Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysiques cutanées

Armelle Bigouret

▶ **To cite this version:**

Armelle Bigouret. Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysiques cutanées. Médecine humaine et pathologie. INSA de Lyon, 2012. Français. NNT : 2012ISAL0144 . tel-00823313

HAL Id: tel-00823313

https://theses.hal.science/tel-00823313

Submitted on 16 May 2013

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.

N° d'ordre 2012ISAL0144
Année 2012

Thèse

Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysiques cutanées.

Présentée devant
L'institut national des sciences appliquées de Lyon

Pour obtenir
Le grade de docteur

Formation doctorale
Sciences et Technologies de l'Information et de la communication en santé

École doctorale
Électronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon

Par
Armelle Bigouret

Jury MM.

F. De Oliveira	Encadrant	Ingénieur Docteur	CSTB, Nantes
A. Dittmar	Invité	Docteur d'état en biologie humaine	Lyon
A. Dufour	Rapporteur	Professeur des Universités	Université de Strasbourg
C. Gehin	Directrice de thèse	Maître de Conférences, HDR	INSA de Lyon
P. Humbert	Rapporteur	Professeurs des Universités	CHU de Besançon
J.C. Launay	Rapporteur	Médecin en chef	CRSSA, La Tronche
E. McAdams	Examinateur	Professeurs des Universités	INSA de Lyon
A. Porcheron	Invité	Ingénieur de recherche clinique	CERIES, Neuilly sur Seine

Cette thèse a été préparée au sein de l'équipe Capteurs Biomédicaux de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon, UMR 5270 CNRS-INSA de Lyon

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysiques cutanées.

Résumé :

Les modèles actuels de prédiction de la sensation thermique et du confort thermique ainsi que les solutions visant à améliorer l'état de bien-être thermique des occupants d'un bâtiment sont insuffisants. Ils ne prennent pas assez en compte les différences interindividuelles de jugement thermosensoriel. Pourtant, ces différences, souvent associées à la sensibilité thermique de chaque individu, existent mais restent inexpliquées sur le plan physiologique.

Ces travaux de thèse, qui se sont déroulés en deux étapes, ont pour objectif d'identifier les causes physiologiques potentielles des différences interindividuelles du ressenti thermique, à travers des expérimentations multiparamétriques basées sur des mesurées cutanées. Toutes les mesures ont été réalisées après 30 minutes d'acclimatation en environnement thermique contrôlé.

La première étape, exploratoire, a permis d'analyser à la fois l'activité neurosensorielle, les propriétés thermo-vasculaires et les propriétés du film hydrolipidique cutané de deux groupes présentant des sensibilités au froid distinctes (selon leur sensation thermique déclarée). Ainsi, les expérimentations ont montré qu'il était plus pertinent d'analyser davantage les propriétés cutanées thermiques et hydriques (reliées aux mécanismes de thermorégulation) plutôt que l'activité neurosensorielle des volontaires pour caractériser les différences interindividuelles de jugement thermosensoriel. Elles ont également mis en évidence la nécessité de contrôler les facteurs non thermiques des environnements et de sélectionner rigoureusement les sujets.

La deuxième étape s'est focalisée sur l'analyse des propriétés thermo-vasculaires et des propriétés du film hydrolipidique de deux groupes de sensibilité au froid. Pour cela, 13 femmes ont été confrontées à 6 environnements de températures modérées comprises entre 17°C et 30°C (avec 2 transitions chaudes et 2 transitions froides) et les groupes ont été construits à partir du degré de frilosité déclaré par les sujets. Des différences cutanées ont alors pu être relevées entre les deux groupes. Le résultat le plus significatif est que les individus dits « frileux » présentent une activité microcirculatoire plus intense sur les joues avec une vasoconstriction plus forte au froid et une vasodilatation plus forte au chaud que l'autre groupe « non sensible au froid » ($p=0,002$ d'après le test de l'ANCOVA pour l'effet des groupes). De plus, il a été montré que l'approche multiparamétrique (introduction de variables non thermiques comme variables prédictives) ainsi que la prise en compte des sensibilités thermiques individuelles améliorent la prédiction du confort thermique surtout pour le groupe « frileux » (+ 6,4 %).

Mots-Clés: différences interindividuelles de jugement thermosensoriel, sensibilité thermique, confort thermique, paramètres biophysiques cutanés, seuil de perception thermique, microcirculation cutanée, film hydrolipidique, barrière cutanée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS XI

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART 11

1.1. LES MECANISMES PHYSIOLOGIQUES FACE A DES SOLLICITATIONS THERMIQUES 14

1.1.1. L'homéostasie : la base des réponses physiologiques humaines 14

1.1.2. Les conditions de l'homéothermie 14

1.1.3. La thermogenèse 17

1.1.4. Les transferts de chaleur « passifs » 18

1.1.4.1. Les échanges thermiques entre le noyau et l'enveloppe 19

1.1.4.2. Les échanges thermiques entre l'enveloppe cutanée et le milieu extérieur 19

1.1.4.3. Les échanges thermiques au niveau des voies respiratoires 21

1.1.4.4. L'influence des vêtements sur les échanges thermiques 22

1.1.4.5. Le bilan thermique « passif » 22

1.1.4.6. Bilan 23

1.1.5. La thermorégulation active inconsciente : la régulation autonome 23

1.1.5.1. Les thermorécepteurs 23

1.1.5.2. Les intégrateurs 24

1.1.5.3. Le lien entre les intégrateurs et les effecteurs : le système nerveux autonome 26

1.1.5.4. Les mécanismes effecteurs de la régulation autonome 29

1.1.5.5. Les facteurs non thermiques influençant la régulation autonome 35

1.1.6. La thermorégulation active et consciente : la régulation comportementale 39

1.1.6.1. Une vue d'ensemble des mécanismes de perception de l'environnement 40

1.1.6.2. La perception de l'environnement thermique : la thermoception 42

1.1.6.3. Les mécanismes actifs conscients de la régulation comportementale 48

1.2. LE RESSENTI THERMIQUE DECLARE 49

1.2.1. Les réponses verbales associées au ressenti thermique 49

1.2.1.1. La sensation thermique déclarée 50

1.2.1.2. Le confort thermique déclaré : une évaluation affective ou hédonique 51

1.2.1.3. Les autres évaluations hédoniques possibles de l'environnement thermique 52

1.2.2. La caractérisation des seuils de perception thermique 53

1.2.2.1. L'influence de facteurs physiques et physiologiques 53

1.2.2.2. L'influence de facteurs individuels et temporels 55

1.2.2.3. Bilan 57

1.2.3. La caractérisation du score de sensation thermique et de confort thermique 57

1.2.3.1. Les variables physiologiques reliées à la sensation thermique 58

1.2.3.2. Les variables physiologiques reliées au confort thermique 61

1.2.3.3. Première sélection des paramètres cutanés à mesurer 64

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2.3.4. L'influence des facteurs individuels ... 66
1.2.3.5. L'influence des facteurs temporels ... 68
1.2.3.6. L'influence du contexte ... 69
1.2.3.7. Bilan sur les facteurs d'influence ... 70
1.3. LES INTERACTIONS ENTRE LA PEAU ET L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE ... 72
1.3.1. La structure et les principaux composants de la peau ... 73
1.3.1.1. Les trois couches principales de la peau ... 73
1.3.1.2. La stratification de l'épiderme ... 74
1.3.1.3. Le film hydrolipidique ... 77
1.3.1.4. La flore cutanée ... 78
1.3.1.5. Les annexes cutanées ... 78
1.3.1.6. La vascularisation cutanée ... 81
1.3.1.7. L'innervation cutanée ... 82
1.3.2. L'eau, un élément essentiel de la peau ... 83
1.3.2.1. La répartition de l'eau et ses différents états ... 83
1.3.2.2. Les moyens de rétention de l'eau dans le stratum corneum ... 84
1.3.2.3. La perte insensible en eau ... 87
1.3.2.4. La notion d'hydratation ... 88
1.3.3. Les fonctions de la peau ... 88
1.3.4. L'impact de la température ambiante sur les propriétés cutanées ... 91
1.3.5. Deuxième sélection des paramètres cutanés à mesurer ... 95
1.3.6. L'influence de facteurs non thermiques sur les propriétés cutanées ... 96
1.3.6.1. Les facteurs environnementaux ... 96
1.3.6.2. La zone anatomique ... 97
1.3.6.3. Les facteurs individuels ... 98
1.3.6.4. Le stress émotionnel ... 101
1.3.6.5. Les rythmes biologiques ... 101
1.3.6.6. Bilan ... 102
CHAPITRE 2. EXPERIMENTATIONS PRELIMINAIRES ... 107
2.1. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX ... 110
2.1.1. Déroulement général ... 110
2.1.2. Description des zones d'expérimentation ... 111
2.1.3. Sélection et caractérisation des panels ... 112
2.1.4. Consignes pour la standardisation des mesures ... 113
2.1.5. Evaluation du ressenti thermique : les questionnaires ... 114
2.1.6. Mesures ... 115
2.1.6.1. Mesures des paramètres physiques des environnements ... 115
2.1.6.2. Mesures cutanées ... 116
2.2. TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES ... 116
2.2.1. Evaluation de la significativité des différences entre des échantillons ... 117

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2.1.1. Les tests statistiques utilisés 117
2.2.1.2. Le test de l'ANOVA à deux facteurs 118
2.2.1.3. La méthode de transformation de Box & Cox 119
2.2.1.4. Les tests de comparaisons multiples par paires 119
2.2.2. Evaluation de la significativité de la variation d'une variable 119
2.2.3. Evaluation des liens entre des variables 120
2.2.3.1. Les tests de corrélation 120
2.2.3.2. L'analyse en composantes principales (ACP) 121
2.3. STABILITE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES ENVIRONNEMENTS 121
2.4. IMPACT DU CONTEXTE SUR LES VOLONTAIRES 123
2.5. CARACTERISATION DES GROUPES PRESENTANT DES RESSENTIS DISTINCTS 124
2.5.1. Choix du critère de construction des groupes 124
2.5.2. Caractérisation non sensorielle des groupes 126
2.5.3. Caractérisation du ressenti des groupes 127
2.6. ETUDE DES SEUILS DE PERCEPTION THERMIQUE 129
2.6.1. Mesure des seuils de perception thermique 129
2.6.1.1. Choix de l'appareil de mesure des seuils de perception thermique 129
2.6.1.2. Dispositif TSA-II 129
2.6.1.3. Méthode de détection des seuils 130
2.6.1.4. Paramétrage du logiciel 131
2.6.1.5. Zone de mesure 132
2.6.2. Résultats et discussions 133
2.6.2.1. Fiabilité des mesures : confrontation aux données de la littérature 133
2.6.2.2. Lien entre la sensibilité thermique globale et la sensibilité thermique locale 135
2.7. ETUDE DES PROPRIETES THERMO-VASCULAIRES CUTANEES 137
2.7.1. Mesures des propriétés thermo-vasculaires 138
2.7.1.1. Mesure de la température cutanée 138
2.7.1.2. Mesure de la couleur de peau 143
2.7.1.3. Zones de mesures et paramètres à analyser 147
2.7.2. Résultats et discussions 148
2.7.2.1. Fiabilité des mesures : confrontation aux données de la littérature 148
2.7.2.2. Températures cutanées des groupes de sensibilité thermique 151
2.7.2.3. Couleur de peau (L*, a*, b*) des groupes de sensibilité thermique 154
2.7.2.4. Liens entre les propriétés thermo-vasculaires et le ressenti 155
2.7.2.5. Discussion : liens entre la sensibilité thermique et les propriétés thermo-vasculaires 157
2.8. ETUDE DES PROPRIETES DU FILM HYDROLIPIDIQUE 160
2.8.1. Mesures des propriétés du film hydrolipidique 160
2.8.1.1. Mesure de la teneur en eau du SC 160
2.8.1.2. Mesure de l'acidité de la surface cutanée 164
2.8.1.3. Mesure de la quantité de lipides surfaciques 165

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.8.1.4. Mesure de la perte en eau à la surface de la peau 167
2.8.1.5. Facteurs expérimentaux affectant les mesures cutanées 171
2.8.1.6. Zones de mesures 172
2.8.2. Résultats et discussions 173
2.8.2.1. Fiabilité des mesures : confrontation aux données de la littérature 173
2.8.2.2. Liens entre la sensibilité thermique et les propriétés du film hydrolipidique 179
2.8.2.3. Discussion : liens entre la sensibilité thermique et les propriétés du film hydrolipidique 185
CHAPITRE 3. CAMPAGNE FINALE DE MESURES 191
3.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL 194
3.1.1. Déroulement général 194
3.1.2. Description des zones d'expérimentation 196
3.1.3. Sélection et caractérisation du panel 199
3.1.4. Consignes pour la standardisation des mesures 200
3.1.5. Mesures des paramètres physiques des environnements 200
3.1.6. Evaluation du ressenti thermique : les questionnaires 201
3.1.7. Contrôle de la réactivité émotionnelle des sujets 202
3.1.8. Mesures pour caractériser les différences interindividuelles de ressenti 203
3.2. DISPOSITIFS DE MESURES ET METHODE D'EXTRACTION DES DONNEES 207
3.2.1. Dispositif pour la thermographie infrarouge 207
3.2.2. Mesure de l'activité microcirculatoire 207
3.2.2.1. Choix de l'appareil de mesure 207
3.2.2.2. Imageur de microcirculation Laser Doppler : le PeriScan PIM3 209
3.2.3. Etude du spectre de réflectance obtenu avec le spectrocolorimètre 212
3.2.4. Mesure de la quantité des éléments du Facteur Naturel d'Hydratation 214
3.2.5. Evaluation de l'intégrité du stratum corneum 215
3.2.6. Mesure de la capacité de récupération de la barrière cutanée 215
3.2.7. Méthode de suivi de l'état de détente des sujets 216
3.2.7.1. Choix de la mesure physiologique de suivi du stress 216
3.2.7.2. Mesure de la résistance électrodermale avec la centrale « Minimotion » 218
3.3. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES 219
3.3.1. Démarche générale de l'analyse statistique des données 219
3.3.2. La régression Partial Least Squares (PLS) 221
3.4. CARACTERISATION DES PARAMETRES PHYSIQUES ENVIRONNEMENTAUX 222
3.4.1. Conditions extérieures 222
3.4.2. Humidité relative ambiante des environnements thermiques 223
3.4.3. Températures ambiantes des environnements thermiques 224
3.4.4. Impact du contexte 225

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.5. CARACTERISATION DES GROUPES PRESENTANT DES RESSENTIS DISTINCTS.....225
3.5.1. Choix du critère de construction des groupes.....225
3.5.2. Caractérisation non sensorielle des groupes.....227
3.5.3. Caractérisation du ressenti des groupes.....228
3.5.3.1. Sensations thermiques globales et locales.....228
3.5.3.2. Confort thermique et notes hédoniques d'appréciation.....231
3.6. RESULTATS ET DISCUSSION.....234
3.6.1. Comparaisons des différences physiologiques des deux groupes.....234
3.6.1.1. Etude des propriétés vasculaires.....234
3.6.1.2. Etude des propriétés colorimétriques.....238
3.6.1.3. Etude des propriétés thermiques.....248
3.6.1.4. Etude des propriétés hydriques cutanées : perte en eau et contenu en eau.....254
3.6.1.5. Etude de la quantité de lipides surfaciques sur les joues.....260
3.6.1.6. Etude des composants du FNH sur la face interne des avant-bras.....262
3.6.1.7. Etude de la cohésion et de l'intégrité du stratum corneum de l'avant-bras.....264
3.6.1.8. Etude du taux de récupération de la barrière cutanée du stratum corneum.....269
3.6.1.9. Etude des relations entre les variables mesurées pour chacun des groupes.....271
3.6.1.10. Synthèse et discussion sur les différences physiologiques des deux groupes.....275
3.6.2. Apports pour la prédiction du ressenti thermique.....284
3.6.2.1. Résultats sur la prédiction de la sensation thermique.....285
3.6.2.2. Résultats sur la prédiction du confort thermique.....287
3.6.2.3. Discussion.....289
CONCLUSIONS & PERSPECTIVES.....293
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....305
LISTE DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS.....331
ANNEXE 1 : Etude sur les seuils de perception à un courant électrique.....333
ANNEXE 2 : Questionnaires des expérimentations préliminaires.....341
ANNEXE 3 : Questionnaires de la campagne finale de mesures.....349
ANNEXE 4 : Supplément statistique – les boîtes de Tukey.....361
TABLE DES FIGURES.....363
TABLE DES TABLEAUX.....371

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Liste des abréviations

a*AB	Coordonnée de chromaticité de l'avant-bras sur l'axe vert-rouge
a*J	Coordonnée de chromaticité de la joue sur l'axe vert-rouge
AAL	Acide aminé libre
ACP	Analyse en composantes principales
b*AB	Coordonnée de chromaticité de l'avant-bras sur l'axe bleu-jaune
b*J	Coordonnée de chromaticité de la joue sur l'axe bleu-jaune
C	Echange convectif
CE.R.I.E.S	CEntre de Recherche et d'Investigations Epidermiques et Sensorielles
CEAB	Contenu en eau du stratum corneum des avant-bras
CEJ	Contenu en eau du stratum corneum de la joue
CohAB	Perte de cohésion du stratum corneum de l'avant-bras (quantité de protéines prélevées)
conc_AB	Critère du spectre de réflectance des avant-bras lié à la concentration en hémoglobine
conc_J	Critère du spectre de réflectance des joues lié à la concentration en hémoglobine
Cres	Echange convectif par les voies respiratoires
Crit_conc_AB	Critère du spectre de réflectance des avant-bras lié à la concentration en hémoglobine
Crit_conc_J	Critère du spectre de réflectance des joues lié à la concentration en hémoglobine
Crit_O2_AB	Critère du spectre de réflectance des avant-bras lié à la saturation en oxygène de l'hémoglobine
Crit_O2_J	Critère du spectre de réflectance des joues lié à la saturation en oxygène de l'hémoglobine
CSTB	Centre Scientifique et Technique du bâtiment
Cth	Confort thermique
Ei	Environnement thermique
E_{ins}	Echange par évaporation spontanée de l'eau à travers la peau
E_{res}	Echange par évaporation au niveau des voies respiratoires
EVA	Echelle Visuelle Analogique
FHL	Film HydroLipidique
FNH	Facteur Naturel d'hydratation
FNH-filaggrine	Constituants de Facteur Naturel d'Hydratation reliés à la protéolyse de la filaggrine
FNH-sudation	Constituants de Facteur Naturel d'Hydratation reliés à la sudation
H	Chaleur produite par l'organisme
HR	Humidité relative
I_{clo}	Isolement vestimentaire

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

IMC	Indice de Masse Corporelle
IntAB	Perte d'intégrité du stratum corneum de l'avant-bras
ITA	Individual Typology Angle (angle typologique individuel)
K	Echange par conduction
L*AB	Luminance ou clarté de l'avant-bras
L*J	Luminance ou clarté de la joue
La	Lactate
LDI	Imagerie par Laser Doppler
LSC	Lipides de la surface cutanée
M	Energie métabolique
Nb	Nombre
p	p-valeur, probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle d'un test statistique
PCA	Acide pyroglutamique ou acide pyrrolidone carboxylique
PEAB	Perte en eau sur les avant-bras
PEJ	Perte en eau sur les joues
PIE	Perte Insensible en Eau
PLS	Partial Least Squares (régression des moindres carrés partiels)
PMV	Predicted Mean Votes (vote prédit moyen de sensation thermique)
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied (pourcentage prédit d'insatisfaits)
PUAB	Perfusion sanguine cutanée de l'avant-bras
PUJ	Perfusion sanguine cutanée de la joue
Qi	Questionnaire
QI	Questionnaire Interactif
QLS	Quantité de lipides surfaciques
R	Echange thermique par rayonnements
r	Coefficient de corrélation
RécupAB	Taux de récupération de la barrière du stratum corneum de l'avant-bras
RED	Résistance Electrodermale
S	Stockage de chaleur
SC	Stratum Corneum
SET	Standard Equivalent Temperature (température équivalente standard)
SNA	Système Nerveux Autonome
Sth	Sensation thermique
T	Température
Ta	Température ambiante
TAB	Température de la face interne de l'avant-bras

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

TABN	Gradient de température entre l'avant-bras et le nez
$T_{consigne}$	Température de consigne
TF	Température du front
TFJ	Gradient de température entre le front et la joue
TFN	Gradient de température entre le front et le nez
TFPO	Gradient de température entre le front et le pouce
T_{int} ou $T_{interne}$	Température interne
TJ	Température de joue
TJAB	Gradient de température entre la joue et l'avant-bras
TJN	Gradient de température entre la joue et le nez
TMRT	Température moyenne rayonnante
TN	Température de nez
Tpeau	Température cutanée superficielle
TPO	Température de pouce
TPOAB	Gradient de température entre le pouce et l'avant-bras
TRP	Canaux cationiques
UCA	Acide urocanique
Vair	Vitesse d'air
W	Travail mécanique utile
Δ	Variations individuelles (par rapport à un niveau moyen individuel)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Introduction générale

« Dans les sciences expérimentales, la mesure des phénomènes est un point fondamental, puisque c'est par la détermination quantitative d'un effet relativement à une cause donnée que la loi des phénomènes peut être établie »

Claude Bernard

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Le secteur du bâtiment, en France, est le plus gros consommateur d'énergie. Il représente, à lui seul, plus de 43% de la consommation d'énergie totale, ce qui représente 24% des émissions de CO_2 [ADEME 2012]. Plus concrètement, chacun d'entre nous consomme, en moyenne, 1,1 tonne d'équivalent pétrole par an pour satisfaire ses besoins et son confort. Or, si les émissions de gaz à effet de serre persistent ou augmentent, la température moyenne terrestre pourrait augmenter de plus de 5°C. Ce réchauffement provoquerait, alors, des perturbations climatiques fortes, ayant des répercussions humaines gravissimes [ADEME 2012]. Face à ces constatations alarmantes, le grenelle de l'environnement a fixé des objectifs ambitieux, pour le secteur du bâtiment, qui consistent à réduire la consommation d'énergie de 38% et les émissions des gaz à effet de serre de 50% d'ici 2020 [Ministère 2012]. L'enjeu de ce secteur n'est donc pas seulement de se préoccuper de la stabilité mécanique, de la sécurité ou de l'étanchéité à l'eau d'un bâtiment, mais c'est aussi d'améliorer en permanence la qualité des ambiances (en termes de confort : acoustique, visuel, olfactif, et thermique et de santé), tout en maîtrisant les impacts sur l'environnement. Les notions de santé et de confort sont fondamentales, elles ne correspondent pas seulement à des souhaits ou à des besoins mais elles constituent des données fondamentales pour le développement durable [CSTB 2012]. En effet, si un environnement ne satisfait pas les occupants, ces derniers le transformeront en y intégrant des technologies qui seront susceptibles de ne plus respecter les contraintes environnementales et les solutions apportées ne seront, donc, pas durables. Il est nécessaire d'utiliser une approche globale et multidisciplinaire (physique, physiologie, psychologie, sociologie, etc.) pour atteindre l'enjeu fixé. Dans ce contexte, les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit se focalisent sur une composante du confort, le jugement thermosensoriel ou le ressenti thermique et plus précisément sur les impacts de la température ambiante sur le bien-être général de l'Homme.

