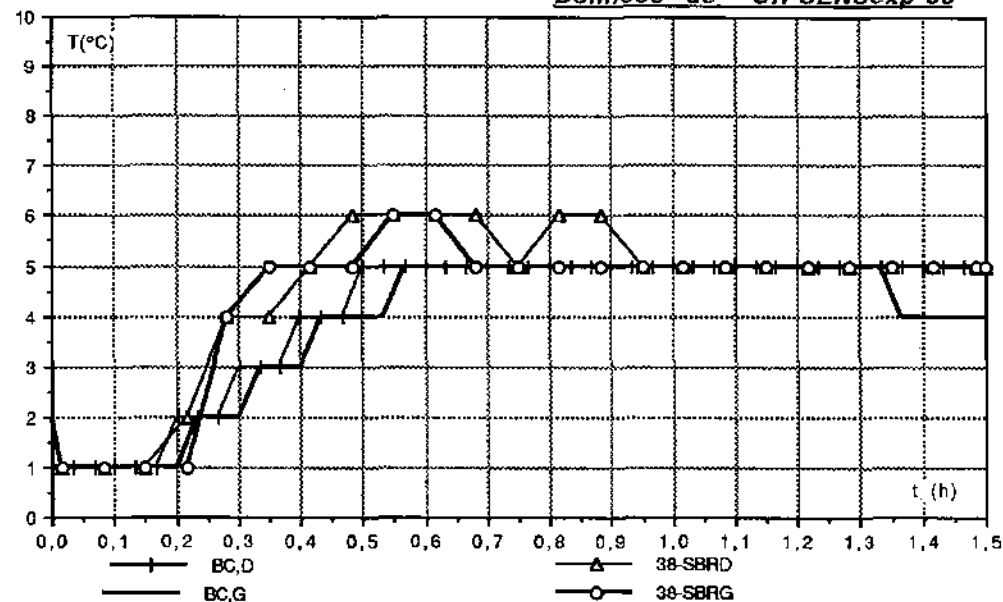
Données de "CR-Tskexp-38"



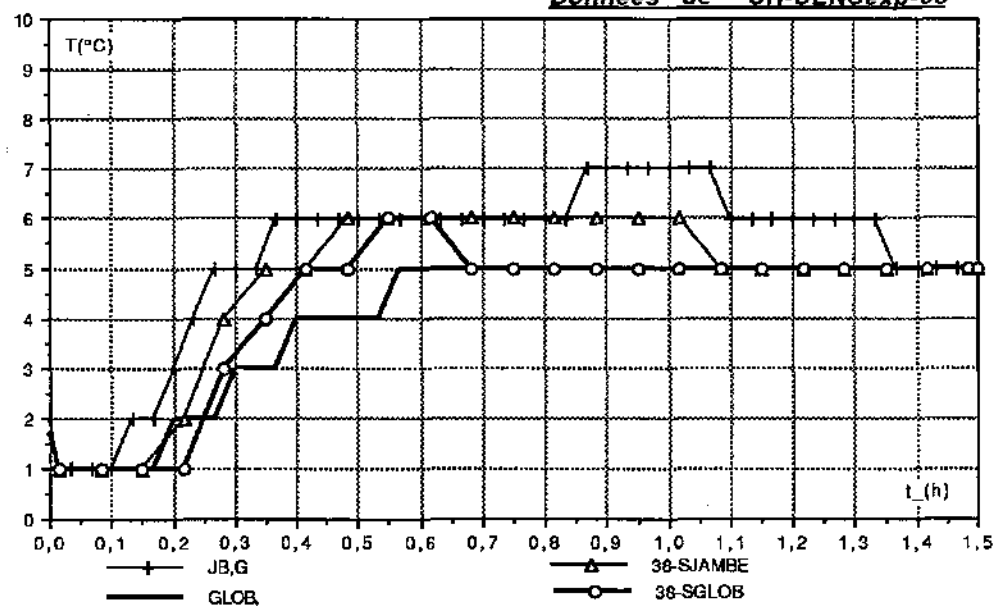
Données de "CR-SENSExp-38"



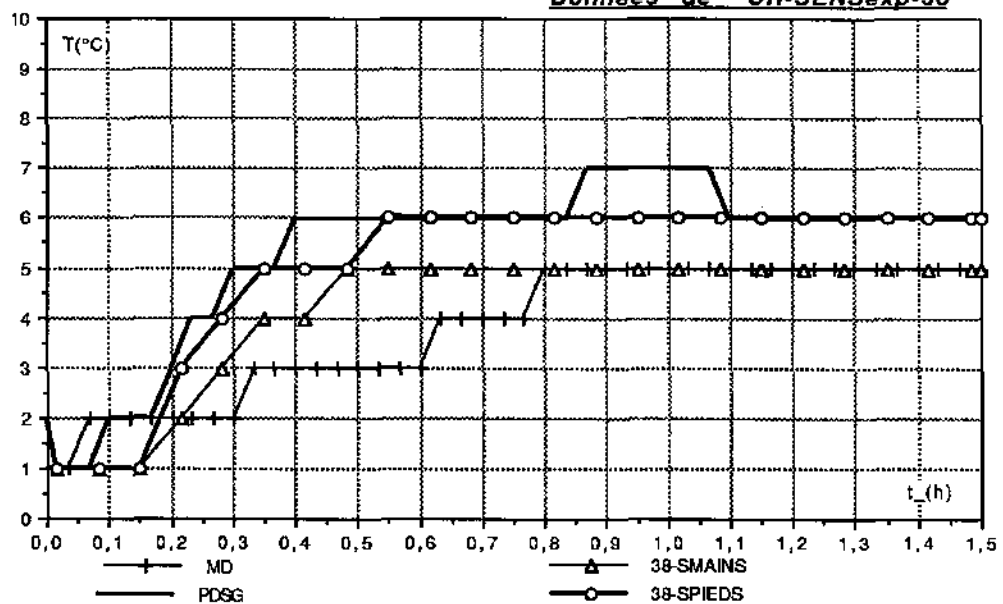
Données de "CR-SENSExp-38"



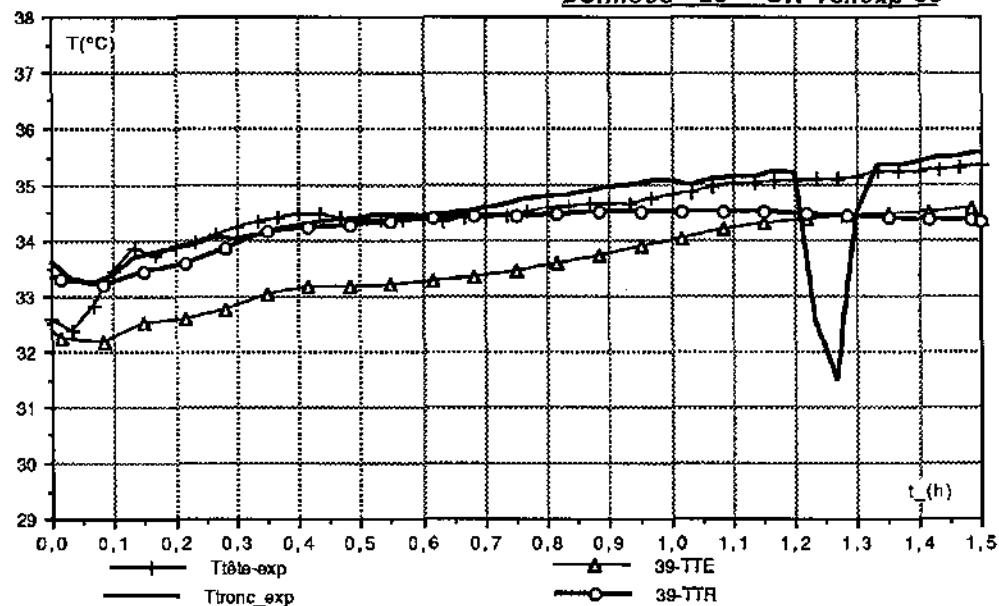
Données de "CR-SENSExp-38"



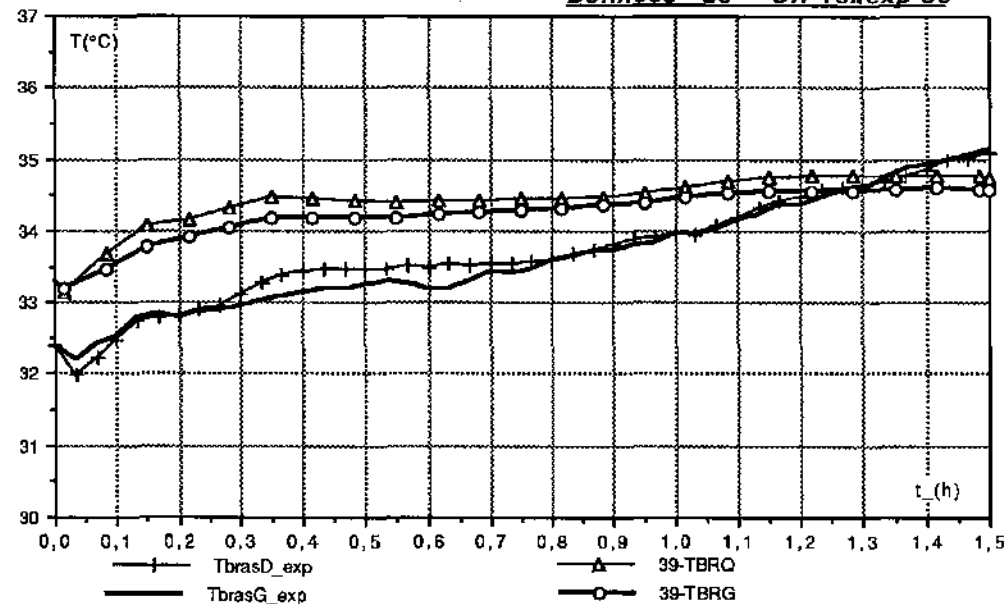
Données de "CR-SENSExp-38"



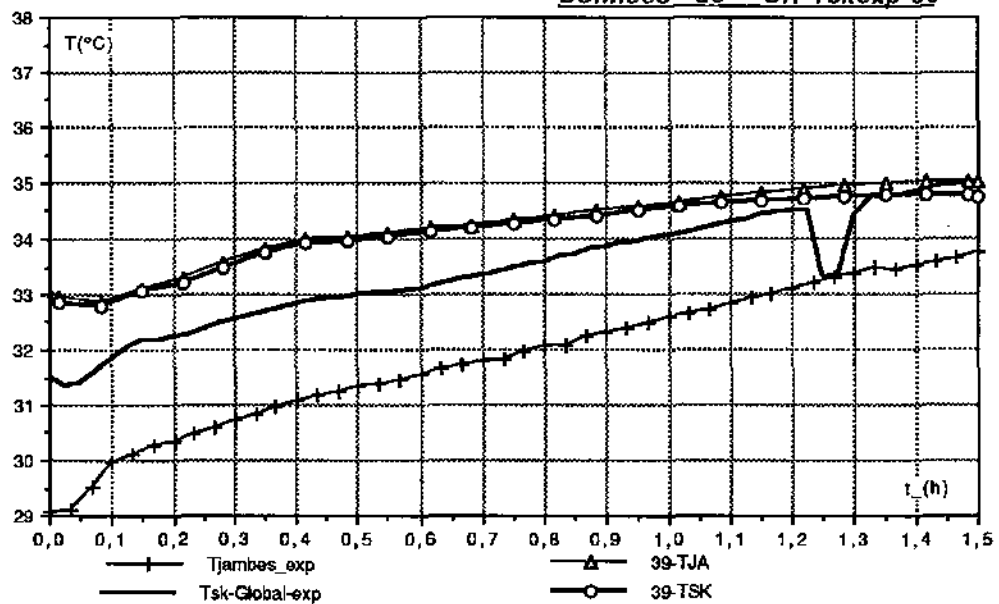
Données de "CR-Tskexp-39"



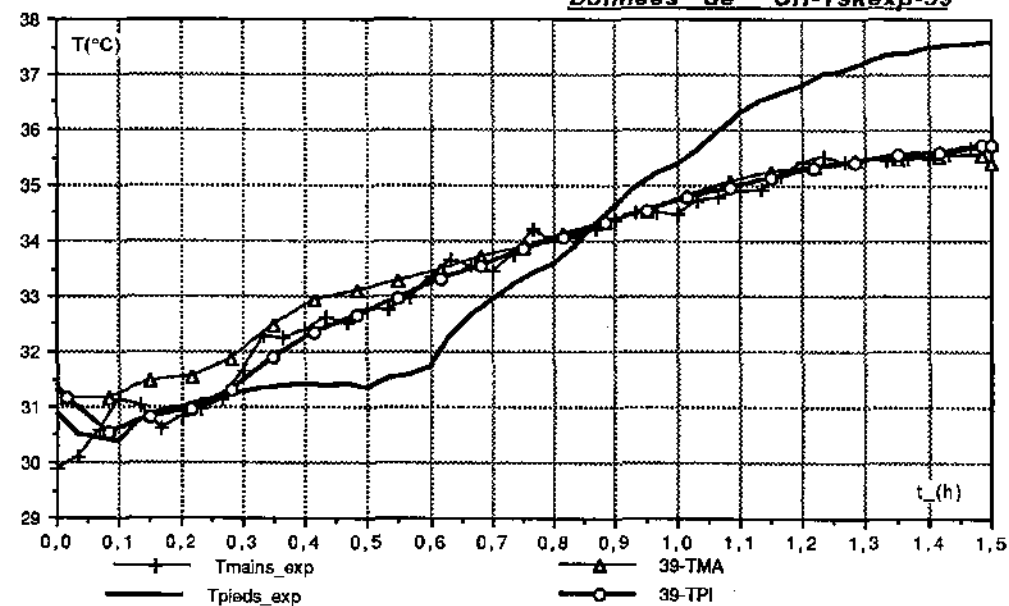
Données de "CR-Tskexp-39"



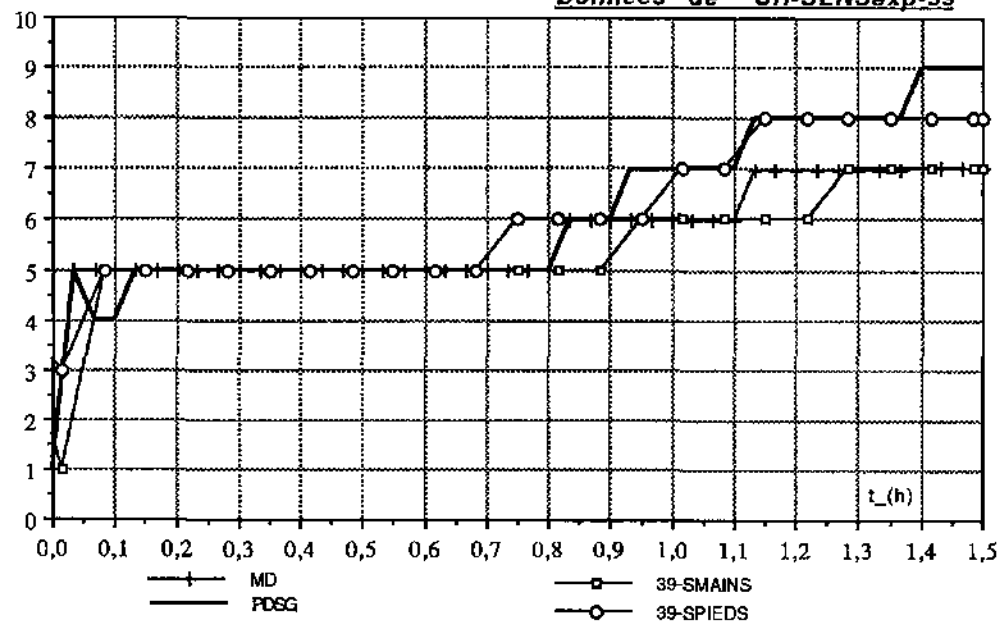
Données de "CR-Tskexp-39"



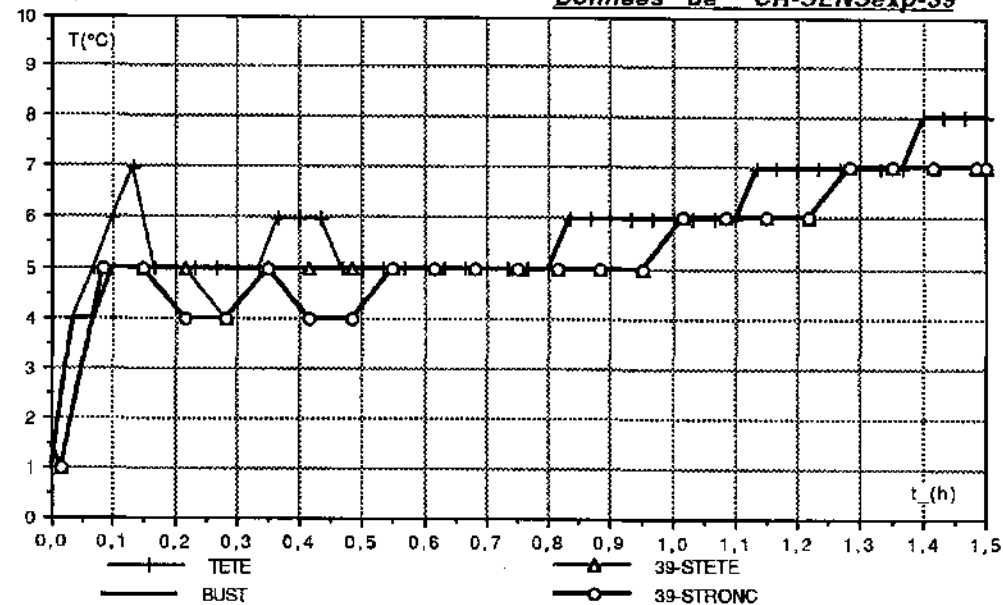
Données de "CR-Tskexp-39"



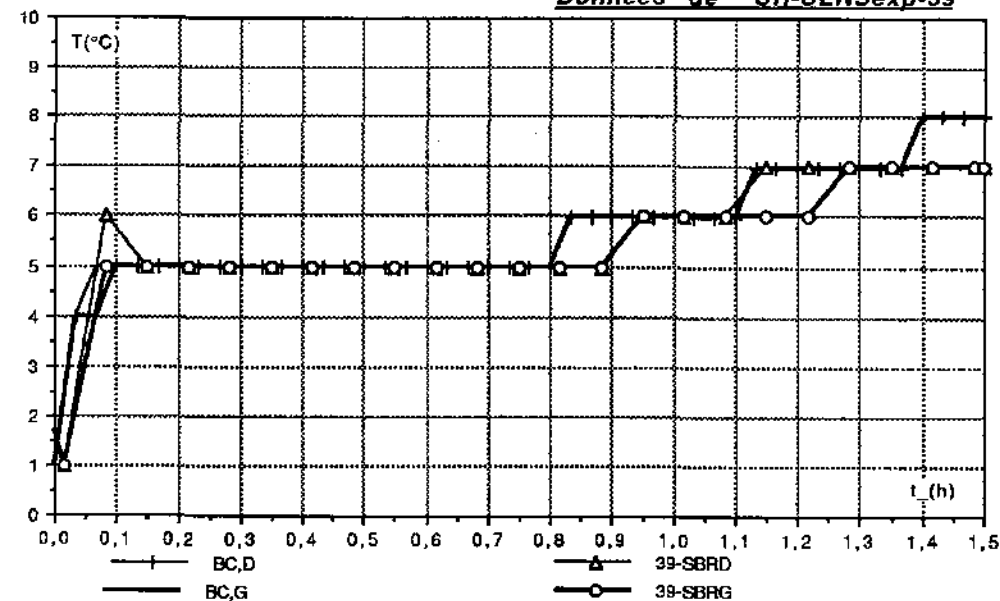
Données de "CR-SENSexp-39"



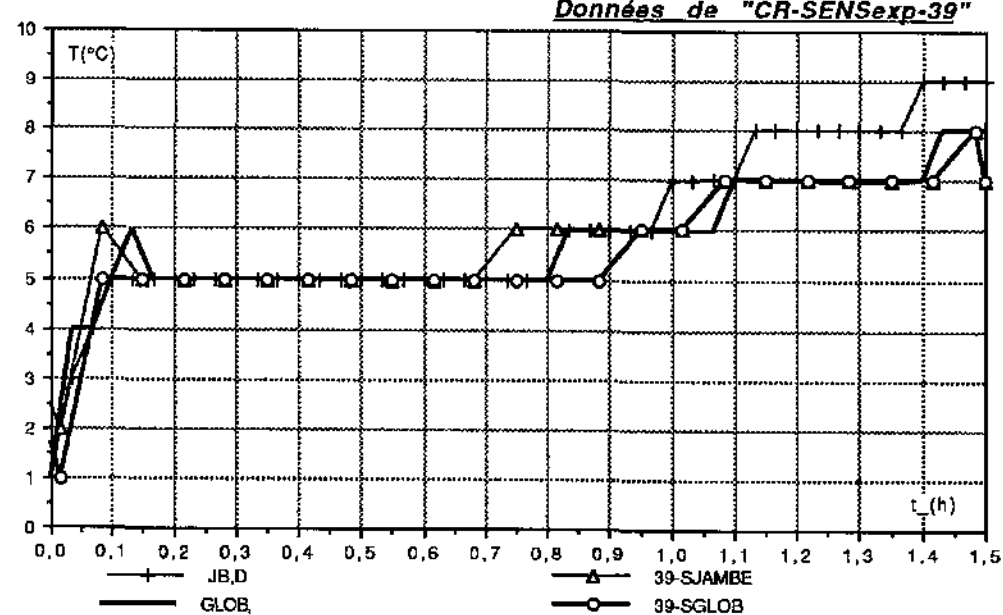
Données de "CR-SENSexp-39"



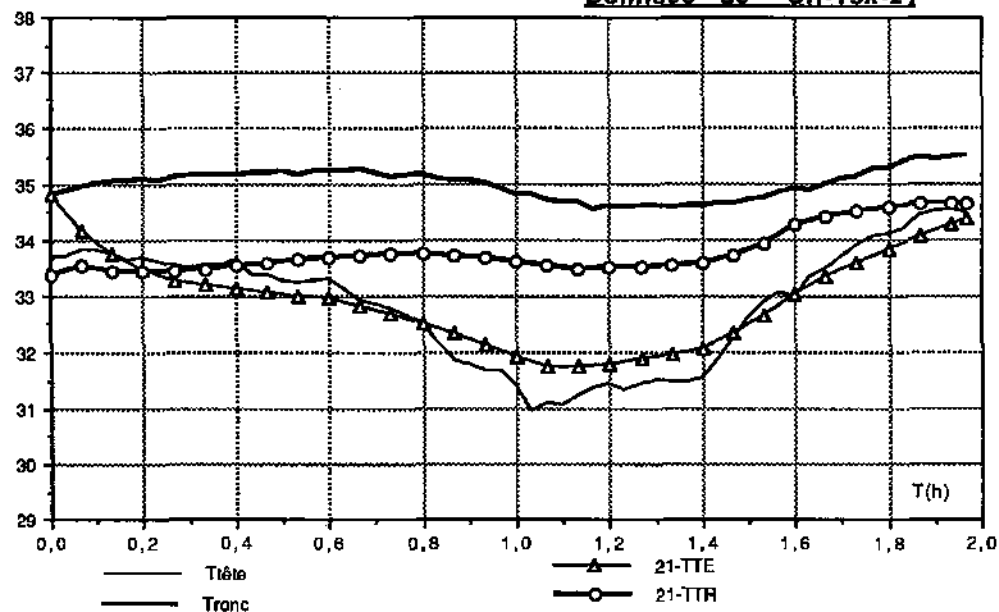
Données de "CR-SENSexp-39"



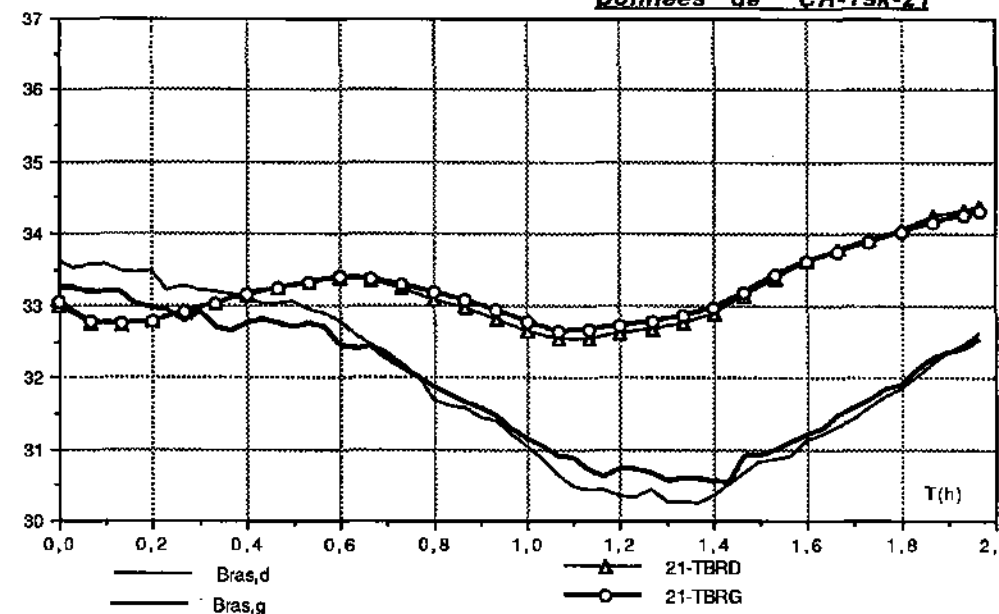
Données de "CR-SENSexp-39"



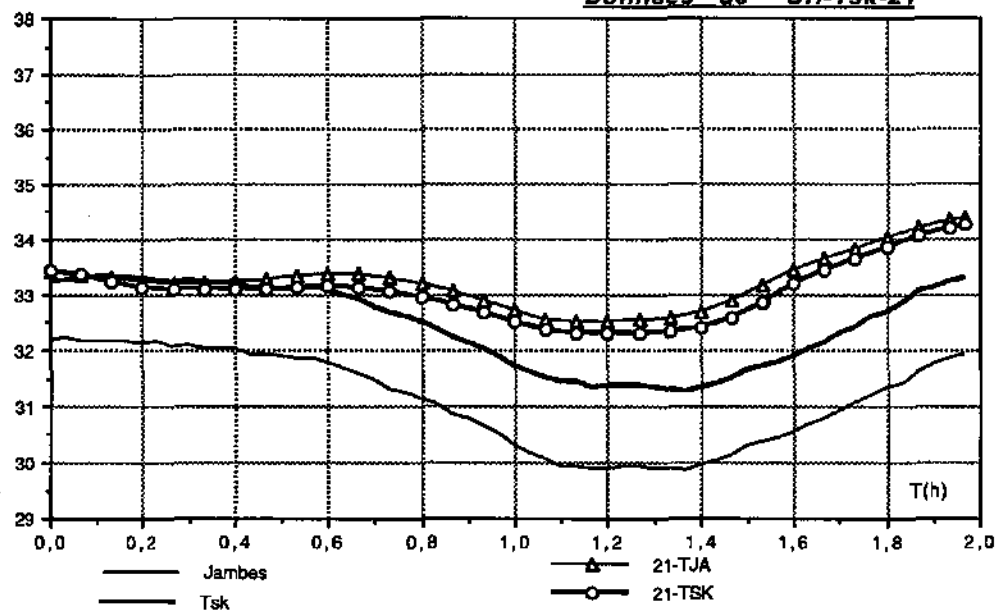
Données de "CR-Tsk-21"



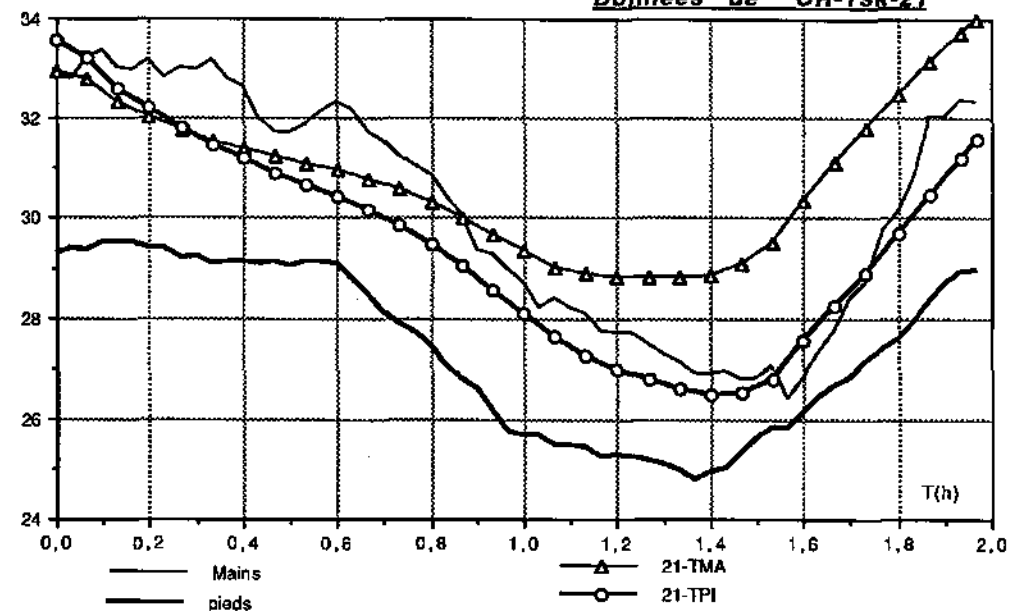
Données de "CR-Tsk-21"



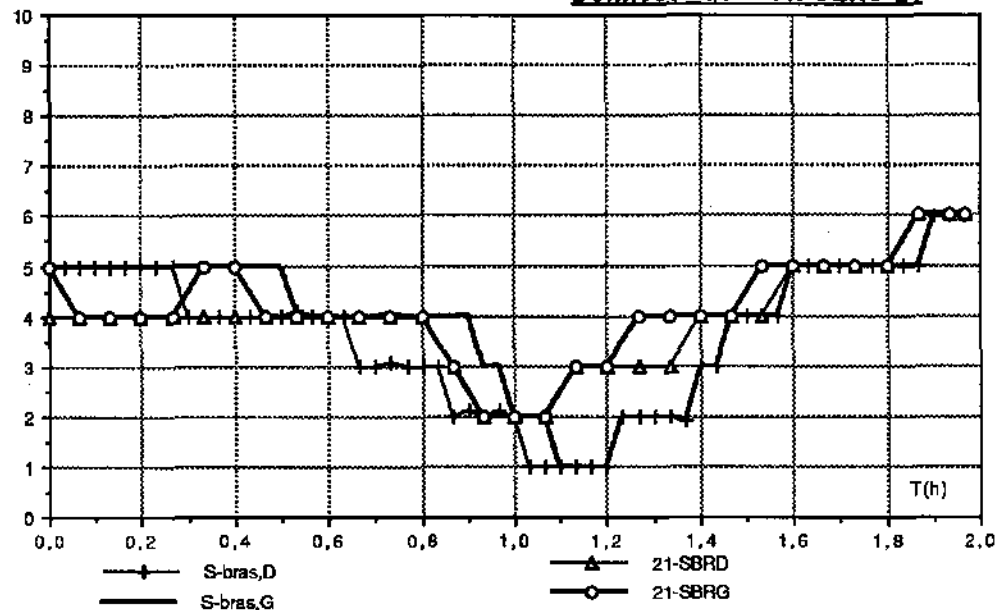
Données de "CR-Tsk-21"



