



INDICATEUR DE CONFORT P.E.T. : UNE REVUE CRITIQUE

Édouard WALTHER
edouard.walther@arep.fr

AREP
16 avenue d'Ivry – 75013 Paris

Quentin GOESTCHEL
quentin.goestchel@ens-paris-saclay.fr

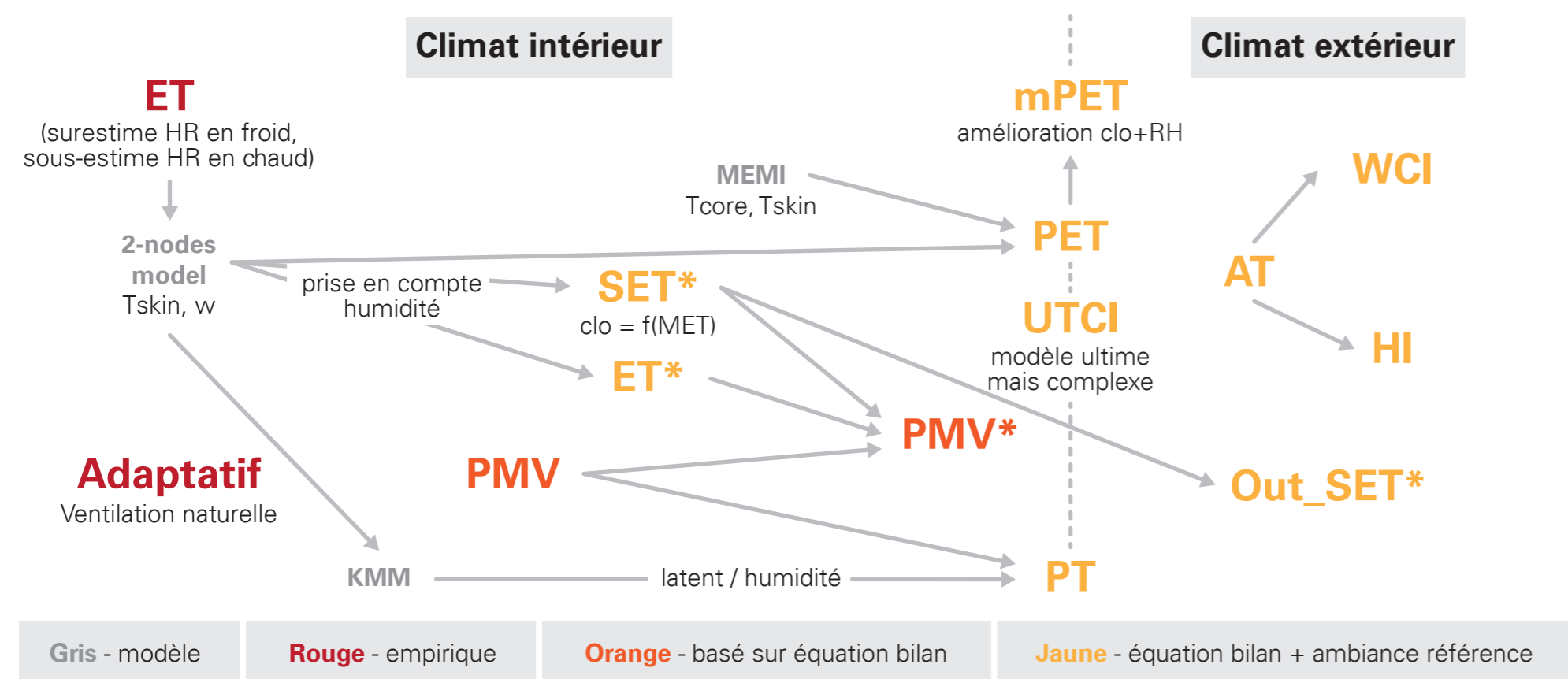
ENS Paris-Saclay
64 avenue du Président Wilson – 94230 Cachan

AREP

école
normale
supérieure
paris-saclay

Introduction

Une grande variété d'indicateurs de confort a été développée entre le début du XX^e siècle et aujourd'hui. D'abord construits pour les ambiances intérieures, la caractérisation de l'environnement extérieur a démarré dans les années 1970.