Le confort thermique, défini comme la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique [AFNOR 2006], a déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Au début du siècle dernier, les chercheurs identifiaient des conditions de confort ou d'acceptabilité des ambiances thermiques à partir de variables environnementales sans forcément chercher à comprendre les mécanismes mis en jeu. Mais au fur et à mesure, les auteurs se sont intéressés à la physiologie humaine et à son lien avec le ressenti thermique [Galeou, Grivel *et al.* 1989].

Au niveau physiologique, lors d'une stimulation thermique, l'être humain cherche à assurer son équilibre thermique intérieur grâce à des mécanismes de thermorégulation conscients et inconscients (frissons, sudation, vasomotricité) lui permettant d'évacuer ou au contraire de conserver sa chaleur interne. Ainsi, il a été supposé que l'équilibre du bilan thermique mais aussi

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'atteinte de cet équilibre avec une mise en œuvre minimale des mécanismes physiologiques de thermorégulation (sudation modérée, circulation sanguine stable, variations négligeables de la fréquence cardiaque, faibles différences de températures cutanées locales, *etc.*) étaient nécessaires pour l'établissement d'un état de confort thermique.

Ces deux hypothèses sont la base de nombreux indices ou modèles de prédiction de la sensation et du confort thermique, construits grâce à des données obtenues dans des chambres climatiques. Ces modèles appartiennent à l'approche dite « analytique » qui repose sur la causalité linéaire suivante : physique => physiologie => sensation thermique + confort thermique. Ils sont fondés sur le calcul du bilan thermique du corps. Ce dernier est calculé à partir :

– de modèles physiques, représentant les échanges de chaleur entre la surface cutanée / le vêtement / l'environnement (cf. Figure 1)
– de modèles physiologiques plus ou moins « segmentés » (pour représenter différentes parties du corps), prenant en compte les mécanismes de thermorégulation et prédisant les valeurs des variables physiologiques à partir des variables de l'environnement et des caractéristiques de l'individu (cf. Figure 1)

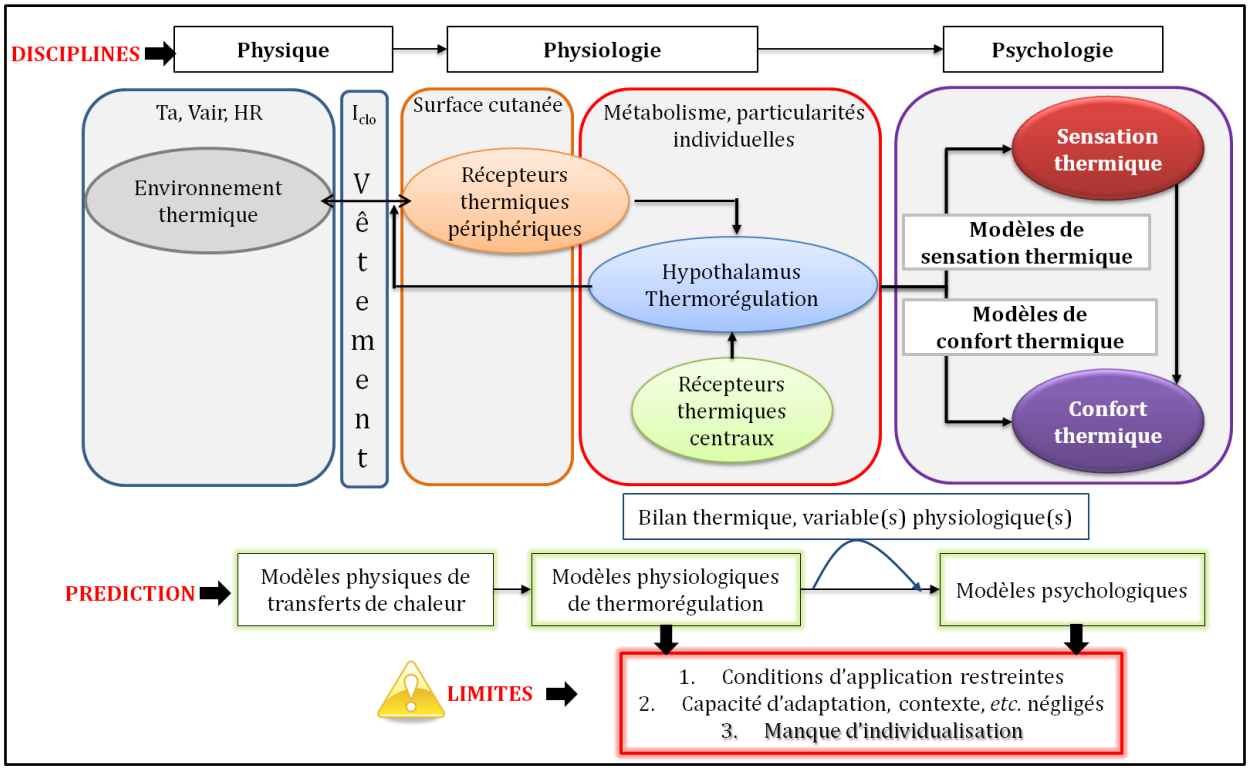


Figure 1 : Représentation schématique de la démarche analytique de prédiction du ressenti thermique (sensation thermique et confort thermique) et de ses limites. Ta : température ambiante, Vair : vitesse d'air, HR : humidité relative, I_{clo} : isolation vestimentaire.

Ensuite, un modèle empirique psychologique (cf. Figure 1) permet de prédire la sensation thermique, soit à partir du bilan thermique, soit à partir d'une ou plusieurs variables

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

physiologiques (prédites ou mesurées) [Walgama, Fackrell *et al.* 2006; Cheng, Niu *et al.* 2011]. Le confort thermique, quant à lui, est estimé empiriquement, en fonction de la sensation thermique.

Trois limites ont été identifiées, dans les modèles couramment utilisés (cf. Figure 1) :

– **Limite n°1** : Les conditions d'application restreintes des modèles

Les modèles sont souvent adaptés à des conditions restreintes. Par exemple, le modèle de Fanger avec l'indice PMV (vote prédit moyen de sensation thermique) et PPD (pourcentage prévu d'insatisfaits) n'est valable que pour des conditions stationnaires, uniformes et modérées [Fanger 1970]. Ou encore, le modèle dynamique de Gagge avec l'indice SET (température équivalente standard) est valable pour des conditions stationnaires et non stationnaires, mais uniquement pour des conditions uniformes puisque le modèle physiologique associé représente le corps par deux compartiments seulement [Gagge, Stolwijk *et al.* 1972]. Des inconforts locaux liés à des asymétries d'environnements ne peuvent donc pas être pris en compte.

Solutions apportées : Des auteurs cherchent toujours à améliorer les modèles physiologiques (tels que le modèle de Stolwijk [Stolwijk et Hardy 1966]), par l'ajout de segments pour modéliser le corps humain ou l'affinage du découpage [Fiala, Lomas *et al.* 1999], par l'introduction de limites de confort pour chaque segment, *etc*. [Huizenga, Hui *et al.* 2001]. Zhang s'est également penché sur la caractérisation de la sensation thermique et du confort thermique dans des situations transitoires et non uniformes pour proposer des modèles psychologiques plus adaptés à ces situations complexes [Zhang 2003; Zhang, Arens *et al.* 2010b].

– **Limites n°2** : Le manque de prise en compte de la capacité d'adaptation des individus

Certains modèles, tels que celui de Fanger adapté aux bâtiments ventilés, sont souvent utilisés dans des conditions non étudiées lors du développement du modèle. Ainsi, l'inconfort thermique dans des bâtiments naturellement ventilés peut être surestimé, et cette surestimation encourage l'installation de climatisation active au détriment de la consommation énergétique. Des investigations menées dans les bâtiments in situ ont, en effet, mis en évidence que le confort estimé de cette façon ne correspondait pas au confort des occupants. Il est supposé que ces écarts reposent sur les interactions dynamiques de l'Homme avec son environnement. L'être humain est actif : il réagit avec les variations de son environnement afin d'atteindre un niveau de confort optimal. Cette adaptation peut se diviser en trois partie : l'adaptation comportementale (liée au contexte), l'adaptation physiologique (ou l'acclimatation) et l'adaptation psychologique (ou l'accoutumance : liée aux attentes, aux expériences passées). Or, les indices rationnels développés grâce à des expérimentations en chambres climatiques ne prennent pas en compte cette capacité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

d'adaptation. Ceci engendre donc des écarts avec la réalité [Humphreys et Nicol 2002]. D'autre part, les investigations in situ ont également montré que la relation souvent établie entre la sensation thermique et le confort thermique (selon laquelle la neutralité thermique ou la sensation de « ni chaud, ni froid » suscite un état de confort optimal) était inexacte dans certaines situations suivant le climat, l'origine de la population, *etc.*[Van Hoof, Mazej *et al.* 2010].

Solutions apportées : Pour faire face à ces limites, l'approche adaptative basée sur des investigations in situ et sur le couplage de grandeurs physiques de l'environnement et des réponses subjectives des occupants s'est beaucoup répandue (même si les relations établies sont de vraies boîtes noires qui ne permettent pas de comprendre les mécanismes physiologiques). Des algorithmes basés sur l'expression linéaire de la température de confort en fonction du climat extérieur ont été mis en place. Aux Etats-Unis, les travaux de de Dear et Brager ont permis d'élaborer un standard du confort adaptatif qui a été inclus dans l'ASHRAE[1] standard 55 [de Dear et Brager 2002]. De plus en plus d'auteurs tentent de prendre en compte cette notion d'adaptation dans leur modèle de confort thermique ou dans leur simulation thermique de l'habitat [Thellier, Monchoux *et al.* 2007].

- **Limite n°3** : Le manque d'individualisation des modèles

Les modèles sont établis pour des « individus moyens », à partir d'une moyenne obtenue sur un large groupe d'individus qui ne représente pas toute la population. Ils indiquent que, dans une situation de confort idéale, seulement 5% des individus sont insatisfaits, alors, qu'en réalité, ce pourcentage est plutôt proche de 20% [Candas 2000]. L'une des causes de cette observation est le manque de prise en compte des différences interindividuelles de ressenti thermique dans les modèles physiologiques et psychologiques. Il est quasi impossible, actuellement, de prédire deux ressentis thermiques différents pour deux individus (avec des similarités anthropométriques : même âge, même poids, même taille et même ethnicité, *etc.*) qui se trouvent dans un même environnement. Pourtant, il est courant de trouver, dans un « open space », des individus qui ont froid, souvent qualifiés de « frileux » et des individus qui se sentent bien et qui ne semblent pas perturbés par la température ambiante. Comment pouvons-nous prétendre optimiser le confort thermique sans prévoir un minimum les différences interindividuelles du ressenti thermique et sans connaître les causes physiologiques de ces différences ? Il n'est évidemment pas possible de prédire le ressenti thermique de chacun mais un ressenti « moyen » a-t-il réellement un sens ? D'ailleurs, le médecin et physiologiste Claude Bernard a fait la remarque suivante dans son

[1] ASHRAE signifie : “American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

ouvrage sur l'introduction de la médecine expérimentale [Bernard 1966] : *« l'emploi des moyennes en physiologie et en médecine ne donne, le plus souvent, qu'une fausse précision aux résultats en détruisant le caractère biologique des phénomènes. »* Cette remarque ne serait-elle pas applicable au domaine du ressenti ? Ne serait-il pas pertinent de s'intéresser à des classes d'individus bien définies pour prédire le ressenti ? De plus, Claude Bernard ajoute : « *Il faut maîtriser la complexité du phénomène par l'expérimentation et l'observation avant d'établir des équations générales. »* Pouvons-nous considérer que nous maîtrisons suffisamment la complexité du ressenti thermique pour le modéliser finement ?

Solutions apportées : Au niveau des modèles physiologiques, de plus en plus d'auteurs introduisent des nuances suivant les particularités anthropométriques des individus. Par exemple, Zhang *et al.* ont amélioré le modèle de Berkeley en prenant en compte des différences physiologiques individuelles au niveau de la production de chaleur ou du débit sanguin grâce à des données anthropométriques (genre, poids, taille, tour de cou, de l'abdomen, des hanches, *etc.*) [Zhang, Huizenga *et al.* 2001]. Mais, il existe un vrai manque au niveau des modèles psychologiques et au niveau de la caractérisation expérimentale des différences interindividuelles. Quelques différences ont déjà été identifiées à travers des expérimentations, mais les résultats ont tendance à diverger suivant les auteurs. Toutefois, Nagashima *et al.* ont montré que les individus particulièrement sensibles au froid ont tendance à avoir des températures de doigts plus faibles (en lien probable avec une activation particulière de la vasoconstriction) que les autres [Nagashima, Yoda *et al.* 2002]. Il semble bien y avoir un lien entre la physiologie humaine et les différences de ressenti thermique global. Ainsi, il est apparu nécessaire de réaliser davantage d'expérimentations psychophysiologiques fiables pour enrichir nos connaissances sur le ressenti thermique afin d'améliorer la prédiction du confort thermique par l'individualisation (au moins par des classes d'individus) de la prédiction et de proposer des méthodes ciblées d'optimisation du confort thermique.

Ce travail de recherche se concentre sur cette dernière limite. Il a pour objectif de caractériser le ressenti thermique et plus particulièrement d'identifier les causes physiologiques potentielles des différences interindividuelles du ressenti thermique, à travers des expérimentations fiables et multiparamétriques.

L'hypothèse de travail est que l'exploration des propriétés cutanées (liées plus ou moins directement aux mécanismes de thermorégulation) permettra de caractériser les différences interindividuelles de ressenti thermique. En effet, la peau est une cible privilégiée car elle correspond à la principale interface vivante entre l'homme et l'environnement. Cette interface est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

en adaptation perpétuelle, facilement accessible et reflétant l'état de notre milieu intérieur qui dépend à la fois des agressions du monde extérieur et de facteurs internes et personnels tels que la santé, l'humeur, les émotions, *etc.*

Les objectifs intermédiaires ont été les suivants :

- Construire des expérimentations fiables où les facteurs « non thermiques » (stress, contexte, *etc.*) susceptibles de modifier les variables physiologiques observées sont maitrisés.
- Mettre en évidence des groupes d'individus avec des sensibilités thermiques globales différentes.
- Identifier des paramètres physiologiques cutanés permettant de caractériser les différences de ressenti thermique des groupes
- Evaluer l'intérêt d'introduire des classes d'individus et une approche multiparamétrique pour prédire la sensation thermique

Il a été choisi d'étudier le ressenti thermique avec un scénario particulier, c'est-à-dire après des transitions thermiques d'au moins 5°C, dans des espaces de températures modérées (entre 17°C et 30°C) simulant des environnements intérieurs de repos (type bureau, salon, chambre). Ce n'est pas l'état thermique juste après la transition thermique qui a fait l'objet de ce travail mais l'état thermique obtenu 30 minutes après la transition. L'Homme s'adapte en quelques minutes à un environnement donné et son ressenti varie beaucoup lors des premières minutes puis celui-ci a tendance à se stabiliser. Il nous a semblé plus pertinent de nous intéresser à un inconfort ou à un confort « durable » et non transitoire. Même si la situation ne peut pas être considérée comme stationnaire puisque, suivant la transition thermique, l'impact du changement d'ambiance peut encore se faire ressentir trente minutes après la transition, elle sera considérée comme « relativement durable ». Ainsi, le scénario choisi reflète davantage les problèmes de confort thermique du quotidien (au bureau par exemple).

Ce travail exploratoire et multidisciplinaire a été mené avec des entités présentant chacune des spécialités différentes :

- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) de Nantes, spécialisé dans l'étude des ambiances climatiques,
- l'équipe « Capteurs Biomédicaux » de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), spécialisée dans le développement de capteurs ambulatoires capables de suivre l'état d'un individu et en particulier l'état d'activation du système nerveux autonome,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– le Centre de Recherche et d'Investigations Epidermiques et Sensorielles (CE.R.I.E.S) de Chanel R&T, spécialisé dans l'étude de la peau saine.

Ce manuscrit se divise en trois chapitres. Le **premier chapitre** est consacré à l'étude bibliographique des interactions entre l'Homme et son environnement. Il rassemble les éléments essentiels à la construction des expérimentations et il permet d'identifier les catégories de paramètres cutanés qui semblent pertinentes à explorer pour la caractérisation des différences interindividuelles du ressenti thermique. Il est composé de trois grandes parties : la première se focalise sur les différents mécanismes physiques, physiologiques et comportementaux que l'Homme utilise inconsciemment et consciemment lors d'une confrontation à un environnement thermique spécifique ; la deuxième se concentre sur la caractérisation du ressenti thermique déclaré et plus particulièrement sur les liens existant entre le ressenti déclaré et la physiologie humaine ; et la troisième se penche sur les mécanismes cutanés et sur les propriétés cutanées qui sont susceptibles d'être influencés par la température ambiante.

Le **deuxième chapitre** est dédié aux expérimentations préliminaires. Il constitue une véritable phase exploratoire où trois catégories de paramètres cutanés, identifiées à la fin du premier chapitre, sont investiguées afin de dégager les catégories de paramètres cutanés qui méritent d'être analysées plus en détail pour une caractérisation plus fine des différences interindividuelles de ressenti. Il permet aussi de mettre en place une méthodologie expérimentale fiable pour la campagne de mesures qui représente l'objet du troisième chapitre. Plusieurs éléments essentiels seront abordés tels que la méthode d'évaluation du jugement thermosensoriel, la construction de groupes d'individus présentant des ressentis distincts, *etc.*

Le **troisième chapitre** correspond à une analyse physiologique plus approfondie des différences interindividuelles de ressenti. Les atouts ainsi que les limites de la méthodologie utilisée y sont exposés. Il permet également d'évaluer l'intérêt d'utiliser une approche multiparamétrique et de prendre en compte les différences interindividuelles de ressenti, grâce à des classes d'individus choisies judicieusement, pour améliorer la prédiction de la sensation thermique et du confort thermique.

Le choix des appareils de mesure, les différents protocoles, les méthodes de traitement statistique des données et les résultats associés à chaque expérimentation sont détaillés dans chacun des chapitres 2 et 3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 1. Etat de l'art

Présentation des différentes interactions entre l'homme et son environnement et identification des variables physiologiques à explorer pour la caractérisation du ressenti.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

INTRODUCTION

L'Homme interagit en permanence avec son environnement : il capte des signaux énergétiques de toute sorte (énergie lumineuse, énergie sonore, énergie thermique, *etc.*) grâce à des récepteurs spécifiques, il réagit inconsciemment par des mécanismes physiologiques internes, il échange de l'énergie avec l'environnement, il s'adapte pour atteindre un niveau de satisfaction optimal, il construit ses propres représentations mentales du monde qui l'entoure, il émet des appréciations sur son environnement et sur son état, *etc*. L'Homme est donc actif face à l'environnement qui l'entoure. Les mécanismes physiologiques de thermorégulation, les modifications des propriétés cutanées et le ressenti thermique global de chaque individu est le fruit de l'interaction de l'Homme avec son environnement. Il est donc essentiel de rassembler les connaissances actuelles sur ces interactions pour traiter ce sujet de thèse qui consiste à mieux caractériser le ressenti thermique à partir de mesures cutanées.

Ce chapitre se divise en trois parties :

- La première partie aborde en détail les mécanismes internes (physiques, physiologiques et comportementaux) conscients et inconscients de **thermorégulation** qui se mettent en place lors d'une perturbation thermique.
- La deuxième partie rassemble tous les éléments nécessaires à l'étude du **ressenti thermique** (seuils de perception thermique, sensation thermique et confort thermique). Les relations déjà établies entre des variables physiologiques et le ressenti thermique ainsi que les facteurs susceptibles d'influencer le **jugement thermosensoriel** y sont exposés.
- La troisième partie se concentre sur les **mécanismes internes de la peau** puisque cette dernière est la cible des mesures des expérimentations décrites dans les chapitres 2 et 3. Cette partie permet d'identifier les mesures cutanées qui varient avec la température ambiante (et donc avec le ressenti) et qui seraient susceptibles de nous fournir des explications physiologiques sur les différences interindividuelles de ressenti thermique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1. Les mécanismes physiologiques face à des sollicitations thermiques

Cette partie détaille les **échanges physiques** qui s'établissent entre l'Homme et son environnement, la **thermorégulation active inconsciente**, et les mécanismes qui permettent à l'Homme de **prendre conscience** de son environnement et d'**agir** en conséquence pour atteindre un niveau de confort optimal.

1.1.1. L'homéostasie : la base des réponses physiologiques humaines

Afin de bien comprendre comment l'Homme interagit physiologiquement avec son environnement, il est important d'introduire une notion fondamentale qui est la base de tous les mécanismes intimes de l'Homme et de la physiologie humaine : l'**homéostasie**. Ce concept a été introduit par Claude Bernard [Binet 1952; Bernard 1966; Arens et Zhang 2006] qui a démontré la nécessité d'un milieu interne constant pour assurer des conditions satisfaisantes aux diverses fonctions physiologiques. Aujourd'hui, il est admis que la constance des propriétés physico-chimiques du milieu interne est relative [IUPS, commission *et al.* 2001; Arens et Zhang 2006]. En effet, une fonction physiologique n'est pas strictement constante dans le temps, mais, lors d'une perturbation, elle revient à sa valeur de base grâce à une contre-réaction c'est-à-dire à un rétrocontrôle (« feedback ») pour que le corps retrouve un état d'équilibre. Une variable peut donc varier à court terme mais elle est pratiquement constante sur du long terme. D'autre part, l'organisme vivant peut être exposé à deux types de changement de l'environnement : soit périodiques donc prévisibles, soit aléatoires donc imprévisibles. Pour faire face à ces changements, l'Homme est muni, respectivement, d'un système de régulation à long terme correspondant à l'organisation temporelle de l'organisme (rythmes biologiques) et d'un système de régulation à court terme mettant en jeu des processus de rétrocontrôle.