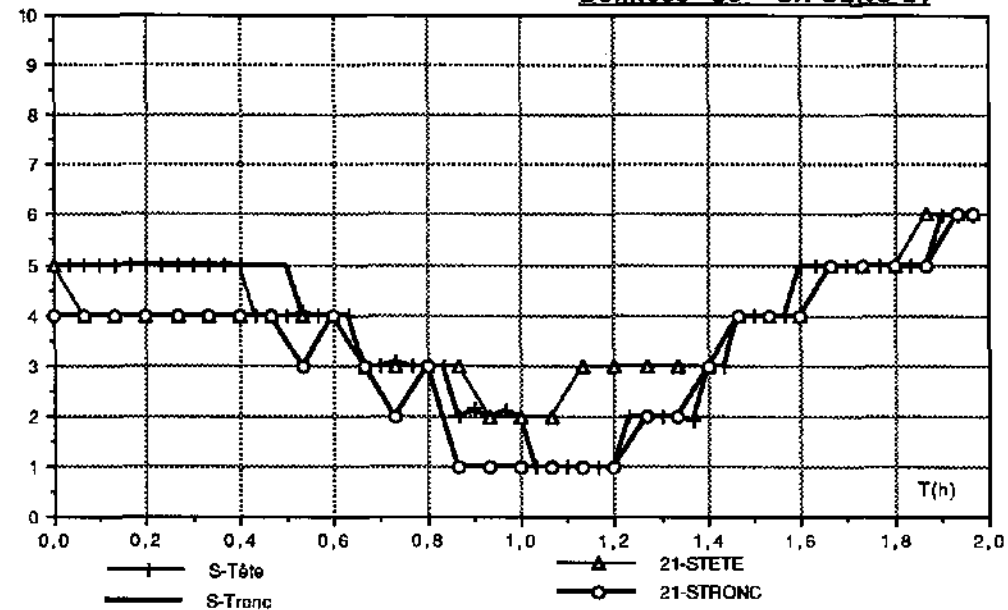
Données de "CR-Tsk-21"



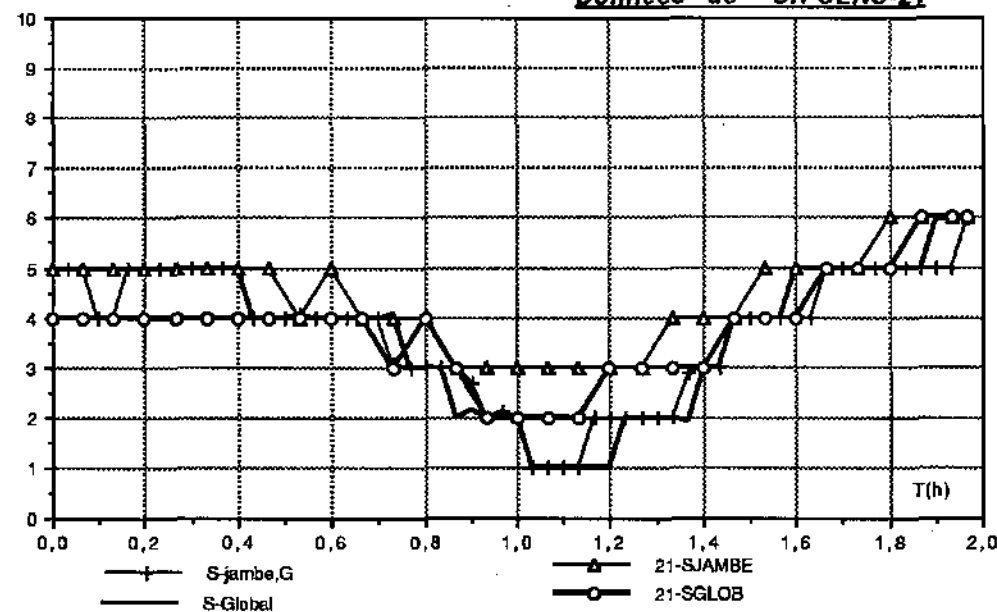
Données de "CR-SENS-21"



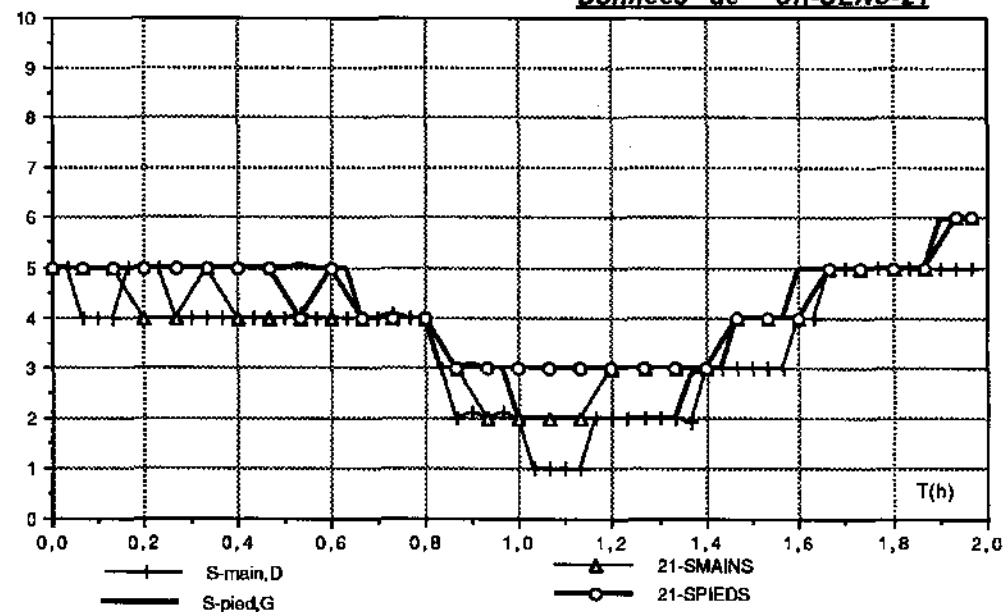
Données de "CR-SENS-21"



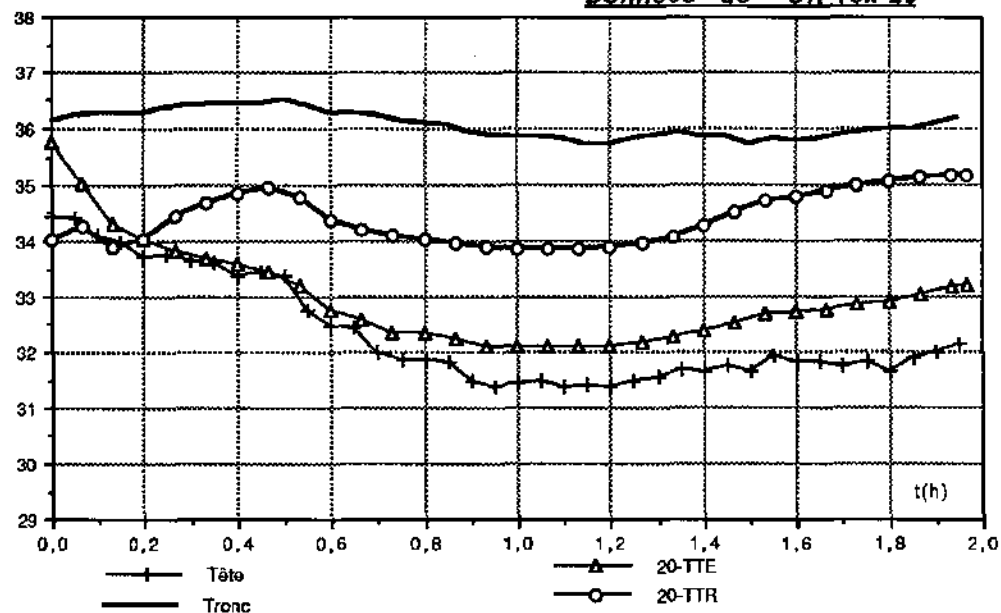
Données de "CR-SENS-21"



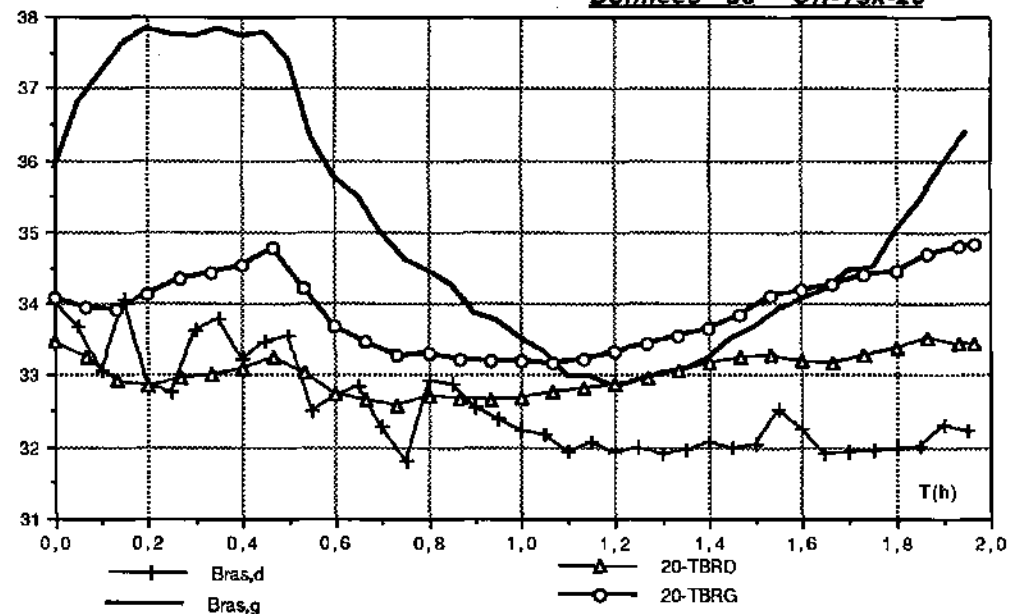
Données de "CR-SENS-21"



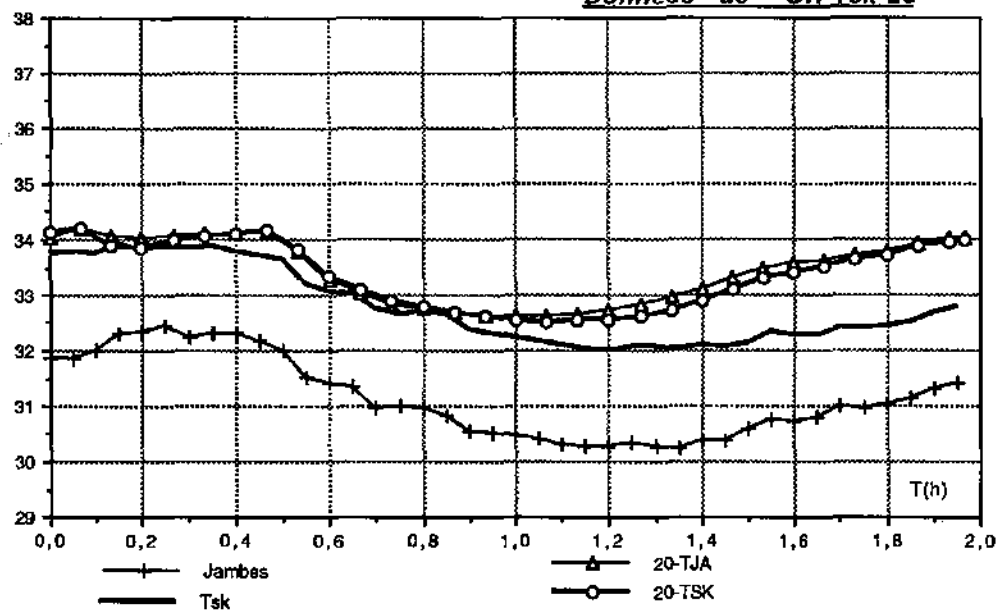
Données de "CR-Tsk-20"



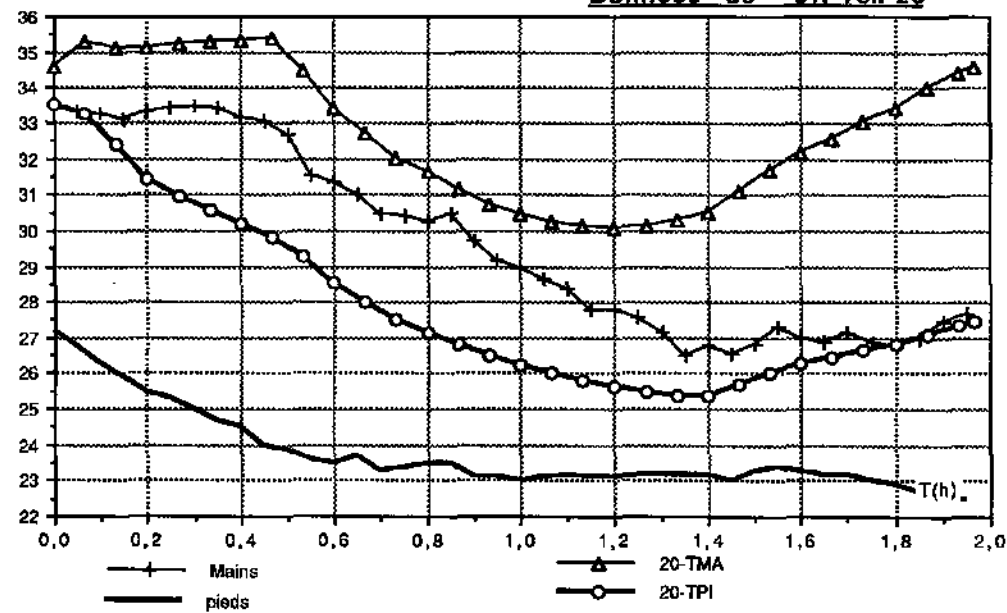
Données de "CR-Tsk-20"



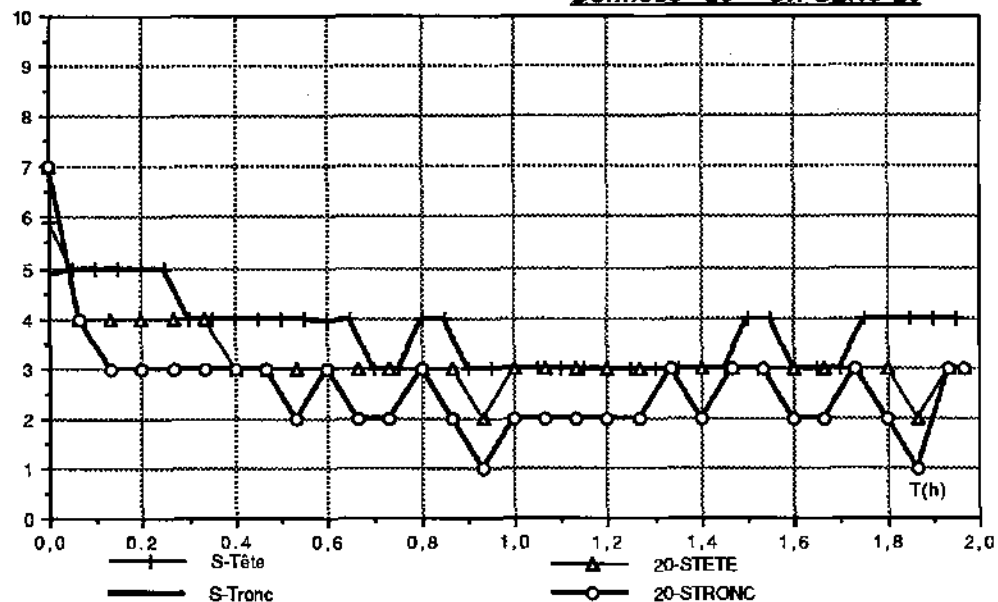
Données de "CR-Tsk-20"



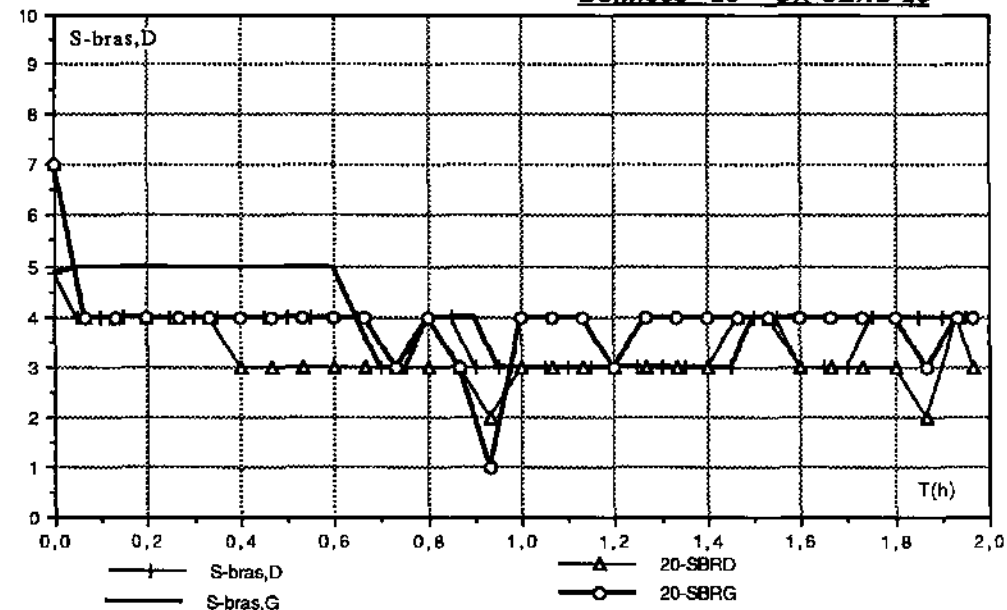
Données de "CR-Tsk-20"



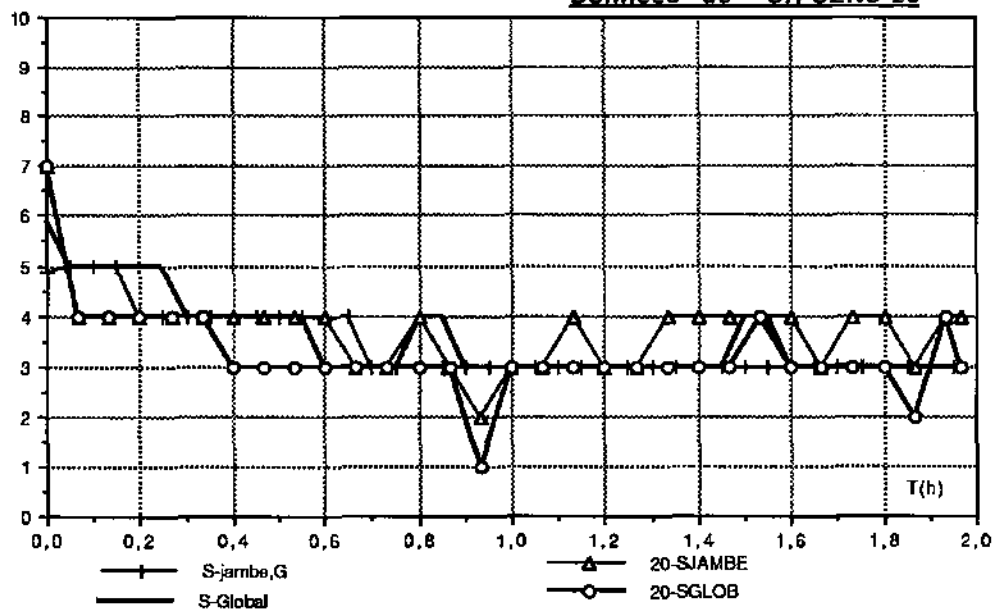
Données de "CR-SENS-20"



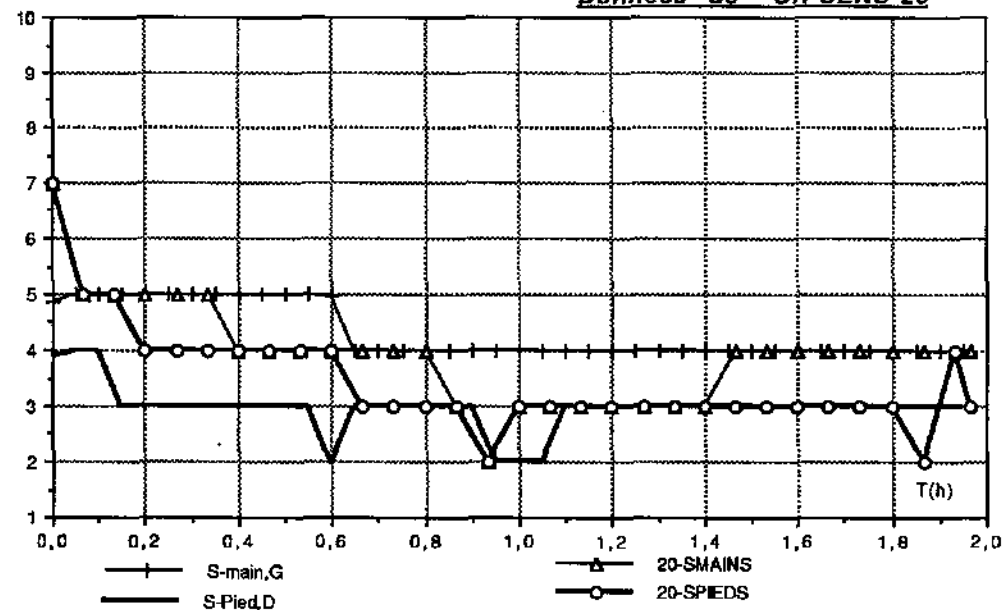
Données de "CR-SENS-20"



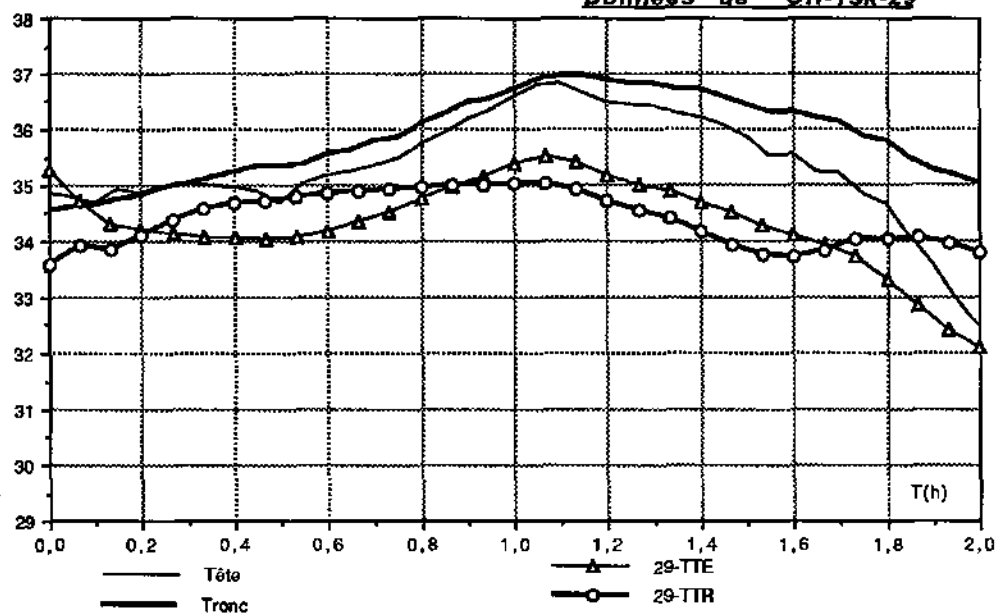
Données de "CR-SENS-20"



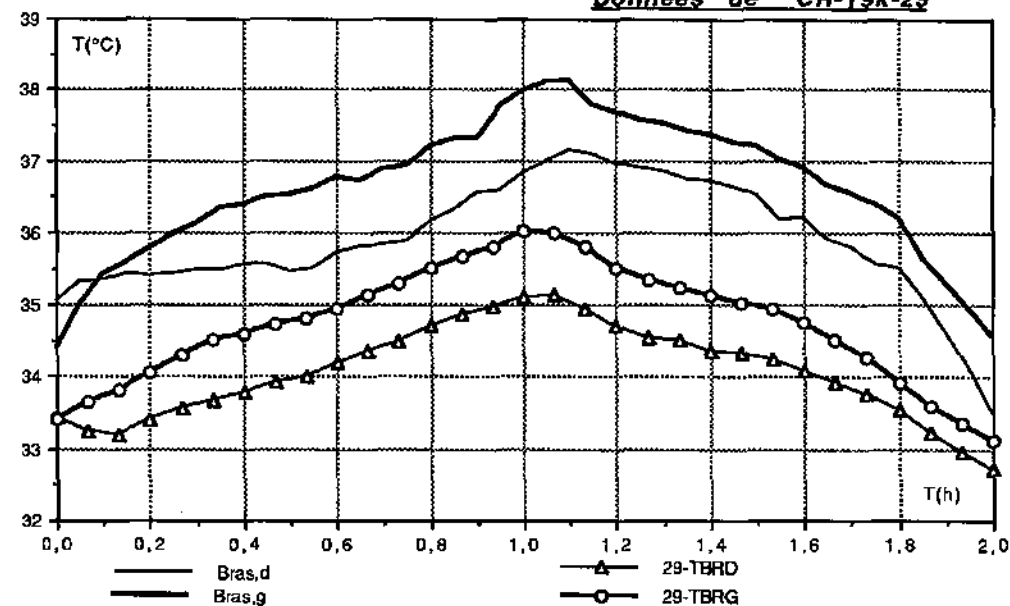
Données de "CR-SENS-20"



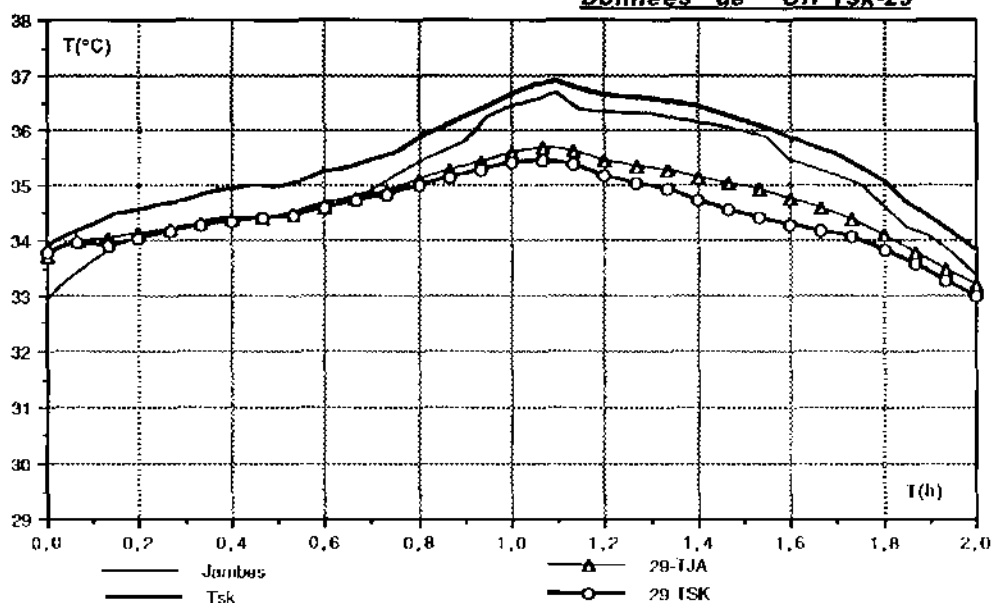
Données de "CR-Tsk-29"



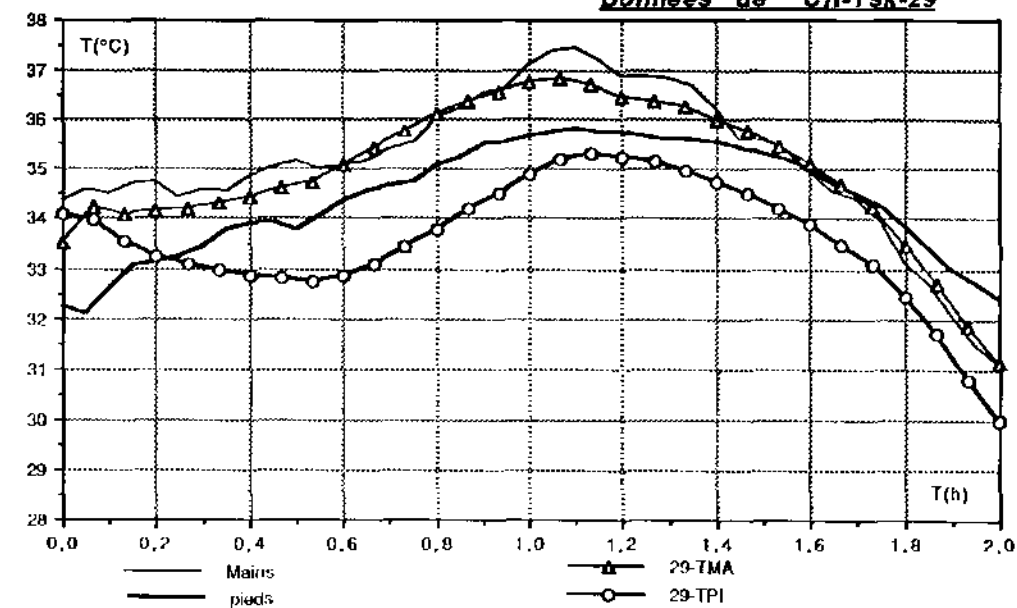
Données de "CR-Tsk-29"



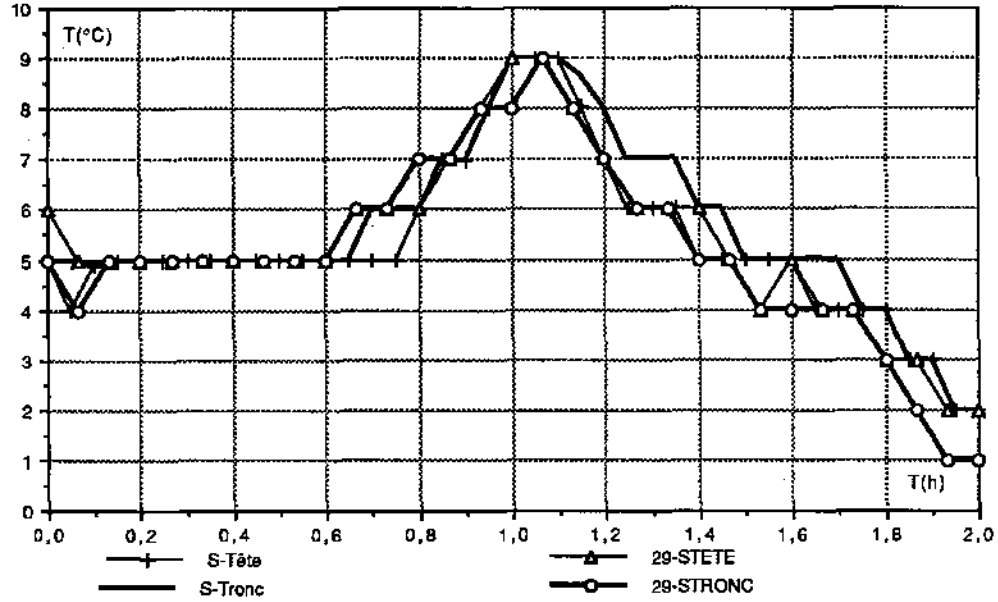
Données de "CR-Tsk-29"