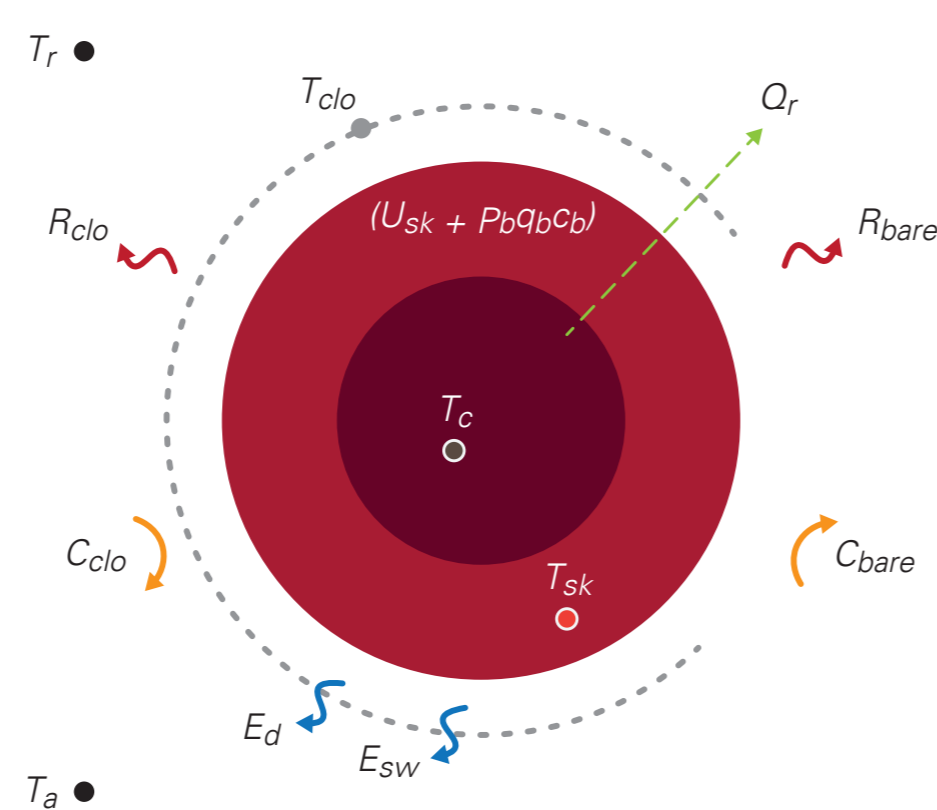


↑ Quelques indicateurs de confort pour les ambiances intérieures et extérieures

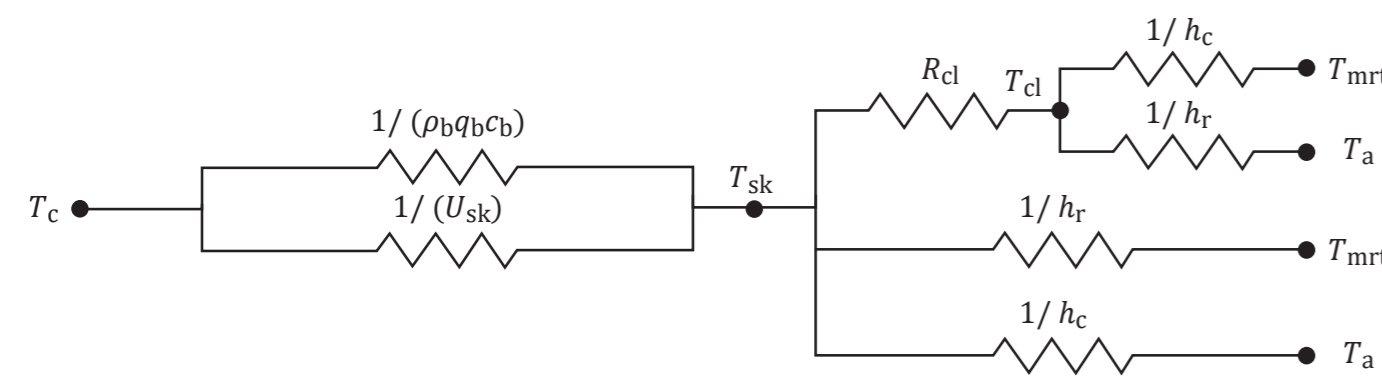
La Physiological Equivalent Temperature (P.E.T.)

Une approche pour déterminer le niveau de confort est de déterminer la réaction physiologique de l'individu. Pour ce faire, une approche répandue est de représenter le métabolisme comme un système thermique à deux noeuds, constitué de deux cylindres concentriques entourés d'une couche de vêture (voir ci-contre).