Dans ce travail de recherche, la modification brutale de la température ambiante correspond à la perturbation non prévisible imposée à l'organisme et le système de régulation exploré est celui de la température corporelle.

1.1.2. Les conditions de l'homéothermie

L'homéothermie permet à l'Homme d'assurer la stabilité de la température de son noyau[2] et par là même, d'assurer son indépendance vis-à-vis des conditions atmosphériques.

[2] Pour simplifier les explications, l'Homme est assimilé à un noyau (représentant 2/3 des tissus) entouré d'une enveloppe cutanée (représentant 1/3 des tissus).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les deux principales conditions de l'**homéothermie** sont :

- **la constance relative de la température du noyau**

Elle s'applique uniquement au noyau ou aux tissus profonds de l'organisme (cerveau, viscères, foie, reins, etc.). La température du noyau se trouve en moyenne à 37°C et elle varie peu : entre 36°C la nuit et 38-39°C lors de certains efforts prolongés. Elle peut être maintenue presque constante, même si la température ambiante varie entre 13 et 60°C (pour un homme nu, immobile en environnement sec) [Guyton et Hall 2002]. A l'opposé, la température de l'enveloppe cutanée (comprise, en condition standard, entre 29 et 30°C au niveau des pieds et entre 34 et 35°C au niveau de la tête) peut varier fortement : des variations de 10°C sont possibles en fonction des conditions externes [Candas 2000]. Cette variabilité de la température de l'enveloppe permet de dissiper plus ou moins de chaleur vers l'environnement et ainsi d'assurer la seconde condition.

- **l'équilibre entre les gains et les pertes de chaleur**

Le maintien de la température du noyau constante nécessite, qu'à chaque instant, la production de chaleur (thermogenèse), c'est-à-dire le flux thermique produit par les oxydations cellulaires et par des éventuels apports de chaleur d'origine externe, soit équilibrée par une perte de chaleur équivalente (thermolyse).

$$Bilan\ thermique = Thermogen\grave{e}se - Thermolyse \quad \textbf{[1.1-1]}$$

$$Bilan\ thermique = M\acute{e}tabolisme + Gains\ de\ chaleur - Pertes\ de\ chaleur \quad \textbf{[1.1-2]}$$

Tant que le bilan thermique est nul, l'homéothermie est assurée. Cependant, lorsque le bilan est supérieur (ou inférieur) à 0, la température du noyau augmente (ou diminue) et il y a un risque d'hyperthermie (ou d'hypothermie). Cette variation de la température du noyau doit alors être corrigée. Pour ce faire, l'Homme est muni d'un système thermorégulateur correspondant à un système de rétrocontrôle négatif capable de déclencher des mécanismes spécifiques inconscients (régulation autonome) et conscients (régulation comportementale), permettant le retour à l'équilibre. L'organisme pourrait alors se décomposer en deux systèmes (cf. Figure 1.1) :

- **un système « contrôlé »** caractérisé par un noyau qui produit de la chaleur et par une enveloppe cutanée qui assure les transferts de chaleur avec l'environnement extérieur
- **un système « contrôleur »** composé de capteurs, de centres intégrateurs de contrôle et d'effecteurs qui exécutent les mécanismes actifs commandés par les centres de contrôle.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

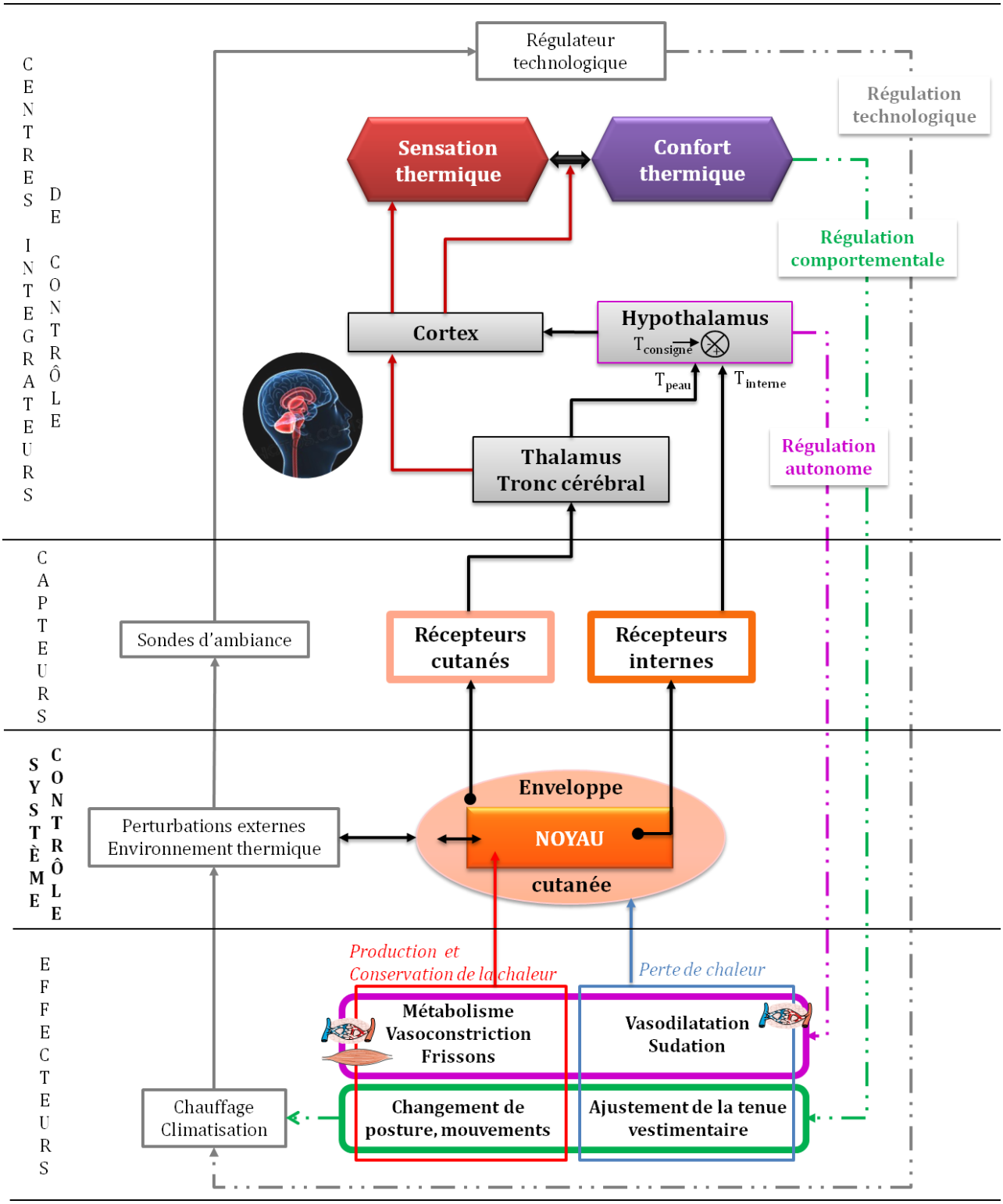


Figure 1.1 : Principe de la thermorégulation [système contrôlé + système contrôleur] avec la boucle de régulation autonome, comportementale et technologique. Modifié à partir de [Hensel 1981].

Les parties suivantes consisteront à détailler le fonctionnement de la thermorégulation, schématisée ci-dessus, en explicitant les points suivants :

– les sources de production de chaleur au sein du noyau,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- les différents transferts de chaleur « passifs » s'effectuant entre le noyau et l'enveloppe cutanée et entre l'enveloppe cutanée et l'environnement sans que l'organisme ne mette en œuvre des processus biologiques tendant à modifier les pertes ou les gains de chaleur,
- les composants et le fonctionnement de la thermorégulation « active » inconsciente (ou de la régulation autonome) : les thermorécepteurs, les intégrateurs, le système nerveux autonome et les mécanismes effecteurs,
- le fonctionnement de la thermorégulation « active » consciente (ou de la régulation comportementale) : la thermoception et les actions mises en œuvre.

1.1.3. La thermogenèse

L'Homme est **endotherme** : il produit sa propre chaleur au sein du noyau par oxydation des aliments. En effet, pour produire l'énergie nécessaire à l'activité cellulaire, au fonctionnement des différents organes et à l'activité musculaire, l'Homme dégrade des substances énergétiques (glucides, protides, lipides), en consommant de l'oxygène, en produisant du CO_2, de l'eau métabolique et en dégageant de l'énergie métabolique. Comme le rendement énergétique de toute activité (chimique, osmotique, musculaire, etc.) est faible, une grande partie de l'énergie dégagée est transformée en chaleur.

Suivant les situations, la chaleur produite par l'organisme (H) en Watt est différente :

- **Au repos**, la totalité de l'énergie métabolique (M) est transformée en chaleur : H = M.

Un individu au repos, allongé et en condition de neutralité thermique[3] dissipe entre 40 et 50 $W.m^{-2}$, soit environ 80 W pour un homme de taille et de poids moyens (avec une surface corporelle d'environ 1,8 m^2) [Dittmar, Delhomme *et al.* 1996; AFNOR 2005a].

- **Lors d'une activité physique**, une fraction du métabolisme énergétique (M) est transformée en travail mécanique « utile » (W) mais pas en chaleur : H = M – W

Comme le rendement des muscles ne dépasse pas 25% [Dittmar, Delhomme *et al.* 1996; Parsons 2002a], une quantité importante de chaleur est libérée. Pour la plupart des activités « industrielles », le travail utile est supposé nul (W=0) [AFNOR 2005a]. Pour une course ou une marche (vitesse supérieure à 7 km h^{-1}), un homme « moyen » dissipe ~ 520 W [AFNOR 2005a].

- **Lors de l'ingestion de nourriture**, de la chaleur est produite.

[3] Une condition de neutralité thermique correspond à une condition où l'équilibre thermique est atteint et où aucun mécanisme de lutte contre le froid ou le chaud n'est mobilisé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

L'action dynamique spécifique de la nourriture, la transformation chimique et la dégradation des aliments par l'organisme libèrent de la chaleur [Johnson 1991].

L'énergie métabolique de base est susceptible de varier avec l'âge, le sexe, l'origine ethnique, l'état émotionnel, le climat, l'action de certaines hormones, la posture, *etc.* [Johnson 1991]. Le métabolisme énergétique peut être estimé grâce à des tableaux regroupant des valeurs de métabolisme énergétique pour chaque profession et type d'activité mais aussi grâce à des méthodes plus précises mais plus fastidieuses reposant sur la mesure de la fréquence cardiaque ou de la consommation d'oxygène. Toutes les méthodes sont détaillées dans la norme ISO 8996 [AFNOR 2005a]. Au cours de ces travaux, l'estimation du métabolisme a été effectuée à partir des classifications par catégorie d'activité.

La chaleur métabolique produite au sein du noyau se répartit ensuite de façon homogène dans tout le corps grâce à des transferts thermiques « passifs ».

1.1.4. Les transferts de chaleur « passifs »

La chaleur métabolique est dissipée du noyau vers l'enveloppe cutanée grâce au principe selon lequel l'Homme, comme n'importe quel système matériel qui présente une différence de température avec un autre système tel que l'environnement, échange de la chaleur (écoulement du chaud vers le froid) afin que la différence de température tende à disparaitre. Ces transferts de chaleur obéissent aux lois physiques de la thermocinétique et ils peuvent se faire selon trois modalités : la conduction, la convection et le rayonnement [Houdas et Guieu 1977].

De plus, comme l'Homme correspond à un système biologique endotherme qui respire et qui est constitué d'eau et d'une circulation sanguine, d'autres transferts de chaleur sont possibles par l'intermédiaire d'un changement d'état de l'eau (évaporation) ou encore grâce à la convection sanguine. Les échanges s'effectuent de différentes façons suivant les zones suivantes :

- entre le noyau et l'enveloppe cutanée,
- entre l'enveloppe cutanée et le milieu extérieur
- au niveau des voies respiratoires.

Seuls les transferts thermiques dits « passifs », puisqu'ils sont purement physiques et qu'ils ne dépendent pas de processus biologiques tendant à modifier les pertes et les gains de chaleur de l'organisme, seront présentés dans cette partie pour chacune des zones évoquées précédemment.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.4.1. Les échanges thermiques entre le noyau et l'enveloppe

La transmission de chaleur entre le noyau et l'enveloppe s'effectue selon deux modalités : la conduction de tissu en tissu et la convection par le sang [Houdas et Guieu 1977].

Les **transferts thermiques par conduction tissulaire** sont souvent considérés comme très lents et donc négligeables à cause de la faible inertie thermique de la peau (comprise entre 90 et 400×10^{-5} Cal cm^{-4} °C^{-2} s^{-1} suivant la circulation sanguine) et des tissus adipeux (comprise entre 22 et 32×10^{-5} Cal cm^{-4} °C^{-2} s^{-1} suivant la température).

Cependant, les **transferts par convection forcée par le sang** sont prédominants. Ils dépendent de la différence de température entre le sang artériel (sang oxygéné se dirigeant du noyau vers la peau) et le sang veineux (se dirigeant de la peau vers le noyau), du débit sanguin (dépendant des mécanismes « actifs » de thermorégulation abordés plus loin) et de la capacité calorifique du sang (quantité de chaleur contenue dans le sang pour 1°C de température : C_s=3,8 kJ L^{-1}).

1.1.4.2. Les échanges thermiques entre l'enveloppe cutanée et le milieu extérieur

Les échanges de chaleur entre l'organisme et le milieu environnant s'effectuent principalement à partir de l'enveloppe cutanée par l'intermédiaire de la conduction, de la convection, du rayonnement et de l'évaporation (cf. Figure 1.2) [Houdas et Guieu 1977; Clark, McArthur *et al.* 1981; Vogt 1985; Johnson 1991; Candas 2000; Guyton et Hall 2002].

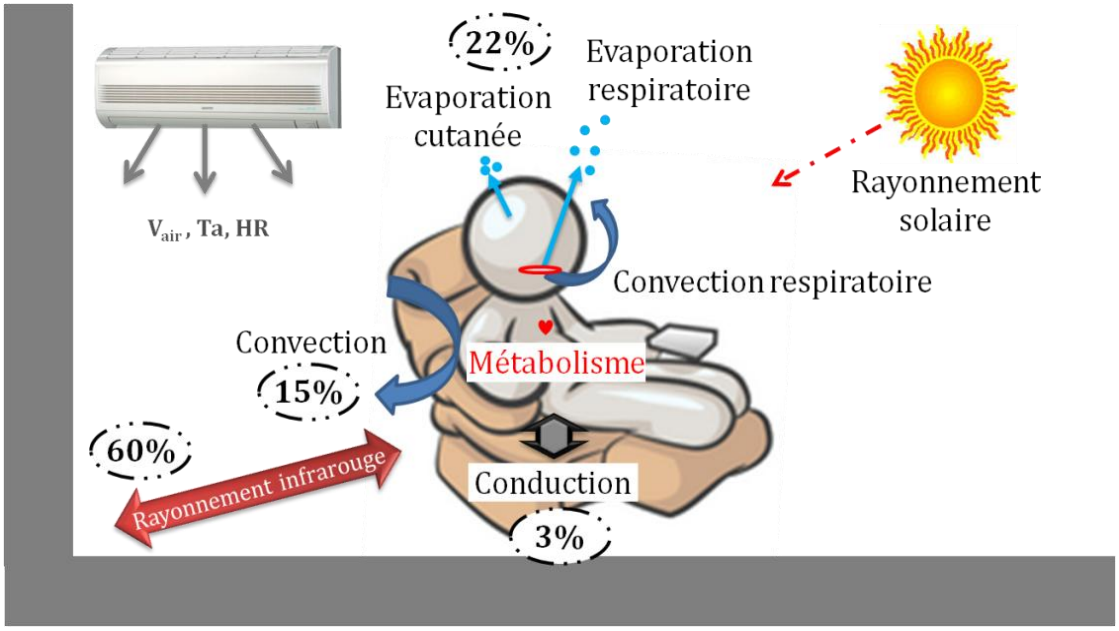


Figure 1.2 : Les principaux transferts thermiques « passifs » entre l'Homme et son environnement. Les pourcentages (issus de [Guyton et Hall 2002]) expriment la proportion des pertes de chaleur par chacune des voies de dissipation thermique pour un homme nu dans un environnement confortable et sans mouvement d'air important.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les **échanges par conduction** avec les solides (K) dépendent de la surface de contact, de la température et de la conductivité des solides. Lorsque de petites zones corporelles (mains, pieds) sont en contact, les échanges sont négligeables, alors que lorsque des parties plus grandes de la surface corporelle sont en contact avec le mobilier, les tissus en contact se mettent rapidement en équilibre et se comportent comme un isolant thermique. Ainsi, le système peut être assimilé à une résistance thermique (analogue au vêtement) qui est incluse dans l'expression des échanges convectifs.

Les **échanges par convection et par conduction avec l'air** (souvent regroupés sous le terme d'échanges convectifs) (C) sont davantage utilisés. Ils dépendent de la différence de température entre l'air et la peau, de l'isolement vestimentaire et d'un coefficient dynamique de convection dépendant en grande partie de la vitesse d'air et de la posture [Kurazumi, Tsuchikawa *et al.* 2008b]. Sans convection forcée (vent ou ventilateur) et lorsque la température de peau est plus élevée que la température de l'air, l'air est chauffé par conduction et il entre en mouvement : c'est la convection naturelle ($v_{air} \sim 0{,}2$ m.s^{-1}). Ce phénomène de convection est également présent entre la peau et le vêtement.

Les **échanges thermiques par rayonnement** (R) s'effectuent sous forme d'ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde d'émission est comprise soit entre 0,3 et 3µm pour le rayonnement solaire, soit entre 3 et 100 µm dans les autres cas. Ils sont particulièrement prédominants lorsque la différence entre la température de peau et de l'environnement est grande. Concrètement, tous les corps (corps humain, objets, murs) dont la température est supérieure au zéro absolu rayonnent dans l'infrarouge et dans toutes les directions. Les transferts thermiques par rayonnement au niveau de la peau résultent donc du rayonnement émis et du rayonnement reçu. Le flux radiatif au niveau de la peau dépend de la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5{,}67\times10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}), des différences des températures de surface (peau et environnement), de la capacité des corps à absorber et à réémettre l'énergie rayonnée c'est-à-dire du coefficient d'émissivité[4], de la posture de l'individu [Kurazumi, Tsuchikawa *et al.* 2008a] et de la tenue vestimentaire. Pour évaluer ces échanges, la température ambiante est souvent associée à la température moyenne

[4] Le coefficient d'émissivité correspond au rapport entre l'émission d'un corps réel (la peau par exemple) et l'émission du corps noir porté à la même température. Il peut se mesurer de différentes façons (cf. [Hervé 2005]). Suivant les auteurs, la valeur de l'émissivité de la peau est comprise entre 0,96 et 0,99. La valeur de 0,98 a été retenue pour cette étude tout en sachant que la rugosité, l'humidité et bien d'autres facteurs de qualité de surface de la peau peuvent avoir un impact sur cette valeur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

rayonnante[5] qui prend en compte les flux thermiques locaux provenant des murs, du sol, du plafond, *etc.* [AFNOR 2002; La Gennusa, Nucara *et al.* 2005].

Les **échanges de chaleur par évaporation spontanée de l'eau à travers la peau** non rigoureusement imperméable (E_{ins}) (ou perspiration insensible cutanée) correspondent à des phénomènes passifs de diffusion transépidermique. Ils sont liés aux différences des pressions partielles de vapeur d'eau entre le milieu interne de l'organisme et l'environnement. Ils entrainent une déperdition thermique relativement modeste (~ 5 à 6,5 W m^{-2}) [Houdas et Guieu 1977] et sont d'autant plus importants quand l'humidité de l'atmosphère est basse en valeur absolue.

1.1.4.3. Les échanges thermiques au niveau des voies respiratoires

Les échanges thermiques par les voies respiratoires sont secondaires comparés aux échanges effectués par la peau. Ils peuvent se faire par convection (C_{res}) ou par évaporation (E_{res}) [Houdas et Guieu 1977; Johnson 1991].

Les **échanges de chaleur sensible par convection** dépendent du débit de ventilation respiratoire (qui est fonction du métabolisme) et de la différence de température entre l'air inspiré et l'air expiré (qui est proche de la température interne à la sortie des poumons).

Les **échanges de chaleur latente par évaporation** (E_{res}) dépendent du débit de ventilation respiratoire et de la différence de pression de vapeur d'eau entre l'air ambiant et l'air expiré (~ 5,87 kPa à 34°C). A la sortie des voies respiratoires, l'air est presque saturé en vapeur d'eau (HR ~ 80-90%). Le changement d'état de l'eau implique alors une perte de chaleur puisque l'évaporation d'un gramme d'eau correspond à la dissipation de 0,58 Calories. En moyenne 450 à 600 ml d'eau sont quotidiennement évaporés (de façon passive) par la peau et les voies respiratoires. Ceci correspond à une perte horaire de 12 à 16 Calories.

Les équations associées à chacun des processus d'échange thermique, décrits ci-dessus (partie 1.1.4.2. et 1.1.4.3.), sont disponibles dans de nombreux ouvrages [Houdas et Guieu 1977; Johnson 1991; Candas 2000] et en particulier dans la norme NF EN ISO 7933 [AFNOR 2005b].

[5] La température moyenne rayonnante est définie comme "la température des parois d'une enceinte virtuelle pour laquelle la température des parois serait uniforme et les échanges par rayonnement entre cette enceinte et l'homme seraient égaux aux échanges par rayonnement dans l'enceinte réelle". Les différents moyens de calculs et de mesures de cette grandeur sont détaillés dans la norme NF EN ISO 7726. L'étude de La Gennusa *et al.* (2005) propose une équation pour calculer la température moyenne rayonnante en prenant en compte l'influence d'une tache solaire dans un environnement intérieur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.4.4. L'influence des vêtements sur les échanges thermiques

Comme évoqué lors de la description de certains transferts thermiques, les vêtements sont susceptibles de modifier les échanges thermiques puisqu'ils constituent une résistance aux échanges de chaleur et de vapeur d'eau qui s'effectuent entre la peau et l'environnement. Les flux convectifs, radiatifs et d'évaporation cutanée sont réduits [Vogt 1985]. Les facteurs de réduction de ces flux dépendent du comportement thermique des vêtements qui est lui-même fonction de la résistance thermique et de la capacité évaporatoire du vêtement mais également des mouvements du corps, de la pénétration de l'air dans les tissus ou de l'adsorption d'eau, *etc.* [Parsons 2002a]. Mais dans un souci de simplification, il est souvent supposé que les transferts de chaleur entre la peau et les tissus se font uniquement par conduction. L'isolement thermique intrinsèque de la tenue vestimentaire est alors représenté par un indice « I_{clo}» en m² °C W^{-1} qui est souvent exprimé avec l'unité Clo. Cette unité correspond à l'isolement nécessaire au maintien de la « balance thermique » d'un homme sédentaire assis dans une ambiance à 21°C (T_{peau} = 33,3°C, HR=50%, v_{air} < 0,51 m s^{-1}) : 1 Clo = 0,155 m² °C W^{-1}. La détermination de la valeur de cet isolement peut se faire grâce à des tableaux regroupant des valeurs d'isolement pour des ensembles vestimentaires types ou pour des éléments vestimentaires [AFNOR 2006; AFNOR 2007].