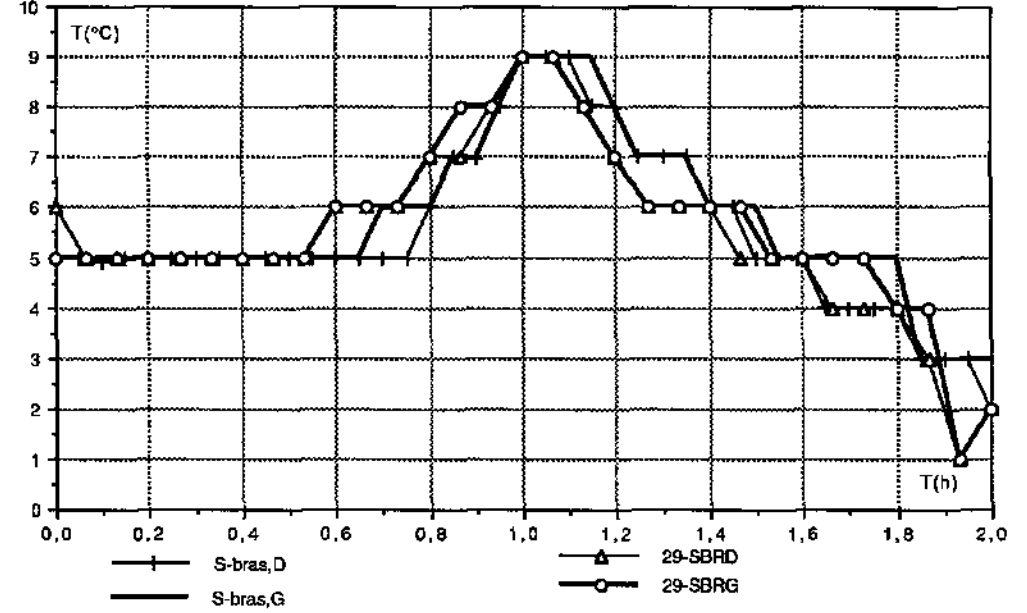
Données de "CR-Tsk-29"



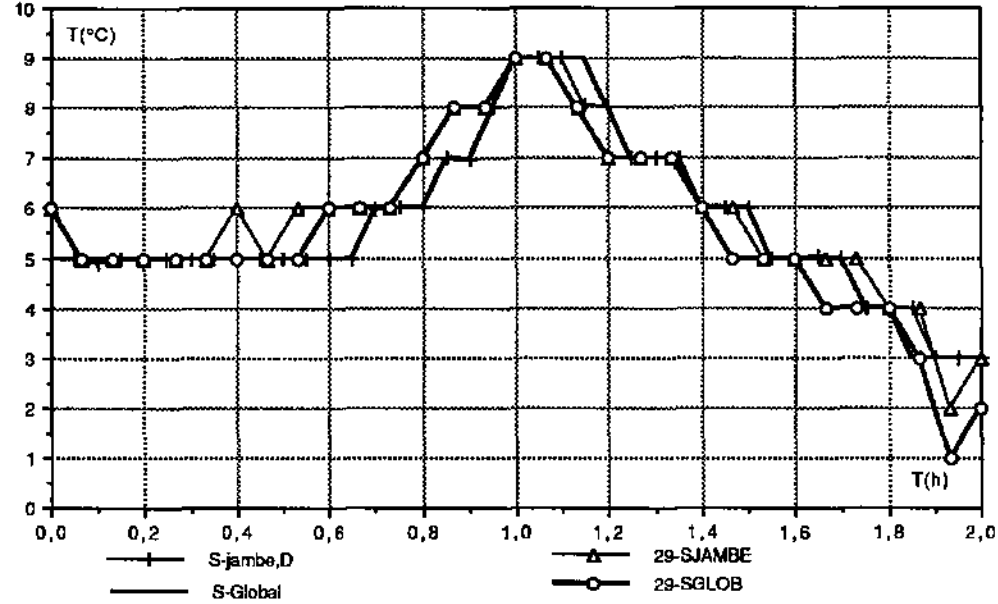
Données de "CR-SENS-29"



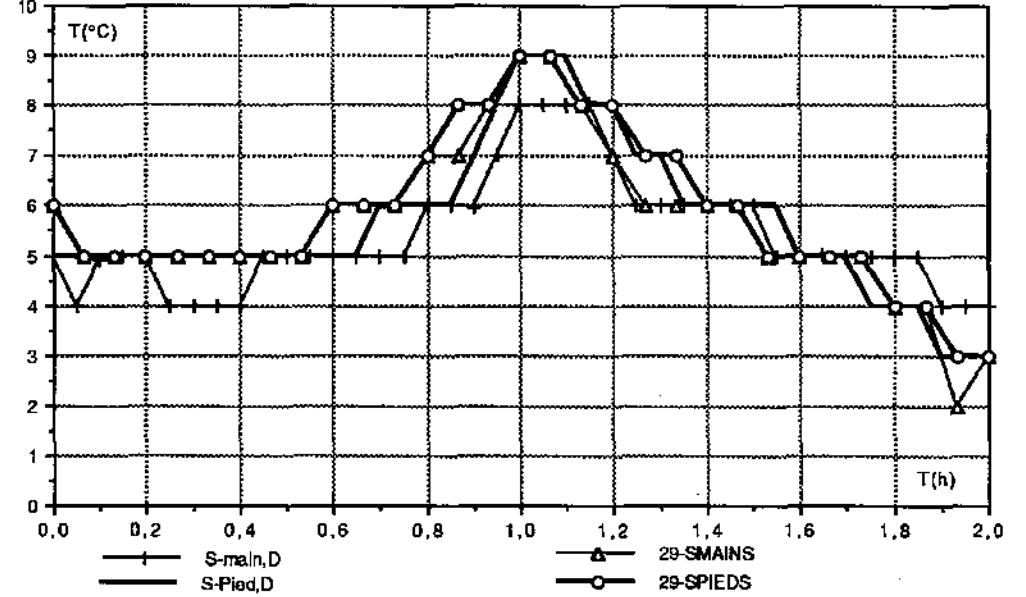
Données de "CR-SENS-29"



Données de "CR-SENS-29"



Données de "CR-SENS-29"



ANNEXES

VARIABLES ENREGISTRÉES ET TRAITEMENTS DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

- Liste et position des thermocouples lors des expériencesa.1
- Regroupement des surfaces pour les calculs d'échanges radiatifsa.5

VITESSES D'AIR

- Dispositif de mesure.....a.7
- Tableaux des vitesses d'air en fonction du type de soufflage.....a.7
- Vitesses utilisées lors des simulations.....a.9

MESURE DES FLUX SOLAIRES.....a.10

CARACTÉRISTIQUES DES VÊTEMENTS D'HIVER.....a.10

TABLEAUX RÉCAPITULATIFS DE CHAQUE ESSAI.....a.12

MODE D'EMPLOI DES PROGRAMMES

- Fiche TRNSYS du Type 54 - MATHER - Hivera.18
- Commentaires sur le logiciel.....a.19
- Fichier des paramètres du modèle MATHER - Hivera.19
- Fiche TRNSYS du Type 70 - Échanges radiatifsa.21
- Fichier de simulation de TRNSYS commentéa.21
- Fichier des conditions thermiquesa.25

TABLES DES MATIÈRES DES 5 RAPPORTS INTERMÉDIAIRES.....a.26

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....a.28

LES FICHES PROFORMA.....a.30

- Fiche PROFORMA du Type 54 - MATHER -Hiver.....19 pages
- Liste des variables7 pages
- Fiche PROFORMA du Type 70 - Échanges radiatifs8 pages

VARIABLES ENREGISTRÉES ET TRAITEMENTS DES DONNÉES

Liste et position des thermocouples

Au cours de tous les essais (sauf octobre 1992), 104 variables ont été enregistrées toutes les 30 secondes. Les données qui nous intéressent sont réparties de la façon suivante :

- 3 variables sur les conditions extérieures
- 7 variables pour le système de chauffage
- 3 conditions moyennes dans le véhicule
- 31 températures de surface du véhicule
- 10 températures d'air dans le véhicule
- 12 températures d'air près du corps
- 20 températures cutanées
- 11 sensations thermiques

• Conditions extérieures dans la veine

Vveine : Vitesse du vent
Tveine : Température de l'air
HRveine : Humidité relative

• Données sur le système de chauffage

Qv : débit d'eau dans le système de chauffage
Ipuls : intensité électrique pour le pulseur
Upuls : tension aux bornes du pulseur
Ppuls : puissance du pulseur ($P = U.I$)
Ii : Indicateur de répartition du soufflage
Eaero : température de l'eau à l'entrée de l'aérotherme
Saero : température à la sortie de l'aérotherme

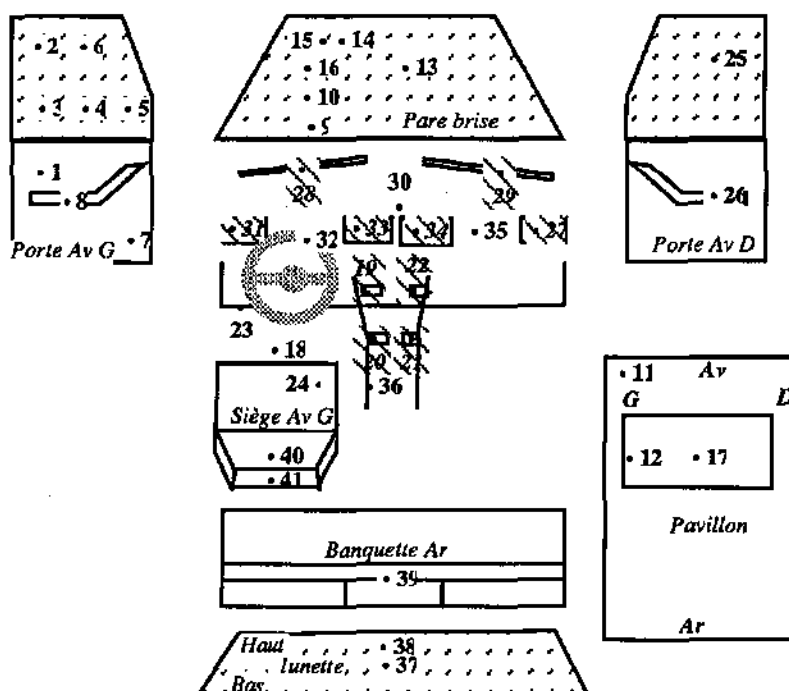
• Données à l'intérieure du véhicule

Thab : température moyenne de l'air dans l'habitacle
Moy air : " " " " relevée plus près du sujet
HR vehi : humidité relative dans l'habitacle

• Températures de surface et d'air dans le véhicule

Les températures relevées sont données ci-dessous, soit : 31 températures de surface et 10 températures d'air (hachurées sur la figure et en italique dans la liste). Les lettres en majuscules correspondent aux abréviations généralement utilisées.

- 1 PANneau AVant Gauche (haut arrière)
- 2 VITre AVAnt Gauche (haut arrière)
- 3 VITre AVAnt Gauche (bas arrière)
- 4 VITre AVAnt Gauche (bas milieu)
- 5 VITre AVAnt Gauche (bas avant)
- 6 VITre AVAnt Gauche (haut avant)
- 7 PANneau AVAnt Gauche (bas avant)
- 8 accoudoir AVAnt Gauche
- 9 PARE BRise Bas
- 10 PARE BRise Milieu Bas
- 11 PAVillon AVAnt Gauche
- 12 PAVillon ARrière Gauche
- 13 PARE BRise Centre
- 14 PARE BRise Haut Droit
- 15 PARE BRise Haut Gauche
- 16 PARE BRise MILieu Haut
- 17 PAVillon Centre
- 18 PIEDs Avant Gauche
- 19 Sortie PIEDs Avant Gauche
- 20 Sortie PIEDs ARrière Gauche
- 21 Sortie PIEDs ARrière Droit
- 22 Sortie PIEDs Avant Droit
- 23 Sous Planche Gauche
- 24 ASSise AVAnt Gauche
- 25 VITre AVAnt Droite
- 26 ACCoudoir AVAnt Droit
- 27 AERateur Latéral Droit
- 28 DEGIvrage Gauche
- 29 DEGIvrage Droit

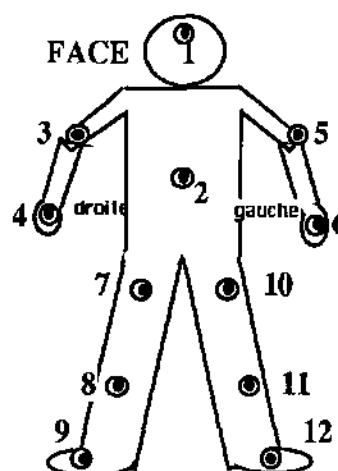


Position des thermocouples dans le véhicule lors de essais

- 30 Dessus PLAnche Centre
- 31 AERateur Latéral Gauche
- 32 VOLant
- 33 AERateur Centre Gauche
- 34 AERateur Centre Droit
- 35 Planche De Bord Droite
- 36 CONSOLE Bas Gauche
- 37 LUNette MILieu
- 38 LUNette Haut
- 39 Banquette ARrière
- 40 DOSSier AVAnt (Siège conducteur)
- 41 DOSSier ARrière (Siège conducteur)

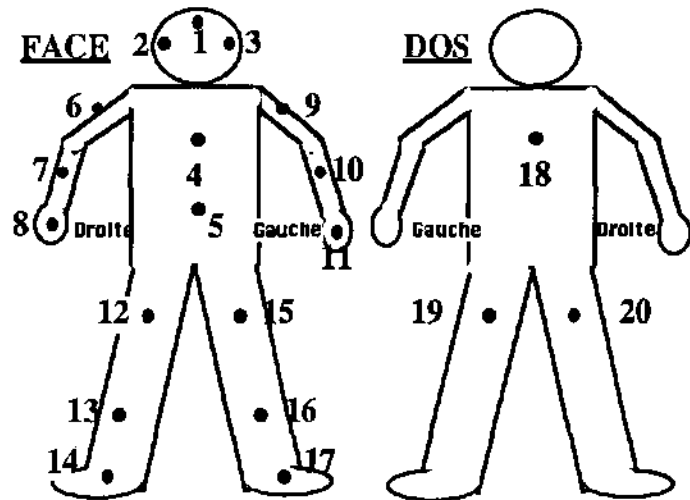
• Températures d'air à proximité du sujet

- 1 Tête
- 2 Poitrine
- 3 coude droit
- 4 main droite
- 5 coude gauche
- 6 main gauche
- 7 cuisse droite
- 8 tibia droit
- 9 pied droit
- 10 cuisse gauche
- 11 tibia gauche
- 12 pied gauche



• Températures cutanées

- 1 Front (T_{FRont})
- 2 Tempe droite ($T_{T,d}$)
- 3 Tempe gauche ($T_{T,g}$)
- 4 Poitrine (T_{po})
- 5 Abdomen (T_{abd})
- 6 Biceps droit ($T_{Bi,d}$)
- 7 Avant bras droit ($T_{AB,d}$)
- 8 Main droite ($T_{Ma,d}$)
- 9 Biceps gauche ($T_{Bi,g}$)
- 10 Avant bras gauche ($T_{AB,g}$)
- 11 Main gauche ($T_{Ma,g}$)
- 12 Cuisse droite Avant ($T_{Cu,d,Av}$)
- 13 Mollet droit ($T_{MO,d}$)
- 14 Pieds droit ($T_{PI,d}$)
- 15 Cuisse gauche Avant ($T_{Cu,g,Av}$)
- 16 mollet gauche ($T_{MO,g}$)
- 17 Pieds gauche ($T_{PI,g}$)
- 18 Dos (T_{DOs})
- 19 Cuisse Gauche ARrière ($T_{Cu,g,Ar}$)
- 20 Cuisse droite ARrière ($T_{Cu,d,Ar}$)



Il a fallu en déduire 11 températures cutanées pour les mêmes localisations que les sensations, puis 7 températures compatibles avec le modèle.

$$T_{Tête} = \frac{T_{FRont} + T_{T,d} + T_{T,g}}{3}$$

$$T_{Tro} = \frac{T_{po} + T_{abd} + T_{DOs}}{3}$$

$$T_{Bras,d} = 0,6 T_{Bi,d} + 0,4 T_{AB,d}$$

$$T_{Bras} = \frac{(T_{B,d} + T_{B,g})}{2}$$

$$T_{Bra,g} = 0,6 T_{Bi,g} + 0,4 T_{AB,g}$$

$$T_{jam,d} = 0,65 \frac{(T_{Cu,d,Av} + T_{Cu,d,Ar})}{2} + 0,35 T_{MO,d}$$

$$T_{jam} = \frac{T_{jam,d} + T_{jam,g}}{2}$$

$$T_{jam,g} = 0,65 \frac{(T_{Cu,g,Av} + T_{Cu,g,Ar})}{2} + 0,35 T_{MO,g}$$

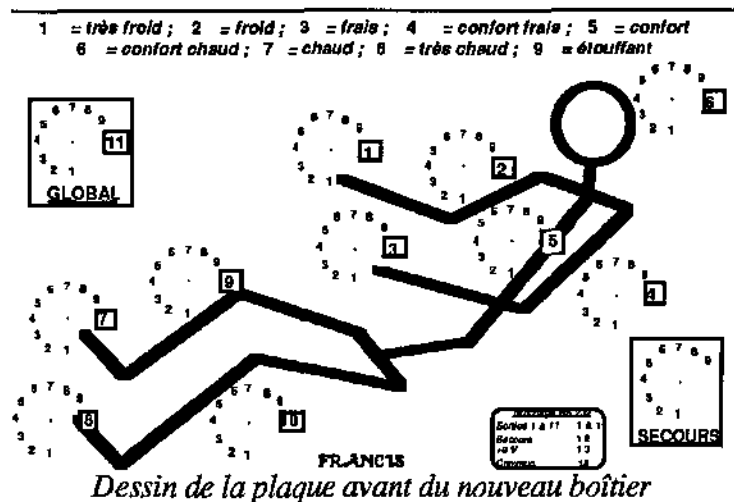
$$T_{mains} = \frac{T_{MA,d} + T_{MA,g}}{2}$$

$$T_{pieds} = \frac{T_{PI,d} + T_{PI,g}}{2}$$

$$T_{sk} = 0,0674 T_{tête} + 0,3604 T_{Tro} + 0,1304 T_{Bras} + 0,0475 T_{ma} + 0,3283 T_{jam} + 0,0659 T_{pi}$$

• Sensations

Les sensations sont enregistrées grâce au nouveau boîtier mis au point au LESETH, muni de contacteurs rotatifs gradués de 1 à 9. Les 11 jugements thermiques correspondent aux 10 emplacements locaux donnés ci-dessous plus le jugement global. Une voie de secours est prévu en cas de problème.



Regroupement des surfaces de l'habitacle pour le calcul IR

Les 31 températures de surface relevées lors des essais doivent être regroupées de façon à obtenir 20 températures correspondant aux groupes de surfaces utilisées dans le module de calcul des échanges radiatifs. Pour le conducteur, les 7 températures de peau ou de vêtement sont directement issues du modèle. Les différentes surfaces sont numérotées ainsi :

<u>Habitacle</u>		<u>Conducteur</u>
n°1 pavillon	n°13 haut du tableau de bord	n°21 tête
n°2 toit ouvrant	n°14 milieu du tableau de bord	n°22 tronc
n°3 haut du pare-brise	n°15 dessous du tableau de bord plus console	n°23 bras gauche
n°4 milieu du pare-brise	n°16 plancher	n°24 bras droit
n°5 bas du pare-brise	n°17 haut des portières avant	n°25 mains
n°6 vitre avant droite	n°18 bas des portières avant	n°26 jambes
n°7 lunette arrière et vitres arrières	n°19 portières arrières	n°27 pieds
n°8, 9, 10, 11 vitre avant gauche	n°20 montant du pare-brise	
n°12 siège		

Détermination des surfaces isothermes en vue du calcul des facteurs de forme

La géométrie obtenue pour le calcul des facteurs de forme comprend environ 300 surfaces élémentaires différentes, que nous avons rassemblées en 27 groupes de température.

D'après les résultats obtenus, on découpe les surfaces en différentes parties isothermes ; ces parties devront être adaptées par la suite au logiciel de C.A.O.

Les mesures effectuées en octobre et novembre 92 nous ont permis de mettre en valeur certaines inhomogénéités dans les températures d'une même surface, notamment pour les surfaces vitrées. Le changement de position de soufflage modifie également les températures de paroi.

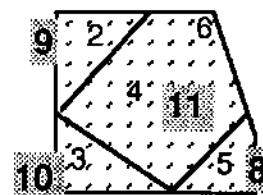
Toutefois lorsque l'air soufflé dans le véhicule n'est pas réchauffé ($Q_v=0$), les surfaces ont des températures homogènes. Pour certaines configurations de soufflage on pourrait effectuer d'autre regroupement, mais il a été décidé de garder toujours la même méthode, afin d'automatiser le traitement des données.

Les numéros "simples" correspondent aux températures mesurées, les numéros en Gras sur fond grisé, correspondent aux températures utilisées pour les calculs du rayonnement infra-rouge.

La vitre de la porte avant gauche est découpée en 5 surfaces. Suivant le mode de soufflage on pourra regrouper plusieurs de ces surfaces en une seule surface isotherme:

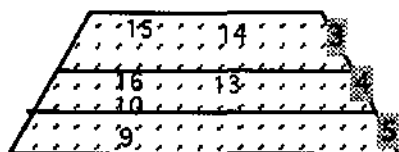
- En soufflage bilevel : la surface 5 est la partie la plus froide, la surface 2 est une surface chaude et les surfaces 3, 4 et 6 ont une température moyenne et peuvent être regroupées en une seule surface isotherme. $T_5 < T_6 < T_2$ ($T_3 = T_4 = T_6$)

- En soufflage pied-dégré : On pourra considérer 3 autres surfaces. La surface 3 est la plus froide, la surface 5 est la plus chaude, les surfaces 2, 4 et 6 ont une température intermédiaire et peuvent être regroupées. $T_3 < T_2 < T_5$ ($T_2 = T_4 = T_6$)

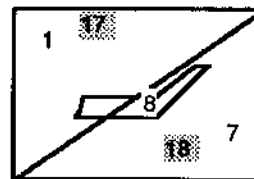


Pour toutes les configurations nous obtenons donc 4 surfaces isothermes (8,9,10 et 11)

Pare-brise : La température du pare-brise varie beaucoup, il est généralement plus chaud en bas surtout lorsque le dégivrage est en marche.



Le bas de la porte : On peut partager le bas de porte uniquement en deux parties. Un triangle en haut à gauche, un triangle en bas à droite et l'accoudoir



Pavillon : On note une dissymétrie dans les températures avant du pavillon : la partie avant est plus chaude que le milieu et la partie arrière. De plus on constate une plus grande inertie de la partie 1 lors des variations importantes de température.

On considère donc deux zones: la zone pleine et la zone vitrée.

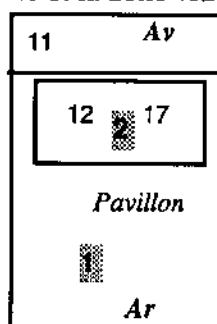
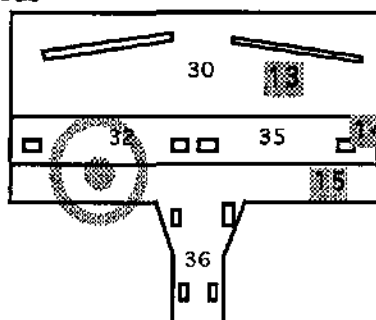


Planche de bord : Toute une partie de la planche de bord est très près des bouches de sortie d'air ; si on a un grand débit d'air on aura de grandes variations de température de surface.

On découpe cette partie en trois zones:

- la partie horizontale de la planche de bord (13) qui contient les aérateurs du dégivrage
- la partie verticale (14) qui contient les aérateurs du soufflage tête
- la partie inférieure (15) et la console basse qui contient les aérateur des pieds



lunette arrière : Entre la mesure de la température du milieu, 37, et du haut de la lunette, 38, on obtient dans certains cas une différence de 2°C maximum. On pourra donc considérer la lunette isotherme (n° 7).

Sièges : Les températures des siège non occupés sont identiques. On pourra donc regrouper les sièges "vides" en un seul groupe.

Les premiers numéros correspondent à la numérotation des thermocouples données ci-dessus, les numéros en gras correspondent aux surfaces définies dans la description géométrique simplifiée.

1	PANneau AVant Gauche (haut arrière)	17	16	PARe BRIsE MILieu Haut	4
2	VITre AVAnt Gauche (haut arrière)	9	17	PAVillon Centre	2
3	VITre AVAnt Gauche (bas arrière)	10	18	PIEds AVant Gauche	16
4	VITre AVAnt Gauche (bas milieu)	11	24	ASSise AVAnt Gauche	
5	VITre AVAnt Gauche (bas avant)	8	25	VITre AVAnt Droite	6
6	VITre AVAnt Gauche (haut avant)	11	26	ACCoudoir AVAnt Droit	17
7	PANneau AVAnt Gauche (bas avant)	18	30	Dessus PLAnche Centre	13
8	accoudoir AVAnt Gauche	17	32	VOLant	
9	PARe BRIsC Bas	5	35	Planche De Bord Droite	14
10	PARe BRIsC Milieu Bas	4	36	CONSOLE Bas Gauche	15
11	PAVillon AVAnt Gauche	1	37	LUNette MILieu	7
12	PAVillon ARrière Gauche	2	38	LUNette Haut	7
13	PARe BRIsE Centre	4	39	Banquette ARrière	12
14	PARe BRIsE Haut Droit	3	40	DOSSier AVAnt (Siège conducteur)	
15	PARe BRIsE Haut Gauche	3	41	DOSSier ARrière (Siège conducteur)	12

VITESSES D'AIR

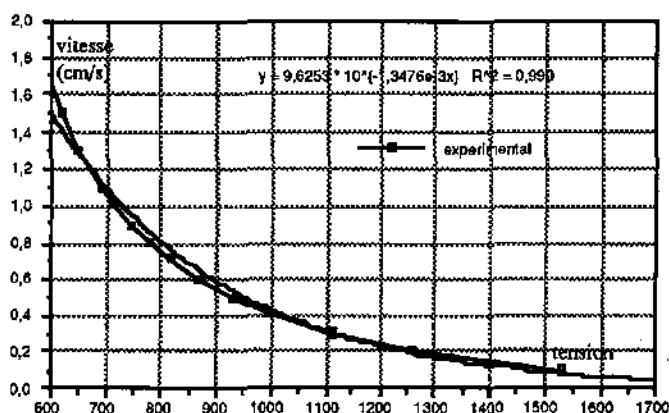
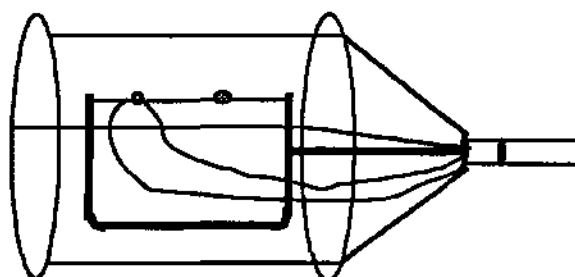
Dispositif de mesure

L'anémomètre est composé de deux éléments sensibles montés en série, chacun étant recouvert d'une sphère de diamètre 5 mm environ. L'un des deux éléments est chauffé par un courant continu de 1746 mA.

L'anémomètre délivre une tension proportionnelle à la vitesse. La courbe d'étalonnage fournie par le C.E.T.I.A.T. nous permet d'obtenir la correspondance en vitesse.

Pour calculer plus rapidement les vitesses d'air nous avons interpolé les points d'étalonnage par la courbe d'équation donnée ci-contre.

Les points de mesure correspondent aux localisations des thermocouples mesurant la température de l'air à proximité du sujet.



Pour chaque mesure, la valeur de la tension fluctue. Nous avons pris la valeur moyenne de ces fluctuations, qui est de l'ordre de 15 %.

Nous avons effectué les mesures suivantes :

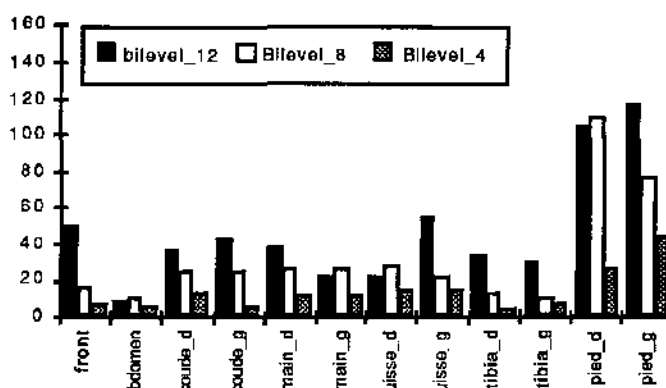
- soufflage bilevel à 4, 8 et 12V
- soufflage tête à 4, 8 et 12V
- soufflage pied à 4 et 8V
- soufflage pied-dégivrage à 4, 8 et 12V
- soufflage dégivrage à 12 V

Remarques

- Les mesures en bilevel et en pied-dégl ont été faites trois fois. On constate un écart qui peut être important entre deux mesures, ce qui nous donne une variation sur les résultats qui peut atteindre 100% dans les cas où les vitesses sont faibles.

- Il y a peu de différence entre côté droit et gauche, compte tenu des incertitudes.

- La vitesse d'air sur les pieds est toujours de beaucoup la plus élevée, sauf dans la configuration dégivrage où les vitesses sont assez bien réparties.



Exemple de répartition des vitesses en fonction de la puissance de soufflage

Tableaux des vitesses d'air en fonction du type de soufflage

Pour le soufflage bilevel et pieds/dégl, 3 mesures de tension ont été effectuées à chaque fois (cf. Rapport n°3), mais dans les tableaux ci-dessous nous n'avons reporté que la moyenne des 3 (Moy.), puis les vitesses d'air (V) calculées (en cm/s), l'écart ΔV entre les mesures (en cm/s), et l'écart relatif $\Delta V/V$.