Ce système est régulé en température par des actions de sudation, vasomotricité et tremblement.

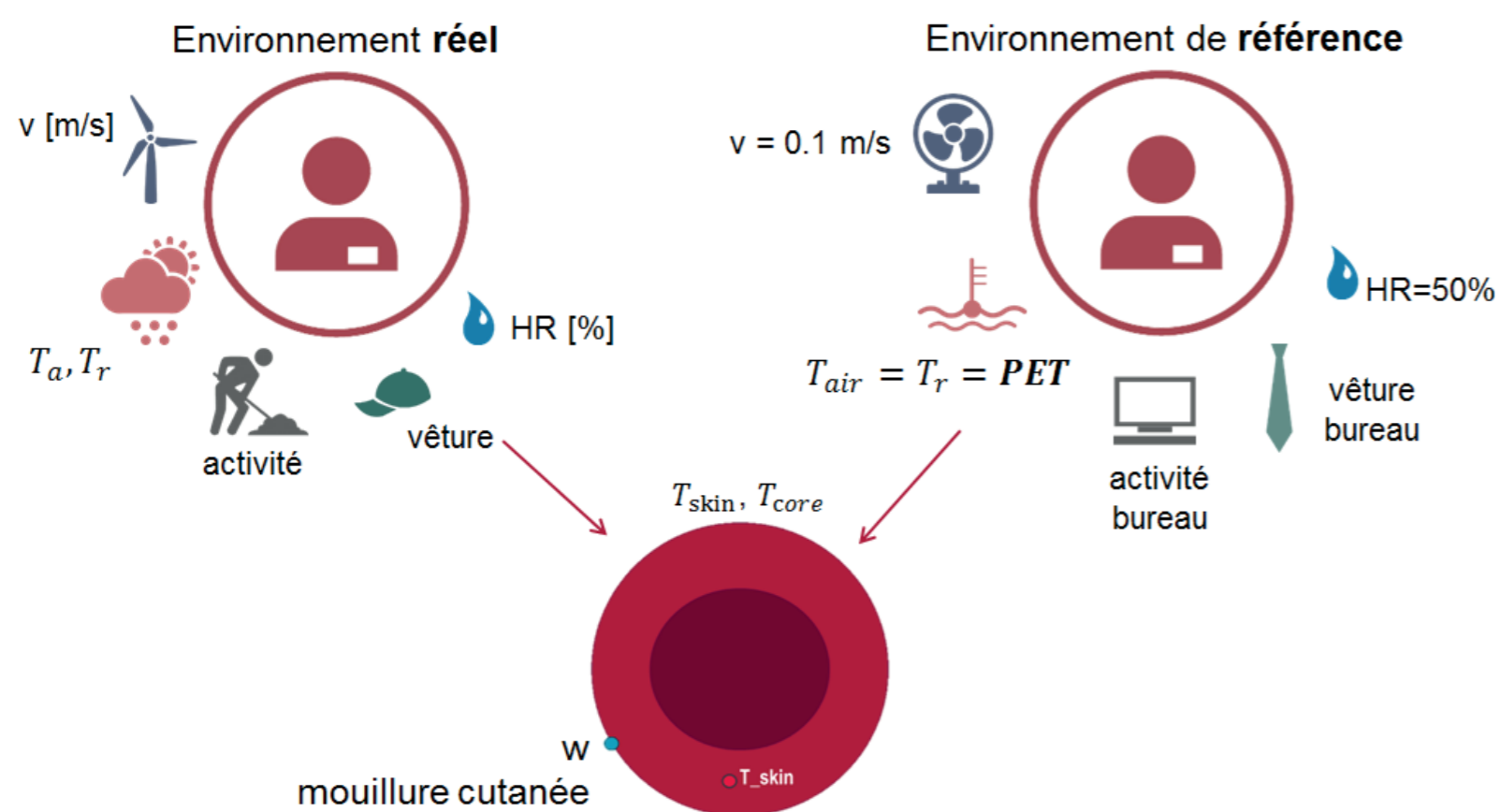


↑ Bilan des flux sensibles et latents sur le cylindre



← Schéma électrique équivalent entre le noyau (Tc), la peau (Tsk) et l'environnement extérieur

La PET est la température opérative d'un environnement de référence qui provoque la même réaction physiologique (températures de peau et corporelle) que l'environnement réel (voir la figure ci-dessous). L'environnement de référence est similaire à un bureau : vitesse d'air faible, humidité relative de 50%, vêtue adaptée à l'activité.