1.1.4.5. Le bilan thermique « passif »

Suite à l'identification des transferts thermiques s'effectuant entre l'Homme et son environnement, il est possible de déduire le bilan thermique « passif » selon lequel la production de chaleur interne du corps, qui correspond au métabolisme énergétique (M) moins la puissance mécanique utile (W), est compensée par les échanges de chaleur, au niveau de la peau, par conduction (K), convection (C), rayonnement (R) et évaporation (E_{ins}), ainsi que par les échanges de chaleur au niveau des voies respiratoires, par convection (C_{res}) et évaporation (E_{res}).

$$M - W = K + C + R + E_{ins} + C_{res} + E_{res} + S \qquad \textbf{[1.1-3]}$$

Le terme (S) de l'équation [1.1-3] correspond au stockage éventuel de chaleur. Or, l'homéotherme ne peut pas stocker une quantité importante de chaleur puisqu'il doit maintenir sa température interne constante. Donc, lorsque le bilan établi à partir des transferts thermiques « passifs » entraine une quantité de chaleur stockée (S) trop importante, l'Homme met en jeu des mécanismes de régulation qui nécessitent de l'énergie et qui seront donc qualifiés d' « actifs ». Ces mécanismes seront regroupés sous le terme de « thermorégulation active » dans la suite.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.4.6. Bilan

La partie 1.1.4. met en évidence, qu'en plus des facteurs environnementaux tels que la température d'air, la vitesse d'air, l'humidité relative et la présence d'une tache solaire dans l'environnement, d'autres facteurs comprenant la tenue vestimentaire, la posture, l'ingestion d'aliments, le niveau d'activité physique, et bien d'autres ont un impact sur l'équilibre thermique « passif ». Ils devront donc être maîtrisés lors des expérimentations.

1.1.5. La thermorégulation active inconsciente : la régulation autonome

Avant de décrire les différentes actions « inconscientes » de la thermorégulation qui permettent de rétablir un équilibre thermique lors d'une perturbation externe, les différents éléments de la boucle de régulation autonome sont présentés.

1.1.5.1. Les thermorécepteurs

Les thermorécepteurs correspondent à des capteurs de températures capables de détecter un réchauffement ou un refroidissement du corps responsable d'un déséquilibre du bilan thermique. Il existe 2 types de récepteurs qui ont chacun une température optimale de réponse différente : les thermorécepteurs au chaud et les thermorécepteurs au froid. Tous ces récepteurs peuvent être classés en fonction de leur localisation anatomique :

- **les thermorécepteurs cutanés**

Ils renseignent sur la température périphérique. Ceux qui sont sensibles au chaud sont plus profonds (dans la couche supérieure du derme : entre 0,3 et 0,6 mm) et moins nombreux (10 fois moins dans certaines zones du corps telles que la main) que ceux sensibles au froid (dans l'épiderme : entre 0,15 et 0,17 mm) [Guyton et Hall 2002; Arens et Zhang 2006]. Le fonctionnement et les caractéristiques de ces récepteurs sont abordés en détail dans la description de la thermorégulation active consciente (cf. partie 1.1.6.2.1. page 42).

- **les thermorécepteurs des tissus profonds**

Ils sont situés dans la moelle épinière, dans certains viscères abdominaux et dans les gros troncs veineux du thorax et de la partie supérieure de l'abdomen. Ils renseignent sur la température du noyau et sont plus sensibles au froid qu'au chaud [Guyton et Hall 2002].

- **les thermorécepteurs du système nerveux central**

Ils sont situés sur l'axe neuronal (de la moelle épinière au cortex cérébral) [Van Someren, Raymann *et al.* 2002]. Ils renseignent sur la température interne ou plus précisément sur la température du sang passant dans le cerveau.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.5.2. Les intégrateurs

Une fois que les signaux thermiques sont captés par les différents types de thermorécepteurs, l'information est intégrée à différents niveaux de l'axe neuronal. Des expérimentations sur des animaux ont montré qu'il n'y avait pas un et unique centre de thermorégulation et qu'il y avait une hiérarchie entre l'hypothalamus, le tronc cérébral et la moelle épinière [Bicego, Barros *et al.* 2007]. Toutefois, la zone principale d'intégration a été localisée au niveau de l'hypothalamus.

1.1.5.2.1. L'hypothalamus

Même si il existe des divergences entre les auteurs au niveau de l'organisation des centres thermorégulateurs hypothalamiques, il est admis que la zone antérieure et la zone postérieure de l'hypothalamus jouent des rôles importants. L'une des organisations possible et souvent mentionnée est la suivante [Zhang 2003; Simon 2006]:

- **l'hypothalamus antérieur** joue à la fois le rôle de capteur et d'intégrateur de la température interne : lorsque la température qu'il mesure dépasse la zone de consigne (ou « set point »), il déclenche des mécanismes de lutte contre le chaud.
- **l'hypothalamus postérieur** reçoit principalement les signaux des thermorécepteurs cutanés et déclenche des mécanismes de lutte contre le froid ou de maintien de la chaleur.

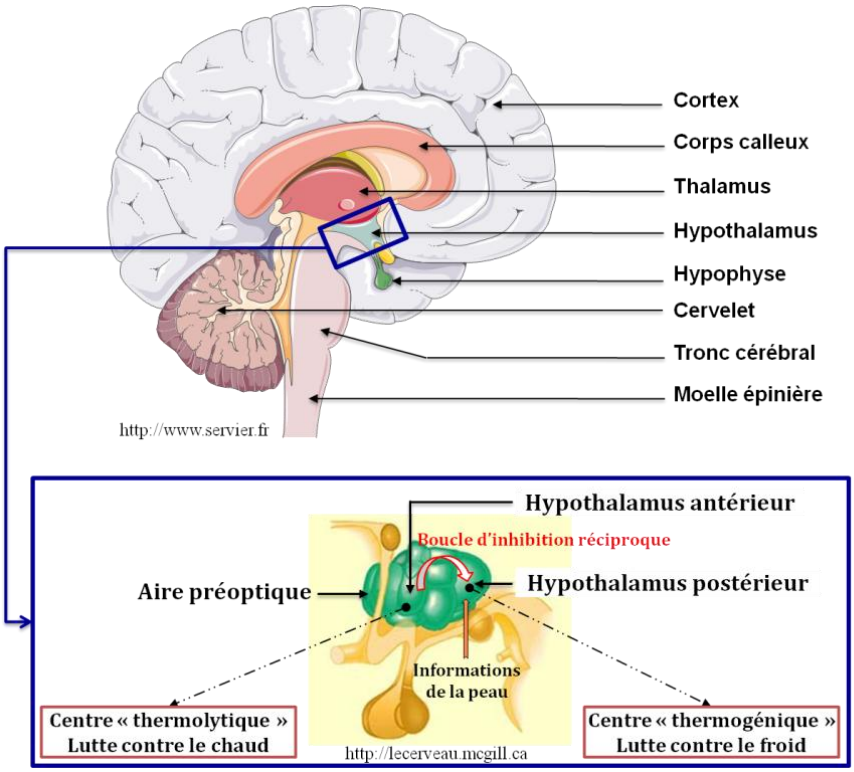


Figure 1.3 : Les principales zones du cerveau avec un zoom sur le centre intégrateur majeur de la thermorégulation autonome : l'hypothalamus (modifiée à partir de http://www.servier.fr et http://lecerveau.mcgill.ca et [Zhang 2003])

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Ces deux centres hypothalamiques sont couplés par des liaisons d'inhibition réciproque (cf. Figure 1.3) [Houdas et Guieu 1977; Richalet et Regnard 2009]. Par exemple, si la température interne est élevée, l'activité de la zone « antérieure » de l'hypothalamus déclenche le phénomène de sudation mais lorsque la température cutanée diminue à cause d'un refroidissement extérieur, la zone « postérieure » de l'hypothalamus est stimulée et inhibe la zone « antérieure » ce qui engendre une diminution ou un arrêt de la sudation.

Donc, une partie de l'hypothalamus est capable de déclencher, suivant l'écart par rapport à une valeur de consigne, les mécanismes effecteurs de lutte contre le froid ou le chaud en activant spécifiquement le système nerveux autonome. Le système nerveux autonome ainsi que le principe de la « zone de consigne » seront présentés dans les deux parties suivantes.

1.1.5.2.2. Le concept de « consigne »

Le système thermorégulateur humain peut être assimilé à un système de régulation avec un thermostat dont la valeur de consigne (appelée « set-point » en anglais) est reliée non seulement à la température centrale mesurée par l'hypothalamus mais aussi aux températures des autres tissus profonds et aux températures cutanées. En effet, dès 1969, Benzinger a montré que la température centrale de consigne pouvait être modifiée par la température cutanée [Benzinger 1969]. Par exemple, le refroidissement de la peau peut amener les centres hypothalamiques au seuil de déclenchement du frisson même quand la température hypothalamique est encore dans les limites de la normale : l'augmentation de la thermogenèse par le refroidissement cutané « anticipe » et prévient la survenue d'une éventuelle diminution de la température interne. Cependant, la température interne et la température cutanée contribuent dans des proportions différentes au déclenchement des mécanismes effecteurs. La température interne (T_{int}) a un impact plus fort que la température cutanée (T_{peau}) sur les réponses thermorégulatrices mais la température de peau a un rôle plus important dans la lutte contre le froid que dans la lutte contre le chaud : un rapport (T_{int}/T_{peau}) aux alentours de 4/1 pour le déclenchement des frissons ou de la vasoconstriction et de 7/1 pour la sudation et de 20/1 pour la vasodilatation [Frank, Raja *et al.* 1999].

Actuellement, il est admis que la consigne n'est plus une valeur fixe [IUPS, commission *et al.* 2001]. Le seuil de déclenchement des frissons et celui du déclenchement de la sudation est différent. Il existe une zone sans réponse thermorégulatrice de type frisson ou sudation (cf. Figure 1.4) : c'est une zone inter-seuil (définie dans le glossaire de physiologie thermique sous le nom

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

de « Thermoeffector threshold zone » ou « Interthreshold zone » [IUPS, commission *et al.* 2001]) [Mekjavic et Eiken 2006].

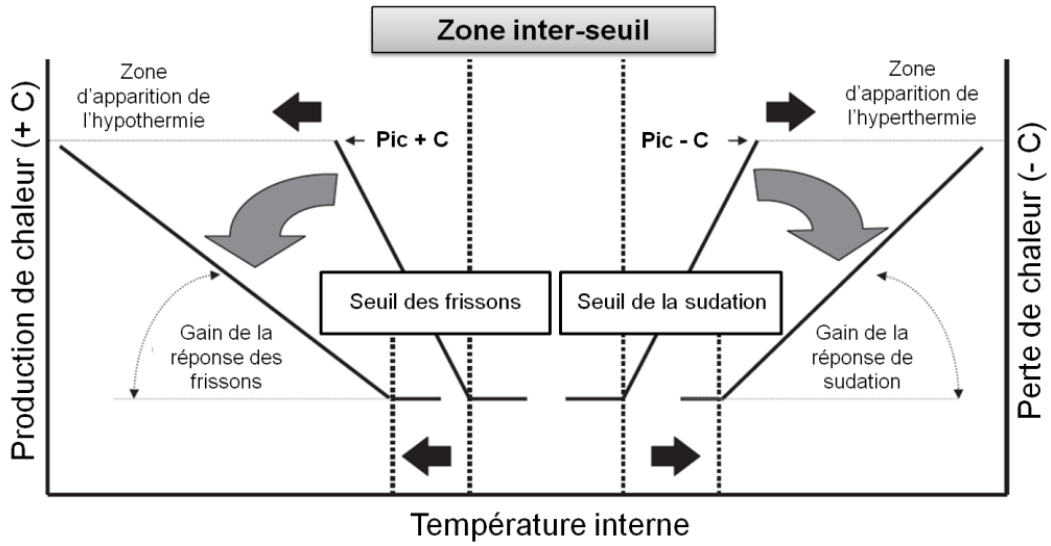


Figure 1.4 : Illustration de la zone « inter-seuil ». Cette zone est délimitée par le seuil de température interne de la sudation et par celui du déclenchement des frissons. La réponse des effecteurs est caractérisée à la fois par leur seuil et leur gain qui peuvent être modifiés par des facteurs non-thermiques. Réalisée à partir de [Mekjavic et Eiken 2006].

Dans cette zone, les réponses vasomotrices activées par la température de peau (33-35 °C) suffisent à maintenir une température interne « relativement » constante.

Les seuils ainsi que les gains des réponses thermorégulatrices (frissons et sudation) ne sont pas fixes, ils peuvent être modifiés par des facteurs non thermiques tels que l'exercice, l'état d'hydratation, le rythme circadien, le cycle menstruel, *etc.* (cf. Figure 1.4). Les influences de ces facteurs non thermiques sur la régulation autonome seront abordées dans la partie 1.1.5.5. , page 35.

1.1.5.3. Le lien entre les intégrateurs et les effecteurs : le système nerveux autonome

Le système nerveux autonome permet d'établir la connexion entre les centres intégrateurs et les organes effecteurs responsables des mécanismes de la thermorégulation active inconsciente (cf. Figure 1.5). Il appartient au système nerveux périphérique. Il est composé de neurones qui innervent les organes internes, les vaisseaux sanguins et les glandes. Il se subdivise en trois systèmes : le système **sympathique**, le système **parasympathique** et le système **entérique** impliqué dans les fonctions digestives.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

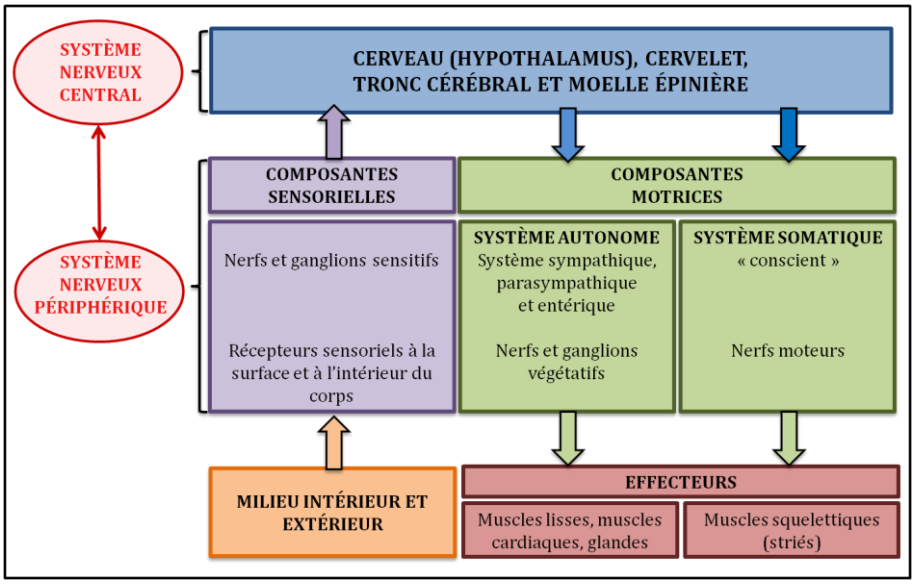


Figure 1.5 : Représentation des composantes principales du système nerveux central et périphérique et de leurs relations fonctionnelles, à partir de [Purves, Augustine *et al.* 1999].

Le système sympathique et parasympathique ont des fonctions parallèles et peuvent agir réciproquement l'un sur l'autre (lorsque le système sympathique stimule un organe particulier, le système parasympathique peut quelquefois l'inhiber) excepté au niveau de certains organes tels que les vaisseaux sanguins et les glandes sudoripares qui sont uniquement innervées par les axones sympathiques excitateurs [Bear, Connors *et al.* 2006] (cf. Figure 1.6). Le sytème sympathique est connu pour agir en période d'alerte ou de stress. Il répond également au processus de régulation cardiaque, au contrôle sympathique de la sueur et du débit sanguin au niveau de la peau. Il joue donc un rôle essentiel dans la thermorégulation. A l'inverse, le système nerveux parasympathique agit dans la durée et sur certaines fonctions spécifiques des organes. Il agit principalement sur la digestion, la croissance, la réponse immunitaire et les réserves énergétiques [Guyton et Hall 2002].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

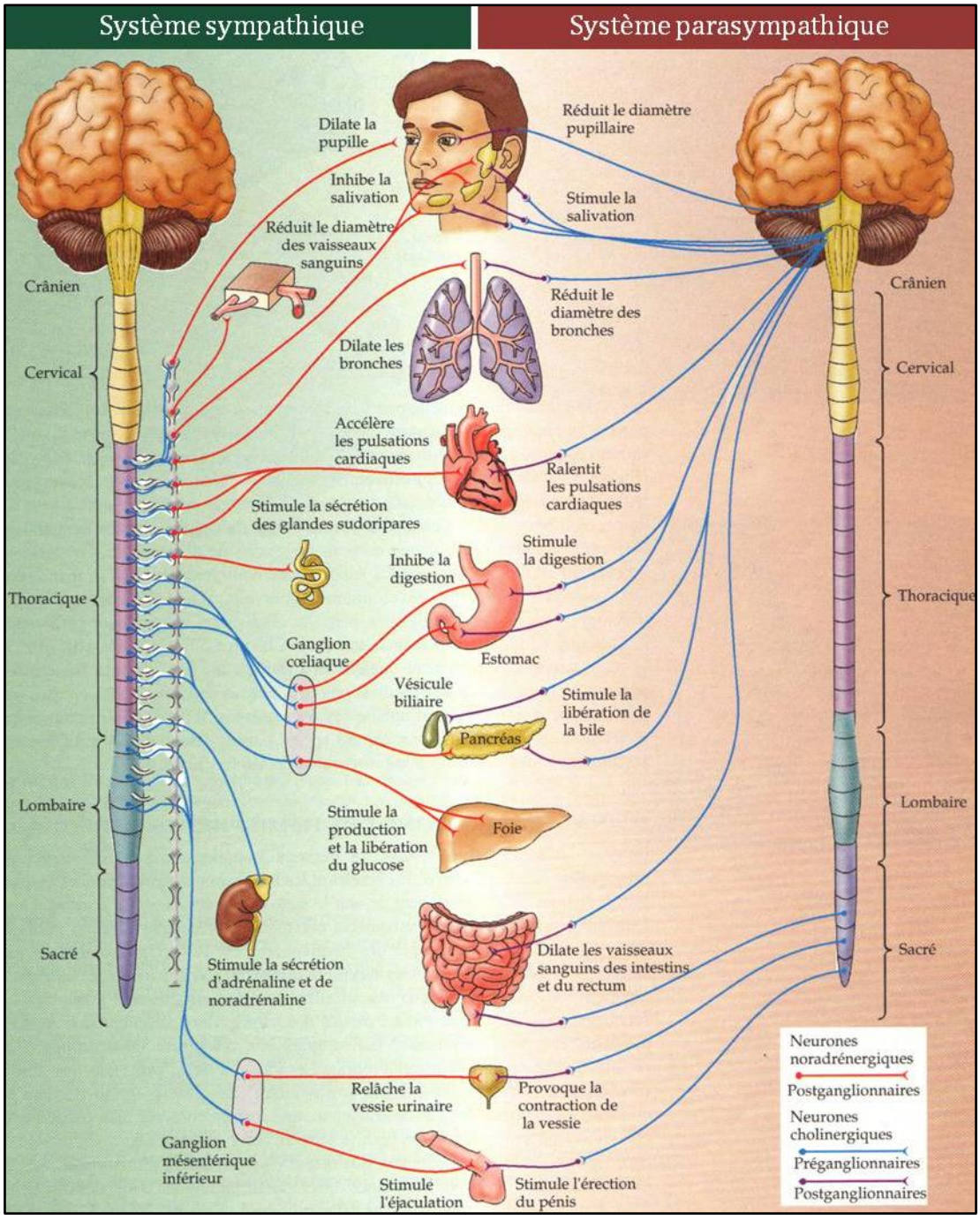


Figure 1.6 : Le système nerveux sympathique et parasympathique [Purves, Augustine *et al.* 1999].

Les mécanismes effecteurs de la régulation thermique autonome présentés dans la suite sont exécutés grâce à la division sympathique du système nerveux autonome et plus précisément grâce aux fibres non myélinisées du système nerveux cutané autonome. En effet, ces fibres innervent les principaux organes effecteurs : les vaisseaux sanguins cutanés, les muscles arrecteurs des poils et les glandes sudoripares (cf. Figure 1.12 – partie système nerveux autonome).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.5.4. Les mécanismes effecteurs de la régulation autonome

Les mécanismes effecteurs de la thermorégulation active et inconsciente sont principalement :

- Les réponses vasomotrices : vasodilatation et vasoconstriction des vaisseaux sanguins
- Le frisson thermique : contraction des muscles squelettiques
- La sudation : sécrétion de sueur par les glandes sudoripares puis évaporation

1.1.5.4.1. Les réponses vasomotrices

Les réponses vasomotrices sont les premiers mécanismes mis en jeu dans la thermorégulation active et inconsciente. Elles permettent de faire varier le débit sanguin cutané. Celui-ci est consacré à 80% à la thermorégulation puisque seulement un dixième du débit est consacré aux besoins nutritifs de la peau [Lehmuskallio, Hassi *et al.* 2002]. Il peut varier entre 0,5 $L.min^{-1}$ au repos et 7 $L.min^{-1}$ lors d'un exercice intense et des températures élevées. Cette variation engendre une modification de la résistance thermique cutanée et une dissipation de chaleur vers l'extérieur plus ou moins importante [Guyton et Hall 2002].

1.1.5.4.1.1. Les réponses au froid et à la chaleur

Au froid (ou en-dessous de la consigne), les réponses vasomotrices se manifestent par une **vasoconstriction**, c'est-à-dire une diminution du diamètre des vaisseaux. Le débit sanguin est alors réduit à une valeur très faible (30 $mL.min^{-1}$ *vs.* 450 $mL.min^{-1}$ dans une situation de confort [Lehmuskallio, Hassi *et al.* 2002]) pour éviter l'évacuation de la chaleur du noyau. Ainsi, le gradient local de température entre le noyau et la peau peut atteindre 10°C (cf. Figure 1.7).