Bilevel

	Moy	V	ΔV	$\Delta V/V$
front	950	50	9	0,17
abdomen	1525	8	2	0,28
coude g	1007	42	3	0,07
main g	1206	23	10	0,42
coude d	1055	36	2	0,05
main d	1040	38	5	0,14
cuiss g	928	54	7	0,13
tibia g	1116	30	2	0,07
pied g	681	116	6	0,05
cuiss d	1225	22	36	1,67
tibia d	1080	34	6	0,18
pied d	715	105	24	0,23

12V**Pieds-déjà**

Moy.	V	ΔV	$\Delta V/V$
1181	25	3	0,11
1528	8	6	0,69
1133	29	3	0,12
1212	22	8	0,36
1034	39	8	0,22
1068	35	3	0,09
1052	37	1	0,04
1429	11	1	0,13
593	153	8	0,05
1013	42	2	0,05
1060	36	3	0,07
594	152	53	0,35

8V

	Moy	V	ΔV	$\Delta V/V$
front	1328	16	7	0,44
abdomen	1487	10	2	0,24
coude g	1191	24	12	0,49
main g	1155	27	11	0,39
coude d	1188	24	3	0,13
main d	1166	26	3	0,10
cuiss g	1210	23	11	0,48
tibia g	1463	10	3	0,26
pied g	819	76	11	0,14
cuiss d	1140	28	5	0,19
tibia d	1393	13	1	0,11
pied d	702	109	33	0,30

Moy.	V	ΔV	$\Delta V/V$
1509	9	9	1,06
1665	5	1	0,15
1382	13	6	0,45
1420	12	5	0,41
1262	19	2	0,08
1223	22	2	0,11
1188	24	6	0,26
1540	8	11	1,40
758	91	25	0,27
1268	19	9	0,51
1252	20	8	0,40
679	117	55	0,47

4V

	Moy	V	ΔV	$\Delta V/V$
front	1558	7	7	0,86
abdomen	1646	5	2	0,34
coude g	1645	5	3	0,51
main g	1446	10	7	0,69
coude d	1391	12	4	0,29
main d	1400	12	3	0,25
cuiss g	1368	13	3	0,24
tibia g	1630	6	1	0,22
pied g	993	44	16	0,36
cuiss d	1335	15	8	0,49
tibia d	1735	4	2	0,44
pied d	1161	26	13	0,50

Moy	V	ΔV	$\Delta V/V$
1622	6	1	0,20
1643	6	1	0,18
1535	8	2	0,27
1539	8	2	0,25
1515	9	2	0,20
1556	8	2	0,32
1402	12	1	0,12
1718	5	2	0,33
990	45	8	0,19
1440	11	2	0,14
1606	7	1	0,18
946	51	35	0,69

Tête 12 V

	mes. 1	V
front	875	64
abdomen	1241	20
coude g	1110	31
main g	885	62
coude d	902	59
main d	887	61
cuiss g	845	70
tibia g	1250	20
pied g	1240	21
cuiss d	870	65
tibia d	1395	13
pied d	1710	5

Tête 8 V

mes. 1	V
1007	42
1425	12
1095	32
1040	38
1087	33
972	47
972	47
1128	29
1285	18
1070	35
1442	11
1815	3

Tête 4 V

mes. 1	V
1442	11
1547	8
1405	12
1300	17
1445	11
1405	12
1257	19
1375	13
1750	4
1235	21
1675	5
1672	5

Pieds 8 V

	mes. 1	V
front	1565	7
abdomen	1515	9
coude g	1695	5
main g	1655	6
coude d	1385	13
main d	1250	20
cuiss g	1330	16
tibia g	1320	16
pied g	612	144
cuiss d	1491	9
tibia d	1032	39
pied d	656,5	126

Pieds 4 V

	mes. 1	V
	1645	6
	1660	6
	1715	5
	1670	5
	1490	9
	1605	7
	1550	8
	1655	6
	768	89
	1440	11
	1465	10
	641	132

Dégl 12 V

	mes. 1	V
	1025	40
	1145	28
	1142	28
	1005	43
	885	62
	962	49
	1265	19
	1505	9
	1440	11
	890	61
	1485	10
	1005	43

Valeurs de vitesses d'air utilisées dans les simulations

Pour tenir compte de la dynamique due à la vitesse du vent dans la soufflerie nous avons utilisé les résultats de mesures effectuées par P.S.A. donnant la variation des vitesses d'air au niveau des bouches d'aération en fonction du vent extérieur. Nous avons transposé l'augmentation de la vitesse de sortie des aérateurs aux vitesses locales pour un vent de 100 Km/h. Les valeurs obtenues et utilisées dans nos simulations sont les suivantes :

Souf Upuls	Bil 2	Bil 4	Bil 6	Bil 8	Bil 12	pieds/ degi 2	pieds/ degi 4	pieds/ degi 8	pieds/ degi 12
Tête	6	14	16	18	53	5	8	10	27
Tronc	4	9	10	12	9	5	4	6	9
Br-D	10	22	25	28	39	8	17	22	42
Br-G	4	22	25	28	45	7	11	15	31
Mains	9	24	27	30	33	7	15	20	30
Jamb	8	17	19	21	37	8	16	21	34
pieds	29	83	95	106	118	55	92	120	163

Souf Upuls	Aérat. 4	Aérat. 8	Aérat. 12	pieds 2	pieds 4	pieds 8	pieds 12
Tête	37	48	69	5	6	8	11
Tronc	11	14	22	5	6	10	14
Br-D	29	38	64	8	11	15	20
Br-G	28	37	34	4	4	6	8
Mains	37	49	66	5	11	15	20
Jamb	27	35	45	8	18	23	31
pieds	9	12	14	93	119	155	209

MESURES DES FLUX SOLAIRES

Les valeurs données ici ont été effectuées en Suède. Aucune mesure n'a été faite à la Verrière ; il faut noter que les caractéristiques des lampes, leur positionnement, leur rendement, leur courbe d'émission, sont très différentes. Toutefois, pour les simulations des essais réalisés à la Verrière nous avons tout de même utilisé ces mesures, n'ayant pas de valeurs pour ce site.

Pour les différentes valeurs des puissances solaires affichées nous avons mesuré les densités de flux sur la voiture et sur le conducteur. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un pyranomètre

	milieu pavi	côté D, AR	côté D, AV	côté G, AV	côté G, AR	Pare brise	intérieur, Volant	intérieur, Pla.de.bo
500	670	545	350	569	370	575	187	252
750	683	626	423	651	488	838	350	375
1000	862	1278	822	928	830	1041	447	496

Densités de flux enregistrées sur la voiture (en Watts/m²)

On peut constater une grande hétérogénéité spatiale et le manque de proportionnalité entre les puissances affichées et mesurées en un même lieu. Ceci est probablement dû à la méthode de variation de la puissance (extinction de lampes).

	ventre	épaule g	bras d	bras g	main d	main g	cuisse d	cuisse g
500	172,5	187	123	163	172	203	122	122
750	155	219	122	227	276	249	227	200
1000	150	284	244	236	333	333	301	288

Densités de flux enregistrées sur le conducteur (en Watts/m²)

Les flux enregistrés à l'intérieur de la voiture sont bien inférieurs à ceux obtenus à l'extérieur. Cela est dû à l'absorption du rayonnement visible (vitres teintées) et probablement à une réflexion sur les vitres.

CARACTÉRISTIQUES DES VÊTEMENTS UTILISÉS

Les vêtements décrits ici ont été définis en commun avec PSA et Valéo et sont restés les mêmes pour tous les essais. Les caractéristiques de chaque pièce de vêtement ont été déterminées à l'aide de la norme internationale ISO et les recommandations de l'ITF (Institut des Textiles de France). Les caractéristiques manquantes sont complétées d'après les références de McCullough. Tous les paramètres sont donnés dans la description ci-dessous ; la plupart ne sont pas utiles pour les expériences elles mêmes, mais sont indispensables pour la modélisation ou pour retrouver facilement dans les normes à quels tissus ils correspondent exactement.

Nomenclature du tableau :

n°	numéro de la forme du vêtement dans la liste ISO
T *-%	type de coupe et pourcentage de surface couverte qui correspond à T*
tissus n°	numéro du tissu,
M_{VET}	masse totale du vêtement (g)
I_{cl}	isolement thermique intrinsèque (clo)

Xe	<i>épaisseur du tissu (mm)</i>
Rcl	<i>résistance thermique du tissu ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)</i>
mt	<i>masse du tissu par m^2 (g/m^2)</i>
Pe	<i>perméabilité à l'air ($l/m^2.s$)</i>

données utiles pour le modèle

vêtement	n°	T* - %	tis n°	M _{VET}	Icl	Xe	Rcl	mt	Pe
slip	1	T4-10%	25	27	0,03	0,95			1067
maillot	30	T2-40%	27	105	0,08	0,95			1097
chemise	54	T2-51%	91	362	0,33	0,70	0,04	206	241
pull-over	142	T6-45%	7	424	0,36	3,55			1031
pantalon	100	T1-45%	10	404	0,24	1,27	0,04	310	899
chaussettes	265	T2-14%	32	53	0,03	2,00			
chaussures	260	T6-7%		1006	0,03				

L'isolement thermique (Icl_T) de la tenue complète peut être estimée en additionnant les Icl des différents vêtements composant la tenue, il en est de même pour la masse totale M_{tenue}.

$$M_{\text{tenue}} = \sum M_{\text{vet}(i)} = 2381 \text{ g} \quad \text{Icl}_T = \sum \text{Icl}(i) = 1,10 \text{ clo}$$

Pour les simulations nous avons besoin de Ccl, capacité calorifique du vêtement sur chaque segment ($J/^\circ\text{C}$) : $Ccl(i) = mt(i) \cdot Ct(i) \cdot S(i)$. (mt, masse surfacique du tissu (kg/m^2); Ct, capacité calorifique du tissu ($J/kg^\circ\text{C}$); S, surface du segment (m^2))

Nous avons utilisé les données suivantes : pour la tête et les mains Ccl = 0

segment	vêtements	Ccl ($J/^\circ\text{C}$)
tronc	Maillot + slip + Chemise + Pull	940
bras	Chemise + Pull	110
Jambes	Pantalon	560
Pieds	chaussures + Chaussettes	1100

TABLEAUX RÉCAPITULATIFS

Sur les pages suivantes, les tableaux donnent un récapitulatif de tous les essais. Ces tableaux indiquent les sens de variations et les ordres de grandeur.

Les notations et symboles utilisés sont les suivantes :

En caractères gras les variables sur lesquelles on a agi.

- \rightarrow : constante ↗ : augmente \ : diminue

- Pour chaque essai apparaissent les différentes phases et le titre de l'essai ; toutes les phases durent 1/2 heure, sauf notation particulière.

Description des lignes du tableau :

- 4 conditions d'essai

Tveine (°C) : température de la veine

Vveine (km/h) : vitesse de la veine

Hrveine (%) : humidité relative de la veine

soleil (W) : puissance d'alimentation des lampes

- 3 variables du système de chauffage

Souf : position du soufflage

Upul (V) : Tension du pulseur

Qv (l/h) : débit d'eau dans la chaudière

- 2 températures de soufflage,

Ts,pi (°C) : température moyenne de soufflage des quatre points au niveau des pieds

Ts,ae (°C) : température moyenne de soufflage des aérateurs latéraux et centraux

(// signifie que Ts,ae = Ts,pi)

- 2 conditions d'habitable

Thab (°C) : température moyenne dans l'habitable

HR hab(%) : humidité relative dans l'habitable

Octobre 1992 : La Verrière

	Essai 10-1 répartition soufflage			Essai 10-2 Vitesse soufflage			Essai 10-3 Puissance soufflage			Essai 10-4 Rayon ^t	
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II (2h.)
Tve	-18			-18			-18			-18	10
Vve	6			6			100			-100	
HRve	46			49			60			60	60 85 75
Soleil											
Souf	Haut	Bil	Pied	Bilevel			Bilevel			Bilevel	
Upul	12			12	8	4	8			8	
Qv	150			-150		145	480	300	150	300	300\260\320
Ts,pi	25	32	37	30	40	55	45	35	22	35	47
Ts,ae	35	30	28	//	//	//	42	//	20	//	//
Thab	26	24	/ 26	23	/ 28	/ 31	27	\ 24	\ 12	22	22 36
Hr ha	5			5			5			5	18

Novembre 1992 : La Verrière

	Essai 1 Rôle humidité			Essai 3 Conv ^t et Rayon ^t			Essai 4 Rayon ^t			Essai 5 Conv ^t			Essai 6 Soleil			Essai 7 rayon ^t		Essai 8 conv ^t et rayon ^t		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I 0.7 h	II	III	I 1 h	II	I	II	III
Tve	18			15	\ 7	/21	21	\ 14	/29	-18			-18			0	/ 20	20	/ 27	\ 13
Vve	50	100		100			100			100			100			100		100		
HRve	19	/ 90	\ 50	50			50			60			50			90	90\ 50	50		/ 80
Soleil													0	500	1000					
Souf	Bilevel			Bilevel			Bilevel			Pieds/Dégl			Pieds/Dégl			Pieds/Dégl		Pieds/Dégl		
U-pul	4		6	4		0	0		8	8		8	8		8	8		8		
Qv	0		40	50			0			600	200	/1000	100	300		60		70 \ 0	/40\ 0	0
Ts,pi	22	/ 40		40\10	10\20	20\40	30\ 23	23 \ 17	17\30	60	60\10	-10\60	27\ 55	55		45\25	25\ 40	42\20	20\40	40\ 18
Ts,ae	//	//		//	//	//	//	//	//	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
T,deg	-	-		-	-	-	-	-	-	60	60\ 10	10\60	27\55	55		45\ 25	25\40	42\ 20	20\ 40	40\ 18
Thab	23	23\35		30\ 25	25\13	13\33	26\ 23	23\ 19	19\29	30	30\ -2	-2\ 30	15\25	25\28	28\31	23\ 18	18\30	32\ 22	22\32	32\ 18
HRha	18	18\60	60\ 20	20\ 30	35	35\ 25	45		45	5	10	5	5			23	30	22\42	42\30	30\60

MAI 1993 : La Verrière

	Essai 9 tout constant	Essai 10 Rayonnement			Essai 12 Rayon ^t + Soleil			Essai 11 Convec ^t et rayon ^t			Essai 13 Convec ^t et rayon ^t			Essai 14 Convec ^t et rayon ^t			Essai 15 Convec ^t et rayon ^t				
	I	I	II	III 1h	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II 20mm	III 12mm	IV 25mm	V 15mm
Tve	18	22	\ 17	/35	21	\ 14	/29	15	11	/25	16	\ 11	/25	16	/24	13	0				
Vve	100	100			14			100			100			100			100				
HRve	49	50			74			88			70\60	60/65	65\50	50			80				
Soleil	-	500	500\0	/1000	0	0	1000	-			-			-			-				
Souf	Bilevel	Bilevel			Bilevel			Bilevel			Bilevel			Bilevel			Bilevel				
U-pul	6	6			8			6			6			6			8				
Qv	-	-			air de la pièce			50	0	/250	50	0	/250	40	/400	\0	150	0	500	0	1000
Ts,pi	22	40\10	10/20	20/40	20	20\17	17/25	25	25\7	7/40	25	25\7	7/40	25	25/40	40/7	27	10/12	35	10	37
Ts,ae	//	//	//	//	//	//	//	//	25\8	8/38	//	25\8	8/38	//	25/31	3/8	25	//	//	//	40
T,deg	-	-			-			-			-			-			-				
Thab	23	30\25	25\13	13/33	27	27\22	22/33	21	21\12	12/30	21	21\12	12/30	23	23/32	3/15	20	12	25	10	28
HRha	18	20/30	35	35\25	40	/60	\38	30	/43	\25	33	/43	\25	25	\20	/30	27	37	23	42	20

OCTOBRE 1993 : SUEDE (n°1)

	Essai 18 Saut de soleil positif air chaud				Essai 19 Saut de soleil positif air frais				Essai 20 Saut de soleil négatif air frais				Essai 21 Identique aux 11 et 13			Essai 22 Saut de température d'air			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I 30mm	II 45mm	III 45mm	I	II	III	IV
Tve	15	↗ 20	↘ 15	15	22				15				15	15 ↘ 11	11 ↗ 25	20			
Vve	100				100				100				100			100			
HRve	15	20	15		14				13				70	70 ↗ 90	90 ↘ 70	50			
Soleil	0	1000	1000 ↘ 0		0	1000			1000	0	0 ↗ 1000		0			0			
Souf	bilevel				bilevel				bilevel				bilevel			bilevel			
U-pul	8				8				4				6			8			
Ts,pi	25 ↗ 30	30 ↘ 23	23 ↗ 27		30 ↘ 25	25 ↘ 10	10 ↘ 5		5	13	13 ↘ 5		23	25 ↘ 6	6 ↗ 40	22	46	22	5
Ts,ae	//	//	//		//	//	//		//	//	//		//	//	//	//	//	//	//
T,deg	-		-		-				-				-			-			
Thab	25				15				15				21	21 ↘ 12	12 ↗ 30	25	37	24	12
HRha	18	16			23	23 ↘ 14	13	12	15 ↗ 20	20 ↗ 25	25	25 ↘ 20	33	↗ 50	50 ↘ 25	20 ↗ 30	30 ↘ 12	12 ↗ 30	30 ↗ 50

OCTOBRE 1993 : SUEDE (n°2 & 3)

	Essai 23 Mode de soufflage				Essai 24 Vitesses de soufflage				Essai 25 Conv ¹ et Rayon ¹ + Soleil			Essai 26 Tout constant bas puis haut			Essai 27 rayon ¹ croissant		
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III 1h	I 45 mn	II 45 mn	III 45 mn	I	II 1h 30mn	III
Tve	25				25				15	15/22	22 7	7	5	5	16	5	- 15
Vve	100				100				100			100			100		
HRve	50				50				45			35/50	50	50/60	40	40	10
Soleil	0				0				500	/1000	1000 0	0	0	500	0		
Souf	bilevel	acrateur	bilevel	pieds	bilevel				bilevel			bilevel			bilevel		
U-pul	4				2	6	8	10	6			6			10		
Ts,pi	20 16	-	15/18	5	20 19	18 14	14/16	16	20/25	25/40	40 5	20	30		34	37	37 40
Ts,ae	//	7	//	-	//	//	//	//	//	//	//	//	//		25	25/37	//
Thab	30/25	25/13	13	13/33	20/16	16/13	15/18	13/33	25	25/36	36 10	18	25		28		27
HRha	20/30	15/18	20/16	35/25	20/30	35		35/25	20/25	25/15	15 40	35	35	20	15	15	0

	Essai 28 Gamme PSA						Essai 29 Conv ^{ct} et Rayon ¹ + Soleil			Essai 30 Rayon ^{nt} décroissant				Essai 31 conv ^{ct} croissant		Essai 32 conv ^{ct} décroissant	
	I 30 mn	II 5 mn	III 20 mn	IV 10 mn	V 10 mn	VI 20 mn	I	II	III 1h	I	II 1h 30mn			I	II 1h	I	II 1h
Tve	-18						15	/23	23 7	5	5	27		22		22	
Vve	45	0		90		0	100			100				100		100	
HRve	50						50		50	47				47		50	
Soleil	0						500	/1000	1000 0	0				0		0	
Souf	Pieds						bilevel			bilevel				bilevel		bilevel	
U-pul	12			8	0	12	6			6				8		8	
Ts,pi	10/65	65/52	52/61	6/69	74	74/50	22	22/40	40 5	35	35	33	28	29/25	25 7	20	20 45
Ts,ae	-	-			-		//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//
Thab	15/38	38	40	35	40		22	22/35	35 11	27				25	25 13	20	20 35
HRha	25/0	0					25	25/15	15 40	23				25	25 50	35	35 20

JANVIER 1994 : La Verrière (n°1 & 2)

	Essai 33 Convct et Ray ^t + soleil				Essai 34 Saut de Convct				Essai 35 (1h) influence de Tair tête		Essai 36 Convct et Ray ^t			Essai 37 Ray ^t . croissants			
	I	II	III	IV	I	II	III 15mn	IV	I	II	I	II	III	I	II	III	
Tve	5		5	27			20		20		15	15 \ 7	7	28	6	6	-17
Vve	100				100				10		100			100			
HRve	80	85	85	40	55				54		65	70	70 ⁸⁰	80 \ 40	80	80	60
Soleil	0				0				0		0			0			
Souf	Pieds-Dégl				bilevel				Tête		bilevel			Pied-Dégl			
U-pul	6				8				8		6			6			
Ts,pi	10 \ 5	10	5	10	25	5	27	50	-	-	25	25 \ 4	4	55	22	26	42
Ts,ae	-	-	-	-	//	//	//	//	9	9	60	//	//	//	-	-	-
T,deg	10 \ 5	10	5	10					-		-	-	-	-	22	26	42
Thab	10			30	22	10	22	37	18	18	45	22	22 \ 8	8			20
HRha	45	45	45	30	5	5 \ 50	50 \ 25	15	50	50	20	26	26 \ 50	50	15	35	7

	Essai 38 Gamme PSA			Essai 39 Gamme PSA				Essai 40 convct croissant		
	I	II	III	I 5mn	II 25mn	III 30mn	IV 30mn	I	II	III
Tve		18		5	6	6 \ 12	12		20	
Vve	45	90	45		45		120		100	
HRve		55			85				80	
Soleil		0			0				0	
Souf	Pieds	Pieds	Pie/Dé	Dégl	pieds - Dégl	bilevel			Pied-Dégl	
U-pul	12	4	4	12		6			12	
Ts,pi	60	60	60	55	45	52		28	28	10
Ts,ae	-	-	-	-	-	52		-	-	-
T,deg	-	-	60	-	45	-		28	28	10
Thab	30	30		33	28	33		25	25	12
HRha	50 \ 5		5	75 \ 25	25	30		30	30	60

MODE D'EMPLOI DES PROGRAMMES

Fiche TRNSYS TYPE 54 - MATHER

Cette fiche permet de connecter le module de thermo-physiologie aux autres modules avec les conventions spécifiques à TRNSYS. Les unités des variables d'entrées/sorties sont dans le système international, qui ne sont pas compatibles avec l'ensemble de TRNSYS mais le sont avec les modules de TRNSYS dont nous avons besoin.

TYPE 54 - MATHER Hiver

Modèle mathématique de thermorégulation humaine. Le corps est divisé en 29 compartiments (7 segments, chacun divisés en 4 couches plus le flux sanguin). Le bilan thermique de chaque compartiment est calculé, puis les températures ; toutes les réactions physiologiques sont prises en compte (sudation, vasomotricité, frissons). Passage des variables physiologiques aux sensations thermiques.

- Les paramètres du modèle sont lus dans des fichiers différents pour chaque cas
- Toutes les grandeurs de thermo-physiologie sont accessibles.
- Les sensations sont exprimées sur une échelle en 9 points :
1-très froid ... 5 -confort ... +9-étouffant

LES PARAMÈTRES

- | | | |
|---|---------|--------------------------------------|
| 1 | cas = 1 | conditions d'Hiver Vêtements Epais |
| | cas= 2 | conditions d'Eté-Vêtements légers, |
| | cas= 3 | conditions d'Hiver -Vêtements Légers |
| | cas=4 | conditions d'Eté-Vêtements Epais |
- sont prévus dans le programme mais ne seront étudiés que par la suite*

LES ENTRÉES

- | | | |
|---------|------------|---|
| 1 | ACT | Métabolisme total (Si ACT<10 alors ACT est en met sinon en W/m ²) |
| 2 | Pa | Pression de vapeur dans l'air (Pa) |
| 3 | Thab | |
| 4 à 10 | Ta(i) | Températures d'air sur les 7 segments (°C) |
| 11 à 17 | Va(i) | Vitesses d'air sur les 7 segments (m/s) |
| 18 à 24 | RayIRCL(i) | Flux net rayonnés par les vêtements pour les 7 segments (W) |
| 24 à 31 | RayIRsk(i) | Flux net rayonnés par la peau pour les 7 segments (W) |
| 31 à 38 | RaySOL(i) | flux solaire reçu sur les 7 segments (W) |

LES SORTIES

- | | | |
|---------|---------|--|
| 1 | Tsk | température moyenne cutanée (°C) |
| 2 | Tclo | température moyenne de surface des vêtements (°C) |
| 3 | ω | mouillure moyenne cutanée |
| 4 | Sensglo | sensation globale |
| 5 à 11 | Tskl(i) | température cutanée des 7 segments (°C) |
| 12 à 18 | Tcl(i) | température de surface des vêtements des 7 segments (°C) |
| 19 à 25 | ω(i) | mouillure cutanée des 7 segments (°C) |
| 26 à 32 | Sens(i) | sensation thermique des 7 segments |
| 33 | HP | production totale de chaleur (W) |
| 34 | Hflow | stockage total de chaleur (W) |
| 35 | Conv | échange de chaleur par convection (W) |

36	Ray	" " " " rayonnement (W)
37	Dry	échange sensible (convection + rayonnement) (W)
38	Evag	débit d'eau évaporée (kg/s)
31	Qevap	évaporation totale depuis le début (kg)
32	sud	débit d'eau suée (kg/s)
39	Qsud	quantité d'eau suée depuis le début (kg)
40	Qdrip	eau ruisselant depuis le début (kg)
41	T(1)	température interne de la tête (°C)
42	T(5)	température rectale (°C)

COMMENTAIRES SUR LE LOGICIEL

Au premier pas de temps de la simulation, on considère que le corps est à l'équilibre thermique et à la neutralité, c'est à dire que toutes les températures internes sont égales aux températures de consignes. Ceci implique que toutes les quantités d'eau au niveau de la peau sont nulles ($\omega(i)$, mH₂O, RSW, sont initialisés à 0), et qu'il n'y a pas de réaction physiologiques.

Aux alentours de la neutralité thermique, il y avait des problèmes de stabilité du système de contrôle, nous avons donc ajouté un "blocage", afin que le système ne puisse pas passer de réaction de lutte contre le chaud à lutte contre le froid d'une itération sur l'autre dans un même pas de temps.

Depuis la version 3.0 du logiciel, le métabolisme basal et la répartition de l'activité ont changé

LISTE DES PARAMÈTRES DU MODÈLE MATHER - HIVER (CONDITIONS N°1)

Le fichier ci-dessous regroupe tous les paramètres utiles au modèle. Pour la signification et les unités de chaque variables, cf. 'liste des variables du modèle'

N	C	QB	EB	BFB	TC	Tset
1	12661.220	14.950	5.225	1.333E-02	4.644	37.06
2	2821.500	0.120	0.000	7.500E-05	9.057	36.34
3	940.500	0.130	0.000	3.333E-05	15.327	35.78
4	1015.740	0.100	0.711	2.222E-04	0.000	35.12
5	39563.700	52.630	5.225	6.444E-02	1.684	37.12
6	66545.600	5.810	0.000	1.778E-03	6.444	36.61
7	17890.400	2.490	0.000	6.389E-04	18.229	34.15
8	5107.960	0.470	3.797	1.189E-03	0.000	32.86
9	2633.400	0.410	0.000	9.583E-05	1.684	35.01
10	6395.400	0.555	0.000	1.722E-04	5.573	34.27
11	1224.740	0.105	0.000	4.444E-05	16.720	33.50
12	919.600	0.075	0.689	6.944E-05	0.000	32.54
13	2633.400	0.410	0.000	9.583E-05	1.684	35.01
14	6395.400	0.555	0.000	1.722E-04	5.573	34.27
15	1224.740	0.105	0.000	4.444E-05	16.720	33.50
16	919.600	0.075	0.689	6.944E-05	0.000	32.54

17	597.740	0.090	0.000	2.778E-05	4.761	34.60
18	280.060	0.230	0.000	1.389E-05	11.147	34.00
19	376.200	0.040	0.000	1.389E-05	11.147	33.20
20	702.240	0.060	0.502	1.583E-04	0.000	32.52
21	16686.560	2.590	0.000	6.111E-04	6.096	36.10
22	38665.000	3.320	0.000	1.028E-03	16.372	35.36
23	6019.200	0.500	0.000	2.222E-04	58.636	33.70
24	4547.840	0.370	3.460	1.050E-03	0.000	33.09
25	1007.380	0.150	0.000	4.167E-05	5.864	34.95
26	280.060	0.020	0.000	8.333E-06	19.971	34.00
27	564.300	0.050	0.000	2.222E-05	16.139	32.90
28	940.500	0.080	0.697	2.278E-04	0.000	31.74
29	9405.000	0.000	0.000	0.000E+00	0.000	36.69

PERSU	Pcont	Hco	Rcl	Fcl	Ctr	CCL	CV
0.0674	0.00	7.558	0.000	1.000	1.000	0.0	0.01
0.3604	0.50	6.293	0.220	1.100	0.100	1100.0	20.00
0.0653	0.00	10.345	0.200	1.200	0.150	200.0	20.00
0.0653	0.00	10.345	0.200	1.200	0.150	200.0	20.00
0.0475	0.00	10.276	0.000	1.000	1.000	0.0	0.01
0.3283	0.30	8.952	0.140	1.200	0.200	700.0	20.00
0.0659	0.00	10.334	0.110	1.000	0.020	1200.0	0.01

SKINR	SKINS	SKINC	SKINV	WORKI	CHILI
0.0827	0.081	0.050	0.1320	0.020	0.0233
0.5870	0.482	0.150	0.3220	0.550	0.5480
0.0411	0.077	0.025	0.0475	0.100	0.0526
0.0411	0.077	0.025	0.0475	0.100	0.0526
0.2215	0.031	0.350	0.1220	0.020	0.0023
0.1860	0.219	0.050	0.2300	0.200	0.3190
0.0399	0.035	0.350	0.1000	0.010	0.0023

CSW	SSW	PSW	XSW	CDIL	SDIL	PDIL	XDIL
420	70	70	465	0.0420	0.007	0.007	0.0420

CSTRI	SSTRI	PSTRI	XSTRI	CCHIL	SCHIL	PCHIL	XCHIL
300	50	50	200	210	35	35	350

QBT	CLW	CNN	CSK	ADU	BPH	BULL	EAUMAX
81	0.0165	250173	14153	1.8877	0.3	10	0.08

IL	BQ	CS	XXL
0.6	2.39E-04	4180	3483

CRI	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
20	24.4	25.0	26.7	29.0	31.0	33.1	34.3	35.2	36.2	39	
20	27.0	27.3	28.4	29.5	31.8	33.2	34.0	35.2	36.2	39	
20	24.8	25.5	26.6	28.4	31.1	32.5	34.1	35.1	35.9	39	
20	25.5	25.9	26.2	27.9	30.9	33.1	34.1	35.1	36.1	39	
20	23.3	24.0	25.3	27.1	30.4	33.3	34.6	35.7	35.9	39	
20	24.5	24.9	26.0	28.0	30.1	32.5	33.9	35.1	35.7	39	
20	22.2	22.4	23.6	25.7	29.6	32.2	32.8	34.4	35.5	39	
20	25.3	25.8	26.8	28.5	31.2	32.5	33.9	34.7	35.9	39	

FICHE TRNSYS DU TYPE 70 : Flux rayonnés par le conducteur

TYPE 70 : Bilan radiatif

Modèle mathématique permettant de calculer les transferts radiatifs entre les différentes surfaces de l'habitacle et du conducteur. La matrice des facteurs de forme ainsi que la matrice inverse qui en découle ont été calculées auparavant et sont lues directement dans un fichier: "FCTAMT".

Pour obtenir ces facteurs de formes nous avons regroupé les surfaces qui ont un coefficient d'émissivité et une température identique. Nous avons ainsi 20 groupes de surfaces différents pour l'habitacle et 7 pour les 7 segments du conducteur.

Les densités de flux net de chacun des groupes sont calculées à partir des températures des surfaces de l'habitacle et les températures du conducteur.