Pour calculer la PET, on détermine au préalable les températures de peau, de noyau et de la vêtue en résolvant le système de trois équations à trois inconnues ci-dessous :

$$\begin{aligned} M + Q_r - (\rho_b q_b c_b + U_{sk}) \times (T_c - T_{sk}) &= 0 \\ R_{bare} + C_{bare} + E + (\rho_b q_b c_b + U_{sk}) \times (T_c - T_{sk}) - h_{cl} \times (T_{sk} - T_{cl}) &= 0 \\ C_{clo} + R_{clo} + h_{cl} \times (T_{sk} - T_{cl}) &= 0 \end{aligned}$$

Correction du modèle

Plusieurs incohérences majeures ont été relevées dans le modèle initial de la PET :

- Le code fourni avec la norme [VDI 2008] **ne prend pas en compte** l'activité et les pertes respiratoires de référence, ni la vêtue de référence (il y a également plusieurs erreurs de typographie),
- Le modèle original **ne résout pas le système non-linéaire complet** à 3 équations mais le système à 2 équations en s'affranchissant de la température de vêtue,
- Le modèle de transfert de vapeur **ne correspond pas à l'état de l'art** et son origine n'a pas pu être déterminée : il est indépendant du niveau de vêtue.

La correction de ces erreurs donne les résultats suivants dans les conditions étudiées [Walther 2018] :

- Le modèle corrigé occasionne **-3.8 à +10 %** d'écart selon les conditions,
- La résolution du système à 2 équations induit un biais de l'ordre de **-0.5 à +2.4 [K]**,
- La mise à jour du modèle de diffusion de vapeur dans la vêtue donne des différences de **-7 à +2,6 [K]**.

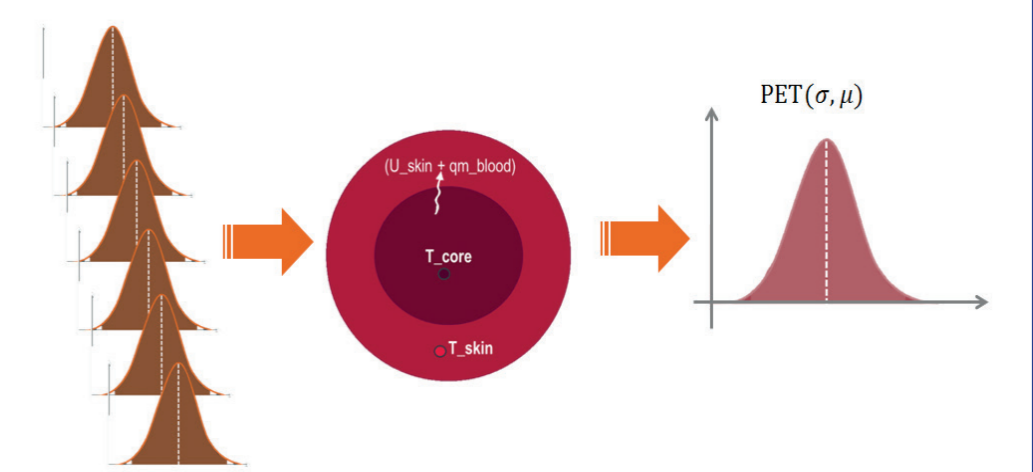
Influence de la variabilité morphologique

Les modèles de confort comme la PET [Höppe 1999] ou la SET [Gagge 1986] sont basés sur un modèle morphologique masculin, avec une corpulence représentative d'un individu moyen Nord-Américain des années 1970.

On s'intéresse ici à une première évaluation de la variabilité en se basant sur des valeurs de la littérature [INSEE 2007].