Au chaud (ou au-dessus de la consigne), les réponses vasomotrices se manifestent par une **vasodilatation**, c'est-à-dire une augmentation du diamètre des vaisseaux. Les débits sanguins cutanés sont alors très élevés (jusqu'à être multipliés par 10) et permettent de transporter beaucoup de chaleur du noyau vers la peau. Cette dilatation des vaisseaux peut multiplier par 8 la conductance cutanée provoquant un gradient de température entre le noyau et la peau de moins de 1°C (cf. Figure 1.7).

La conductivité thermique de la peau varie entre 0,2-0,3 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour un état de vasoconstriction et 0,4-0,9 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour un état de vasodilatation [Lehmuskallio, Hassi *et al.* 2002].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

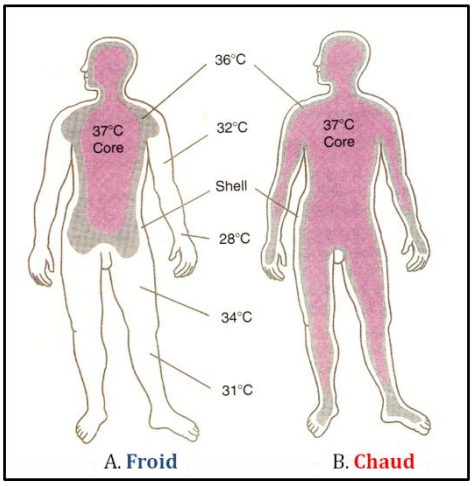


Figure 1.7 : Distribution de la température à travers le corps dans un environnement froid (A) et dans un environnement chaud (B) [Wenger 2003].

Ce sont certaines particularités structurelles de la microcirculation cutanée qui permettent d'assurer une régulation thermique efficace.

1.1.5.4.1.2. Les atouts structurels de la microcirculation cutanée pour la thermorégulation

Comme tout système vasculaire, celui de la peau est constitué d'artères, en provenance du ventricule gauche, qui véhiculent du sang oxygéné. Ces artères montent vers la surface de la peau en diminuant de calibre au fur et à mesure et en se divisant en artérioles (Ø < 20 µm) qui se terminent en méta-artérioles qui donnent naissance aux circuits capillaires (Ø ~ 4 à 9 µm) où se font des échanges de gaz et de molécules dissoutes. Ces capillaires se transforment à leur tour en veinules puis veines qui retournent au cœur (cf. Figure 1.8). Ce réseau sanguin est aussi constitué d'anastomoses correspondant à des systèmes de court-circuit (entre artère et veine et entre artériole pré-capillaire et veinule post-capillaire).

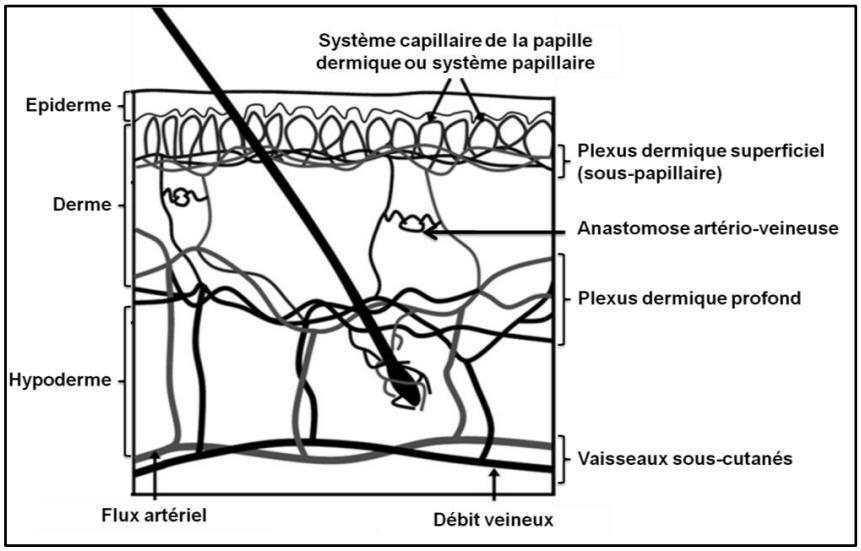


Figure 1.8 : La vascularisation cutanée. Réalisée à partir de [Leahy, Enfield *et al.* 2007].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La circulation cutanée, via les **anastomoses artério-veineuses** et le **système capillaire** a un rôle essentiel dans la dissipation de la chaleur.

Les **capillaires** situés au niveau de la peau ont une morphologie particulière (cf. Figure 1.9) : ils suivent étroitement les accidents épidermiques. Ceux qui sont situés juste sous la jonction dermo-épidermique ont une forme d'anse dont la boucle épouse la convexité du sommet de la papille. Cette disposition spatiale favorise les échanges thermiques avec les tissus : le transfert de chaleur par les vaisseaux est élevée car la surface de contact capillaires-tissu est importante [Martineaud et Seroussi 1977].

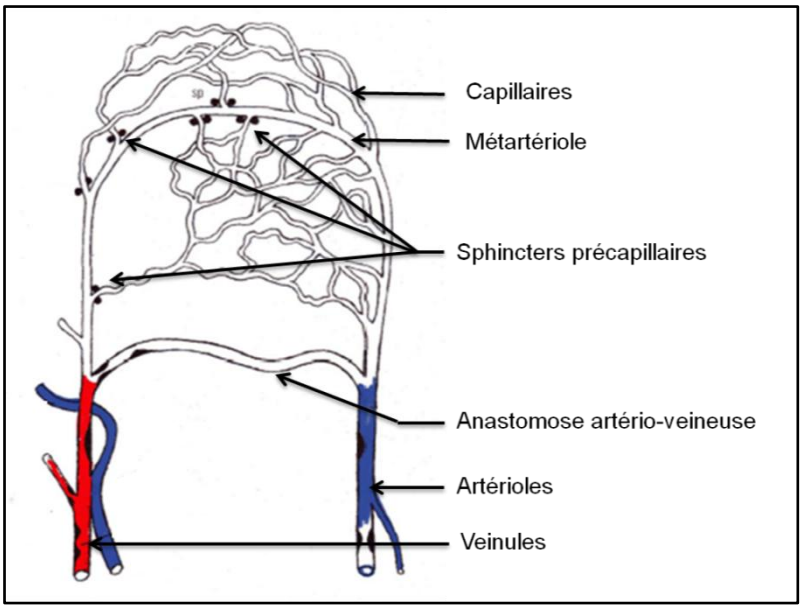


Figure 1.9 : Le système capillaire de la papille épidermique.

D'autre part, les **anastomoses** particulièrement présentes au niveau des extrémités (doigts, des pieds et des oreilles) sont capables de provoquer des variations très importantes et très rapides du débit sanguin. Le relâchement des muscles lisses des anastomoses (environ 20 fois plus larges que les capillaires) permet au sang de s'écouler directement dans une veinule en court-circuitant le réseau capillaire (cf. Figure 1.9). Les anastomoses favorisent donc la dissipation de chaleur dans un environnement chaud. Elles permettent également le maintien de la température des extrémités des membres (quand la température des extrémités est inférieure à 10°C) malgré le froid par le relâchement très bref du tonus vasoconstricteur des anastomoses. Ce relâchement permet le passage du sang artériel dans les capillaires et par là même le maintien de la durée de vie de la peau des extrémités pendant une dizaine de minutes. [Houdas et Guieu 1977; Martineaud et Seroussi 1977; Lehmuskallio, Hassi *et al.* 2002].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.5.4.1.3. La régulation du débit sanguin

La vasomotricité, responsable des variations de débit sanguin, est engendrée par la contraction active des muscles lisses présents sur les artérioles et les anastomoses artérioveineuses. Cette contraction dépend du tonus vasoconstricteur qui est contrôlé par le système nerveux autonome et en particulier par la division sympathique (grâce à la sécrétion de noradrénaline) (cf. partie 1.1.5.3.). Si le tonus vasoconstricteur diminue ou est complètement inhibé (par l'arrêt de la sécrétion de noradrénaline), le débit sanguin augmente fortement provoquant ainsi une vasodilatation. La vasodilatation peut également être provoquée par la libération d'une substance vasoactive : la bradykinine sécrétée par les glandes sudoripares lors de la sudation. D'autre part, l'ouverture et la fermeture des sphincters pré-capillaires qui régulent le débit sanguin à la périphérie (dans les capillaires), sont contrôlées par des facteurs locaux et indirectement par les artérioles pré-capillaires. [Houdas et Guieu 1977; Martineaud et Seroussi 1977; Mélissopoulos et Levacher 1998]

1.1.5.4.1.4. Les réactions vasculaires cutanées suivant les différentes zones corporelles

Tous les tissus n'ont pas la même réponse vasculaire face à des stimulations thermiques. Les tissus tels que ceux du visage (excepté le front qui a une réactivité particulièrement médiocre), des membres et des extrémités qui sont riches en anastomoses artérioveineuses et qui ont des débits élevés présentent des activités vasomotrices importantes et participent donc activement aux échanges de chaleur [Martineaud et Seroussi 1977]. D'autres zones telles que le cerveau ont une activité vasomotrice très spécifique. En effet, le cerveau a besoin d'un débit sanguin plus important (environ 750 ml de sang par minute) que les autres parties du corps pour délivrer du glucose et de l'énergie indispensable à l'activité permanente des neurones. Ce débit ne peut pas être réduit. La tête ne peut donc pas avoir le même mécanisme de vasoconstriction que le reste du corps. Au froid, la tête devra être couverte pour ne pas perdre trop de chaleur. Au chaud, le cerveau possède une régulation propre appelée « système de refroidissement sélectif » [Arens et Zhang 2006]. Elle se réalise, entre autres, grâce à la performance de veines de gros diamètre telles que la veine angulaire de l'œil dont le débit peut être multiplié par 10 [Cabanac et Caputa 1979; Cabanac 1993].

1.1.5.4.2. Le frisson thermique

Lorsque la vasoconstriction des vaisseaux cutanés n'est plus suffisante pour lutter contre le froid, le frisson devient le moyen le plus important de défense. Le corps génère alors une chaleur métabolique en mettant les muscles sous tension. Un « tonus musculaire de pré-frisson »

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

apparait dans la peau et provoque un mécanisme de frisson involontaire [Arens et Zhang 2006]. Ce mécanisme correspond à une contraction non coordonnée des muscles squelettiques de courte durée qui se répète rythmiquement [Houdas et Guieu 1977]. Il commence au niveau du tronc avant de se disperser jusqu'aux différents membres. Il s'effectue sans travail mécanique global important : la totalité de l'énergie consommée par les muscles est convertie en chaleur. Sur de courtes périodes, il est capable de multiplier par 5 le niveau basal de production de chaleur [Parsons 2002a]. Par contre, si le frisson est maintenu sur une longue période, le métabolisme de base sera seulement doublé pour des personnes jeunes [Sessler 2009]. La pilosité permet de préserver la chaleur (qui peut être perdue dans l'environnement) générée par un phénomène d'horripilation [Parsons 2002a]. Mais ce phénomène est relativement faible chez l'Homme qui est de moins en moins poilu.

La thermogenèse sans frisson (augmentation des réactions thermogéniques au niveau de certains tissus tels que la « graisse brune » [Houdas et Guieu 1977]) ne sera pas traitée ici car elle est supposée comme quasiment négligeable chez l'Homme adulte.

1.1.5.4.3. La sudation

Quand la vasodilatation ne peut plus lutter seule contre le chaud, l'évaporation de la sueur sécrétée permet de refroidir le corps. En effet, l'évaporation d'un gramme de sueur (solution aqueuse avec une dominance de NaCl) absorbe environ 2,5 kJ ce qui engendre un abaissement de la température locale et plus précisément une déperdition d'environ 0,6 kcal [Houdas et Guieu 1977].

Ce mécanisme est pulsatile (décharges périodiques entrecoupées de repos) avec une fréquence comprise entre 0,3 et 12 émissions par minute selon les individus, les circonstances et les régions corporelles. Deux phénomènes s'intriquent dans le mécanisme de sudation :

- la sécrétion sudorale qui est un phénomène biologique
- l'évaporation qui est un phénomène physique

1.1.5.4.3.1. La sécrétion sudorale

La sécrétion s'effectue grâce aux glandes sudoripares (cf. Figure 1.10). Il existe deux types de glandes sudoripares sur le corps [Parsons 2002a] :

- **les glandes sudoripares apocrines** :

elles sont présentent au niveau des aisselles, des conduits auditifs, des paupières, des aréoles mammaires, du pubis et des organes génitaux. Elles sécrètent une substance responsable de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'odeur de la transpiration et sont principalement stimulées par le stress et les émotions [Agache et Candas 2000b].

– **les glandes sudoripares eccrines (2 à 5 millions)** :

elles sont réparties inégalement dans presque tout le corps. Leur densité est plus forte au niveau des paumes et plantes (~ 620 ± 120 /cm²), du front (~ 360 ± 50 /cm²) et des joues (~ 320 ± 60 /cm²) [Agache et Candas 1999]. Seules ces glandes interviennent dans les mécanismes de thermorégulation. La suite se focalisera donc uniquement sur l'activité de ces glandes.

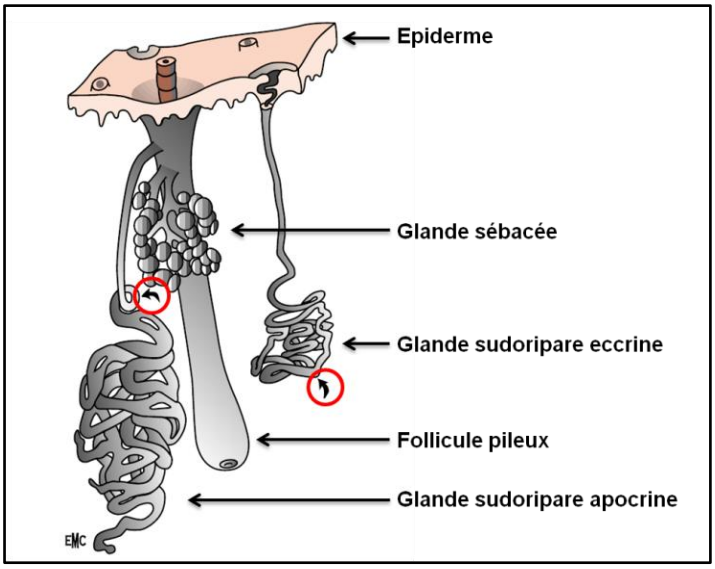


Figure 1.10 : Représentation d'une glande sudorale eccrine et apocrine. Les flèches entourées en rouge représentent le point de transition entre le tube sécréteur et le canal excréteur [Agache et Candas 1999].

Concrètement, lorsque la température de consigne du noyau (dépendant de la température cutanée moyenne [Agache et Candas 1999]) est dépassée, les glandes sudorales sont stimulées par les fibres sympathiques cholinergiques (et non adrénergiques comme la plupart des fibres sympathiques) grâce à la libération d'acétylcholine (cf. partie 1.1.5.3.). Ceci entraine une sécrétion primaire de sueur importante suivie d'un écoulement rapide de la sueur dans le canal sudoral. Une fois que la sécrétion arrive à la surface de la peau, le phénomène d'évaporation entre en jeu.

D'autre part, comme nous l'avons décrit dans les activités vasomotrices, la sécrétion sudorale vers la surface cutanée est accompagnée par une sécrétion de bradykinine (commandée par le système parasympathique) vers le sang qui provoque une vasodilatation importante [Houdas et Guieu 1977; Parsons 2002a].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.5.4.3.2. L'évaporation de la sueur

L'évaporation dépend principalement de l'humidité relative de l'environnement extérieur et de la température de l'air (ou de la capacité de l'air à accepter de l'eau à l'état gazeux) :

- Si l'atmosphère est **sèche**, l'évaporation est efficace et un taux important de sueur est produit sans que la peau soit mouillée.
- Si l'atmosphère est **humide**, la sueur s'accumule à la surface de la peau pour être évaporée [Arens et Zhang 2006]. Dans ce cas, la mouillure cutanée (rapport entre la surface corporelle mouillée et la surface corporelle totale) peut être importante et gênante.
- Si l'atmosphère est **saturée en eau**, l'évaporation est quasiment impossible et la sueur ruisselle sur la peau.

Dans les cas où la sueur ruisselle et où l'évaporation se fait difficilement, l'accumulation de l'eau en surface gonfle le stratum corneum et provoque l'hidroméiose. Ce mécanisme réduit le débit sudoral sans altérer le débit évaporatoire [Candas, Libert *et al.* 1983].

D'autre part, le port d'un vêtement réduit l'efficacité du phénomène d'évaporation. En effet, après absorption de la sueur par le vêtement, celle-ci s'évapore à la surface du vêtement. L'évaporation est alors beaucoup moins importante qu'à la surface de la peau nue.

1.1.5.5. Les facteurs non thermiques influençant la régulation autonome

Comme mentionné dans la partie 1.1.5.2.2. , page 25, les réponses thermorégulatrices « actives » (seuils et gains) sont susceptibles d'être influencées par des facteurs non thermiques. Les principaux sont présentés dans cette partie.

1.1.5.5.1. Les rythmes biologiques

Les rythmes biologiques déclenchent de façon immédiate et automatique des mécanismes de régulation à certains moments de la journée où un conflit est probable mais avant que le conflit ne survienne réellement [Widmaier, Raff *et al.* 2009]. Pour ce faire, la valeur de consigne de la thermorégulation autonome varie sur du long terme. En effet, une fluctuation circadienne (période d'environ 24h) caractéristique de près de 1°C est observée pour la température centrale. Cette température a tendance à être plus basse la nuit et plus élevée le jour (cf. Figure 1.11).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

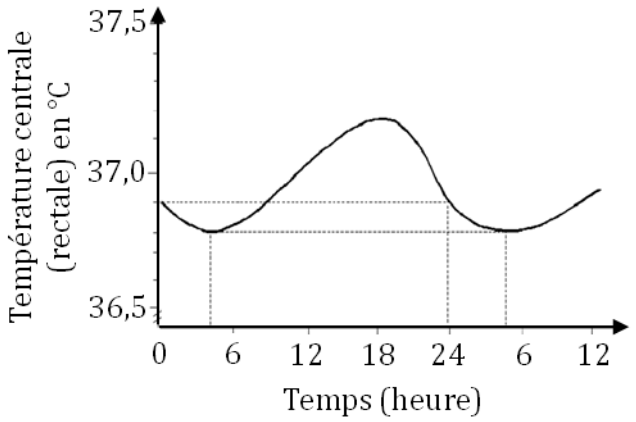


Figure 1.11 : Rythme circadien de la température centrale [Houdas et Guieu 1977]

Les variations du point de consigne se répercutent sur les réponses régulatrices qui présentent elles aussi des rythmes circadiens [Marotte et Timbal 1982; Reinberg 2003]. Ainsi, au niveau du « creux » (la nuit) du rythme circadien de la température interne, les mécanismes de thermorégulation sont davantage orientés vers la conservation de la chaleur : les processus métaboliques de synthèse sont favorisés. Cependant, au niveau du « pic » (la journée), les mécanismes de thermorégulation sont orientés vers la perte de chaleur : la protection de l'organisme face aux agressions environnementale est favorisée [Henry, Arrese *et al.* 2002; Weinert et Waterhouse 2007; Weinert 2010].

Pour les femmes, une variation supplémentaire de la température centrale est observée pendant la deuxième moitié du cycle menstruel. Cette température aurait tendance à augmenter à cause de l'effet de la progestérone. Il a été constaté que le flux sanguin varie en fonction de la phase du cycle menstruel : pendant la deuxième moitié du cycle, le flux de base est plus faible et la vasoconstriction induite par le froid est plus élevée que pendant la phase pré-ovulatoire [Ethel 1997].

1.1.5.5.2. L'acclimatation

La capacité d'un individu à répondre à un stress environnemental n'est pas figée et peut être modifiée par une exposition prolongée à ce stress. Cette modification entraine une acclimatation c'est-à-dire une amélioration du fonctionnement d'un système homéostatique tel que le système de thermorégulation [Widmaier, Raff *et al.* 2009]. Il existe deux types d'acclimatation :

- **L'acclimatation au chaud** :

Par exemple, un individu qui est soudainement contraint à pratiquer une activité sportive quotidienne d'une heure dans un environnement chaud est susceptible d'être acclimaté au bout

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

d'une semaine. Cette acclimatation se traduit par [Savourey, Launay *et al.* 2003; Wenger 2003; Havenith 2005; Richalet et Regnard 2009]: une meilleure efficacité de la sudation (avec une transpiration plus précoce, plus abondante, mieux répartie et un phénomène d'évaporation plus performant) et une réduction de l'astreinte cardio-vasculaire (avec une diminution du débit sanguin périphérique, du seuil de déclenchement de la vasodilatation et une augmentation plus modérée de la fréquence cardiaque). Ainsi, le transfert de chaleur par gradient thermique est plus efficace. D'autre part, Launay a montré qu'un séjour de 4 semaines en zone tropicale humide induit non seulement une adaptation à la chaleur mais aussi des modifications thermorégulatrices au froid qui ne sont pas bénéfiques [Launay 2008].

- **L'acclimatation au froid :**

Elle est beaucoup moins flagrante qu'au chaud. Elle se traduit par [Wenger 2003; Richalet et Regnard 2009]: une amélioration du phénomène de vasodilatation induite par le froid[6] (vasodilatation plus précoce, flux sanguin plus important et alternance entre vasodilatation et vasoconstriction), une stimulation suivie d'une hypertrophie de la glande thyroïde, une augmentation plus modérée de la noradrénaline (diminution de l'activité du système nerveux sympathique) [Leppäluoto, Korhonen *et al.* 2001]. Un article de Launay et Savourey répertorie les différents types d'adaptation au froid (locale et globale) [Launay et Savourey 2009].

Une fois acclimaté l'organisme réagit par anticipation toujours dans le but de maintenir au mieux l'homéothermie.

1.1.5.5.3. L'endurance, l'entrainement physique

Une grande puissance aérobie (endurance) est associée à une amélioration des mécanismes de perte de chaleur [Havenith 2005; Mekjavic et Eiken 2006] :

- Augmentation de la sudation
- Augmentation du débit sanguin
- Abaissement de la température interne et du rythme cardiaque pour des jeunes qui pratiquent des exercices dans des environnements chauds

Cette endurance peut ne pas être bénéfique dans des conditions de grosses chaleurs ou d'humidité importante où la perte de chaleur est difficile.