LES PARAMETRES

1	ns	nombre de surfaces ici ns=27
2 à ns	$\epsilon(i)$	émissivité des 27 groupes de surfaces
28 à 34	Surf	surfaces émissives des segments du sujet (m^2)

LES ENTRÉES

1 à 20	$T(i)$	température de surface du véhicule ($^{\circ}C$)
20 à 27	$T(i)$	température de surface du conducteur ($^{\circ}C$)

LES SORTIES

1 à 7	$\Phi(i)$	densités de flux sur les surfaces du conducteur (W/m^2)
7 à 14	$\Phi(i)$	flux nets rayonnés sur les surfaces du conducteur (W)

FICHER DE SIMULATION (DECK) DE TRNSYS COMMENTÉ

Pour les connections entre les différents modules, voir manuel d'utilisation de TRNSYS

<pre> * Simulation MATHER experience N° 20 * NOLIST SIMULATION 0 1.96666667 0.01666667 WIDTH 72 TOLERANCES .01000 .01000 LIMITS 20 10 * </pre>	en tête de TRNSYS
<pre> ASSIGN FCTAM 03 ASSIGN PAUSI 14 ASSIGN TI-Tsurf1-20 17 ASSIGN TI-Tsurf2-20 18 ASSIGN TI-Tair-20 19 ASSIGN T-20 44 ASSIGN S-20 48 * </pre>	ouverture des fichiers

UNIT 1 TYPE 9 TEMPERATURES DE SURFACE N°1 PARAMETERS 4 10 0.01666667 17 0 * UNIT 2 TYPE 9 TEMPERATURES DE SURFACE N°2 PARAMETERS 4 10 0.01666667 18 0 * UNIT 3 TYPE 9 TEMPERATURES D'AIR PARAMETERS 4 10 0.01666667 19 0 *	lecture des conditions thermiques de l'habitable
UNIT 31 TYPE 14 VITESSE D'AIR *tête PARAMETERS 4 0.0 0.14 2.0 0.14 UNIT 32 TYPE 14 VITESSE D'AIR *tronc PARAMETERS 4 0.0 0.09 2.0 0.09 UNIT 33 TYPE 14 VITESSE D'AIR *bras droit PARAMETERS 4 0.0 0.22 2.0 0.22 UNIT 34 TYPE 14 VITESSE D'AIR *bras gauche PARAMETERS 4 0.0 0.22 2.0 0.22 UNIT 35 TYPE 14 VITESSE D'AIR *mains PARAMETERS 4 0.0 0.24 2.0 0.24 UNIT 36 TYPE 14 VITESSE D'AIR *jambes PARAMETERS 4 0.0 0.17 2.0 0.17 UNIT 37 TYPE 14 VITESSE D'AIR *pieds PARAMETERS 4 0.0 0.83 2.0 0.83 *	Calcul des vitesses d'air locales
UNIT 38 TYPE 14 SOLEIL *PUISSANCE DES LAMPES PARAMETERS 10 0.0 1000 0.5 1000 0.5 0.0 1.0 0.0 2.0 1000 * EQUATIONS 4 RAYTR=0.022*[38,1] RAYBDM=0.006*[38,1] RAYBG=0.013*[38,1] RAYJ=0.028*[38,1] *	Calcul du rayonnement Solaire

<p>UNIT 42 TYPE 70 ZXRAYO sur les vêtements</p> <p>PARAMETERS 35</p> <p>27 .90 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .90 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .95 .9 .9 .9 .95 .9 .9</p> <p>0.143 0.407 0.158 0.159 0.034 0.461 0.086</p> <p>INPUTS 27</p> <p>1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 1,10 2,1 2,2 2,3 2,4 2,5 2,6 2,7 2,8 2,9 2,10 49,12 49,13 49,15 49,14 49,16 49,17 49,18</p> <p>*</p> <p>20. 19. 19. 19. 19. 19 19 19. 19. 19. 19. 19. 20. 20. 20. 19. 20. 19. 20. 20. 30 30 30 30 30 30 30</p> <p>*</p> <p>UNIT 43 TYPE 70 ZXRAYO sur la peau</p> <p>PARAMETERS 35</p> <p>27 .90 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .90 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .9 .95 .9 .9 .9 .95 .9 .9</p> <p>0.143 0.407 0.158 0.159 0.034 0.461 0.086</p> <p>INPUTS 27</p> <p>1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 1,10 2,1 2,2 2,3 2,4 2,5 2,6 2,7 2,8 2,9 2,10 49,5 49,6 49,8 49,7 49,9 49,10 49,11</p> <p>*</p> <p>20. 19. 19. 19. 19. 19 19 19. 19. 19. 19. 19. 20. 20. 20. 19. 20. 19. 20. 20. 30 30 30 30 30 30 30</p> <p>*</p>	<p>Calcul des échanges radiatifs au niveau de la peau et du tissu</p>
<p>UNIT 49 TYPE 54 MATHER</p> <p>PARAMETER 1</p> <p>1</p> <p>INPUTS 38</p> <p>0,0 3,9 3,10 3,2 3,3 3,4 3,5 3,6 3,7 3,8 31,1 32,1 33,1 34,1 35,1 36,1 37,1 42,1 42,2 42,4 42,3 42,5 42,6 42,7 43,1 43,2 43,4 43,3 43,5 43,6 43,7 0,0 RAYTR RAYBDM RAYBG RAYBDM RAYJ 0,0</p> <p>*</p> <p>1.2 900.0 20 20.0 10.0 10.0 20.0 30.0 20.0 20.0 0.14 0.09 0.22 0.22 0.24 0.17 0.83 5 10 5 5 2 10 3 10 10 10 10 10 10 10 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</p> <p>*</p>	<p>modèle de thermorégulation</p>

UNIT 23 TYPE 25 print températures cutanées

PARAMETERS 4

0.0666667 0.0 1.96666667 44

INPUTS 8

49,5 49,6 49,7 49,8 49,9 49,10 49,11 49,1
Tte Ttr TbrQ TBRG Tma Tja Tpi TSk

*

UNIT 26 TYPE 25 print SENSATIONS

PARAMETERS 4

0.0666667 0.0 1.96666667 48

INPUTS 8

49,26 49,27 49,28 49,29 49,30 49,31 49,32 49,4
Ste Str SBrD SBrG Sma Sja Spi Sglo

*

END

Sorties, ordre d'écriture

(Deux autres PRINTER peuvent être
ajoutés si besoin est)

Fichiers des conditions climatiques

Ces fichiers sont lus lors de la simulation, XX correspond au numéros de l'essai. Les numéros de surfaces correspondent à ceux des relevés expérimentaux donnés au début des annexes.

Tair-XX : températures d'air près du conducteur

T(h)	Température d'air près du conducteur							Habitacle	
	Tête	Tronc	bras,D	bras,G	main	jambes	pieds	HR-Hab	T-Hab
N°	1	2	3	5	(4+6)/2	(7+8+10+11)/4	(9+12)/2		
0,000	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	13,38	22,20
0,433	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	13,38	22,20
0,450	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	13,38	22,20
0,467	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	13,38	22,20
0,483	-6,40	3,50	-6,60	-9,10	-2,50	-10,03	-12,00	13,38	22,20
0,500	2,30	-0,30	-6,80	-5,50	-5,30	-2,95	-7,15	18,63	-15,00
0,517	4,10	2,20	-1,30	1,70	0,15	2,10	5,60	20,39	-14,40

Tsurf1-XX : températures de surface de l'habitacle

T(h)	Pavillon	toit ouvrant	haut pare brise	milieu pare brise	bas pare brise	vitre avant droite	vitre AR + lunette	vitre avant Gauche	vitre avant Gauche	vitre avant Gauche
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,000	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
0,433	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
0,450	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
0,467	-9,60	-8,40	-13,90	-13,97	-13,80	-15,10	-14,75	-14,90	-14,80	-14,40
0,483	-11,00	-9,15	-13,95	-14,07	-14,00	-15,10	-14,65	-15,10	-14,90	-14,50
0,500	-7,20	-6,90	-13,05	-13,23	-12,90	-15,00	-14,60	-14,40	-14,30	-14,00
0,517	-4,60	-3,75	-12,55	-12,57	-10,80	-14,60	-14,35	-13,90	-14,30	-14,00

Tsurf2-XX : températures de surface de l'habitacle (suite)

T(h)	vitre avant Gauche	sièges+ Banq. arrière	haut Tableau bord	milieu Tableau de bord	dessous TdB + console	plancher	portière haut	portière bas	portière arrière	montant pare brise
N°	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0,000	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
0,433	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
0,450	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
0,467	-14,35	-6,35	7,80	-7,60	-8,50	-11,60	-6,70	-9,80	-6,70	-6,70
0,483	-14,50	-6,80	6,00	-8,70	-9,80	-12,70	-8,80	-12,00	-8,80	-8,80
0,500	-13,90	-6,20	6,40	-7,80	-9,00	-9,50	-7,00	-9,00	-7,00	-7,00
0,517	-13,70	-5,15	6,30	-7,30	-7,05	-6,70	-5,17	-4,20	-5,17	-5,17

TABLES DES MATIÈRES DES 5 RAPPORTS INTERMÉDIAIRES

Rapport d'avancement n°1 : Septembre 1992

1ère Partie - Bibliographie

I. LES MODÈLES DE THERMORÉGULATION	
I.1. Généralités	2
I.2. Les modèles de thermorégulation existants	5
Les modèles à 1 segment, multi-couches.....	5
Les modèles multi-segments, multi-couches.....	7
Tableau récapitulatif	11
I.3. Conclusions sur les modèles	13
I.4. Références bibliographique.....	14
II. BIBLIOGRAPHIE SUR LES VÉHICULES	17

2ème Partie - Résultats

I. TESTS DU LOGICIEL EXISTANT, SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES	
I.1. Habitable.....	19
I.2. Températures de paroi et d'air, vitesse d'air	20
I.3. Résultats.....	20
I.4. Variations de la température d'air.....	23
II. ASYMÉTRISATION DE MARCL	
II.1. Modification du logiciel.....	25
II.2. Résultats.....	25
II.3. Influence de la vitesse d'air	27

Rapport d'avancement n°2 : Février 1993

1ère Partie - Préparation des expériences et des Simulations

I. DÉFINITION DE LA TENUE VESTIMENTAIRE	2
--	---

2ème Partie - Compte rendu des essais

I. GÉNÉRALITÉS	5
II. ESSAI DU MOI D'OCTOBRE	
II.1. Description de la journée de travail.....	7
II.2. Variables enregistrées et traitements des données	8
II.3. Présentation des résultats	11
II.4. Premières conclusions	11
III. ESSAI DU MOI DE NOVEMBRE	
III.1. Description des journées de travail	15
III.2. Variables enregistrées et traitements des données	16
III.3. Présentation des résultats	21
III.4. Premières conclusions	26
IV. TABLEAUX RÉCAPITULATIFS	
V. RELEVÉS DE VITESSE D'AIR	
V.1. Dispositif expérimental	29
V.2. Tableaux de résultats.....	31
V.3. Commentaires.....	33

ANNEXE 1 Courbes de résultats d'octobre

ANNEXE 2 Courbes de résultats de novembre

ANNEXE 3 Bibliographie mise à jour

Rapport d'avancement n°3 : Juin 1993

1ère Partie - Modèle de calcul de rayonnement

I. <u>détermination des facteurs de forme</u>	
Géométrie de l'ensemble	2
Calcul des facteurs de forme	2
Résultats	5
II. <u>Le modèle d'échange radiatif</u>	
Description du modèle	8
Regroupement des surfaces par les températures expérimentales.....	10
Les premiers tests effectués	11
IV. <u>Fiche descriptive du modèle de rayonnement</u>	11

2ème Partie - Modèle de thermo-physiologie FRANCIS

I. <u>Description du modèle</u>	
Fiche TRNSYS.....	12
Liste des paramètres nécessaires.....	13
Fiche descriptive du modèle & Liste des variables du modèle.....	14
II. <u>Relation sensation-température</u>	15
III. <u>Les premiers tests des deux modèles couplés</u>	
Climat homogène et constant.....	19
Essai n° 5 du mois de novembre.....	19

Rapport d'avancement n°4 : Octobre 1993

1ère Partie - Températures cutanées

I.	MODIFICATION DES VÊTEMENTS DANS LA MODELISATION	2
II.	EXPERIENCES DE MAI 93	4
III.	COMPARAISON EXPERIENCES - SIMULATION	4

2ème Partie - Sensations thermiques

I.	EXPERIENCES	6
II.	VALEURS MOYENNES PAR EXPERIENCE.....	9
III.	VALEURS MOYENNES POUR TOUTES LES EXPERIENCES	17

Rapport d'avancement n°5 : Février 1994

INTRODUCTION.....	2
-------------------	---

1ère Partie - Essais de Suède

I.	Les expériences.....	3
II.	Tableaux récapitulatifs.....	5
III.	Mesure du flux solaire transmis dans la voiture	9
IV.	Simulation des essais de Suède (Températures).....	10

2ème Partie - Sensations thermiques

I.	Les essais d'amélioration.....	13
II.	Le nouveau tableau "sensation/température ".....	14
III.	Vérification du bien fondé du nouveau tableau	21
IV.	Simulation des essais de Suède (Sensations).....	23

Annexe - fiche PROFORMA

BIBLIOGRAPHIE SUR LES ASPECTS DE CONFORT DANS LES VÉHICULES

Articles disponibles au LESETH

Cette bibliographie n'inclue évidemment pas les articles, sur le confort en général, disponibles au laboratoire. La majeure partie de ces articles utilisés sont référencés dans les thèses soutenues au LESETH : F. Thellier 1989, H. Derbel 1990, M. Galéou 1991)

BEZIAN J.J., CHEIKH A., FONZES G., 1992

Modélisation dynamique des échanges par convection naturelle à l'intérieur d'un habitacle automobile. Journées de la S.F.T., Sophia-Antipolis mai 1992, pp.1-9

CHRISTIE T., 1991

La climatisation des voitures exigences et réalisations. Chauffage Ventilation Conditionnement, n°5 mai 1991, pp.18-19

DELLA ROLLE C., TAREZA A., PALAZZETTI R., GOAN B., CARISO B., 1989

thermal confort in the passenger compartment: a contribution to its evaluation Proc. international congress, technology status and prospects about the thermal vehicle comfort., Bologna April 1989.

GWOSDOW A.R., BERGLUND L.G., 1987

Clothing distribution influences thermal responses of man in cool environments.. J. Therm. Biol., Vol 12, No 2, pp. 91-95.

GWOSDOW A.R., BERGLUND L.G., 1989

physiological and behavioral temperatureregulation of men in simulated nonuniform thermal environments..

Aviation, Space and environmental medicine, june 1989, pp. 558-565

ISHIHARA Y., HARA J., SAKAMOTO H., KAMEMOTO K., OKAMOTO, 1991

Determination of flow velocity distribution in a vehicle interior using a visualization and computation techniques. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 25-March 1, pp.51-62.

INGERSOLL J.G., KALMA T.G., MAXWELL L.M., NEIMLEC R.J., 1992

Automobile passenger compartment thermal confort model

- Part I : Compartment cool-down/warm-up calculation .

- Part II : Human thermal confort calculation

Sans références

LARNICOL P., 1990

Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son environnement. Rapport de stage, DEUST d'énergétique d'Orsay

LEVENT, 1985

Confort thermique des véhicules.

Proc. Clima 2000, Copenhagen .

LIN C.H., HAN T., KOROMILAS C.A., 1992

Effects of HVAC design parameters on passenger thermal confort. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29/

- MESSANA C., PALAZZATI M., PARISI PRESICCE L., PETRUCCIOLI G., SALOTTI G., 1991
Solar ventilation in vehicles. The role of components involved. XXIII Fisita congress, Torino, PP. 901-909.
- NEWBOROUGH M., PROBERT S.D. , 1984
Improving the thermal comfort of sedentary man. Applied Energy, 17, pp. 283-299.
- PACHIAUDI G., BLANCHET V., LETISSERAND D., 1989
Le confort thermique en situation réelle : cas des transports longue distance. Journées de la S.F.T. : Evaluation des échanges de chaleur du confort thermique et des durées de tolérance dans diverses situations de vie et de travail, 14 juin 1989
- PAKLEZA J., SACADURA J.F. 1989
Le confort thermique en situation réelle : cas d'un véhicule individuel. Journées de la S.F.T. : Evaluation des échanges de chaleur du confort thermique et des durées de tolérance dans diverses situations de vie et de travail, 14 juin 1989
- PERRIN F., 1991
Modélisation du comportement thermique d'un habitacle d'automobile : approche de l'étude du confort. Thèse d'université, Lyon 91 ISAL.
- ROBIN R., 1992
Conception des systèmes de climatisation automobile.. Bulletin de liaison n°2 du G.U.T., Janvier 1992
- TANAKA H., KITADA M., TANIGUCHI Y., OHNO Y., SHINAGAWA T., AOKI H., 1992
Study on car air conditioning system controlled by car occupants' skin temperature - Part 2 development of a new air conditioning system Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.21-27
- TANIGUCHI Y., AOKI H., FULKAKE K., TANAKA H., KITADA M. 1992
Study on car air conditioning system controlled by car occupants' skin temperature - Part 1 Research on a method of quantitative evaluation of car occupants' thermal sensations by skin temperatures. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.13-19
- UEDA M., TANIGUCHI Y., AOKI H., 1992
A new method using neural networks to evaluate the transitional thermal sensation of an automobile occupant. Proc. Inter. congress & exposition of SAE, Michigan, Detroit, Feb. 24-29, pp.75-80

Journée spécialisée : confort thermique dans les véhicules de transport, 19 mai 1988.

LES FICHES PROFORMA

Dans les fiches qui suivent, les deux programmes que nous avons développés sont expliqués en détails. Cette présentation correspond aux "FICHE PROFORMA" utilisées dans l'habitat : il s'agit d'une présentation mise au point par un groupe d'étude, permettant d'écrire sous forme standardisée les modèles existants. Ce mode de description nous ayant paru pratique nous l'avons donc utilisé.

Ces fiches sont suivies des listing des deux programmes.

UNIVERSITE PAUL SABATIER



P.S.A. - VALEO - LESETH

Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"

MATHER

Modèle de MANnequin THERmique dans une voiture

Modèle de thermorégulation humaine et d'évaluation des sensations thermiques pour un homme dans un véhicule

JUIN 1994 - Version 4.0

Françoise THELLIER, Frédéric ALTHABÉGOÏTY, Alain CORDIER, Françoise MONCHOUX, GUY SERIN

**L.E.S.E.T.H. - Laboratoire Etudes des Systèmes et Environnement Thermique de l'Homme
U.P.S. - 118, Route de Narbonne - 31062 Toulouse Cedex - Téléphone : 61 55 68 29. Fax : 61 55 60 21**

CHAPITRE 1 : Fiche Signalétique

Objet : sensation thermique d'un conducteur de voiture
Phénomènes : Thermorégulation du corps humain, Sensations thermiques
Hypothèses : Homme "standard", conditions climatiques d'hiver (température extérieure basse, chauffage en marche dans la voiture, vêtements épais)
Méthode : Bilan thermique
Caractère : ☐ intrinsèque ☐ interface ☒ couplage ☐ macro-modèle
Degrés de liberté : 29

RESUME

Physique->physiologie : Calcul du bilan thermique du corps humain, ce modèle permet d'obtenir toutes les données physiologiques globales et locales d'un individu soumis à une ambiance thermique hétérogène. Le corps est divisé en 29 compartiments.

Physiologie->sensations : Les grandeurs physiologiques globales et locales sont traduites en sensations thermiques globales et locales. Le modèle s'appuie sur des résultats expérimentaux.

MODE D'APPROCHE	<input type="checkbox"/> simplifié	<input checked="" type="checkbox"/> détaillé	<input checked="" type="checkbox"/> empirique	<input type="checkbox"/> conventionnel
TYPE	<input type="checkbox"/> algorithmique	<input checked="" type="checkbox"/> équationnel	<input checked="" type="checkbox"/> jeux de données	<input type="checkbox"/> logique
ETAT	<input type="checkbox"/> embryonnaire	<input type="checkbox"/> en développement	<input checked="" type="checkbox"/> à affiner	<input type="checkbox"/> finalisé
VALIDATION	<input type="checkbox"/> qualitative	<input type="checkbox"/> analytique	<input type="checkbox"/> numérique	<input checked="" type="checkbox"/> expérimentale

INFORMATIONS GENERALES

Rédacteur et Suivi de la fiche		Françoise THELLIER, L.E.S.E.T.H. - U.P.S Toulouse		Date de la fiche : 6/06/94	
Date de la modification	Objet de la modification	Numéro de version	Auteur de la modification		
Novemb.1991	MARCL-Modèle d'Analyse et de Recherche sur le Confort Local Thermorégulation humaine et sensations thermiques Validation pour l'habitat	0.0	F. THELLIER, A. CORDIER, M. GALÉOU, F. MONCHOUX, G. SERIN		
mai 1993	Première version pour Application aux véhicules	1.0	F. ALTHABÉGOITY, A. CORDIER, F. THELLIER		
Nov 1993	couplage avec le rayonnement, sensations dans les voitures	2.0	F. ALTHABÉGOITY, A. CORDIER, G. SERIN & F. THELLIER		
Janv.1994	ventilation sous les vêtements	3.0	"	"	"
Avril 1994	passage en unités internationales	3.2	"	"	"
Juin 1994	version dans le cas hiver	4.0	"	"	"

CHAPITRE 2 : Description formelle

NOMENCLATURE

Paramètres :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
cas	conditions	sans	entier	(1; 2 ; 3 ; 4)	1	1= hiver

Variables de couplage en "entrée" :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
M	Métabolisme total	met	réel	1 à 3 met	1 met	1 met
HR	Humidité Relative	%	réel			
Ta(i)	7 Températures d'air	°C	réel	-10 à 40		
Va(i)	7 vitesses d'air	m/s	réel	0 à 2		
Raycl(i)	7 flux au niveau des vêtements	W	réel			
Raysk(i)	7 flux au niveau de la peau	W	réel			
Ray SOL(i)	7 flux solaires	W	réel			

Variables de couplage en "sortie" : de nombreuses sorties, autres que celles décrites ci-dessous sont disponibles

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
Tsk et Tsk(i)	Temp. cutanées moyenne et locales	°C	réel	30 à 40		
Tcl et Tcl(i)	Températures des vêtements moyenne et 7 locales	°C	réel	10 à 40		
Sensg et sens(i)	sensations globale et locales des 7 segments	-	réel	1 à 9		1 : très froid 9: étouffant

Déclarations des variables internes au modèle :

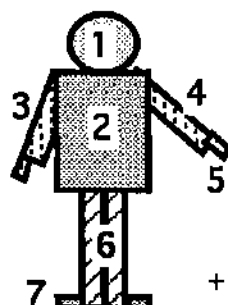
Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
Voir annexe : "les variables du modèle"						

SCHEMA FONCTIONNEL

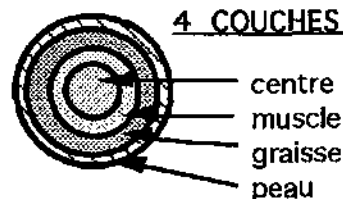
Système contrôlé

7 SEGMENTS

- 1 tête
- 2 tronc
- 3 bras droit
- 4 bras gauche
- 5 mains
- 6 jambes
- 7 pieds

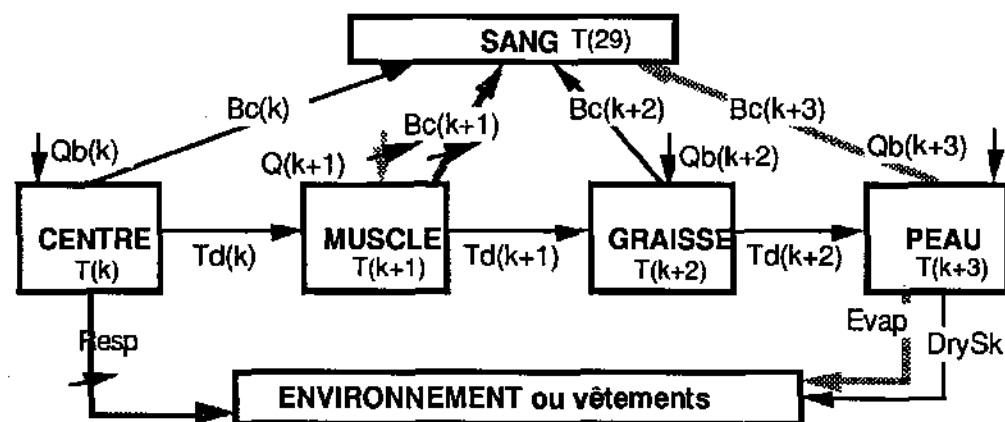


4 COUCHES



+ le flux sanguin

$[(7 \text{ segments}) * (4 \text{ couches})] + \text{flux sanguin} = 29 \text{ compartiments}$



Schématisation des échanges de chaleur dans un segment

Système de contrôle

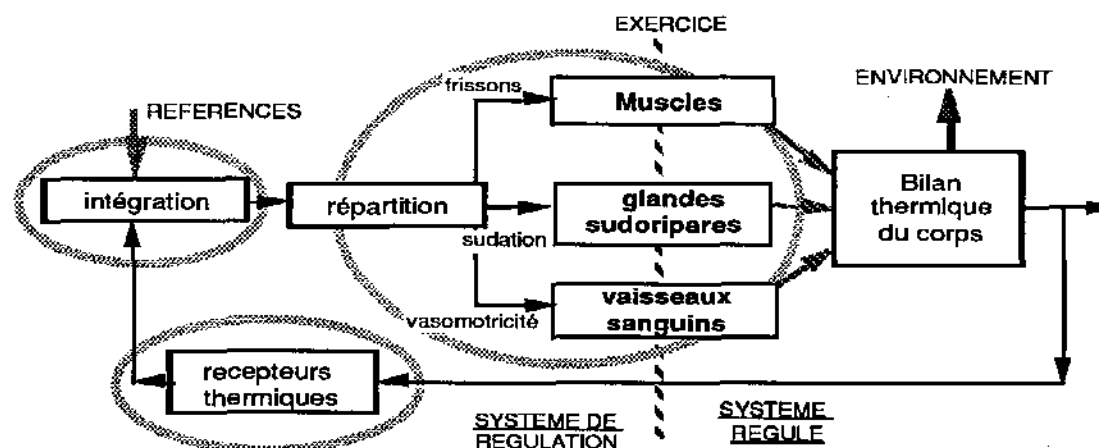
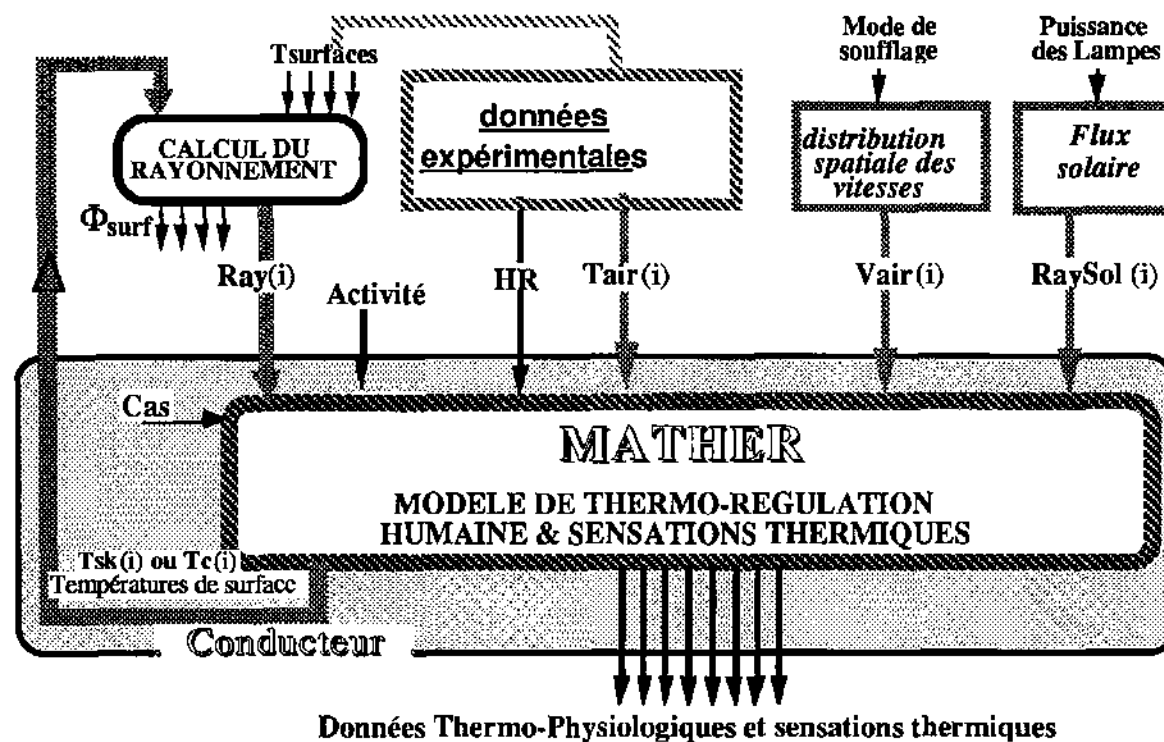


Schéma bloc : Modèle complet, liaisons entre modèle de thermophysiology et environnement thermique (véhicule)



FORMULATIONS

Le corps est décomposé en deux sous systèmes :

- le système contrôlé : il est passif et a les caractéristiques physiques et physiologiques réelles du corps humain ; il met en jeu uniquement des transferts de masse et de chaleur ;
- le système de contrôle : il correspond à la partie active du système, c'est le régulateur ; il met en jeu uniquement des transferts d'information et de commande.

Dans la description qui suit, les notations utilisées correspondent à :

- indice "B" = valeurs basales des variables,
- indice "n" = numéro de compartiment (n = 1 à 29)
- indice "i" = numéro de segment (i = 1 à 7), (i=1-Tête; 2-tronc, 3-bras droit, 4-bras gauche, 5-mains, 6-jambes, 7-pieds)
- indice "k" = numéro de couche (k = 1 à 4), (k=1-centre, 2-muscle, 3-graisse, 4-peau)

SYSTEME DE CONTROLE

• Le système de contrôle détermine les réactions physiologiques internes 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,
- le deuxième intègre les signaux et détermine l'amplitude des commandes,
- le troisième effectue la répartition des signaux dans le système contrôlé.

1 - Signal d'erreur :

$$ERROR(n) = [T(n) - Tset(n)] + [Rate(n) \cdot F(n)]$$

$$ERROR(n) > 0 \quad WARM(n) = ERROR(n) \quad \text{et} \quad ERROR(n) < 0 \quad COLD(n) = -ERROR(n).$$

Remarque : Un terme dynamique ($Rate(n) \cdot F(n)$) est prévu, mais cet effet n'étant pas pour l'instant mis en évidence il est négligé : $Rate(n) = 0$.

2 - L'intégrateur reçoit les informations venant des détecteurs et détermine des signaux de commande générale ER_S , ER_1 , ER_P . Les températures qui interviennent alors sont uniquement la température interne de la tête, correspondant à l'hypothalamus, et une moyenne pondérée des températures cutanées de chaque segment :

$$\begin{aligned} \text{Signaux de commande générale :} \quad ER_S &= \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} WARM_{(i)} - \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} COLD_{(i)} & ER_1 &= WARM_{(1)} - COLD_{(1)} \\ ER_P &= (WARM_{(1)} \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} WARM_{(i)}) - (COLD_{(1)} \sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} COLD_{(i)}) \end{aligned}$$

Les coefficients $SkR_{(i)}$ sont proportionnels aux nombres de thermorécepteurs cutanés de chaque segment (i). $\sum_{i=1}^7 SkR_{(i)} = 1$

3 - L'effecteur reçoit les signaux de commande générale venant de l'intégrateur et détermine la nature de la commande à transmettre au système contrôlé. Les quatre types de la commande (COM) sont :

- SWEAT qui régule la sudation, CHILL - les frissons, DILAT - la vasodilatation, STRIC - la vasoconstriction.

Mode général de calcul : $COM = C.ER_{(1)} + S.ER_S + P.ER_P$ $0 \leq COM \leq XCOM$

Ces coefficients de commande sont toujours positifs et bornés par des valeurs supérieures (XCOM), qui correspondent aux limites physiologiques du corps humain. Les signaux de commande sont répartis aux divers effecteurs dans chaque segment.