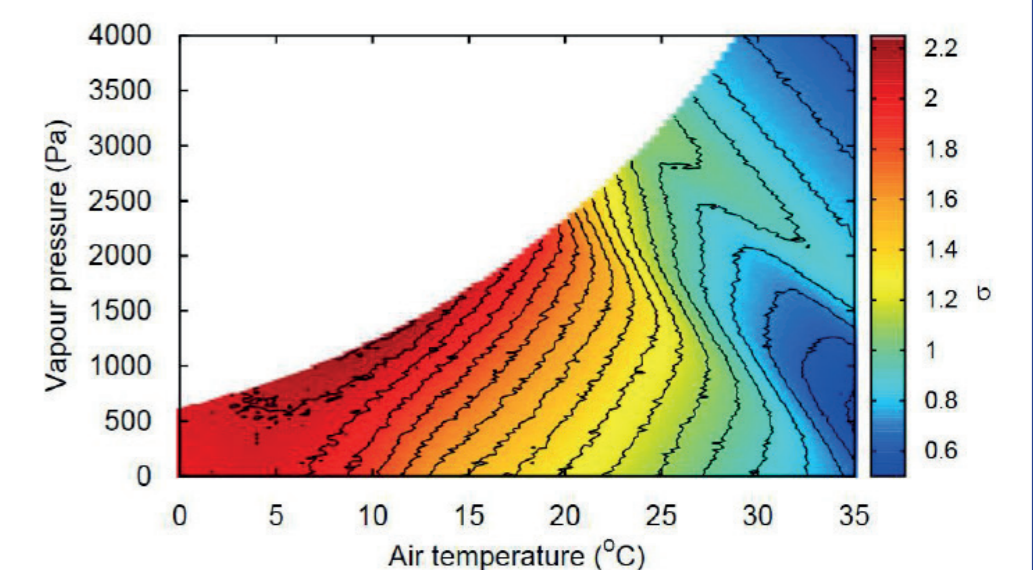
| Paramètre | Valeur moyenne μ | Écart-type σ |
|--|----------------------|---------------------|
| Taille [m] | 1.75 | 0.065 |
| Masse [kg] | 71.4 | 8.9 |
| Graisse [%] | 23 | 7.5 |
| C_{cl} [L/(m ² .h.K)] | 200 | 10 |
| C_s [l/K] | 0.5 | 0.025 |
| C_{ws} [kg/(m ² .h.K)] | 170 | 8.5 |
| C_{sh} [W/(m ² .K ²)] | 19.4 | 0.97 |
| U_{sk} [W/(m ² .K)] | 5.28 | 0.264 |
| q_b [L/(m ² .h)] | 6.3 | 0.315 |
| T_{sk}^{ref} [°C] | 33.7 | 0.169 |
| T_c^{ref} [°C] | 36.8 | 0.184 |

↑ Liste des paramètres variables : valeur moyenne et dispersion de loi normale



↑ Principe de propagation de la variabilité des paramètres

Les résultats obtenus montrent une dispersion importante, avec un écart-type allant de 0,5 à 2,2 [K], soit un intervalle à 95% de 2 à 8,8 [K].



↑ Écart-type en conditions opératives et vitesse d'air faible

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans la littérature [van Hoof 2008] qui relève jusqu'à 10 [K] d'écart entre températures déclarées confortables pour des conditions ambiantes identiques.

Conclusion & Perspectives

Ce travail propose une première description exhaustive du modèle de la PET, qui a permis de dégager plusieurs incohérence dans le code de [VDI 2008], [Höppe 1999]. Nous déconseillons par conséquent l'utilisation de ce dernier. Une version corrigée est proposée en téléchargement dans les annexes de [Walther 2018].

La pré-étude de variabilité morphologique mérite d'être approfondie en s'inspirant de [Bruse 2007]. À partir de la pyramide des âges et de la distribution de l'IMC, il est possible de déterminer des jeux de paramètres interdépendants afin d'évaluer de manière plus fine l'influence de la variabilité morphologique sur le modèle.

Une analyse de sensibilité par la méthode de Morris est en cours de réalisation sur le modèle afin d'évaluer quels paramètres sont les plus influents.

Références

- [Bruse 2007] M.Bruse, "Multi-AgentSystems – A new approach for assessing urban environmental conditions." Habilitationsthesis, Ruhr Universität Bochum, 2007.
- [Gagge 1986] A. Gagge, A. Fobelets, L. Berglund, A standard predictive index of human response to the thermal environment, Build. Eng. 14 (1986).
- [Höppe 1999] P. Höppe, The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, Int. J. Biometeorol. 43 (1999).
- [INSEE 2007] T. de Saint Pol, "L'obésité en France : les écarts entre catégories sociales s'accroissent.", 2007.
- [van Hoof 2008] Van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort : comfort for all? Indoor air, 18(3), 182-201.
- [VDI 2008] Environmental Meteorology, Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for Urban and Regional Planning at Regional Level, Part I: Climate vol. 3787. Verein Deutscher Ingenieure, 2008 Blatt 2.
- [Walther 2018] Walther, E., Goestchel, Q. "The PET comfort index: Questioning the model" Building and Environment, 2018;1137), 1–10.