[6] Ce phénomène de vasodilatation au froid se produit pour des températures ambiantes inférieures à 15°C pour réchauffer les extrémités afin qu'elles gardent leur fonctionnalité et pour éviter les lésions liées au froid.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.5.5.4. La morphologie et la masse graisseuse

La surface corporelle en contact avec l'environnement a un impact sur les mécanismes actifs de thermorégulation. Plus la surface sera grande, plus les échanges, par évaporation de la sudation par exemple, sont importants.

Au froid, les personnes avec une masse graisseuse plus importante frissonnent moins à cause de l'isolation fournie par la graisse. Au chaud, les personnes d'une même masse mais plus grasses, vont avoir chaud plus rapidement avec une même capacité de stockage car la chaleur spécifique de la graisse est deux fois plus faible que celle des autres tissus. Les mécanismes de défense seront donc modifiés [Havenith 1997; Anderson 1999; Havenith 2001; Havenith 2005; Arens et Zhang 2006]

1.1.5.5.5. L'âge

D'après des auteurs tels que Havenith, Raymann, *etc.* [Inoue, Havenith *et al.* 1999; Havenith 2001; Van Someren, Raymann *et al.* 2002; Kenney et Munce 2003; Havenith 2005], les tendances suivantes ont pu être mises en évidence :

- l'âge modifie le rythme circadien de la température interne : diminution de l'amplitude et de la stabilité.
- au froid, l'âge réduit la vasoconstriction et la production de chaleur métabolique.
- au chaud, l'âge réduit la sudation, le flux sanguin, l'activité cardiaque et la redistribution du sang venant de la circulation rénale et splanchnique.

L'impact de l'âge sur les mécanismes de thermorégulation pourrait davantage être relié aux changements d'activité, à un manque d'endurance ou à une modification morphologique des personnes âgées plutôt qu'à la vieillesse en elle-même.

1.1.5.5.6. Le genre

Face à un stress thermique chaud, les femmes ont tendance à avoir une température interne, une température de peau, un rythme cardiaque, une pression artérielle et un point de consigne pour la sudation plus élevés que les hommes. Elles ont tendance à dissiper moins de chaleur [Bittel et Henane 1975; Havenith 1997; Havenith 2005].

Au froid, les femmes ont une température cutanée moyenne plus faible et une vasoconstriction périphérique plus importante que les hommes [Mozaffarieh, Fontana Gasio *et al.* 2010]. Après une transition thermique froide (32°C => 24°C), elles ont un niveau de flux

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

sanguin, de perte en eau et d'humidité de la peau plus faible que les hommes [Chen, Hwang *et al.* 2011].

Ces différences pourraient s'expliquer par des différences morphologiques entre l'homme et la femme. Les études qui prennent en compte ces différences (poids, taille, masse graisseuse…) ont des résultats qui divergent. Certains montrent que les différences liées au sexe sont minimales et d'autres ont des différences qui persistent.

Les femmes ménopausées ont une température interne plus élevée, des bouffées de chaleur et des sueurs nocturnes [Havenith 2005].

1.1.5.5.7. Les maladies et dysfonctionnements de l'organisme

De nombreuses maladies ou dysfonctionnements de l'organisme ont un impact sur les mécanismes de thermorégulation « actifs » :

- La fièvre décale la température de consigne vers le haut et provoque des frissons. [Guyton et Hall 2002; Mekjavic et Eiken 2006].
- La déshydratation supprime le phénomène de sudation [Mekjavic et Eiken 2006].
- L'hypoglycémie abaisse le seuil de température interne [Mekjavic et Eiken 2006].
- L'hypertension réduit le flux sanguin et le débit cardiaque et qui augmente la sudation [Havenith 2005].
- Les maladies de peau telles que l'ichtyose (dystrophie cutanée) et la dysplasie ectodermique anhidrotique (absence partielle ou totale totale de dents, cheveux, poils et inactivité des glandes sudoripares) diminuent ou suppriment le phénomène de sudation.
- Les coups de soleil affectent la sudation et peuvent perturber la vasoconstriction et la conservation de la chaleur lors d'une exposition au froid [Wenger 2003].

1.1.5.5.8. Les drogues

Le terme drogue comprend : l'alcool, les diurétiques, les anti-cholinergiques, les vasodilatateurs, les antihistaminiques, les relaxants musculaires, l'atropine, les tranquillisants et les sédatifs, les ß-bloquants et les amphétamines. Toutes ces substances sont susceptibles d'avoir un impact non négligeable sur la vasomotricité et la fonction cardiaque [Havenith 2005].

1.1.6. La thermorégulation active et consciente : la régulation comportementale

Comme il a été mentionné précédemment, l'Homme est muni d'un système thermorégulateur capable de déclencher des mécanismes inconscients (régulation autonome) mais

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

également des mécanismes spécifiques conscients (régulation comportementale) permettant le retour à l'équilibre des variables physiologiques lors d'une perturbation thermique extérieure (cf. Figure 1.1, page 16). Ces mécanismes conscients sont souvent déclenchés avant même la régulation autonome. Mais, ce n'est qu'après avoir pris conscience de l'environnement qu'il l'entoure et de son état que l'Homme met en place ces mécanismes propres à la thermorégulation comportementale. Ainsi, l'Homme tend à atteindre un état de confort optimal.

A présent, les processus qui permettent à l'Homme de prendre conscience de son environnement thermique ainsi que les différentes actions conscientes de la régulation comportementale vont être présentés.

1.1.6.1. Une vue d'ensemble des mécanismes de perception de l'environnement

Le corps perçoit l'environnement grâce aux sensations somatiques extéroceptives (appartenant à la sensibilité générale ou à la somesthésie) fournies par le système nerveux cutané sensoriel (cf. Figure 1.12 – partie sur le système nerveux sensitif). Les sensations somatiques extéroceptives correspondent aux sensibilités mécaniques, thermiques et douloureuses [Purves, Augustine *et al.* 1999].

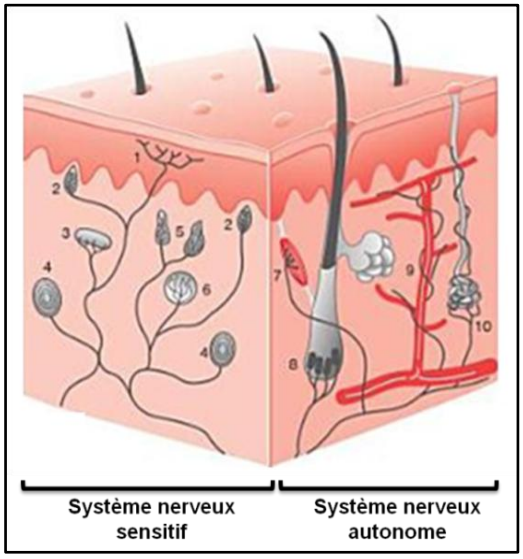


Figure 1.12 : Schéma du réseau nerveux cutané. 1. Terminaisons nerveuses libres ; 2. Corpuscule de Merkel ; 3. Corpuscule de Meissner ; 4. Corpuscule de Pacini ; 5. Corpuscule de Ruffini ; 6. Corpuscule de Golgi-Mazzoni ; 7. Fibres nerveuses du muscle arrecteur ; 8. Fibres lancéolées périfolliculaires ; 9. Fibres nerveuses périvasculaires ; 10. Fibres nerveuses des glandes sudoripares [Misery 2006]

Le système nerveux cutané sensoriel est composé de différentes fibres nerveuses myélinisées ou amyéliniques qui forment des récepteurs spécifiques de différents types (cf. Figure 1.12). La classification de ces récepteurs est complexe et souvent différente suivant les auteurs. Un exemple de classification est présenté dans le Tableau 1.1. Il permet de distinguer les récepteurs suivants :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- des **terminaisons libres** qui sont très nombreuses dans le derme et l'épiderme [Tschachler, Reinisch *et al.* 2004].
- des **terminaisons dilatées** qui correspondent aux terminaisons lancéolées et aux disques de Merkel.
- des **terminaisons corpusculaires** qui sont peu nombreuses et qui sont surtout situées dans les régions sensibles (visage, mains, pieds, organes génitaux).

Tableau 1.1 : Exemple de classification des récepteurs sensoriels cutanés [Purves, Augustine *et al.* 1999].

Type de récepteur	Caractéristiques anatomiques	Fibres associées	Fonction
Terminaisons nerveuses libres	Terminaisons nerveuses faiblement spécialisées	C, Aδ	Douleur, température, tact grossier
Corpuscules de Meissner	Encapsulés ; entre les papilles dermiques	Aβ	Tact, pression (dynamique)
Corpuscules de Pacini	Encapsulés	Aβ	Pression profonde, vibration (dynamique)
Disques de Merkel	Encapsulés ; associés à des cellules libérant des peptides	Aβ	Tact, pression (statique)
Corpuscules de Ruffini	Encapsulés ; orientés dans le sens des lignes d'étirement	Aβ	Etirement de la peau

Ces récepteurs convertissent l'énergie associée au stimulus en signaux bioélectriques (phénomène de transduction) qui codent l'information en termes d'intensité, de durée, de position et de direction parfois. Puis, les informations sont relayées par des fibres nerveuses spécifiques vers le système nerveux central, qui les interprète afin d'établir une perception cohérente de l'environnement et qui agit ensuite en conséquence (cf. Figure 1.13).

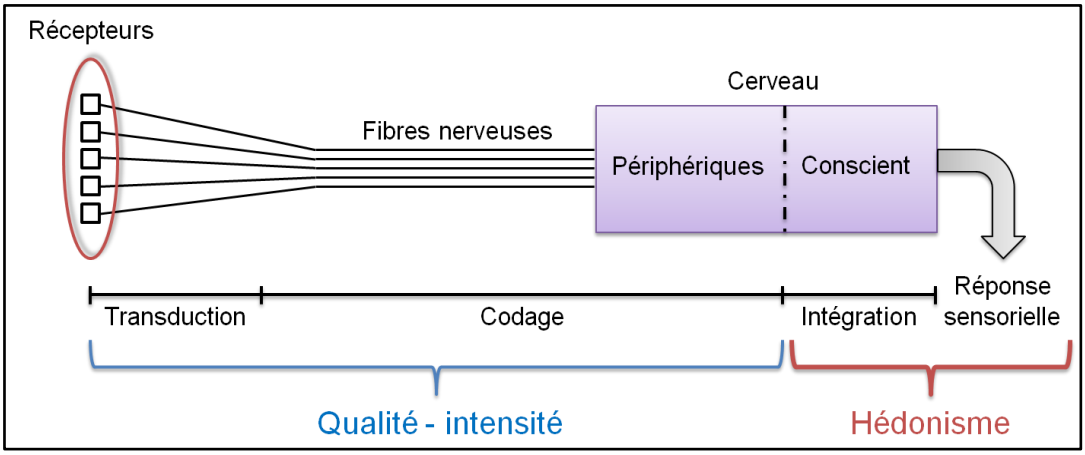


Figure 1.13 : Etapes physiologiques de la perception [Mac Leod, Sauvageot *et al.* 1996].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Ces travaux de thèse se focalisant sur l'effet d'un changement de température ambiante, seuls les mécanismes de la sensibilité thermique (ou de la thermoception = perception non douloureuse de la température de l'environnement) seront détaillés[7].

1.1.6.2. La perception de l'environnement thermique : la thermoception

Cette partie présente les mécanismes de perception de notre environnement thermique.

1.1.6.2.1. Les thermorécepteurs cutanés et le phénomène de transduction

La thermoception prend naissance au niveau des thermorécepteurs cutanés qui sont capables de détecter des variations de température aussi minimes que celles correspondantes à des changements de 0,01°C. Les thermorécepteurs cutanés ont déjà été évoqués rapidement au niveau de la thermorégulation active inconsciente (cf. partie 1.1.5.1. page 23). Deux types de thermorécepteurs peuvent être distingués : les récepteurs au froid et les récepteurs au chaud. Ils ne sont pas répartis uniformément sur tout le corps. Le visage est la région du corps où la densité en thermorécepteurs est la plus élevée. Les récepteurs au froid sont plus superficiels et plus nombreux que les récepteurs au chaud (cf. Tableau 1.2) [Guyton et Hall 2002]. L'Homme est donc probablement plus sensible aux dangers du froid qu'à ceux émanant du chaud.

Tableau 1.2 : Nombre de récepteurs au froid et au chaud par cm² présents dans certaines zones de la peau humaine. Tableau réalisé à partir de [Arens et Zhang 2006].

Zone du corps	Récepteurs au froid (cm^{-2})	Récepteurs au chaud (cm^{-2})
Nez	8	1
Joue	8,5 - 9	1,7
Avant-bras	6 - 7,5	0,3 - 0,4
Paume de la main	1 - 5	0,4
Dos de la main	7,4	0,5

Au niveau moléculaire, ce ne sont pas les terminaisons nerveuses libres en elles-mêmes qui correspondent aux récepteurs mais plutôt les capteurs moléculaires qu'elles portent. Ces capteurs sont appelés **« canaux TRP (Transient Receptor Potential) »** ou « thermo TRP » [Green 2004; Patapoutian 2005; Bear, Connors *et al.* 2006; Vassort et Fauconnier 2008]. Ce sont des canaux cationiques ou des protéines responsables de la détection du froid et de la chaleur. Ils existent 9 canaux TRP et 6 semblent impliqués dans la sensation de la température : TRPV1-4

[7] Pour obtenir des informations sur les autres mécanismes intervenant dans le système somesthésique, il est recommandé de se référer à des ouvrages de neurosciences tels que [Purves, Augustine *et al.* 1999].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

pour la chaleur, TRPM8 et TRPA1 pour le froid (cf. Figure 1.14). En règle générale, les thermorécepteurs n'expriment qu'un seul type de canaux.

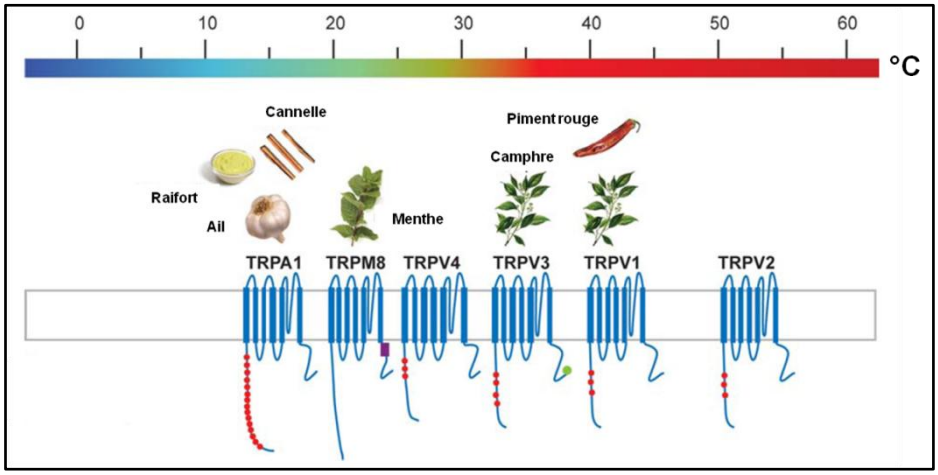


Figure 1.14 : Représentation schématique des thermo TRP fonctionnant dans une gamme de température allant du froid nocif au chaud nocif. Divers composés botaniques peuvent activer les thermo TRP. TRPV1 est activé par la capsaïcine, l'ingrédient piquant dans les piments, TRPM8 est activé par le menthol, le composé de refroidissement de la menthe, TRPA1 est activé par des composés piquants comme l'allicine, l'ingrédient actif de l'ail, le cinnamaldéhyde, le composant piquant de la cannelle, *etc.* [Dhaka, Viswanath *et al.* 2006].

De plus, les kératinocytes exprimeraient également des TRPV [Chung, Lee *et al.* 2003; Denda, Nakatani *et al.* 2007; Boulais et Misery 2008], et ces cellules seraient susceptibles de percevoir des températures en communiquant avec des fibres nerveuses (cf. Figure 1.15).

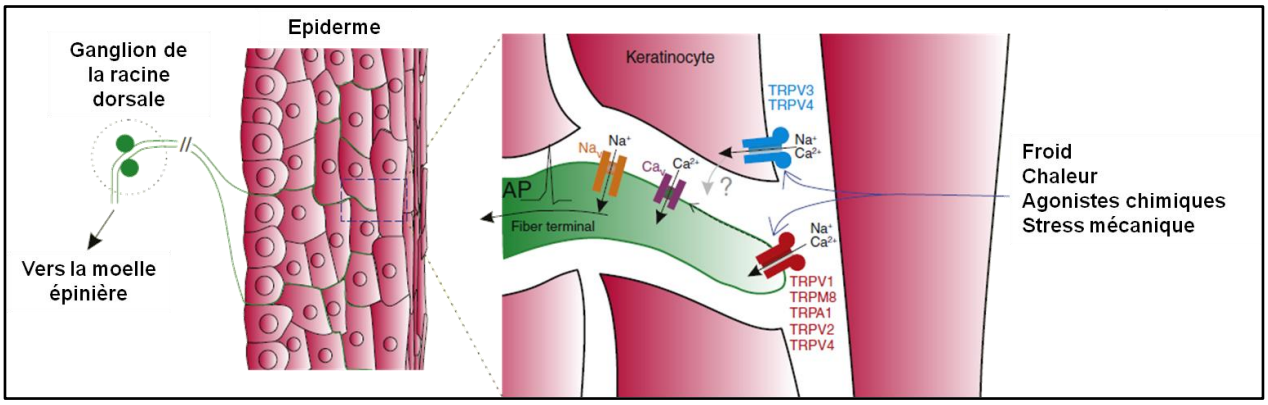


Figure 1.15 : Représentation des rôles des canaux TRP situés dans la peau pour la détection des stimuli du monde extérieur. A gauche : les terminaisons nerveuses libres sont localisées dans la peau et sont couplées par le ganglion rachidien sensitif à la moelle épinière. A droite : En zoomant sur la couche superficielle de la peau, on constate que les stimuli physiques et chimiques peuvent directement activés les canaux TRP situés sur les fibres nerveuses causant une dépolarisation de ces fibres générant ainsi un potentiel d'action. Mais certains canaux TRPV sont aussi exprimés dans les kératinocytes (cellules de l'épiderme) à partir desquels la transduction du signal vers les neurones se fait par un mécanisme encore non clairement élucidé [Damann, Voets *et al.* 2008].

Concrètement, les stimuli thermiques appliqués à la peau provoquent l'ouverture des canaux ioniques exprimés sur les terminaisons libres, ce qui affecte la perméabilité ionique de la membrane du récepteur. Ces changements de perméabilité produisent dans la terminaison nerveuse un courant dépolarisant (ou un potentiel de récepteur) qui donne naissance à un potentiel générateur. L'amplitude du potentiel générateur croit avec l'intensité du stimulus et

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

lorsqu'elle atteint une valeur critique elle déclenche des potentiels d'action. Ceux-ci codent le type ou la qualité (représentée par la répartition spatiale de l'activité nerveuse), l'intensité (masse globale d'activité nerveuse induite par la stimulation), la durée et la localisation du stimulus.

1.1.6.2.2. Les propriétés de codage des thermorécepteurs

Les propriétés de codage des thermorécepteurs ont été étudiées à l'aide de méthodes électrophysiologiques en mesurant l'activité des fibres afférentes [Hensel 1981].

Une **température constante** et stable est codée par une **décharge statique**. Pour un récepteur au froid, l'activité maximale de la fibre se trouve aux alentours d'une température cutanée comprise entre 20 et 30°C et aux alentours de 37 et 47°C pour les récepteurs au chaud (cf. Figure 1.16).

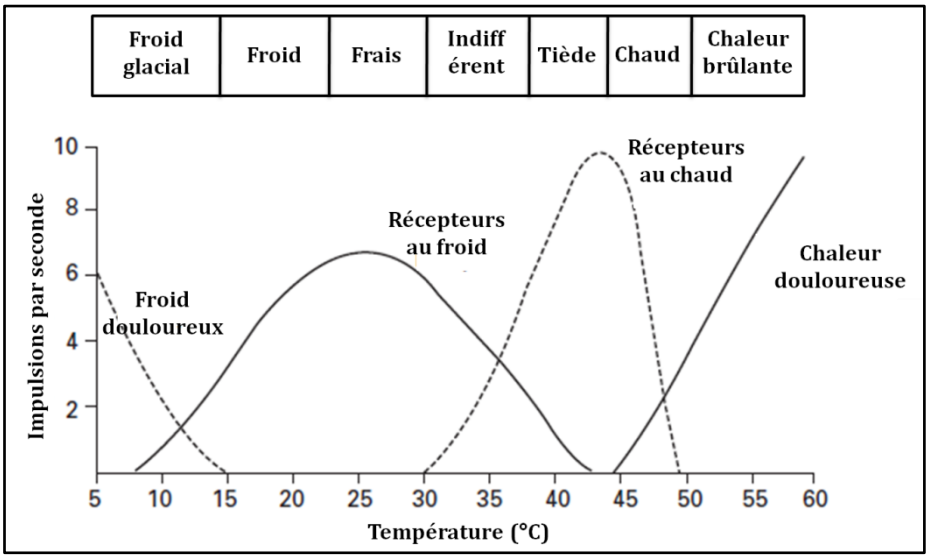


Figure 1.16 : Fréquences des décharges d'une fibre nociceptive stimulée par le froid, d'une fibre sensible au froid, d'une fibre sensible à la chaleur et d'une fibre nociceptive stimulée par la chaleur pour différentes températures de peau [Guyton et Hall 2002].