* Les frissons : L'Augmentation de production de chaleur due aux frissons Q_{sh} n'a lieu que dans les couches musculaires (couche n°3) :

$$Q_{sh}(k=3),i = chili(i).CHILL \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^7 chili(i) = 1$$

* La vasomotricité provoque une augmentation ou une diminution du débit sanguin dans la couche cutanée (couche n°4). Il intervient en plus un phénomène local lié à la résistance supplémentaire du système veineux de surface, qui est fonction de sa température.

$$BF_{(k=4),(i)} = \left(\frac{BF_{b(k=4),(i)} + SkV_{(i)} DILAT}{1 + SkC_{(i)} STRIC} \right)^{2(ERROR(i)/10)} \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^7 SkV_{(i)} = 1 \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^7 SkC_{(i)} = 1$$

* La sudation est répartie sur les différents segments, en fonction du nombre de glandes sudoripares. (voir pertes par évaporation)

SYSTEME CONTROLÉ

• Les transferts internes de chaleur

• La production de chaleur ou métabolisme Q

- Le métabolisme basal Q_b est réparti dans toutes les couches, sa valeur totale est : $QBT = \sum Q_{b(n)} = 81 \text{ W}$

En cas de sudation le métabolisme augmente : $Q_{b(n)} = Q_{b(n)} * XL$ avec $XL = 1 + SWEAT/XXL$

- L'Augmentation due au travail ou métabolisme d'activité Q_a pour un segment i n'a lieu que dans les muscles (couche n°3) :

$$Q_a(k=3,i) = worki(i).WORK, \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^7 worki(i) = 1$$

WORK : travail effectué par les muscle : $WORK = (ACT - QBT) * (1 - RENW)$

ACT : dépense métabolique totale que demande l'activité

RENW : rendement mécanique de l'activité

- Le métabolisme total dans chaque couche

$$Q(n) = Q_B(n) + Q_a(n) + Q_{sh}(n) \text{ et } Q_{tot} = \sum_{i=1}^{29} Q(n)$$

- Conduction tissulaire (TD), se fait de manière radiale d'une couche à l'autre. Il a été établi sur un modèle de sphère ou de cylindre.

$$TD(k) = TC(k) \cdot (T(k) - T(k+1))$$

- Convection sanguine (BC) de chaque couche.

$$BC(n) = BF(n) \cdot CS \cdot (T(n) - T(29))$$

- Le débit sanguin (BF) est constant au centre et dans la graisse.

- Dans les muscles, il augmente en fonction de la production de chaleur. $BF(n) = BFB(n) + BQ \cdot (Q(n) - Q_B(n))$

- Dans la couche cutanée, il est fortement contrôlé par le régulateur. (voir système de contrôle)

• Les échanges de chaleur avec l'extérieur

- Les pertes respiratoires (RESP) par convection (RESPS) et évaporation (RESPL) sont prises en compte dans la couche centrale de la tête (13 %) et du tronc (87 %). $Resp = RESPS + RESPL$ avec $RESPS = 0.0014 \cdot ACT \cdot (T_{exp} - T_a)$ $RESPL = 1.72 \cdot 10^{-5} \cdot ACT \cdot (P_{exp} - P_a)$

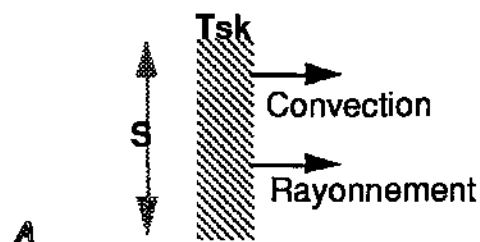
T_{exp} : Température de l'air expiré

P_{exp} : pression de vapeur saturante à température T_{exp}

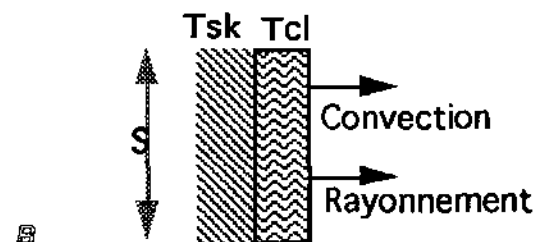
$$T_{exp} = 32,5 + 0.066 T_a + 1,99 \cdot 10^{-4} P_a$$

$$P_{exp} = P_{sat}(T_{exp})$$

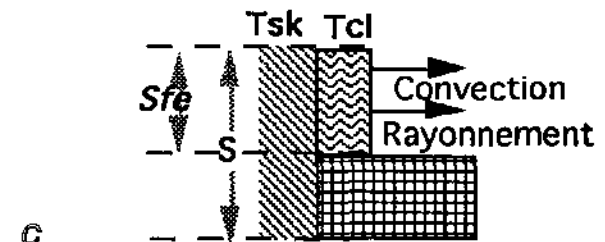
les échanges au niveau de la peau ou des vêtements



cas d'un segment nu



cas d'un segment vêtu



cas d'un segment vêtu en contact avec le siège

A Segment nu : les échanges avec le milieu ambiant ont lieu sur une surface S de peau à température Tsk

B Segment vêtu : les échanges avec le milieu ambiant ont lieu sur une surface S*_{fcl} de vêtement à température Tcl

C Segment vêtu en contact avec le siège : les échanges avec l'extérieur n'ont lieu que sur une surface Sfe

$$S(i) = ADU \cdot PERSUR(i)$$

S(i) surface du segment i
ADU aire de Dubois, surface total du corps
PERSUR(i) pourcentage du segment i

$$Sfe(i) = S(i) \cdot (1 - Pcont(i))$$

Sfe(i) surface d'échange avec l'extérieur
Pcont(i) pourcentage de la surface en contact avec le siège

• Les pertes de chaleur par évaporation (E) : $E(i) = Ediff(i) + Esw(i)$

$$Ediff(i) = 0,06 \cdot (1 - \omega(i)) \cdot Emaxsk(i)$$

$$Esw(i) = \omega(i) \cdot Emaxsk(i)$$

Emaxsk(i) évaporation maximale ou pouvoir évaporatoire au niveau de la peau

La mouillure (ω) est calculée par la comparaison entre la quantité d'eau (m_{H_2Omax}) donnant une mouillure de 1 et la quantité d'eau se trouvant sur la peau à un instant donné (m_{H_2O}). Cette quantité d'eau est fonction de la production de sueur (déterminée par le système de contrôle SWEAT), de la variation de masse d'eau depuis pas de temps précédent et du rendement d'évaporation (Rest)

$$m_{H_2Omax}(i) = E_{aumax} \cdot Persur(i) \quad \text{avec } E_{aumax} = 80 \text{ g d'eau}$$

$$Rsw = Rsw + \Delta rsw = Rsw + (SWEAT - Rsw) \cdot (1 - e^{-\Delta t/\tau}) \quad \text{et} \quad Rsw \geq 0 \quad (\tau = 180 \text{ secondes})$$

$$Sud(i) = \frac{Ediff(i) + SkS(i) \cdot Rsw \cdot 2^{(ERROR(i)/BULL)}}{QL(T_{sk}(i))} \quad \text{et} \quad Evg(i) = \frac{E(i)}{QL(T_{sk}(i))}$$

si Mouillure faible $\omega(i) < 0,5$ Drip(i)=0
si Mouillure forte $\omega(i) \geq 0,5$ Rest(i)= $1 - 0,5 \cdot \omega(i)^2$, $0 \leq Rest(i) \leq 1$
et Drip(i)= Sud(i) · (1 - Rest(i)) eau non évaporée qui ruissèle

$$m_{H_2O}(i)^{t+dt} = m_{H_2O}(i)^t + \Delta m_{H_2O}(i) = m_{H_2O}(i) + [Sud(i) - Evag(i) - Drip(i)] \cdot \Delta t, \quad m_{H_2O}(i) > 0$$

$$\text{si } m_{H_2O}(i) \geq m_{H_2Omax}(i) \quad Drip(i) = Drip(i) + \frac{m_{H_2O}(i) - m_{H_2Omax}(i)}{\Delta t}, \quad m_{H_2O}(i) = m_{H_2Omax}(i)$$

$$\omega(i) = \sqrt{\frac{m_{H_2O}(i)}{m_{H_2Omax}(i)}}$$

• **CAS DES SEGMENTS NUS** : la tête et les mains

Transferts de chaleur sensible : $DRYSK(i) = \dot{q}_{s,sk(i)} = Conv(i) + RaylR(i) + RaySOL(i)$

$$Conv(i) = \frac{T_{sk(i)} - T_a(i)}{R_4(i)} \quad \text{avec } R_4(i) = \frac{1}{hc(i)} \quad \text{et } hc(i) = h_0(i) \cdot Va^{0,5} \quad (h_0(i) : \text{tabulés})$$

Transferts de chaleur latente : $E_{maxsk(i)} = \frac{P_{sat}(T_{sk(i)}) - P_{air}}{R'(i)}$

$$\text{avec } R'(i) = \frac{1}{h_e(i) \cdot S(i)} = \frac{1}{hc(i) \cdot Lw \cdot S(i)} \quad Lw : \text{coefficient de lewis}$$

• **CAS DES SEGMENTS VETUS**

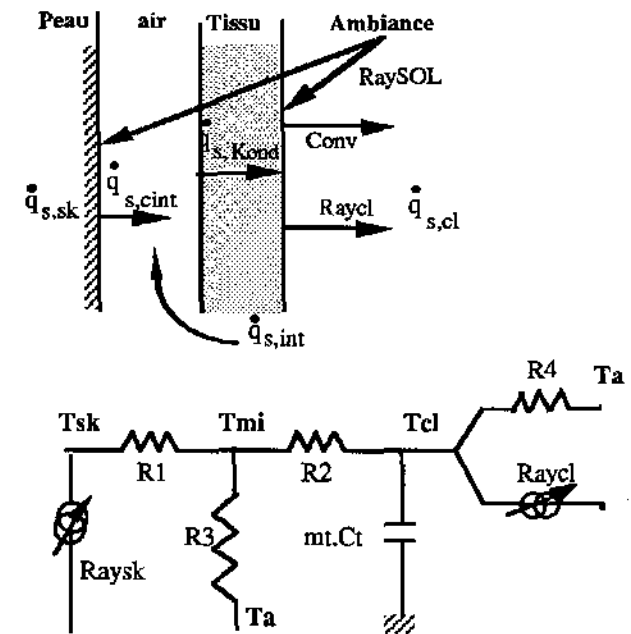
La couche de vêtements est divisée en deux :

- une couche d'air, à température T_{mi} , entre la peau et le tissu
- une couche de tissu à température T_{cl}

Transferts de chaleur sensible

- $\dot{q}_{s,sk}$ Transfert à la surface de la peau
- $\dot{q}_{s,Kond}$ Transfert par conduction à travers le tissu
- $\dot{q}_{s,cl}$ Transfert sur la surface du tissu
- $\dot{q}_{s,int}$ Transfert par convection sous vestimentale

Pour simplifier les calculs des températures et des flux nous faisons l'analogie avec le circuit électrique suivant, avec : R_1, R_2, R_3, R_4 , résistances thermiques ($^{\circ}C/W$) et $\dot{q} = \Delta T/R$



• **Transferts au niveau de la peau.** La peau est en contact avec le milieu intérieur et reçoit une part de rayonnement passant à travers le tissu :

$$DRYSK(i) = \dot{q}_{s,sk(i)} = \dot{q}_{s,cint(i)} + Ray_{sk}(i)$$

* **Convection** : $\dot{q}_{s,cint(i)} = \frac{T_{sk(i)} - T_{mi(i)}}{R_1(i)}$ avec $R_1(i) = \frac{R_{cl(i)}}{2 \cdot S_{fe(i)}}$ R_{cl} , résistance thermique des vêtements ($m^2^{\circ}C / W$)

* Rayonnement : $\text{Raysk}(i) = (\text{RayIR}(i) + \text{RaySOL}(i)) \cdot \text{Ctr}(i)$

RaySOL : rayonnement solaire passant à travers le tissu

RayIR : rayonnement infra rouge, calculé par le modèle radiatif, passant à travers le tissu

Ctr : coefficient de transmission des habits

• Convection interne sous vestimentale : $\dot{q}_{s, \text{int}}(i) = \frac{T_a(i) - T_{mi}(i)}{R3(i)}$ avec $R3(i) = \frac{1}{\rho_a \cdot C_{pa} \cdot d(i) \cdot Sfe(i)}$

d débit d'air dans la couche entre la peau et les vêtements ($\text{m}^3/\text{s m}^2$)

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

C_{pa} capacité calorifique de l'air $C_{pa} = 1006 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Pour calculer R3, il faut connaître les débits d(i). Dans la couche d'air on suppose qu'il y a un débit d'air qui dépend des ouvertures des vêtements, de leur perméabilité à l'air et de la vitesse du vent à la surface des vêtements. $d(i) = f(Va(i))$

On considère alors un coefficient global, CV, tel que : $\rho_a(i) \cdot C_{pa}(i) \cdot d(i) = CV(i) \cdot Va(i)$ d'où $R3(i) = \frac{1}{CV(i) \cdot Va(i) \cdot Sfe(i)}$.
(CV(i) : Coefficients constants et tabulés)

• Conduction à travers le tissu : $\text{DRYMI}(i) = \dot{q}_{s, \text{Kond}}(i) = \frac{T_{mi}(i) - T_{cl}(i)}{R2(i)}$ avec $R2(i) = \frac{R_{cl}(i)}{2 \cdot Sfe(i)}$

• Transferts au niveau des habits : $\text{DRYCL}(i) = \dot{q}_{s, \text{cl}}(i) = \text{Conv}(i) + \text{Ray}(i)$

* Convection $\text{Conv}(i) = \frac{(T_{cl}(i) - T_a(i))}{R4(i)}$ avec $R4(i) = \frac{1}{hc \cdot fcl \cdot Sfe(i)}$

hc coefficient d'échange convectif à la surface des vêtements ($\text{W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$) $hc(i) = h_0(i) \cdot Va^{0,5}$ ($h_0(i)$: tabulés)

fcl facteur d'accroissement de la surface d'échange dû aux vêtements

* Rayonnement : $\text{Raycl}(i) = (\text{RayIR}(i) + \text{RaySOL}(i)) \cdot (1 - \text{Ctr}(i))$

RayIR(i) flux radiatifs infra-rouge calculés par le module de bilan radiatif de la voiture.

Le bilan thermique des flux entrants et sortants dans les deux couches du vêtement nous donne les équations suivantes :

Pour la couche d'air à température T_{mi} : $\dot{q}_{s, cint} + \dot{q}_{s, int} - \dot{q}_{s, Kond} = 0$

d'où
$$\frac{T_{sk(i)} - T_{mi(i)}}{R_1(i)} + \frac{T_{a(i)} - T_{mi(i)}}{R_3(i)} - \frac{T_{mi(i)} - T_{cl(i)}}{R_2(i)} = 0$$

Pour la couche de tissu à température T_{cl} : $\dot{q}_{s, cond(i)} - \dot{q}_{s, cl(i)} = m_t(i) C_t(i) \frac{dT_{cl(i)}}{dt}$

d'où
$$\frac{T_{mi(i)} - T_{cl(i)}}{R_2(i)} - \frac{(T_{cl(i)} - T_{a(i)})}{R_4(i)} + Raycl(i) = HFCL(i)$$

$HFCL(i) = m_t(i) C_t(i) \frac{dT_{cl(i)}}{dt} = CCL(i) \frac{dT_{cl(i)}}{dt}$

Chaleur stockée dans le tissu, on considère que la présence d'eau dans le tissu ne modifie

pas ses propriétés thermiques. ($CCL(i) = m_t(i) C_t(i)$)

m_t : masse du tissu (kg)

C_t : capacité calorifique du tissu (J/kg °C)

Transfert de chaleur latente

Pour calculer E_{max} au niveau de la peau, il faut connaître les pressions de vapeur des différentes couches. On suppose que l'eau est vaporisée au niveau de la peau et migre ensuite sous forme de vapeur.

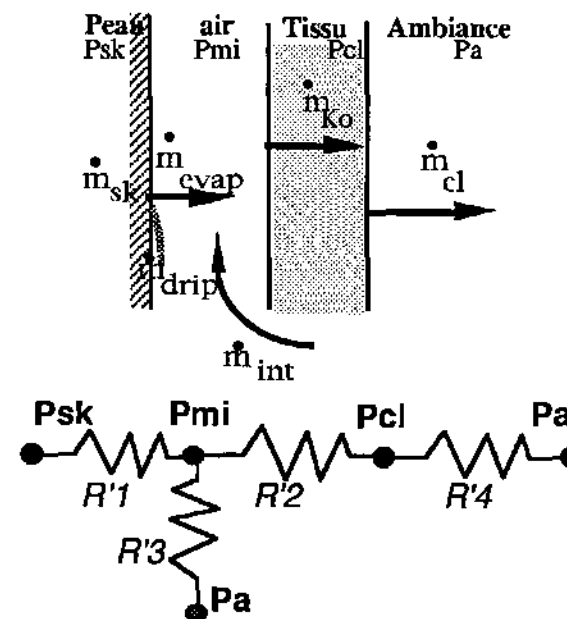
Pour les transferts de masse, on a le schéma suivant :

\dot{m} débit massique d'eau (kg/s)

\dot{m}_{sk}	"	"	au niveau de la peau
\dot{m}_{int}	"	"	échangée avec le milieu intérieur par les ouvertures
\dot{m}_{ko}	"	"	transitant à travers le tissu
\dot{m}_{cl}	"	"	échangée avec l'ambiance à la surface du tissu

Par analogie avec les transferts de chaleur on représente les transferts d'humidité à l'aide du circuit électrique. avec R'_1, R'_2, R'_3, R'_4 résistances au transfert de vapeur (kg/Pa.m²). Pour les conditions hivernales on considère qu'il n'y a pas d'eau emmagasiné dans le tissu.

- \dot{m}_{sk} débit massique d'eau produite au niveau de la peau : $\dot{m}_{sk} = \dot{m}_{evap} + \dot{m}_{drip}$



\dot{m}_{sk} = SUD Quantité d'eau produite au niveau de la peau, déterminée par les réactions de thermophysiology
 \dot{m}_{evap} = EVG Quantité d'eau évaporée qui migre à travers le tissu, liée au pouvoir évaporatoire au niveau de la peau
 \dot{m}_{drip} = DRIP Quantité d'eau non évaporée qui ruissèle sur la peau

- \dot{m}_{int} masse d'eau échangée dans la couche d'air, échange d'eau avec l'air sous vestimental $\dot{m}_{int} = \frac{P_{mi} - P_a}{R'_3}$
- \dot{m}_{ko} masse d'eau échangée à travers le tissu. Cette quantité dépend de la perméabilité du tissu lui même: $\dot{m}_{ko} = \frac{P_{mi} - P_{cl}}{R'_2}$
- \dot{m}_{cl} masse d'eau échangée à la surface du tissu. $\dot{m}_{cl} = \frac{P_{cl} - P_a}{R'_4}$

Le Bilan Massique des flux entrants et sortants dans la couche d'air, nous donne l'équation suivante: $\dot{m}_{evap} + \dot{m}_{int} - \dot{m}_{ko} = 0$

Si on considère qu'il n'y a pas de stockage d'eau dans le tissu on a alors : $\dot{m}_{ko} - \dot{m}_{cl} = 0$

En fait ce qui nous intéresse c'est surtout l'évaporation au niveau de la peau. Le plus souvent on écrit les équations ci-dessus plutôt sous forme de transferts de chaleur latente au lieu de transfert de masse. $\mathcal{R}'_1, \mathcal{R}'_2, \mathcal{R}'_3$ et \mathcal{R}'_4 sont alors des résistance au transferts de chaleur latente (Pa/W)

On peut alors écrire : $E(i) = QL \dot{m}_{evap(i)} = \frac{P_{sk(i)} - P_{mi(i)}}{\mathcal{R}'_1(i)}$

$E(i) = E_{diff(i)} + E_{sw(i)} = [0,06 \cdot (1 - \omega(i)) + \omega(i)] \cdot E_{maxsk(i)}$ avec $E_{maxsk(i)} = \frac{P_{sk(i)} - P_{mi(i)}}{\mathcal{R}'_1(i)}$

avec pour chaque segment $\mathcal{R}'_1 = \mathcal{R}'_2 = \frac{R_1}{Lw \cdot IL}$, $\mathcal{R}'_4 = \frac{1}{S_{fe} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot Lw}$

$\mathcal{R}'_3 = \frac{r \cdot T_{mi}}{QL \cdot d \cdot S_{fe}}$ or $d = \frac{CV \cdot Va}{pa \cdot C_{pa}}$ d'où $\mathcal{R}'_3 = \frac{pa \cdot C_{pa} \cdot r}{QL} (R_3 \cdot T_{mi})$

De même que pour les transferts de masse on peut écrire le bilan des flux , on a alors :

Si on considère qu'il n'y a pas de stockage d'eau dans le tissu on a alors : $\dot{m}_{ko} - \dot{m}_{cl} = 0$

En fait ce qui nous intéresse c'est surtout l'évaporation au niveau de la peau. Le plus souvent on écrit les équations ci-dessus plutôt sous forme de transferts de chaleur latente au lieu de transfert de masse. $\mathcal{R}'_1, \mathcal{R}'_2, \mathcal{R}'_3$ et \mathcal{R}'_4 sont alors des résistances aux transferts de chaleur latente (Pa/W)

On peut alors écrire : $E(i) = QL \dot{m}_{evap}(i) = \frac{P_{sk}(i) - P_{mi}(i)}{\mathcal{R}'_1(i)}$

$$E(i) = E_{diff}(i) + E_{sw}(i) = [0,06 \cdot (1 - \omega(i)) + \omega(i)] \cdot E_{maxsk}(i) \quad \text{avec } E_{maxsk}(i) = \frac{P_{sk}(i) - P_{mi}(i)}{\mathcal{R}'_1(i)}$$

$$\text{avec pour chaque segment } \mathcal{R}'_1 = \mathcal{R}'_2 = \frac{R_1}{L_w \cdot IL}, \quad \mathcal{R}'_4 = \frac{1}{S_{fe} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot L_w}$$

$$\mathcal{R}'_3 = \frac{r \cdot T_{mi}}{QL \cdot d \cdot S_{fe}} \quad \text{or} \quad d = \frac{CV \cdot V_a}{p_a \cdot C_{pa}} \quad \text{d'où} \quad \mathcal{R}'_3 = \frac{p_a \cdot C_{pa} \cdot r}{QL} (R_3 \cdot T_{mi})$$

De même que pour les transferts de masse on peut écrire le bilan des flux, on a alors :

$$\frac{P_{sk} - P_{mi}}{\mathcal{R}'_1} + \frac{P_a - P_{mi}}{\mathcal{R}'_3} - \frac{P_{mi} - P_{cl}}{\mathcal{R}'_2} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{P_{mi} - P_{cl}}{\mathcal{R}'_3} - \frac{P_{cl} - P_a}{\mathcal{R}'_4} = 0$$

$$\text{soit} \quad P_{mi} = \frac{\frac{P_{sk}}{\mathcal{R}'_1} + \frac{P_{cl}}{\mathcal{R}'_2} + \frac{P_a}{\mathcal{R}'_3}}{\frac{1}{\mathcal{R}'_1} + \frac{1}{\mathcal{R}'_2} + \frac{1}{\mathcal{R}'_3}} \quad \text{et} \quad P_{cl} = \frac{\frac{P_{mi}}{\mathcal{R}'_2} + \frac{P_a}{\mathcal{R}'_4}}{\frac{1}{\mathcal{R}'_2} + \frac{1}{\mathcal{R}'_4}}$$

• BILANS THERMIQUES (HF)

(les variables soulignées sont contrôlées par le régulateur ; les variables *italiques* dépendent directement du métabolisme).

$$\text{Centre} \quad HF_{(k)} = Q_{(k)} - T_{d(k)} - Resp_{(k)} - BC_{(k)}$$

$$\text{Muscle} \quad HF_{(k+1)} = Q_{(k+1)} + \underline{Q}_{sh(k+1)} + Q_{a(k+1)} + T_{d(k)} - T_{d(k+1)} - BC_{(k+1)}$$

$$\begin{aligned}
\text{Graisse} \quad & HF_{(k+2)} = Q_{(k+2)} + T_{d(k+1)} - T_{d(k+2)} - BC_{(k+2)} \\
\text{Peau} \quad & HF_{(k+3)} = Q_{(k+3)} + T_{d(k+2)} - BC_{(k+3)} - DRYSK_{(k+3)} - E_{(k+3)} \\
\text{Sang} \quad & HF_{(29)} = \sum_{n=1}^{24} BC_{(n)} \\
\text{Tissu} \quad & HFCL(i) = DRYMI(i) - DRYCL(i)
\end{aligned}$$

Température de la couche n à l'instant t+dt :

$$T_{(n)}^{t+dt} = T_{(n)}^t + \frac{HF_{(n)}}{C_{(n)}} dt$$

Pour les deux couches de vêtements on a alors :

$$T_{cl(i)}^{t+dt} = T_{cl(i)}^t + \frac{HFCL(i)}{CCL(i)} dt \quad \text{et} \quad T_{mi(i)}^{t+dt} = \frac{\left(\frac{T_{sk(i)}^{t+dt}}{R_1} + \frac{T_{cl(i)}^{t+dt}}{R_2} + \frac{T_a}{R_3} \right)}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)}$$

• VALEURS MOYENNES ET GLOBALES

Température moyenne cutanée : $T_{sk} = \frac{\sum_{i=1}^7 T_{sk(i)} C_{(i)}}{C_{sk}}$

Température moyenne du corps : $T_{bm} = \frac{\sum_{n=1}^{29} T_{(n)} C_{(n)}}{CNN}$

Température moyenne des vêtements : $T_{clo} = \frac{\sum_{i=1}^7 T_{cl(i)} S_{(i)}}{A_{du}}$

avec $C_{sk} = \sum_{i=1}^7 C_{(i)}$ $CNN = \sum_{n=1}^{29} C_{(n)}$

Les échanges de chaleur, les quantités d'eau suées, évaporées, etc... sont calculées pour la totalité du corps (...T) ainsi que les pertes d'eau cumulées depuis le début de l'exposition (Q...), par exemple :

quantité d'eau totale évaporée sur tout le corps : $EVAPT = \sum_{n=1}^{29} E_{(n)} + RESPL$

quantité d'eau totale évaporée depuis le début de l'exposition : $QEVAG = \sum_{t=0}^{t_{final}} EVAGT^t$

• **DÉTERMINATION DU PAS DE TEMPS** : Certaines réactions physiologiques peuvent être assez rapides. Le modèle est prévu pour un pas de temps (dt) de calcul inférieur à 1 minute ; il est réduit si l'augmentation de température d'un compartiment est supérieure à 0,1°C au cours d'un pas de temps. La minute est bien inférieure au pas de temps habituellement utilisé dans nos simulations. Il a donc fallu décomposer le pas de temps (Delt) de TRNSYS en pas de temps plus petits (Δt) dans le modèle

$$\Delta t = 60 \text{ secondes} \quad \text{si} \quad \text{ABS}\left(\frac{HF(n)}{C(n)}\right) \cdot \Delta t > 0.1 \quad \Delta t = \Delta t / 2$$

• **Calcul de QL et Psat** : QL chaleur latente de vaporisation : $QL(T) = (597,5 - 0,59 \cdot T) \cdot 4180$ QL en Joule , T en °C
 Psat Pression de vapeur saturante : $Psat(T) = 0,0605 \cdot (((T + 7,06) \cdot T + 908,88) \cdot T + 9567)$ Psat en Pa et T en °C

- **SENSATIONS THERMIQUES** : Sgl : sensation globale, Sens(i) : sensation locale sur le segment i

Les sensations sont données sur l'échelle suivante :

1 très froid, 2 froid, 3 frais, 4 confort frais, 5 confort, 6 confort chaud, 7 chaud, 8 très chaud, 9 étouffant.

Les sensations thermiques, SENS, sont liées aux températures cutanées locales Tsk(i) ou moyenne TSK, mais sont aussi influencées par la température de l'air inspiré

La méthode utilisée consiste à calculer des données intermédiaires DON(j) (J= 1 à 8 , pour les 7 segment, 8 correspond au global), qui sont des températures calculées en fonction de Tsk(j) et de la température de l'air au niveau de la tête, Tair(1).

$$\text{Dans le cas n°1 pour le confort d'hiver : } \text{DON}(j) = \frac{\text{Tsk}(j) + \text{Tair}(1)}{2}$$

Puis le modèle détermine la position de ces températures dans le tableau "Températures/Sensations" ci-dessous.

Les variables de ce tableau CRI(J,S) sont dans un fichier (J numéro du segment, S valeur de la sensation).

Enfin la valeur retenue est arrondie à la valeur entière la plus proche. Des limites, inférieure à 20°C et supérieure, à 39°C ont été fixées de façon arbitraire.

	J	S ->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
TETE	1	20	24.4	25.0	26.7	29.0	31.0	33.1	34.3	35.2	36.2	39
TRONC	2	20	27.0	27.3	28.4	29.5	31.8	33.2	34.0	35.2	36.2	39
BRAS-D	3	20	24.8	25.5	26.6	28.4	31.1	32.5	34.1	35.1	35.9	39
BRAS-G	4	20	25.5	25.9	26.2	27.9	30.9	33.1	34.1	35.1	36.1	39
MAINS	5	20	23.3	24.0	25.3	27.1	30.4	33.3	34.6	35.7	35.9	39
JAMBES	6	20	24.5	24.9	26.0	28.0	30.1	32.5	33.9	35.1	35.7	39
PIEDS	7	20	22.2	22.4	23.6	25.7	29.6	32.2	32.8	34.4	35.5	39
GLOBAL	8	20	25.3	25.8	26.8	28.5	31.2	32.5	33.9	34.7	35.9	39

CHAPITRE 3 - Domaine d'Application - Règles d'Usage

HYPOTHESES DETAILLEES

Le modèle dans un premier temps n'est établi que pour le conducteur d'une voiture, dans des conditions d'hiver, avec un habillement épais défini préalablement.

Hypothèses générales sur le modèle

- L'individu est un homme "standard" en bonne santé, ne mange pas, ne dort pas, n'a pas d'émotion
(Taille : 1,75 m; Poids : 74 Kg; Surface corporelle : 1,89 m²).
- ses vêtements n'absorbent pas d'humidité et ne sont pas imperméables
- les sensations thermiques ne correspondent qu'à l'échelle définie ci-dessus, et représentent les estimations données par "l'essayeur de PSA"

Hypothèses internes au modèle

- Chaque couche (Physiologique et vêtement) est à température homogène. Pas d'échange au sein d'une même couche.
- Pas de transfert dans le sens longitudinal
- Les transferts par conduction entre les segments sont négligés
- Les segments sont reliés entre eux uniquement par le flux sanguin
- Certains membres sont regroupés ; les deux jambes, par exemple, ont la même température et sont traités comme un seul segment. Par contre les deux bras sont séparés.
- Le métabolisme basal est réparti dans toutes les couches
- Le métabolisme d'activité ou de frisson n'a lieu que dans les muscles
- Le débit sanguin est constant au centre et dans la graisse.
- Les pertes respiratoires sont prises en compte dans la couche centrale de la tête (13%) et du tronc (87%)

CONDITIONS DE VALIDITE : Le modèle n'est pas valable pour un autre milieu que l'air ou pour des conditions autres que la voiture en hiver.

LISTE DES APPLICATIONS : Détermination des réactions thermophysologiques et des sensations thermiques d'un homme dans une voiture.

EXEMPLES DE MODELES ASSOCIES : Calcul du bilan radiatif, carte des flux solaires et carte des vitesses locales en fonction du type de soufflage.

REGLES DE COHERENCE POUR L'ASSEMBLAGE : Le mode de calcul nécessite le calcul des flux nets échangés par chaque segment du sujet.

DIFFICULTES : Un grand nombre de paramètres est nécessaire. Les caractéristiques physiologiques du système contrôlé ont été établies de façon expérimentale et sont peu contestées. Par contre, les paramètres du système régulateur (températures de consigne et coefficients de contrôle) varient énormément d'un auteur à l'autre. Mais beaucoup de précautions sont nécessaires pour modifier les paramètres, car la modification d'un seul paramètre entraîne souvent des conséquences inattendues.