Par contre, lors d'un **changement brutal de température**, les thermorécepteurs montrent une **réponse dynamique** (cf. Figure 1.17) : l'augmentation brutale de la température (de T1 à T2) déclenche la décharge d'un récepteur au chaud alors qu'elle stoppe la décharge du récepteur au froid. Après quelques secondes à T2, le récepteur au chaud voit sa décharge se ralentir alors que celle du récepteur au froid augmente à nouveau progressivement. Le retour à la température T1 se traduit par des réponses opposées : arrêt transitoire du récepteur au chaud et bouffée d'activation du récepteur au froid avant un retour de leur décharge respective à la normale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

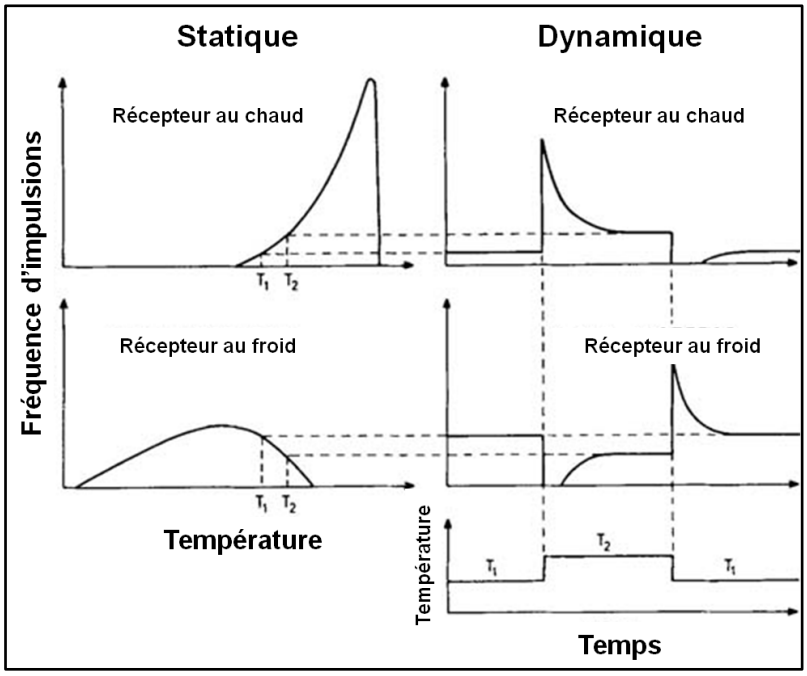


Figure 1.17 : Propriétés statiques et dynamiques des récepteurs au chaud et au froid face à une température constante et à un changement brutal de température [Hensel 1981].

Les réponses des thermorécepteurs s'adaptent donc à des stimuli durables. Le différentiel de décharge entre les récepteurs au chaud et au froid est le plus élevé au moment des variations de température. C'est d'ailleurs, le changement brutal de qualité du stimulus (chaud/froid) qui est à l'origine des sensations les plus fortes.

1.1.6.2.3. Les voies d'intégration de la thermoception

Le signal bioélectrique obtenu par les thermorécepteurs est, relayé jusqu'au système nerveux central grâce aux fibres nerveuses. Ces fibres se divisent en différents groupes selon leur grosseur et leur vitesse de conduction des informations :

- Les **fibres Aβ** : 35 à 75 $m.s^{-1}$ et avec un diamètre compris entre 6 et 12 µm
- Les **fibres Aδ** : 5 à 30 $m.s^{-1}$ et avec un diamètre compris entre 1 et 5 µm
- Les **fibres C** : 0,5 à 2 $m.s^{-1}$ et avec un diamètre compris entre 0,2 et 1,5 µm

Les informations provenant des récepteurs au chaud utilisent uniquement les fibres C alors que les informations provenant des récepteurs au froid utilisent les fibres Aδ et C [Rambaud et Kocher 2000].

Une **voie sensitive spécifique à la thermoception**, appelée « voie spinothalamique », passant par la moelle épinière, le bulbe rachidien et le thalamus, véhicule les informations « thermiques » jusqu'aux aires sensitives spécifiques du cortex cérébral. La spécificité de la voie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

sensitive permet au cerveau de différencier le type d'information (auditive, thermique, mécanique, *etc.*) même si le support (potentiel d'action) est le même pour tous les types.

Les aires sensitives spécifiques aux informations provenant des thermorécepteurs correspondent aux aires somato-sensitives situées dans le lobe pariétal du cerveau (cf. Figure 1.18). C'est **à l'arrivée de l'influx nerveux au niveau de ces aires** (dans le cortex cérébral) que le phénomène psychologique correspondant à la **« sensation »** se forme et il est spécifique d'une modalité sensorielle [Bagot 1999]. L'information est alors représentée par une masse globale d'activité nerveuse, correspondant à l'intensité, mais aussi par une répartition spatiale de cette activité, correspondant à la qualité de l'information.

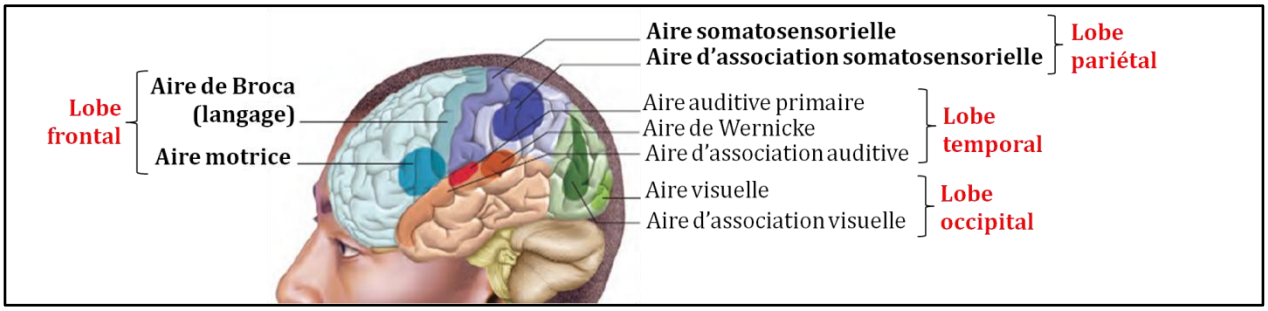


Figure 1.18 : Aires sensitives primaires et aires corticales d'association du cerveau.

Le traitement de l'information afférente ne se termine pas dans ces aires corticales primaires de réception. Les informations continuent leur trajet vers des **aires d'association du cortex cérébral** (cf. Figure 1.18) où a lieu une intégration. La zone du cortex d'association la plus proche de l'aire corticale primaire traite l'information d'une manière relativement simple et sert à des fonctions basiques liées à la **sensibilité**. Les régions plus éloignées des aires sensitives primaires traitent l'information de manière plus complexe : on y trouve une contribution des aires intervenant dans l'éveil, la mémoire, le langage et ces régions peuvent recevoir des informations provenant de plusieurs modalités sensorielles. Ainsi, les fibres issues de neurones des lobes pariétal et temporal se dirigent vers des aires d'association des lobes frontaux (cf. Figure 1.18) qui font partie du système limbique (cf. Figure 1.19). Par ces connexions, l'information sensitive peut se teinter d'une connotation émotionnelle et motivationnelle.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

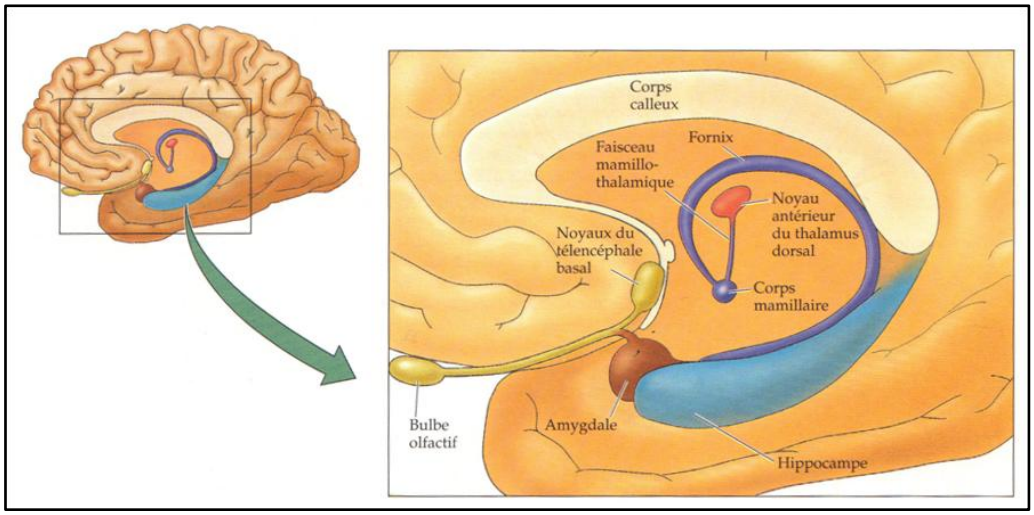


Figure 1.19 : Le système limbique comprend principalement l'hypothalamus et plus précisément les corps mamillaires, l'hippocampe impliqué dans la formation des souvenirs et de la mémoire, l'amygdale impliqué dans les émotions. Ce système intervient dans le comportement, dans l'expression des émotions telles que l'agressivité, la peur et le plaisir, et dans la formation de la mémoire [Purves, Augustine *et al.* 1999].

La perception consciente se produit lorsque différentes sensations ont été projetées sur le champ de la conscience et ont été confrontées à la mémoire, aux expériences antérieures, à l'état physiologique et psychologique de l'individu (cf. Figure 1.20 – étape n°6). **La perception correspond donc à un message global réunissant la composante sensorielle du message** (associée à la qualité et à l'intensité de l'information) **et la composante hédonique ou affective apportée par les centres supérieurs du cerveau**.

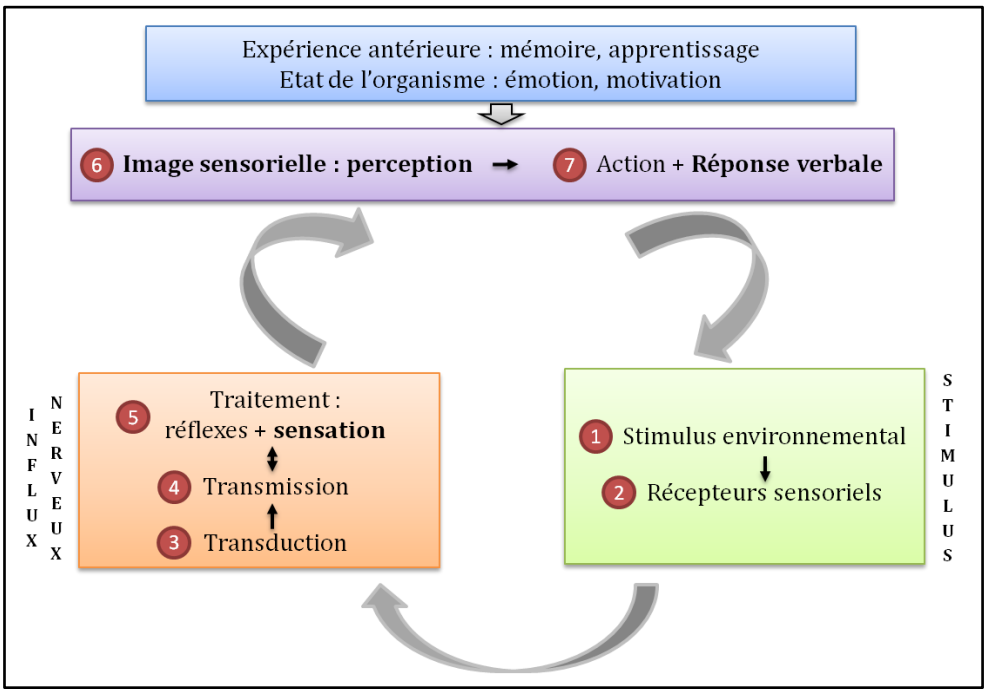


Figure 1.20 : Processus dynamique de la perception. Réalisé à partir de [Perrin 2008; Goldstein 2009].

Une fois que toutes les informations en provenance des différents récepteurs sensoriels, de la mémoire et du centre du plaisir ont été intégrées, l'Homme prend conscience de son

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

environnement thermique et de son état. Il est, alors, capable de réagir par (cf. Figure 1.20 – étape n°7) :

- des **mouvements spécifiques conscients** (parfois inconscients sous forme de réflexe) effectués grâce au cortex moteur. Les différents comportements conscients mis en place lors d'une perturbation thermique seront abordés dans la partie suivante.
- des **réponses verbales** qui sont obtenues grâce au lobe frontal et en particulier grâce à l'aire de Broca qui permet de transformer les pensées en mots. Spontanément, le sujet a tendance à évoquer d'abord la note hédonique (plaisir, confort), puis la qualité perçue (chaud, froid) et enfin l'intensité (peu, très, extrêmement) [Mac Leod, Sauvageot *et al.* 1996]. Ces réponses hédoniques et sensorielles seront traitées dans la partie 1.2.

1.1.6.3. Les mécanismes actifs conscients de la régulation comportementale

Pour lutter davantage contre le chaud ou le froid, l'Homme a la possibilité d'agir consciemment. Ainsi, lors de la perception d'un changement de l'environnement, il peut, par exemple :

- Changer de posture comme se blottir pour limiter les pertes de chaleur
- Changer de tenue vestimentaire pour modifier l'isolation entre lui et l'environnement
- Changer le niveau de son activité physique pour modifier sa production de chaleur
- Migrer vers une zone avec un climat moins extrême
- Modifier l'environnement en ouvrant ou fermant une fenêtre ou une porte, etc.

Modifier l'environnement en utilisant des moyens technologiques tels que le chauffage, la climatisation (…). Ceci correspond à la régulation technologique (cf. Figure 1.1, page 16).

Lors d'une exposition prolongée à un environnement hostile, certaines réactions comportementales deviennent presque spontanées et involontaires (acclimatation comportementale).

Ces réponses comportementales sont souvent précédées ou accompagnées d'une réponse verbale telle que le « ressenti déclaré ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2. Le ressenti thermique déclaré

La verbalisation du ressenti se situe à **l'interface entre la perception et le réel** : ce n'est qu'une représentation de notre propre perception. Elle correspond à l'un des seuls moyens de connaître la satisfaction d'un individu face à un environnement thermique donné. Elle est étudiée en détail dans cette partie car elle constitue un élément essentiel des expérimentations de ce travail de thèse qui consiste à mieux comprendre les différences de ressenti thermique entre les individus.

Globalement, le ressenti est plutôt facile à exprimer lorsqu'il est qualitatif (détection d'une différence entre 2 produits ou 2 situations par exemple). Cependant, il devient beaucoup plus complexe à exprimer lorsqu'il est quantitatif (évaluation de l'intensité). De plus, l'information récupérée par les déclarations du ressenti peut être biaisée lorsqu'un individu cherche à orienter sa réponse pour satisfaire son interlocuteur ou lorsqu'un individu prend conscience qu'il a froid ou chaud à partir du moment où on lui demande comment il se sent thermiquement (alors qu'il n'éprouvait pas de sensation particulière de chaud ou de froid avant la question). Il est donc nécessaire de maîtriser les termes utilisés lors du questionnement ainsi que la manière d'interroger les volontaires tout en ayant à l'esprit les limites de l'information récupérée.

Cette partie permet de définir les différentes composantes du ressenti thermique déclaré, de regrouper les variables physiologiques qui ont déjà été identifiées comme étant reliées au ressenti thermique et, enfin, de relever l'influence de facteurs non thermiques sur le ressenti thermique.

1.2.1. Les réponses verbales associées au ressenti thermique

Lors d'une perturbation thermique, les individus sont susceptibles d'exprimer :

- **L'aspect qualitatif** de la perception de leur état thermique individuel ou de l'environnement : « j'ai chaud / froid », « il fait chaud / froid », « c'est chaud / froid »
- **L'aspect quantitatif** de la perception de leur état thermique individuel ou de l'environnement : « j'ai très chaud / froid », « il fait un peu chaud / froid »
- **L'aspect hédonique** de la perception de leur état (thermique) individuel ou de l'environnement : « je me sens bien », « j'adore », « je préfèrerais avoir plus chaud », « c'est agréable comme ambiance », « c'est très inconfortable ».

La majorité des études sur le ressenti thermique analyse au moins une des trois réponses verbales suivantes : le seuil de perception thermique, la sensation thermique et le confort

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

thermique. Elles seront définies dans les parties suivantes. Puis, d'autres réponses reliées au plaisir et au « bien-être » seront abordées.

1.2.1.1. La sensation thermique déclarée

La « sensation thermique » déclarée consiste à décrire deux aspects de la perception de l'état thermique individuel ou de l'environnement : l'aspect qualitatif et l'aspect quantitatif lorsque l'intensité de la stimulation le permet.

En effet, suivant l'intensité de la stimulation (cf. Figure 1.21), la réponse verbale ne peut pas retranscrire la perception de la même façon, même si dans tous les cas elle consiste à approximer la « sensation » au sens strict (phénomène psychologique correspondant à l'arrivée de l'influx nerveux dans le cortex cérébral, absence de traitement par les centres supérieurs).

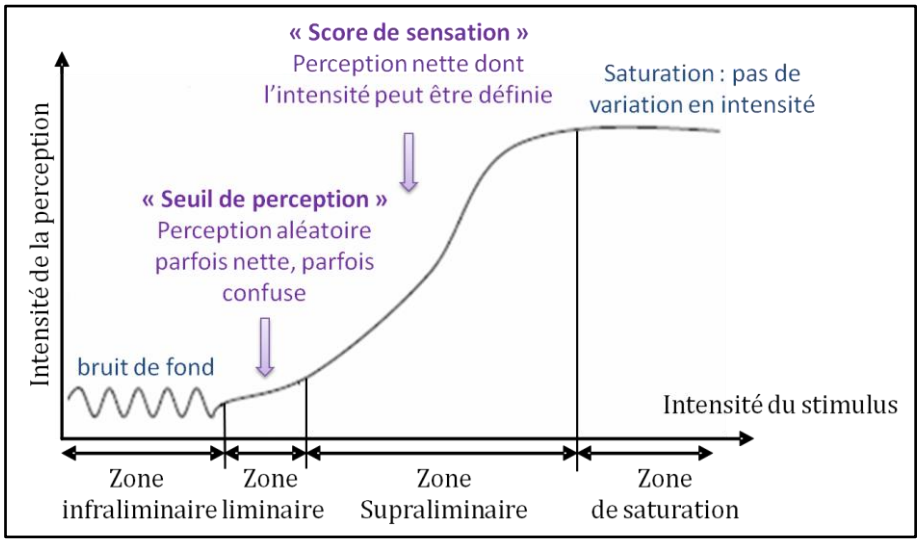


Figure 1.21 : Evolution de l'intensité de la sensation en fonction de la grandeur du stimulus. Chacune des zones représentées est associée à un niveau de perception. Modifiée à partir de [Mac Leod, Sauvageot *et al.* 1996]

Dans la zone liminaire, la réponse correspond au **seuil de perception** alors qu'elle correspond à un **score de sensation** dans la zone supraliminaire (cf. Figure 1.21).

1.2.1.1.1. Le seuil de perception thermique

Lorsque la perception est floue et de très faible intensité (cf. Figure 1.21 : zone liminaire), seul le changement de l'aspect qualitatif de la perception thermique peut être exprimé. La sensation de chaud ou de froid déclarée est alors appelée « seuil de perception thermique ». Plus précisément, ce seuil correspond à **la plus petite variation de température nécessaire pour engendrer l'expression d'une perception de chaud ou de froid** alors que la perception de départ est neutre (« ni chaud, ni froid »). En général, le sujet indique par « oui » qu'il ressent du chaud ou du froid et par « non » qu'il n'identifie pas de perception thermique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2.1.1.2. Le score de sensation thermique déclarée : un jugement thermo-sensoriel

Lorsque la perception est nette et que son intensité augmente avec l'augmentation de la stimulation (cf. Figure 1.21 : zone supraliminaire), l'aspect qualitatif et l'aspect quantitatif de la perception peuvent alors être évalués. La perception ressentie, dans ce cas, peut être exprimée à partir de l'échelle de la norme ISO 10551 présentée sur la Figure 1.22. Cette réponse sera appelée « sensation thermique » dans la suite.

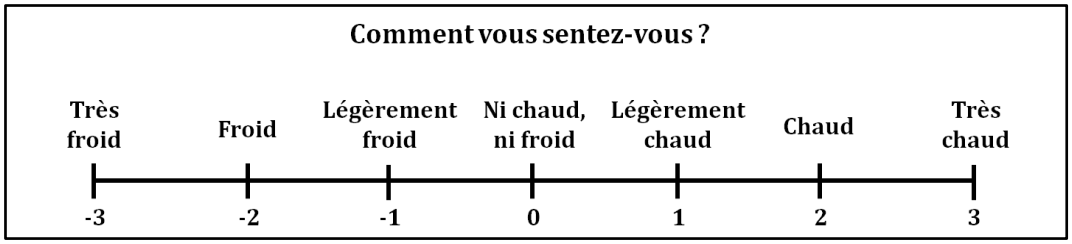


Figure 1.22 : Exemple d'échelle pour l'évaluation de la sensation thermique. Elle peut être étendue avec -4 : extrêmement froid et +4 extrêmement chaud. [AFNOR 2001]

D'après la définition de la « sensation » de la partie 1.1.6.2.3. (cf. page 45), il semble que les termes de « jugement thermo-sensoriel » ou de « jugement perceptif » [AFNOR 2001] soient plus appropriés que le terme de « sensation thermique » pour parler de la réponse verbale se rapportant à l'échelle ci-dessus. En effet, seul le terme de « jugement » traduit l'implication d'un traitement cognitif important (indispensable pour la verbalisation) et souligne que la réponse n'est qu'une approximation de la « sensation » thermique au sens strict. Mais pour simplifier l'écriture, le terme de « **sensation thermique** » sera toujours utilisé, dans la suite, pour parler de « **jugement thermosensoriel** ».

1.2.1.2. Le confort thermique déclaré : une évaluation affective ou hédonique

De façon générale, le « confort » est assimilé à une impression plaisante ressentie par les sens et par l'esprit et il est même parfois relié à un certain plaisir [Candas 2000]. Pourtant, toutes les définitions du « confort thermique » n'incluent pas cette notion de « plaisir » et de « satisfaction ». Par exemple, le lexique des termes de la physiologie thermique associe le confort thermique à un état d'« indifférence subjective vis-à-vis de la température ambiante » [IUPS, commission *et al.* 2001], ce qui exclut toute possibilité de confort en situation transitoire. Pour les travaux présentés dans ce manuscrit, il nous a semblé plus pertinent de se référer à une définition qui mentionne la notion de « plaisir » telle que celle de l'ASHRAE qui associe le confort thermique à un **état d'esprit dans lequel l'Homme exprime une « satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique »** [Djongyang, Tchinda *et al.* 2010].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Ici, le confort thermique déclaré est assimilé à l'appréciation hédonique ou affective de l'état thermique individuel. La Figure 1.23 montre deux exemples d'échelle d'évaluation de cette réponse verbale.