CHAPITRE 4 - Validation

Les versions précédentes ont été validées dans les conditions suivantes pour des applications dans le domaine de l'habitat

Validation Générale : Par comparaison avec des résultats trouvés dans la littérature :

- Variations de la température cutanée moyenne en fonction de la température opérative de la forme $T_{sk} = f(T_{op}, M)$
- Différence verticale (tête-pieds) de température d'air : expériences réalisées par Tanaka.

Validation détaillée : Dans des conditions de l'habitat

Comparaison avec des expériences effectuées au Laboratoire de Physiologie et Psychologie Environnementales, L.P.P.E., C.N.R.S. Strasbourg.

Recherche financée par P.C.A-habitat-MELLAT, l'A.F.M.E., G.d.F. et E.d.F

- conditions proches de la neutralité thermophysiological.
- fortes hétérogénéités de l'ambiance thermique.
- Expériences "confort", au limites de l'inconfort local

Validation dans le domaine des véhicules : Validation pour le conducteur au cours de 3 gammes d'expériences, soit quatre heures et demi d'exposition, effectuée en soufflerie avec une Citroën ZX

ENVIRONNEMENT ET MISE EN OEUVRE: Simulations effectuées sous TRNSYS au - L.E.S.E.T.H. - U.P.S. Toulouse.

CHAPITRE 5 - Références Bibliographiques

• Le modèle physique -> physiologie

- Modèle de base de physiologie a été créé par J.A.J. Stolwijk et J.D. Hardy, en 1970, pour les programmes Skylab et Apolo de la NASA

STOLWIJK J.A.J. - *Mathematical model of thermoregulation*. Physical & behavioral temperature regulation, edited by J.D. Hardy, A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk. Thomas publisher Springfield, chap. 48, pp.703-721, 1970.

STOLWIJK J.A.J., HARDY J.D. - *Control of body temperature*. Handbook of physiology - reaction to environmental agents, Chap. 4, pp.45-68, 1977.

THELLIER E. - *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Un approche pour l'étude du confort*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse n°510, Juillet 1989.

• la partie physiologie -> sensations

GALEOU M. - *La sensation thermique chez l'homme dans son habitat : des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse n°1008, octobre 1991.

• Applications aux Véhicules

Françoise Thellier, Frédéric Althabegoity, Alain Cordier, Françoise Monchoux, Guy Serin. Rapports N° 1, 2, 3, 4 et 5.

LES VARIABLES DU MODULE TYPE 54 MATHER-HIVER version 4.0

<u>Nomenclature:</u>		K	Constantes (<i>fich.</i> : Lues dans le fichier de paramètres physiologiques <i>cal.</i> : calculées)		
P	Paramètres	I	Inputs, Entrées	V Variables	T6 Variables spécifiques à TRNSYS
§ §	Valeur instantanée de la variable			§ § T	Valeur totale pour tout le corps $\text{§ § T} = \sum_{i=1}^n \text{§ § (i)}$
§ § I	Valeur locale pour un segment			§ § SK	Valeur locale pour la peau (SK ->skin)
§ § M	Valeur moyenne sur le pas de temps TRNSYS			$\text{§ § M} = \sum \text{§ § T} \cdot \Delta t / \sum \Delta t$ avec $\sum \Delta t = \text{Delt}$ (pas de temps TRNSYS)	
Q § §	Quantité cumulée depuis le début de la simulation			$\text{Q § §} = \sum \text{§ § T} \cdot \Delta t$	
2 fonctions	PSAT(T) : Pression de vapeur saturante à température T		et		QL(T) : Chaleur latente de vaporisation à température T
Pour le système de thermorégulation		STRI	vasoconstriction		S § § coefficient de contrôle cutané
		DIL	vasodilatation	<--- § § --->	C § § coefficient de contrôle central
		CHIL	frisson		P § § coeff. produit central & cutané
		SWEAT	sudation		X § § valeur maximale ($0 \leq \text{§ §} \leq \text{X § §}$)

Remarques : • Les unités données sont celles utilisées dans le programme et sont en système internationale

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
ACT	1	Métabolisme total (M_{tot}) $ACT = XIN(1)$ $ACT = ACT * 3700 / 4180 * ADU$	W	-	I
ADU	1	Surface de peau (aire de Dubois A_{DU})	m ²	1,8877	K
BC	29	Echange de chaleur par convection sanguine (<i>Blood Convection</i>) $BC(N) = BF(N) * CS(TT(N) - TT(29)) * (1 - BPH)$	W	-	V
BF	29	Débit sanguin (<i>Blood Flow</i>)	l/s	-	V
BFB	29	Débit sanguin Basal (<i>Blood Flow Basal</i>)	l/s	fich.	K
BPH	1	Coef. de préchauffage du sang (<i>Blood PreHeating</i>)	-	0,3	K
BQ	1	augmentation du débit sanguin en fonction de l'activité	l/s W		K
BULL	1	Coef. de Bullard	°C ⁻¹	10	K
C	29	Capacité calorifique	J/°C	fich.	K
CAS	1	cas étudié cas=1 -> conditions d'hiver vêtements épais	-	-	P
CCHIL	1	Coef. de contrôle des frissons (central)	W/°C	210	K
CCL	7	capacité calorifique des habits	J/kg°C	fich	K

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
CDIL	1	Coef. de contrôle de vasoDILATion (central)	l/s°C	0,042	K
CHILI	7	Coef. de répartition des frissons $\sum CHILI(i) = 1$	-	fich.	K
CHILL	1	Signal de commande des frissons (central) $CHILL = -CCHIL * ER1 - SCHIL * ERSK - PCHIL * ERP$ $0 \leq CHIL \leq XCHIL$	W	-	V
CLI	1	Coef. de perméabilité des vêtements (I_L indice de lotens)	-		K
CLW	1	Coef. de Lewis (L_w)	°C/Pa	0.0016	K
CNN	1	Capacité calorifique totale $CNN = \sum C(n)$	J/°C	250173	K
COLD	29	Signal de froid de chaque segment si $ERROR < 0$ $COLD(N) = -ERROR(N)$	°C	≥ 0	V
COLDSK	1	Signal de froid de la peau $COLDSK = \sum COLD(i) * SKINR(i)$	°C		V
CONDM	1	Coef. de CONduction Moyen du corps $CONDM = (HP - (HFLOW - RESPL - RESPS)) / (ADU * (TT(29) - TS))$	W/°C		v
CONVCL	7	Echange CONVectif à la surface des habits $CONVCL(I) = HCS(I) * FCL(I) * (TCL(I) - TA(I))$	W		V
CONVM,T	1	Flux CONVectif Moyen & Total $CONVT = \sum CONVCL(I) + RESPS$	W		V
CONVO	7	Echange CONVectif au niveau de la peau $CONV = HCS(i) * (TT(i) - TA(i))$	W		V
CPA	1	capacité calorifique massique de l'air C_{pa}	J/kg °C	1006	K
CPF	1	capacité calorifique massique des fibre C_{pf}	J/kg °C	fich	K
CS	1	capacité calorifique du sang	J/kg °C	4180	K
CSK	1	Capacité calorifique totale de la peau	W/°C	141757	K
CSTRI	1	Coef. de contrôle de vasoconSTRiction (central)	l/s°C	300	K
CSW	1	Coef. de contrôle de la sudation (central)	W/°C	420	K
CTR	7	Coefficient de transparence au rayonnement des vêtements	-	fich	K
CV	7	coefficient, caractérisant la porosité des habits	J/m°C	fich	K
DELT	1	Pas de temps de TRNSYS	h		T7
DH2O	7	Variation de masse d'eau sur la peau (Δm_{H_2O}) $DH2O(I) = (((SUD(I) - E(4*I)) / QL(TT(4*I))) - DRIP(I)) * DT$	kg/s		V
DILAT	1	Signal de commande de vasoDILATation $DILAT = CDIL * ER1 + SDIL * ERSK + PDIL * ERP$ $0 \leq DILAT \leq XDIL$	l/s		V
DRIP	7	Quantité d'eau qui ruissèle ($DRIPping$) $DRIP(I) = (SUD(I) / QL(TT(4*I))) * (1 - REST(I)) + (H2O(I) - H2OMX(I)) / DT$	kg/s		V
DRIPM & T	1	Quantité d'eau qui ruissèle Moyenne & Totale	kg/s		V

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
DRYCL	7	Echange de chaleur sensible au niveau des vêtements $DRYCL(I) = CONV(I) + RAY(I)$	W		V
DRYMI	7	Echange de chaleur sensible par convection sous vestimentale $DRYMI(I) = TMI(I) - TA(I) / R3$	W		V
DRYSK	7	Echange de chaleur sensible au niveau de la peau $DRYSK(I) = (TSK(I) - TMI(I)) / R1$	W		V
DSWEAT	1	Variation de SWEAT $DSWEAT = (SWEAT - RSWEAT) * (1 - EXP(-DT/180))$	W		V
DT	1	Pas de temps interne du modèle	s		V
DTDT	1	$\Delta T / \Delta t$	°C/s		T6
E	29	perte de chaleur par Evaporation $E(N+3) = W(I) * EMAX(I) + EDIF(I)$	W		V
EAUMAX	1	Masse d'eau maximale sur la peau	kg	0,08	K
EB	29	perte de chaleur par Evaporation basale	W	fich.	K
EDIF	7	perte de chaleur par Evaporation diffuse $EDIF(I) = 0.07 * (1 - W(I)) * EMAX(I)$	W		V
EMAXSK	7	perte de chaleur par Evaporation maximale $EMAXSK(I) = (PSSK(i) - PCL(I)) / RP4$	W		V
ER1	1	Coef. de commande central $ER1 = WARM(1) - COLD(1)$	°C		v
ERP	1	Coef. de contrôle multiplicatif $ERP = WARM(1) * WARMSK - COLD(1) * COLDSK$	°C		V
ERROR	29	Signal d'erreur $ERROR(N) = (TT(N) - TSET(N)) + (RATE(N) * F(N))$	°C		v
ERSK	1	Coef. de commande périphérique cutané $ERSK = WARMSK - COLDSK$	°C		V
EVAGM & T	1	Quantité d'eau totale évaporée au niveau de la peau $EVAGT = \sum E(4*I) / QL(TT(4*I))$	kg		V
EVAPM & T	1	perte par évaporation Moyenne & Totale $EVAPT = \sum E(4*I) + RESPL$	W		V
F	29	Vitesse de variation des températures $F(N) = HF(N) / C(N)$	°C/s		V
FCL	7	Facteur d'augmentation dû aux vêtements	%	fich	K
FL	7	Vitesse de variation de la température des vêtements	°C/s		V
FVF	7	Fraction de volume occupé par les fibres	-	fich	K
H2O	7	Quantité d'eau sur la peau $H2O(I) = H2O(I) + DH2O(I) \quad 0 \leq H2O(I) \leq H2OMX(I)$	kg		V
H2OMX	7	Quantité d'eau maximale sur la peau $H2OMX(I) = EAUMAX * PERSUR(I) / 100.$	kg	cal.	K
HC & HCO	7	Coef. de convection $HC(I) = HCO(I) * VA(I) ** 0.5$	W/°Cm ²		V

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
HF	29	Variation du stockage de chaleur (<i>Heat Flux</i>)	W		V
HFCL	7	Variation du stockage de chaleur dans la couche de tissu	W		V
HFLOM & T	1	Somme des flux total moyen & stockage de chaleur totale	W		V
HP	1	Production totale de chaleur métabolique (<i>Heat Production</i>)	W		V
HPM	1	Production totale moyenne de chaleur	W		V
I		Indice de boucle (en général pour les segments i=1,7)	W		
ICOMPT	1	Compteur de pas de temps			
INFO	10	Paramètres de TRNSYS			T6
I.....		I21/I31/I32, IBLOQ, IGAM, IOCIL1,2,3 Indices pour le blocage des oscillations			
K	1	Indice de boucle (<i>en général pour les 4 couches</i>)			
N	1	Indice de boucle (<i>en général pour les 29 compartiments</i>)			
NI	1	nombre d'inputs			T6
OUT	40	Sorties TRNSYS			T6
PAIR	1	Pression de vapeur d'eau dans l'air	Pa		I
PAR	20	Paramètres de TRNSYS			T6
PCHIL	1	Coef. de contrôle des frissons, (produit)	W/°C ²	35	K
PCL	7	Pression de vapeur à la surface des habits	Pa		V
PCONT	7	Pourcentage de surface en contact	%	fich.	K
PDIL	1	Coef. de contrôle de vasodilatation (produit)	l/s°C ²	0,007	K
PERSUR	7	Pourcentage de surface corporelle	%	fich.	K
PMI	7	Pression de vapeur d'eau dans la couche d'air sous vestimentaire	Pa		V
PSAT	foct	pression de vapeur saturante à température T	Pa		fct
PSK	7	Pression de vapeur à la surface de la peau	Pa		V
PSSK	7	Pression de vapeur saturante à la surface de la peau	Pa		V
PSTRI	1	Coef. de contrôle de vasoconstriction (produit)	l/s°C ²	50	K

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
PSW	1	Coef. de contrôle de sudation (produit)	W/°C ²	70	K
PTR	7	Pente du taux de reprise	-	fich	K
Q	29	Production de chaleur métabolique	W		V
QB	29	Production de chaleur métabolique basal	W	fich.	K
QBT	1	Métabolisme basal total $QBT = \sum QB(n)$	W	81	K
QDRIP	1	Quantité d'eau totale qui ruissèle depuis le début	kg		V
QEVAP	1	Quantité d'eau totale évaporée depuis le début	kg		V
QL	fct	Calcul de la chaleur latente de vaporisation à température T $QL(T) = (597,5 - 0,59 T) \cdot 4180$	J/kg		fct
QSUD	1	Quantité d'eau totale transpirée depuis le début	kg		V
RATE	29	Sensibilité dynamique $RATE(N)=0.0$	°C/(°C/s)	0	K
RAYM & T	1	Flux total rayonné Moyen et Totale	W		V
RAYO	7	flux net rayonné au niveau des vêtements (calculé par le type 70)	W		I
RAYSK	7	Flux rayonné au niveau de la peau (calculé par le type 70)	W		I
RCL	7	Résistance thermique des vêtements	m ² °C/W	fich	P
RENEW	1	Rendement du travail externe	-		P
RESPL	1	Echange respiratoire de chaleur latente $RESPL=0.0023 \cdot ACT \cdot (PSAT(TEXP)-PAIR)$	W		V
RESPS	1	Echange respiratoire de chaleur sensible $RESPS=0.0014 \cdot ACT \cdot (TEXP-TA(1))$	W		V
REST	7	Rendement Evaporatoire de la Sudation Thermique $REST(I)=1-(0.5 \cdot W(I) \cdot W(I))$	-		V
RO	1	p masse volumique de l'air	kg/m ³	1,177	K
RSWEAT	1	Sudation résiduelle $RSWEAT=RSWEAT+DSWEAT$	-		V
RT _{1,2,3,4}	7	résistance aux transferts de chaleur sensible	°C/W	cal	K
RV _{1,2,3,4}	7	résistance aux transferts de masse latente	Pa/W	cal	K
SBF	1	Débit sanguin cutané total (<i>Skin Blood Flow</i>) $SBF = \sum BF(4 \cdot I)$	l/s		V
SCHIL	1	Coef. de contrôle périphérique des frissons	W/°C	30	K
SDIL	1	Coef. de contrôle périphérique de vasodilatation	W/°C	29	K

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
SENS	7	Sensation thermique	-		V
SEPS	1	ε , Variable interne à l'impression des résultats		0,01	K
SF	7	Surface cutanée de chaque segment $SF(I)=ADU * PERSUR(I)/100.$	m ²	cal	K
SFE	7	Surface d'échange convectif entre Francis et l'air	m ²		K
SKINC	7	Coef. de répartition de vasoconstriction $\Sigma SKINC = 1$		fich.	K
SKINR	7	Poids de chaque seg. pour la sensibilité calcul de WARMSK et COLDSK $\Sigma SKINR = 1$		fich.	K
SKINS	7	Coef. de répartition de sudation $\Sigma SKINS = 1$		fich.	K
SKINV	7	Coef. de répartition de vasodilatation $\Sigma SKINV = 1$		fich.	K
SORTI	1	Variable interne à l'impression des résultats	h		V
SSTRI	1	Coef. de contrôle périphérique vaso constriction	W/°C	50	K
SSW	1	Coef. de contrôle périphérique de sudation	W/°C	70	K
STIME	1	Temps	h		V
STOK	100	Variable de stockage d'un pas de temps sur l'autre			T6
STRIC	1	Coef. de contrôle vasoconstriction $STRIC = -CSTRI * ER1 - SSTRI * ERSK - PSTRI * ERP \ 0 \leq STRIC \leq XSTRI$	l/s		V
SUD	7	Sudation $SUD(I) = EDIF(I) + SKINS(I) * RSWEAT * (2. ** (ERROR(4 * I) / BULL))$	W		V
SUDM & T	1	Sudation totale Moyenne & Totale	g/s		V
SWEAT	1	Coef. de contrôle de sudation $SWEAT = CSW * ER1 + SSW * ERSK + PSW * ERP \ 0 \leq SWEAT \leq XSW$	W		V
TA	7	Température de l'air ambiant	°C		I
TBM	1	Température moyenne du corps $TBM = \Sigma TT(N) * C(N) / CNN$	°C		V
TC	29	Coef. de conduction entre 2 couches $TD(N) = TC(N) * (TT(N) - TT(N+1))$	W/°C	fich.	K
TCL	7	Température des habits	°C		V
TCLO	1	Température moyenne des habits $TCLO = \Sigma (TCL(i) * SF(i)) / Adu$	°C		V
TD	29	Echange conductif entre 2 couches	W		V
TEXP	1	Température de l'air expiré $TEXP = 32.5 + 0.077 * TA(1) + 0.027 * PAIR$	°C		V
TFINAL	1	Temps final de simulation	h		T6

Noms	Dim	Désignation	Unité	Val	Var
TIME	1	Temps	h		T6
TIMEO	1	Temps de début de simulation	h		T6
TMI	7	Température des couches d'air sous vestimentaire	°C		V
TSET	29	Température de consigne	°C	fich.	K
TSK	1	Température moyenne cutanée	°C		V
TT	29	Température des 29 segments	°C		V
U	29	Valeur absolue de F	°C/s		V
VA	7	Vitesse de l'air	m/s		I
W	7	Mouillure cutanée	-		V
WARM	29	Signal de chaud	°C		V
WARMSK	1	Signal total cutané de chaud	°C		V
WORK	1	Travail externe	W		V
WORKI	7	Coef. de répartition du travail	-	fich.	K
WTOT	1	Mouillure cutanée totale	%		V
XCHIL	1	valeur maximale de contrôle de frisson	W	300	K
XDIL	1	valeur Max. du coef. de vasodilatation	l/s	0,042	K
XIN	35	Inputs de TRNSYS			T6
XL	1	Coef. de variation du métabolisme au chaud	-		V
XSTRI	1	valeur Max. du coef. de vasoconstriction	l/s	200	V
XSW	1	valeur Max. du coef. de sudation	W	465	K
XXL	1	coefficient de pondération de l'influence de la sudation sur le métabolisme	W	3483	K

UNIVERSITE PAUL SABATIER



P.S.A. - VALEO - LESETH

Contrat "Mannequin thermique - Thermorégulation"

CALCUL DES TRANSFERTS RADIATIFS ENTRE UN CONDUCTEUR ET SON VEHICULE

Juin 1994 - Version 1.0

Frédéric ALTHABÉGOÏTY, Françoise MONCHOUX, Françoise THELLIER

**L.E.S.E.T.H. - Laboratoire Etudes des Systèmes et Environnement Thermique de l'Homme
U.P.S. - 118, Route de Narbonne - 31062 TOULOUSE Cedex - Téléphone : 61 55 68 29 - Fax : 61 55 60 21**

CHAPITRE 1 : Fiche Signalétique

Objet : Calcul des échanges par rayonnement entre les surfaces du conducteur et l'habitacle de la voiture
Phénomènes : Transferts radiatifs
Hypothèses : Surfaces grises, gaz non absorbant, géométrie de l'ensemble bien défini
Méthode : Calcul des flux nets
Caractère : ☐ intrinsèque ☐ interface ☒ couplage ☐ macro-modèle
Degrés de liberté : 27

RESUME

Calcul des transferts radiatifs entre les 20 surfaces intérieures de la voiture et les 7 surfaces des segments du corps humain.
 Les flux nets rayonnés sont calculés à partir des températures de parois, des surfaces des habits ou de la peau du conducteur et des facteurs de forme calculés antérieurement.

MODE D'APPROCHE	<input type="checkbox"/> simplifié	<input checked="" type="checkbox"/> détaillé	<input type="checkbox"/> empirique	<input type="checkbox"/> conventionnel
TYPE	<input type="checkbox"/> algorithmique	<input checked="" type="checkbox"/> équationnel	<input checked="" type="checkbox"/> jeux de données	<input type="checkbox"/> logique
ETAT	<input type="checkbox"/> embryonnaire	<input type="checkbox"/> en développement	<input type="checkbox"/> à affiner	<input checked="" type="checkbox"/> finalisé
VALIDATION	<input type="checkbox"/> qualitative	<input checked="" type="checkbox"/> analytique	<input type="checkbox"/> numérique	<input type="checkbox"/> expérimentale

INFORMATIONS GENERALES

Rédacteur et Suivi de la fiche

F. THELLIER, LESETH - UPS Toulouse

Date de la fiche : 7/06/94

Date de la modification	Objet de la modification	Numéro de version	Auteur de la modification
05/1993	création du modèle	0.0	F. ALTHABÉGOITY & F. THELLIER
05/1994	version définitive	1.0	" " " " " "

CHAPITRE 2 : Description formelle

NOMENCLATURE : (Pour les Variables internes : Voir liste des variables du modèle)

Variables de couplage en "entrée" :

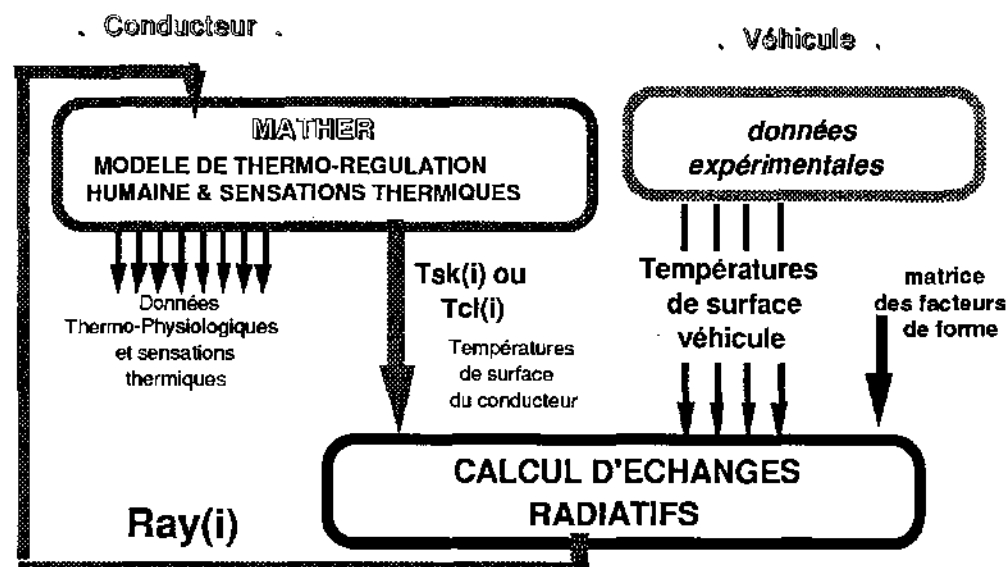
Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
TT(i)	20 Temp. de surface de l'habitacle	°C	réel	-15 à 50		
TT(20+i)	7 Temp de surface du conducteur	°C	réel	25 à 35		

Variables de couplage en "sortie" :

Nom	Définition	Unité	Type	Domaine	Valeur par défaut	Condition
RAY(i)	7 densités de flux net des surfaces	W/m ²	réel			
RAYO(i)	7 flux nets des segments du corps	W	réel			

SCHÉMA BLOC

Modèle complet, liaisons entre
modèle de thermophysiology et
environnement thermique
(véhicule)



FORMULATIONS

A partir des facteurs de forme, $FF(i,j)$, des températures des 20 groupes de surface de l'habitacle de la voiture et des 7 températures de surface des segments du conducteur. On calcule le bilan radiatif de l'ensemble voiture-conducteur, afin de connaître les flux nets émis par le sujet.

On note $FF(i,j)$, le facteur de forme de la surface i vers la surface j , (i de 1 à ns et j de 1 à ns ; ns nombre de surfaces, dans notre cas $ns=27$)
 Au cours du calcul il n'y a pas de différence entre surface du conducteur ou du véhicule. Les facteurs de forme sont calculés au préalable.

Il faut tout de même effectuer une vérification de ces facteurs de forme : $SIGF(i) = \sum_{j=1}^{ns} FF(i,j)$ et $SIGF(i)$ doit être égal à 1

On note:

$$\begin{pmatrix} \phi \end{pmatrix}$$

Vecteur des flux nets

$\phi(i)$ flux net échangé par la surface i

$$\begin{pmatrix} \phi \end{pmatrix}$$

Vecteur des densités de flux net

$\phi(i)$ densité de flux net échangé par la surface i

$$\begin{bmatrix} FF \end{bmatrix}$$

matrice des facteurs de forme

$FF(i,j)$ facteur de forme de la surface i vers j

$$\begin{pmatrix} \varepsilon \end{pmatrix}$$

Vecteur des émissivités

$\varepsilon(i)$ émissivité de la surface i

$$\begin{pmatrix} M^0 \end{pmatrix}$$

Vecteur des émittances des surfaces noires

$M^0(i) = \sigma T_{(i)}^4$ émittance de la surface i

$$\begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \end{bmatrix} \quad \text{la matrice unité} \quad \delta_{i,j}=0 \quad \text{sauf si } i=j : \delta_{i,i}=1$$

$$\begin{bmatrix} \text{AMT} \end{bmatrix} \quad \text{matrice inverse :} \quad \begin{bmatrix} \text{AMT} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} - (1-\epsilon) \begin{bmatrix} FF \end{bmatrix} \right\}^{-1} \quad \text{ou} \quad \text{AMT}(i,j) = \{ \delta_{i,j} \cdot (1-\epsilon(i)) FF(i,j) \}^{-1}$$

Les flux nets radiatifs sont donnés par l'expression (R. Bru):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \phi \end{bmatrix} &= \left\{ \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1-FF \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{AMT} \end{bmatrix} \cdot (1-\epsilon) \right\} \cdot \begin{bmatrix} 1-FF \end{bmatrix} \cdot (\text{EPS}) \\ &= \left\{ \begin{bmatrix} 1-FF \end{bmatrix} \cdot (\text{EPS}) \right\} - \left\{ \begin{bmatrix} 1-FF \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{AMT} \end{bmatrix} \cdot (1-\epsilon) \cdot \begin{bmatrix} 1-FF \end{bmatrix} \cdot (\text{EPS}) \right\} = \begin{pmatrix} FE \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} RFE \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Les calculs matriciels étant assez lourds nous devons passer par des étapes intermédiaires.

- Valeur moyenne des températures de surface T4M :

$$T4M = \left[\sum_{i=1}^{ns} TR(i)^4 \right] / ns$$

- calcul de EPS(i), égal M⁰(i) pondéré par T4M :

$$EPS(i) = \sigma \cdot (TR(i)^4 - T4M^4)$$

- calculs intermédiaires :

$$\begin{bmatrix} FL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-FF \end{bmatrix}$$

$$FL(i,j) = \delta_{i,j} - FF(i,j)$$

$$\begin{pmatrix} FE \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} FL \end{bmatrix} \cdot (\text{EPS})$$

$$FE(i) = \sum_{j=1}^{ns} F(i,j) \cdot EPS(j) = \sum_{j=1}^{ns} F(i,j) [\sigma \cdot (TR(j)^4 - T4M^4)]$$

$$\begin{pmatrix} RFE \end{pmatrix} = (1-\epsilon) \cdot \begin{pmatrix} FE \end{pmatrix}$$

$$RFE(i) = [1-\epsilon(i)] FE(i) = [1-\epsilon(i)] \left\{ \sum_{j=1}^{ns} F(i,j) [\sigma \cdot (TR(j)^4 - T4M^4)] \right\}$$

$$ARFE(i) = \sum_{j=1}^{ns} AMT(i,j) \cdot RFE(j)$$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} ARFE \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} AMT \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} RFE \end{pmatrix} \\ - \text{flux reçu} \quad \begin{pmatrix} RFE \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 - F F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} AMT \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ARFE \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \text{densité de flux net pour les 7 segments du conducteur : } \begin{pmatrix} \phi \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} FE \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} RFE \end{pmatrix} & \phi(i) &= FE(i) - RFE(i) \end{aligned}$$

- les flux nets émis par les 7 segments du conducteur sont obtenus en multipliant leur densité de flux par leur surface respective (S)

$$\begin{pmatrix} \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S \end{pmatrix} \qquad \phi(i) = \varphi(i) \cdot S(i)$$

$$\begin{aligned} - \text{Flux total émis par le conducteur :} \quad SIFI &= \sum_{i=1}^7 \phi(i) \end{aligned}$$

CHAPITRE 3 - Domaine d'Application - Règles d'Usage

HYPOTHESES DETAILLEES :

- Le modèle n'est établi que pour le conducteur d'une voiture, dont la géométrie est définie préalablement,
- La voiture est représentée par 20 surfaces et le conducteur par 7 ,
- La gaz ne participe pas aux échanges, il est ni absorbant ni émissif,
- Seul le rayonnement infra-rouge est pris en compte,
- Les surfaces sont considérées comme des surfaces grises ,
- L'émission est Lambertienne,

LISTE DES APPLICATIONS : Le modèle calcule les différents flux entre les diverses surfaces de l'ensemble habitacle - conducteur

EXEMPLES DE MODELES ASSOCIES : Calcul des facteurs de forme, modèle d'inversion de matrice

REGLES DE COHERENCE POUR L'ASSEMBLAGE : Le mode de calcul nécessite le calcul des températures pour chaque surface

DIFFICULTES : Le programme nécessite de nombreux relevés de températures de paroi ainsi que les températures de surfaces du conducteur à chaque pas de temps.

CHAPITRE 4 - Validation

Comparaisons avec les résultats d'un autre logiciel

ENVIRONNEMENT ET MISE EN OEUVRE: Simulations effectuées sous TRNSYS au - L.E.S.E.T.H. - U.P.S. Toulouse.

CHAPITRE 5 - Références Bibliographiques

BRU R. - Modélisation d'un habitat solaire, application à la simulation d'échanges thermiques cutanés. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse , décembre 1983.

THELLIER F. - *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche pour l'étude du confort.* Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse n°510, Juillet 1989.

Frédéric Althabegoity, Alain Cordier, Françoise Monchoux, Guy Serin, Françoise Thellier Rapports N° 1, 2 , 3, 4 et 5 .

Variables internes du modèle

K : Constantes **P** : Paramètres **V** : Variables

Remarques : Les unités sont en S.I. et sont celles utilisées dans le programme . Attention les inputs et ouputs ne sont pas en unités TRNSYS .

Nom	dim	Définition	unités	
AMT	27*27	Matrice inverse		
ARFE	27	valeur intermédiaire pour le calcul du flux net		V
EMI	27	Emissivité des 27 groupes de surfaces , ϵ		P
EPS	27	valeur intermédiaire pour le calcul du flux net		V
FE	27	flux émis (et valeur intermédiaire pour le calcul du flux net)		V
FF	27*27	Facteur de forme calculé par le programme "FCTFRM" (VALEO)		K
FL	27*27	variable intermédiaire pour le calcul du flux net		V
FR	27	densité de flux net rayonné - ϕ	W / m ²	V
FRS	7	Flux net rayonné des 7 segments du conducteur - ϕ	W	V
RFE	27	Flux reçu (valeur intermédiaire pour le calcul du flux net)		V
SIFI	1	Somme de flux nets échangés par le conducteur		
SIG	1	constante de Boltzmann - σ	$\sigma = 5,67.10^{-8}$	W/m ² K ⁴ K
SIGF	27	somme sur j des FF(i,j)		V
SURF	7	surfaces des segments du conducteur - S	m ²	P
TR	27	températures des différents groupes de surfaces de l'habitable et conducteur	°C	I
T4M	1	valeur moyenne de TR ⁴	°C ⁴	V

```

SUBROUTINE TYPE54 (TIME,XIN,OUT,T,DTDT,PAR,INFO)
SAVE
DIMENSION XIN(40),PAR(10),OUT(50),INFO(10),STOK(100)
COMMON /SIM/TIMEO,TFINAL,DELT
C *****
C          MA.THER      Hiver
C  MODELE DE THERMOREGULATION HUMAINE DANS UNE VOITURE
C -----
C  - LESETH - UNIVERSITE PAUL SABATIER - TOULOUSE -
C  Laboratoire Etudes des Systemes et Environnement Thermique de l'Homme
C *****
C
C  Version - 0.0 - Septembre 1992 - version LESETH pour l'habitat
C  Version - 1.0 - Octobre 1992   - séparation des 2 bras
C          - 1.1 - janvier 1993   - ajout des sensations
C          - 1.2 - Mars 1993      - modification pour le siege
C          - 2.0 - Mai 1993       - francis dans la voiture
C          - 3.0 - Janvier 1994   - sensations avec (Tsk + Ta)/2
C          - 4.0 - Juin 1994      - Unités S.I. - Version finale contrat I
C
C  - - - - - Définition des cas - - - - -
C  cas=1: Hiver - vêtements Epais; cas=2: Ete - vêtements Legers
C  cas=3: Hiver - vêtements Legers; cas=4: Ete - vêtements Epais
C *****
C
C  fichier 14 = "tous les parametres du modèle"
C  fichier 16 = "resultats internes"
C
C  CHARACTER*20 TEXT, NOM
C  CHARACTER*40 NOM3
C  CHARACTER*15 JH
C  CHARACTER*1  MM(20)
C  EQUIVALENCE (NOM,MM(1))
C
C  Variables pour les 29 compartiments (* B -> donnees Basales)
C
C  DIMENSION QB(29),Q(29),EB(29),E(29),BFB(29),BF(29),BC(29)
C  DIMENSION TSET(29),TT(29),TC(29),TD(29),C(29)
C  DIMENSION ERROR(29),WARM(29),COLD(29),RATE(29),F(29),HF(29)
C
C  Variables pour les 7 segments
C  1/Tete;2/Tronc;3/Bras Droit;4/Bras Gauche;5/Mains;6/Jambes;7/Pieds
C  4 couches par segment : Centre - Muscle - Graisse - Peau -
C  le sang est le 29 eme compartiment
C
C  DIMENSION VA(7),TA(7),PERSUR(7),PCONT(7),SF(7),SFE(7)
C  DIMENSION HC(7),HCO(7),DRYSK(7),DRYCL(7),EVG(7)
C  DIMENSION CONVCL(7),CONVO(7),RAYCL(7),RAYSK(7),RAYSOL(7)
C  DIMENSION W(7),PSSK(7),PSK(7),EDIF(7),DRIP(7),REST(7)
C  DIMENSION H2OMX(7),H2O(7),DH2O(7),SUD(7),PCL(7),EMAXSK(7)
C  DIMENSION SKINR(7),SKINS(7),SKINC(7),SKINV(7),WORKI(7),CHILI(7)
C
C  DIMENSION RCL(7),FCL(7),TCL(7),PMI(7),TMI(7),CV(7),CTR(7)
C  DIMENSION FL(7),HFCL(7),DRYMI(7),CCL(7)
C  DIMENSION RT1(7),RT2(7),RT3(7),RT4(7),RP1(7),RP2(7),RP3(7),RP4(7)
C  DIMENSION CRI(8,11),DON(8),ISENS(8)
C  DATA TK/273.15/
C
C ***** ENTREE DES PARAMETRES *****
C
C  IF(INFO(7).GE.0) GO TO 100
C  INFO(5)=0
C  INFO(6)=50
C  INFO(9)=1
C  CALL TYPECK(1,INFO,38,1,0)
C  CAS=PAR(1)
C  DT=60.

```

```

C
C----- Ouverture du fichier de résultats - file 16 -----
C
      INQUIRE (UNIT=4, NAME=NOM)
C
      DO 5 L=1,20
5         IF (MM(L).EQ.' ') GO TO 10
10        CONTINUE
          LL=L-5
          REWIND (10)
          READ (10,2000) JH
2000       FORMAT (1X,A15)
          REWIND (10)
          NOM3=NOM(:LL) //' .RESU(' //JH//') '
          OPEN (16, FILE=NOM3)
C
C----- LECTURE DES CONSTANTES -----
C
      READ (14,2100) TEXT
2100     FORMAT (A30)
      WRITE (*,*) 'On lit le fichier des conditions ',TEXT
C - - - - Lecture des parametres physio & tableau de sensation - -
      READ (14,*) (M,C(N),QB(N),EB(N),BFB(N),TC(N),TSET(N),N=1,29)
      READ (14,*) (PERSUR(I),PCONT(I),HCO(I),RCL(I),FCL(I),CTR(I)
1         ,CCL(I),CV(I),I=1,7)
      READ (14,*) (SKINR(I),SKINS(I),SKINC(I),SKINV(I)
1         ,WORKI(I),CHILI(I),I=1,7)
      READ (14,*) CSW,SSW,PSW,XSW,CDIL,SDIL,PDIL,XDIL
      READ (14,*) CSTRI,SSTRI,PSTRI,XSTRI,CCHIL,SCHIL,PCHIL,XCHIL
      READ (14,*) QBT,CLW,CNN,CSK,ADU,BPH,BULL,
1         EAUMAX,CLI,BQ,CS,XXL,RENW
      READ (14,*) ((CRI(I,J),J=1,11),I=1,8)
C
C
C----- CONDITIONS INITIALES -----
C
      DO 15 N=1,29
          F(N)=0.0
          RATE(N)=0.0
          TSET(N)=TSET(N)+TK
          TT(N)=TSET(N)
15     CONTINUE
          RSWEAT=0.0
          QEVAG=0.0
          QDRIP=0.0
          QSUD=0.0
          QHFLO=0.0
      DO 25 I=1,7
          SF(I)=ADU*PERSUR(I)
          SFE(I)=SF(I)*(1-PCONT(I))
          H2O(I)=0.0
          W(I)=0.0
          H2OMX(I)=EAUMAX*PERSUR(I)
          FL(I)=0.0
25     CONTINUE
          TD(29)=0.0
          E(29)=0.0
          Q(29)=QB(29)
          BF(29)=BFB(29)
          BC(29)=0.0
100    CONTINUE
C
C ***** DEBUT DES CALCULS A CHAQUE PAS DE TEMPS TRN6 *****
C
      ACT=XIN(1)
      IF (ACT.LE.10) ACT=ACT*58.
      ACT=ACT*ADU
      IF (ACT.LE.100) THEN

```

```

      WORK= ACT-QBT
      IF (WORK.LE.0.) WORK=0.0
    ELSE
      WORK=(ACT-QBT)*(1-RENEW)
    ENDIF
    DO 110 I=1,7
      TA(I)=XIN(I+3)+TK
      VA(I)=XIN(I+10)
      RAYSOL(I)=-XIN(I+31)
      RAYCL(I)=(1-CTR(I))*(XIN(I+17)+RAYSOL(I))
      RAYSK(I)=CTR(I)*(XIN(I+24)+RAYSOL(I))
C
110  CONTINUE
C
      HUMR=XIN(2)
      IF (HUMR.LE.5) HUMR=5
      TVOIT=XIN(3)+TK
      PAIR=PSAT(TVOIT)*HUMR/100
      DO 120 I=1,7
        K=4*I-3
        HC(I)=HCO(I)*VA(I)**0.5
        RT1(I)=RCL(I)/(2*SFE(I))
        RT2(I)=RCL(I)/(2*SFE(I))
        RT3(I)=1/(CV(I)*VA(I)*SFE(I))
        RT4(I)=1/(SFE(I)*FCL(I)*HC(I))
        RP1(I)=RT1(I)/(CLI*CLW)
        RP2(I)=RT2(I)/(CLI*CLW)
        RP3(I)=.220*RT3(I)
        RP4(I)=1./(FCL(I)*SFE(I)*CLW*HC(I))
        PSSK(I)=PSAT(TT(K+3))
        PSK(I)=(W(I)+0.06*(1.-W(I)))*PSSK(I)+(1-W(I))*0.94*PAIR
C
        IF (INFO(7).EQ.-1) THEN
C- - - - - CALCUL POUR LE PREMIER PAS DE TEMPS - - - -
          IF (RCL(I).EQ.0.0) THEN
C- - - - - Segment nu- - - - -
            TCL(I)=TT(4*I)
            PCL(I)=PSK(I)
            TMI(I)=TT(4*I)
            PMI(I)=PSK(I)
          ELSE
C- - - - - Segment vetu - - - - -
            DEMO=1./RT1(I)+1./RT3(I)+1./(RT2(I)+RT4(I))
            TMI(I)=TT(4*I)/RT1(I) + TA(I)/RT3(I)
            1      + (TA(I)-RAYCL(I))/RT4(I)
            TMI(I)=TMI(I)/DEMO
            TCL(I)=TMI(I)/RT2(I) + TA(I)/RT4(I) - RAYCL(I)
            TCL(I)=TCL(I)/(1./RT2(I)+1./RT4(I))
            PMI(I)=PSK(I)/RP1(I)+(1./(RP3(I)*TMI(I))
            1      +1./ (RP2(I)+RP4(I))) *PAIR
            PMI(I)=PMI(I)/(1./RP1(I)+1./(RP3(I)*TMI(I))
            1      +1./ (RP2(I)+RP4(I)))
            PCL(I)=PMI(I)/RP2(I)+PAIR/RP4(I)/(1./RP2(I)+1./RP4(I))
            ENDIF
          120  CONTINUE
          TEXP=32.5+0.066*(TA(1)-TK)+1.99E-4*PAIR+TK
          RESPS=0.0014*ACT*(TEXP-TA(1))
          RESPL=1.75E-5*ACT*(PSAT(TEXP)-PAIR)
C
C- - - - - initialisation des variables
      STIME=0.0
      ICOMPT=0
      HPM=0.0
      HFLOM=0.0
      CONVM=0.0
      RAYM=0.0
      EVAPM=0.0

```

EVAGM=0.0
 SUDM=0.0
 DRIPM=0.0

C

C---- Stockage des valeurs d'un pas de temps a l'autre

C

IF(INFO(7).LE.0) THEN

STOK(1)=RSWEAT

STOK(2)=QEVAG

STOK(3)=QDRIP

STOK(4)=QSUD

STOK(5)=QHFLO

DO 150 I=1,7

STOK(5+I)=H2O(I)

STOK(12+I)=W(I)

150 CONTINUE

DO 155 N=1,29

STOK(19+N)=TT(N)

STOK(48+N)=F(N)

155 CONTINUE

IOCIL3=1

IOCIL2=1

IOCIL1=1

IGAM=1

IBLOQ=0

ELSE

RSWEAT=STOK(1)

QEVAG=STOK(2)

QDRIP=STOK(3)

QSUD=STOK(4)

QHFLO=STOK(5)

DO 160 I=1,7

H2O(I)=STOK(5+I)

W(I)=STOK(12+I)

160 CONTINUE

DO 165 N=1,29

TT(N)=STOK(19+N)

F(N)=STOK(48+N)

165 CONTINUE

IF(IBLOQ.EQ.0) THEN

IOCIL3=IOCIL2

IOCIL2=IOCIL1

IOCIL1=IGAM

I32=IOCIL3/IOCIL2

I21=IOCIL2/IOCIL1

I31=IOCIL3/IOCIL1

IF(I32.LT.0.AND.I21.LT.0.AND.I31.GT.0) IBLOQ=1

ENDIF

ENDIF

C

C***** DEBUT DU CALCUL PAR PAS DE TEMPS DU STOLW *****

C

300 CONTINUE

C

C----- Calcul des coefficients de regulation -----

C

DO 305 N=1,29

WARM(N)=0.0

COLD(N)=0.0

ERROR(N)=(TT(N)-TSET(N))+(RATE(N)*F(N))

IF(ERROR(N).LT.0.0) THEN

COLD(N)=-ERROR(N)

ELSE

WARM(N)=ERROR(N)

ENDIF

305 CONTINUE

WARMSK=0.0

COLDSK=0.0

```

DO 310 I=1,7
  WARMSK=WARMSK+WARM(4*I)*SKINR(I)
  COLDSK=COLDSK+COLD(4*I)*SKINR(I)
310 CONTINUE
  ER1=WARM(1)-COLD(1)
  ERSK=WARMSK-COLDSK
  ERP=WARM(1)*WARMSK-COLD(1)*COLDSK
C
  SWEAT=CSW*ER1+SSW*ERSK+PSW*ERP
  SWEAT=SWEAT-(XSW/100.0)
  IF(SWEAT.LT.0.0) SWEAT=0.0
  IF(SWEAT.GT.XSW) SWEAT=XSW
  DILAT=CDIL*ER1+SDIL*ERSK+PDIL*ERP
  DILAT=DILAT-(XDIL/100.0)
  IF(DILAT.LT.0.0) DILAT=0.0
  IF(DILAT.GT.XDIL) DILAT=XDIL
  STRIC=-CSTRI*ER1-SSTRI*ERSK-PSTRI*ERP
  STRIC=STRIC-(XSTRI/100.0)
  IF(STRIC.LT.0.0) STRIC=0.0
  IF(STRIC.GT.XSTRI) STRIC=XSTRI
  CHILL=-CCHIL*ER1-SCHIL*ERSK-PCHIL*ERP
  CHILL=CHILL-(XCHIL/100.0)
  IF(CHILL.LT.0.0) CHILL=0.0
  IF(CHILL.GT.XCHIL) CHILL=XCHIL
C
C ----- calcul du bloquage -----
  ICOMPT=ICOMPT+1
  IF(IBLOQ.EQ.0) THEN
    IF(SWEAT.GT.0.0) IGAM=1
    IF(CHILL.GT.0.0) IGAM=-1
  ENDIF
  IF(IGAM.GT.0) THEN
    SWEAT=SWEAT
    CHILL=0.0
  ELSE
    SWEAT=0.0
    CHILL=CHILL
  ENDIF
C
C ----- Calcul des flux pour chaque couche -----
C
  XL=1.+SWEAT/XXL
  DO 400 I=1,7
    K=4*I-3
C - centre
    Q(K)=QB(K)*XL
    BF(K)=BFB(K)
    E(K)=EB(K)
C - muscle
    Q(K+1)=QB(K+1)*XL+WORKI(I)*WORK+CHILI(I)*CHILL
    BF(K+1)=BFB(K+1)+(Q(K+1)-QB(K+1))*BQ
    E(K+1)=0.0
C - graisse
    Q(K+2)=QB(K+2)*XL
    BF(K+2)=BFB(K+2)
    E(K+2)=0.0
C - peau
    Q(K+3)=QB(K+3)*XL
    BF(K+3)=(BFB(K+3)+SKINV(I)*DILAT)/(1.0+SKINC(I)*STRIC)
    BF(K+3)=BF(K+3)*(2.0**(ERROR(K+3)/10.))
C
  IF(RCL(I).EQ.0) THEN
    EMAXSK(I)=(PSSK(I)-PAIR)/RP4(I)
    CONVO(I)=(TT(K+3)-TA(I))/RT4(I)
    DRYSK(I)=CONVO(I)+RAYSK(I)
  ELSE
    EMAXSK(I)=(PSSK(I)-PMI(I))/RP1(I)

```



```

        DRYSK(I)=(TT(K+3)-TMI(I))/RT1(I)+RAYSK(I)
        DRYMI(I)=(TMI(I)-TCL(I))/RT2(I)
        DRYCL(I)=(TCL(I)-TA(I))/RT4(I)+RAYCL(I)
    ENDIF
C
    EDIF(I)=0.06*(1.0-W(I))*EMAXSK(I)
    IF(EDIF(I).GT.EB(K+3)) EDIF(I)=EB(K+3)
    E(K+3)=W(I)*EMAXSK(I)+EDIF(I)
400 CONTINUE
C
    E(1)=RESPL/8.0
    E(5)=RESPL*7.0/8.0
    BC(29)=0.0
    DO 405 N=1,28
        BC(N)=BF(N)*CS*(1.0-BPH)*(TT(N)-TT(29))
        TD(N)=TC(N)*(TT(N)-TT(N+1))
        BC(29)=BC(29)+BC(N)
405 CONTINUE
C
C ----- Bilan thermique de chaque couche -----
C
    DO 410 I=1,7
        K=4*I-3
        HF(K)=Q(K)-E(K)-BC(K)-TD(K)
        HF(K+1)=Q(K+1)-BC(K+1)+TD(K)-TD(K+1)
        HF(K+2)=Q(K+2)-BC(K+2)+TD(K+1)-TD(K+2)
        HF(K+3)=Q(K+3)-BC(K+3)-E(K+3)+TD(K+2)-DRYSK(I)
        HFCL(I)=0.0
        IF (RCL(I).GT.0.0) THEN
            HFCL(I)=DRYMI(I)-DRYCL(I)
        ENDIF
410 CONTINUE
        HF(1)=HF(1)-RESPL/8.0
        HF(5)=HF(5)-RESPL*7.0/8.0
        HF(29)=BC(29)
C
C ----- DETERMINATION DU PAS DE TEMPS OPTIMUM -----
C
        DT=60.0
499 CONTINUE
        DO 500 N=1,29
            F(N)=HF(N)/C(N)
            U=ABS(F(N))
            IF(U*DT.LE.0.1) GO TO 500
            IF(DT.LE.7.5) GO TO 500
            DT=DT/2.0
            GO TO 499
500 CONTINUE
501 CONTINUE
        DO 502 I=1,7
            IF (RCL(I).GT. 0.0) THEN
                FL(I)=HFCL(I)/CCL(I)
                U=ABS(FL(I))
                IF(U*DT.LE.0.1) GO TO 502
                IF(DT.LE.7.5) GO TO 502
                DT=DT/2.0
                GO TO 501
            ENDIF
502 CONTINUE
        IF((STIME+DT/3600.).GE.DELT) DT=(DELTA-STIME)*3600.
C
C ----- CALCUL DE LA SUDATION ET DE L'EVAPORATION -----
C
        EVAPT=RESPL
        EVAGT=0.0
        SUDT=0.0
        DRIPT=0.0
        WTOT=0.0

```

C

```

DSWEAT=(SWEAT-RSWEAT)*(1.0-EXP(-DT/180.0))
RSWEAT=RSWEAT+DSWEAT
IF(RSWEAT.LE.1E-4) RSWEAT=0.0
DO 550 I=1,7
  SUD(I)=EDIF(I)+SKINS(I)*RSWEAT*(2.0**(ERROR(4*I)/BULL))
  SUD(I)=SUD(I)/QL(TT(4*I))
  EVG(I)=E(4*I)/QL(TT(4*I))
  IF (W(I).LT.0.5) THEN
    DRIP(I)=0.0
  ELSE
    REST(I)=1-(0.5*W(I)*W(I))
    IF(REST(I).GT.1.0) REST(I)=1.0
    IF(REST(I).LT.0.0) REST(I)=0.0
    DRIP(I)=SUD(I)*(1.0-REST(I))
  ENDIF
  DH2O(I)=(SUD(I)-EVG(I)-DRIP(I))*DT
  H2O(I)=H2O(I)+DH2O(I)
  IF(H2O(I).LT.0.0) H2O(I)=0.0
  IF(H2O(I).GT.H2OMX(I)) THEN
    DRIP(I)=DRIP(I)+(H2O(I)-H2OMX(I))/DT
    H2O(I)=H2OMX(I)
  ENDIF
  W(I)=SQRT(H2O(I)/H2OMX(I))

```

C

```

EVAPT=EVAPT+E(4*I)
EVAGT=EVAGT+EVG(I)
SUDT=SUDT+SUD(I)
DRIPT=DRIPT+DRIP(I)
WTOT=WTOT+W(I)*PERSUR(I)

```

550 CONTINUE

C

C ---- Nouvelles Temperatures, Valeurs Globales et Moyennes ----

C

```

HP=0.0
HFLOT=0.0
CONVT=RESPS
RAYT=0.0
DO 600 N=1,29
  TT(N)=TT(N)+F(N)*DT
  HP=HP+Q(N)
  HFLOT=HFLOT+HF(N)

```

600 CONTINUE

C

```

DO 605 I=1,7
  IF (RCL(I).EQ.0.0) THEN

```

C - - - - - Segment nu

```

  TCL(I)=TT(4*I)
  PCL(I)=PSK(I)
  TMI(I)=TT(4*I)
  PMI(I)=PSK(I)
  CONVT=CONVT+CONVO(I)
  RAYT=RAYT+RAYSK(I)-RAYSOL(I)

```

ELSE

C - - - - - Segment vetu

```

  TCL(I)=TCL(I)+FL(I)*DT

```

C

```

  TMI(I)=TT(4*I)/RT1(I)+TA(I)/RT3(I)+TCL(I)/RT2(I)
  TMI(I)=TMI(I)/(1/RT1(I)+1/RT3(I)+1/RT2(I))

```

C

```

  RA=RP1(I)*RP4(I)/(RP2(I)*(RP1(I)+RP4(I)))
  PMI(I)=(PSK(I)/RP1(I)+PAIR/(RP3(I)*TMI(I))+RA*PAIR/RP4(I))
  PMI(I)=PMI(I)/(1./RP1(I)+1./RP3(I)*TMI(I))
  +1./RP2(I)-RA/RP1(I))

```

1

```

  PCL(I)=PMI(I)/RP2(I)+PAIR/RP4(I)
  PCL(I)=PCL(I)/(1./RP2(I)+1./RP4(I))
  CONVT=CONVT+CONVCL(I)+(TMI(I)-TA(I))/RT3(I)
  RAYT=RAYT+RAYCL(I)+RAYSK(I)-RAYSOL(I)

```

```

        ENDIF
605  CONTINUE
C
      HPM=HPM+HP*DT
      HFLOM=HFLOM+HFLOT*DT
      CONVVM=CONVM+CONVT*DT
      RAYM =RAYM+RAYT*DT
      EVAPM=EVAPM+EVAPT*DT
      EVAGM=EVAGM+EVAGT*DT
      SUDM=SUDM+SUDT*DT
      DRIPM=DRIPM+DRIPT*DT
      QEVAG=QEVAG+EVAGT*DT
      QSUD =QSUD+SUDT*DT
      QDRIP=QDRIP+DRIPT*DT
C
      STIME=STIME+DT/3600
      IF (STIME.LT.DELT) GO TO 300
C
C ***** FIN DE LA BOUCLE DU Stolwijk *****
C
C ----- PREPARATION DES SORTIES -----
C
      TBM=0.0
      DO 800 N=1,29
        TBM=TBM+TT(N)*C(N)/CNN
800  CONTINUE
      TSK=0.0
      TCLO=0.0
      DO 805 I=1,7
        TSK=TSK+(TT(4*I)*C(4*I))/CSK
        TCLO=TCLO+TCL(I)*SF(I)/ADU
805  CONTINUE
      DELTS=DELT*3600
      HPM=HPM/DELTS
      HFLOM=HFLOM/DELTS
      CONVVM=CONVM/DELTS
      RAYM=RAYM/DELTS
      EVAPM=EVAPM/DELTS
      EVAGM=EVAGM/DELTS
      SUDM=SUDM/DELTS
      DRIPM=DRIPM/DELTS
C
C***** SENSATIONS THERMIQUES *****
C Attention pour la sensation la global est en dernier
C on a : Tete,TRonc,Bras_Droit,Bras_Gau,Mains,Jambes,Pieds,GLOBAL
C
      DO 850 I=1,7
        DON(I)=(TT(4*I)+TA(1))/2-TK
        ISENS(I)=1
850  CONTINUE
        DON(8)=(TSK+TA(1))/2-TK
        ISENS(8)=1
C
C-----CALCUL DE LA SENSATION
      DO 860 I=1,8
        DO 870 KC=1,11
          IF (DON(I).LT.CRI(I,KC)) GOTO 880
          IF (DON(I).GE.CRI(I,11)) THEN
            ISENS(I)=9
            GO TO 890
          ENDIF
870  CONTINUE
880  ISENS(I)=KC-2+((DON(I)-CRI(I,(KC-1)))/
1      (CRI(I,KC)-CRI(I,(KC-1))))+0.5
890  CONTINUE
      IF (ISENS(I).LE.1) ISENS(I)=1
      IF (ISENS(I).GE.9) ISENS(I)=9

```

```

860    CONTINUE
C
C -----          OUTPUTS          -----
C
      OUT(1)=TSK-TK
      OUT(2)=TCLO-TK
      OUT(3)=WTOT
      OUT(4)=ISENS(8)
      DO 950 I=1,7
        OUT(4+I)=TT(4*I)-TK
        OUT(11+I)=TCL(I)-TK
        OUT(18+I)=W(I)
        OUT(25+I)=ISENS(I)
950    CONTINUE
      OUT(33)=HPM
      OUT(34)=HFLOM
      OUT(35)=CONVM
      OUT(36)=RAYM
      OUT(37)=CONVM+RAYM
      OUT(38)=EVAPM
      OUT(39)=QEVAG
      OUT(40)=SUDM
      OUT(41)=QSUD
      OUT(42)=TT(1)-TK
      OUT(43)=TT(5)-TK
C
      RETURN
      END
C
C * * * * *
C
      REAL FUNCTION QL(TL)
C----- Chaleur latente de vaporisation (QL - J/kg ; TL - Kelvin)
C
      QL= (597.5-0.59*(TL-273.15))*4180
      RETURN
      END
C
C
      REAL FUNCTION PSAT(TP)
C----- Pression de vapeur saturante (Psat - Pa ; TP - Kelvin)
C
      TPC=TP-273.15
      IF(TPC.LE.0.0) PSAT=0.0
      PSAT=0.0605*((TPC+7.06)*TPC+908.88)*TPC+9567)
      RETURN
      END

```



```

SUBROUTINE TYPE70 (TIME, XIN, OUT, T, DTD, PAR, INFO)
SAVE
DIMENSION XIN(30), PAR(40), OUT(30), INFO(10)
COMMON /SIM/TIMEO, TFINAL, DELT
C*****
C
C      ECHANGES RADIATIFS ENTRE MATHER ET L'HABITACLE
C
C      le conducteur est assis dans la voiture et ne bouge pas
C
C      VERSION 0.0          05/93
C      "      1.0          06/94      version finale
C
C      La matrice des facteurs de forme - FF - sont dans un fichier (file 03)
C-----
C      - LESETH - UNIVERSITE PAUL SABATIER - TOULOUSE -
C      Laboratoire Etudes des Systemes et Environnement Thermique de l'Homme
C*****
C      DIMENSION AMT(27,27), FF(27,27), FL(27,27)
C      DIMENSION FR(27), EMI(27), SIGF(27), TR(27), FRS(27)
C      DIMENSION RDS(27), FE(27), SURF(27)
C      DIMENSION ARFE(27), RFE(27), EPS(27)
C      DATA SIG/5.674E-8/
C
C      NS=PAR(1)
C * * * * *      ler pas de temps      * * * * *
C      IF (INFO(7).GE.0) GOTO 20
C      INFO(9)=1
C      INFO(5)=0
C      INFO(6)=30
C
C      -----      LECTURE DES EMISSIVITE      -----
C
C      DO 5 I=1, NS
C          EMI(I)=PAR(I+1)
C      5      CONTINUE
C      DO 6 I=1, 7
C          SURF(I)=PAR(I+28)
C      6      CONTINUE
C
C      -----      LECTURE DES FACTEURS DE FORME      -----
C
C      READ(03,*) NLIST
C      CALL TYPECK(1, INFO, 27, 35, 0)
C      DO 205 I=1, NLIST
C          READ(03,*) (FF(I, J), J=1, NLIST)
C      205      WRITE(01,*) (FF(I, J), J=1, NLIST)
C      205      CONTINUE
C
C      - - - - Calcul de la matrice inverse - - - - -
C
C      DO 201 I=1, NLIST
C      DO 151 J=1, NLIST
C          DEL=0
C          IF (I.EQ.J) DEL=1
C          AMT(I, J)=DEL-(1-EMI(I))*FF(I, J)
C      151      CONTINUE
C      201      CONTINUE
C
C      IFLAG=0
C      CALL INVERT(27, NLIST, AMT, IFLAG)
C
C      - - - - verification des facteurs de forme
C
C      DO 605 I=1, NLIST
C          SIGF(I)=0.0
C      DO 617 J=1, NLIST

```

```

        SIGF(I)=SIGF(I)+FF(I,J)
617      CONTINUE
605      CONTINUE
C
      DO 606 I=1,NLIST
        DO 616 J=1,NLIST
          DEL=0.0
          IF (I.EQ.J) DEL=1.0
          FL(I,J)=DEL-FF(I,J)
616      CONTINUE
606      CONTINUE
C
      20      CONTINUE
C *****
C      DEBUT DU CALCUL DES FLUX A CHAQUE PAS DE TEMPS
C -----
      DO 14 I=1,NS
        TR(I)=XIN(I)+273.15
14      CONTINUE
C -----
C      CALCUL DES FLUX NETS RAYONNES
C      RFE , ARFE,matrices de stockage pour les calculs
C      on note T4M la moyenne des T**4
C -----
      T4M=0
      DO 600 I=1,NS
        T4M=T4M+TR(I)**4
600      CONTINUE
      T4M=T4M/NS
      DO 615 I=1,NS
        EPS(I)=SIG*((TR(I)**4)-T4M)
615      CONTINUE
      DO 610 I=1,NS
        FE(I)=0
        DO 610 J=1,NS
          FE(I)=FE(I)+(FL(I,J)*EPS(J))
610      CONTINUE
      T4M=T4M**.25
C -----
C      CALCUL DES FLUX calcul de ro*(1-f)*epsi
C -----
      DO 630 I=1,NS
        RFE(I)=(1-EMI(I))*FE(I)
630      CONTINUE
C -----
C      calcul de amt*ro*(1-F)*epsi
      DO 651 I=1,NS
        ARFE(I)=0
        DO 651 J=1,NS
          ARFE(I)=ARFE(I)+(AMT(I,J)*RFE(J))
651      CONTINUE
      DO 681 I=1,NS
        RFE(I)=0
        DO 681 J=1,NS
          RFE(I)=RFE(I)+(FL(I,J)*ARFE(J))
681      CONTINUE
      DO 641 I=1,NS
        FR(I)=FE(I)-RFE(I)
641      CONTINUE
C
      SIFI=0.0
      DO 700 I=1,7
        FRS(I)=FR(I+20)*SURF(I)
        SIFI=SIFI+FRS(I)
700      CONTINUE
C -----
C      SORTIES -----
C      OUT(I) > 0 -> le flux est perdu par la surface

```

C OUT(I) < 0 -> le flux est reçu par la surface
C-----

```
      DO 40 I=1,7
         OUT(I)=FRS(I)
         OUT(7+I)=FR(I+20)
40    CONTINUE
      RETURN
      END
```