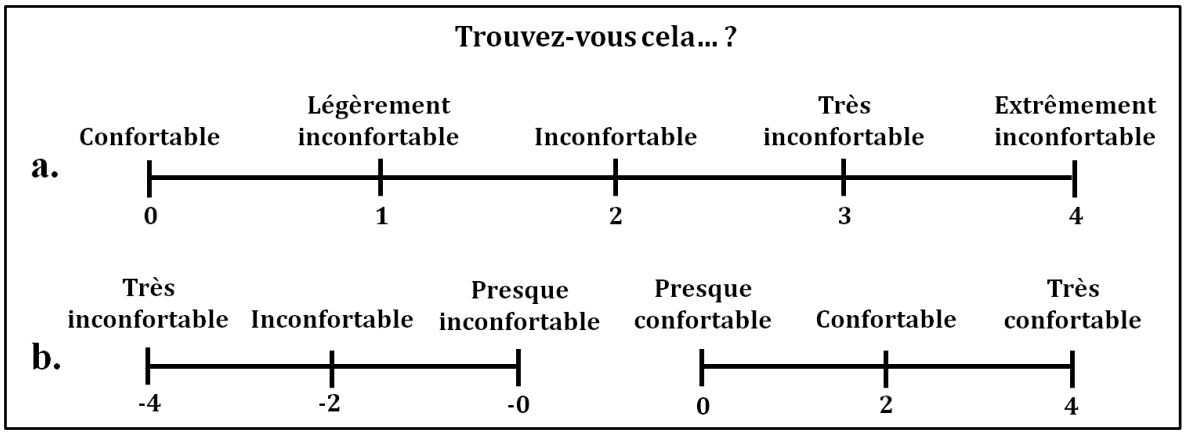


Figure 1.23 : Exemples d'échelle d'évaluation du confort thermique. a. l'échelle d'inconfort thermique de la norme ISO 10551 [AFNOR 2001] et b. l'échelle de confort thermique proposé par Zhang : elle est particulièrement pertinente pour des situations transitoires [Zhang 2003].

Tout comme pour le terme de « sensation thermique », le terme de « confort thermique » n'est pas forcément bien approprié. En effet, la composante hédonique de la réponse verbale (plaisir, satisfaction) est reliée à la représentation générale (et non à une représentation d'une seule modalité sensorielle) que l'Homme se fait de son environnement et il l'attribue aux stimulations (de nature thermique, par exemple) qui semblent lui avoir procuré ce plaisir. Le terme de **« facteurs thermiques du confort »** semble donc plus juste que le terme de confort thermique [Narçon 2001]. Mais pour faciliter l'écriture, le terme de **« confort thermique »** sera utilisé.

D'autre part, contrairement à la notion de sensation de chaud et de froid qui est souvent bien connue par chacun, la notion de confort reste parfois floue et difficile à évaluer pour certaines personnes [Candas 2000]. D'autres termes, souvent utilisés dans les tests hédoniques d'évaluation sensorielle dans le domaine de l'agroalimentaire, pourraient être plus adaptés à la description spontanée de la composante hédonique de la perception de l'état individuel. Ils seront présentés dans la partie suivante.

1.2.1.3. Les autres évaluations hédoniques possibles de l'environnement thermique

Dans le domaine alimentaire, l'analyse sensorielle comprend souvent une mesure hédonique qui appréhende l'appréciation d'un produit à l'aide d'un panel non entrainé. En effet, le plaisir ou l'aspect hédonique ne peut être évalué que par des sujets naïfs, non orientés [Mac Leod, Sauvageot *et al.* 1996]. Cette mesure hédonique s'appuie sur une échelle caractérisée aux deux

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

extrémités par des libellés du type « j'aime beaucoup », « je n'aime pas du tout ». Ces expressions sont couramment utilisées dans la vie de tous les jours [Sauvageot 2001]. Elles sont probablement plus faciles à appréhender que des expressions du type : « je trouve l'environnement confortable ». Ainsi, tout comme un panéliste attribue une « note hédonique » à un produit alimentaire, il pourrait attribuer une note à un environnement thermique.

D'autre part, la notion de « bien-être » associée à « un état du corps ou de l'esprit dans lequel on sent qu'on est bien » (selon le dictionnaire d'Emile Littré) est également beaucoup utilisée dans notre quotidien à travers l'expression : « je me sens bien / mal ». L'appréciation du bien-être pourrait donc être plus naturelle et spontanée que l'appréciation du confort. Lors d'une perturbation thermique, elle pourrait représenter l'aspect hédonique de l'état thermique individuel.

L'échelle de la norme ISO 10551 a été sélectionnée pour évaluer la sensation thermique lors des expérimentations. Par contre, différentes échelles ont été testées, suivant les expérimentations, pour évaluer le confort thermique et le « bien-être » général de l'individu.

1.2.2. La caractérisation des seuils de perception thermique

1.2.2.1. L'influence de facteurs physiques et physiologiques

En général, les seuils de perception sont déterminés à partir d'une stimulation thermique produite localement par une thermode[8] mise en contact avec une zone de la surface cutanée. Différentes expérimentations ont montré que notre capacité à détecter de faibles variations de température est influencée par : la température d'adaptation[9], la surface stimulée, les vitesses de variations de la température de stimulation, la température cutanée locale, la température ambiance et la zone anatomique. L'influence de chacune de ces variables sera brièvement explicitée dans les paragraphes suivants. Mais auparavant, le phénomène d'adaptation est présenté car il permettra de comprendre certaines observations.

Le **phénomène d'adaptation** peut s'observer dans pratiquement tous les systèmes sensoriels. Par exemple, nous savons qu'une odeur nouvelle fortement ressentie en entrant dans une pièce s'estompe en quelques minutes [Bagot 1999]. Au niveau de la sensation thermique, ce phénomène s'illustre par l'observation suivante : lorsqu'une surface corporelle de quelques centimètres carrés est soumise à une stimulation thermique appartenant à la zone « neutre », appelée aussi zone du zéro physiologique (30 – 36°C), la sensation thermique disparait après un

[8] Une thermode est une petite sonde plane dont la température de surface peut changer.

[9] La température d'adaptation correspond à la température initiale de la thermode.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

certain temps de stimulation. Ce temps est d'autant plus faible que la stimulation se trouve au centre de la zone (cf. Figure 1.24). Dans cette zone, l'augmentation de la température du stimulus engendre une sensation de chaud et la diminution une sensation de froid.

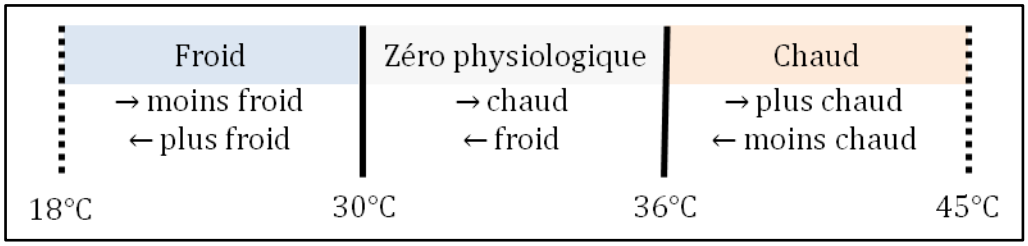


Figure 1.24 : Représentation du phénomène d'adaptation pour une surface de 14,4 cm² de l'avant-bras. Dans la zone du zéro physiologique, la sensation disparait après un certain temps d'application de la stimulation. Pour une température cutanée inférieure à 30°C, la sensation de froid persiste. Pour une température cutanée supérieure à 45°C, la sensation de chaud persiste [Narçon 2001].

Au-delà de la zone « neutre », la sensation de chaud (associée au domaine « chaud ») ou de froid (associée au domaine « froid ») persiste. Dans ces deux domaines, l'augmentation de la température du stimulus engendre une sensation de « plus chaud/froid » et inversement de « moins chaud/froid » avec une diminution de la stimulation thermique. Ce phénomène d'adaptation de la sensation thermique est lié à la réponse phasique ou dynamique des thermorécepteurs décrit dans la partie 1.1.6.2.2. (cf. page 44).

L'augmentation de la **température d'adaptation** abaisse le seuil au chaud et augmente le seuil au froid [Hensel 1981].

L'augmentation de la **surface cutanée de stimulation** abaisse les seuils au froid et au chaud, puisque le nombre de récepteurs activés augmente [Kojo et Pertovaara 1987].

La diminution de la **vitesse de changement** (pour des vitesses inférieures à 0,1°C s^{-1}) **de la température de stimulation** augmente le seuil thermique [Houdas et Guieu 1977; Hensel 1981] [Kenshalo, Holmes *et al.* 1968]. Cet effet est plus marquant pour les seuils au chaud que pour les seuils au froid. Cette constatation est probablement liée au phénomène d'adaptation : une sensation de chaud ou de froid se crée lorsque le taux de variation de la stimulation thermique est plus élevé que le taux d'adaptation [Kenshalo, Holmes *et al.* 1968].

Pour des **températures de peau locales** comprises entre 27°C et 37°C, l'augmentation ou la diminution de la température cutanée locale n'a pas d'effet sur les seuils thermiques, lorsque la thermode reste en contact avec la zone stimulée tout au long de l'évaluation des seuils [Hagander, Midani *et al.* 2000]. Par contre, quand la thermode ne reste pas constamment en contact, l'influence de la température de peau sur les seuils est assimilée à l'influence de la température d'adaptation traitée plus haut [Gerr et Letz 1994].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

L'augmentation de la **température ambiante** (10°C → 30°C → 50°C) a tendance à augmenter les seuils au chaud (sur la main), alors que les seuils au froid semblent indépendants de la température ambiante. Le seuil local au chaud est probablement « masqué » par les afférences thermiques « chaudes » venant du reste du corps [Hensel 1981].

La **zone anatomique** a une forte influence sur les seuils thermiques. Ces derniers peuvent varier jusqu'à 100 fois sur toute la surface corporelle [Stevens 1998]. Le visage est la zone la plus sensible, les extrémités sont les zones les moins sensibles et les membres supérieurs ainsi que le torse ont des seuils intermédiaires [Stevens 1998; Hagander, Midani *et al.* 2000]. Au niveau du visage, les valeurs des seuils au froid peuvent être multipliées par 6 et celles des seuils au chaud par 10 suivant la zone (cf. Figure 1.25) [Essick, Guest *et al.* 2004].

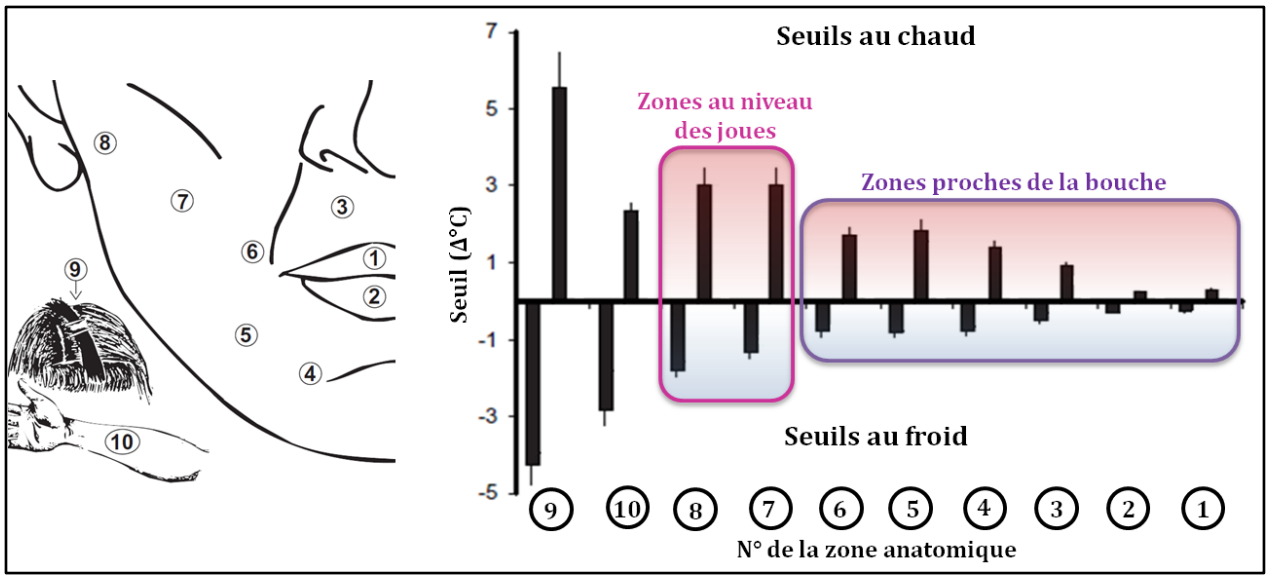


Figure 1.25 : Seuils au chaud et au froid en fonction de la zone anatomique moyennés sur 34 sujets et obtenus pour une surface de 8,8x11,0 mm² et pour une température d'adaptation de l'ordre de 32°C. Les différentes zones anatomiques sont représentées à gauche par un numéro. Réalisé à partir de : [Essick, Guest *et al.* 2004]

Il a également été constaté que les régions qui sont plus sensibles au froid sont plus sensibles au chaud [Stevens 1998; Essick, Guest *et al.* 2004] (cf. Figure 1.25).

1.2.2.2. L'influence de facteurs individuels et temporels

L'influence, sur les seuils de perception thermique, de certains facteurs individuels tels que l'âge, le genre, la maladie, *etc.* a été analysée à travers quelques expérimentations. Des divergences sont présentes entre certaines études mais des tendances se dégagent.

Globalement, l'augmentation de l'**âge** a tendance à abaisser la capacité de détection de faibles variations de température. Ce déclin est progressif et significatif entre 40 et 60 ans et après 65 ans [Heft, Cooper *et al.* 1996; Stevens 1998; Besne, Descombes *et al.* 2002; Tochihara, Kumamoto *et al.* 2011]. Il pourrait être lié à une modification de la densité des fibres nerveuses

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

avec l'âge : les plus de 40 ans ont tendance à posséder une densité bien plus faible que les moins de 40 ans [McArthur, Stocks *et al.* 1998].

Le **genre**, de son côté, ne semble pas avoir d'influence significative sur les seuils thermiques et en particulier sur le visage [Stevens 1998; Essick, Guest *et al.* 2004]. Toutefois, l'étude de Golja *et al.* a mis en évidence une sensibilité thermique supérieure des femmes face à des stimulations thermiques locales froides et chaudes sur l'avant-bras [Golja, Tipton *et al.* 2003]. L'effet du genre sur les seuils ne peut donc pas être complètement exclu même si les différences engendrées par le genre sont bien plus faibles que celles engendrées par des différences d'âge [Stevens 1998].

L'**ethnicité** ou l'acclimatation physiologique a tendance à influencer les seuils thermiques. Les individus vivant dans les tropiques (Malaisiens) apparaissent moins sensibles pour la détection des seuils au chaud (surtout sur le front) que les individus vivant dans des zones tempérées (japonais). De plus, les différences de seuil thermique entre les zones anatomiques sont plus élevées chez les individus vivant dans des zones tempérées [Lee, Saat *et al.* 2010].

D'autres facteurs liés aux **habitudes de vie** peuvent avoir un impact sur les seuils thermiques. Par exemple, la consommation régulière de tabac aurait tendance à augmenter les seuils de perception du froid sur les doigts [Gerr et Letz 1994].

Des **maladies au niveau du système nerveux périphérique** peuvent également modifier les seuils de perception thermique. Ainsi, les individus atteints de neuropathie diabétique périphérique présentent des seuils de perception thermique plus élevés [Chong et Cros 2004].

D'autre part, une autre particularité intéressante, liée à l'individu a pu être mise en évidence : les **individus sensibles localement au chaud semblent également sensibles localement au froid** [Essick, Guest *et al.* 2004; Green et Akirav 2007].

D'autres types de facteurs non individuels mais temporels sont, également, susceptibles de se répercuter sur notre capacité à détecter de faibles variations de température. En effet, des **rythmes biologiques** tels que le cycle menstruel semble avoir un impact sur les seuils. En effet, les femmes présentent une plus grande sensibilité locale au froid après l'ovulation et lorsque la température d'adaptation est supérieure à 35°C. Ce phénomène pourrait être relié au déclenchement d'une vasodilatation cutanée causée par l'augmentation de la progestérone [Kenshalo 1966].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2.2.3. Bilan

Cette caractérisation des seuils de perception thermique met en évidence que notre capacité à détecter de faibles variations de température dépend de nombreux facteurs qui doivent être maitrisés et connus lors d'une étude expérimentale sur les seuils de perception. Certaines différences interindividuelles liées à l'âge et à l'ethnicité ont été clairement identifiées. D'autre part, les individus semblent être caractérisés par une sensibilité thermique locale particulière puisque ceux qui sont sensibles au froid localement le sont également pour le chaud. Tout comme les zones anatomiques sensibles au froid, sont sensibles au chaud. Cette particularité pourrait être associée à des différences au niveau de la densité des fibres nerveuses. On pourrait alors se demander si ces différences interindividuelles locales de sensibilité thermique pourraient expliquer les différences de sensibilité thermique globale. Est-ce que les gens qui se plaignent plus souvent du froid ou du chaud, présentent des seuils de perception thermique différents?

La caractérisation de ce lien potentiel entre les différences interindividuelles de seuils de perception thermique locaux et les différences interindividuelles de ressenti thermique global constituera le premier axe de recherche de ces travaux. L'intérêt de cet axe est renforcé par une étude récente de Yasuoka *et al.* qui montre que les individus dont la température préférée est plus élevée (> 29°C) déclarent plus rapidement un changement de sensation thermique lors d'un changement progressif de température ambiante (33°C → 25°C) que les individus dont la température préférée est plus faible (< 29°C) [Yasuoka, Kubo *et al.* 2012]. Il semblerait que les individus préférant des environnements plus chauds (probablement « frileux ») ont un seuil de perception thermique globale plus faible que les autres. Les auteurs suggèrent, alors, d'explorer les seuils de perception thermique locaux de ces deux groupes pour mieux comprendre les causes de ces différences globales.

1.2.3. La caractérisation du score de sensation thermique et de confort thermique

Comme mentionné dans l'introduction générale et illustrée par l'étude de Nagashami et *al.*, la physiologie humaine pourrait nous permettre de mieux comprendre les différences interindividuelles de ressenti thermique global. Cette partie consiste donc à identifier les variables physiologiques qui sont reliées à la sensation thermique dans un premier temps et au confort thermique dans un deuxième temps. Puis, les facteurs (individuels, temporels et de contexte) susceptibles d'influencer l'intensité du ressenti thermique déclaré seront répertoriés. Ainsi, il sera possible de construire des expérimentations fiables.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Pour ce faire, les résultats des études psychophysiques et psychophysiologiques réalisées sur le ressenti thermique (sensation thermique et confort thermique) seront explorés.

1.2.3.1. Les variables physiologiques reliées à la sensation thermique

Pour répertorier les variables physiologiques qui sont corrélées avec la sensation thermique, il est important de préciser la nature de la stimulation puisque celle-ci peut modifier les relations entre la sensation thermique et les variables physiologiques. La stimulation thermique peut être :

- locale (stimulation d'une zone précise du corps) ou globale (stimulation du corps entier),
- stable ou dynamique : transitoire et brutale ou transitoire et progressive,
- uniforme ou non uniforme.

De plus, suivant les études, les auteurs s'intéressent à la sensation thermique locale (ressentie sur une zone) ou à la sensation thermique globale (ressentie sur tout le corps).

Ici, nous nous focalisons sur la caractérisation de la sensation thermique globale engendrée par une stimulation globale, uniforme, **stable** puis à la caractérisation de la sensation thermique globale engendrée par une stimulation globale, uniforme, **transitoire**.

La notion de stationnarité est complexe. En effet, le temps d'exposition pour atteindre une situation stationnaire (c'est-à-dire un ressenti constant au cours du temps) dépend de l'intensité de la stimulation (cf. Figure 1.26), de l'état de l'individu, de la tenue vestimentaire, *etc.* Ce temps peut être de l'ordre de 20, 30, 80, ou de plus de 120 minutes.

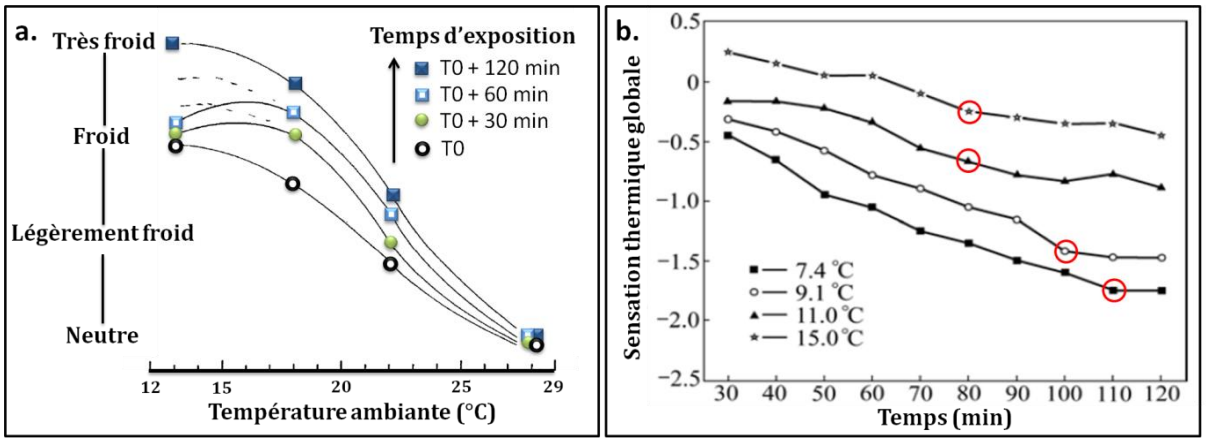


Figure 1.26 : Evolution de la sensation thermique globale au cours du temps pour 4 conditions ambiantes différentes : a. les données sont obtenues à partir de 3 sujets nus [Gagge, Stolwijk *et al.* 1967]. b. les données sont obtenues à partir de 10 jeunes hommes et 10 jeunes femmes avec une isolation vestimentaire de l'ordre de 1,32 Clo. Les ronds rouges illustrent à partir de quel moment la sensation thermique n'est plus influencée significativement par le temps d'exposition [Liu, Tan *et al.* 2011].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Même après un temps long d'exposition, il est difficile d'assurer que la stationnarité soit atteinte. Toutefois, à partir du moment où le sujet a été exposé plus de 40 minutes à un environnement thermique, il sera admis que la caractérisation est faite en régime stationnaire.

La **transition thermique** peut être qualifiée de « froide » pour le passage à un environnement plus froid et de « chaude » pour le passage à un environnement plus chaud. Lorsque ce passage est brusque, la sensation thermique change brutalement avant même que les mécanismes thermorégulateurs se déclenchent, puis elle se stabilise plus ou moins rapidement suivant l'écart de température entre les deux environnements. Cependant, lorsque le passage est progressif, la sensation thermique change progressivement (cf. Figure 1.27).

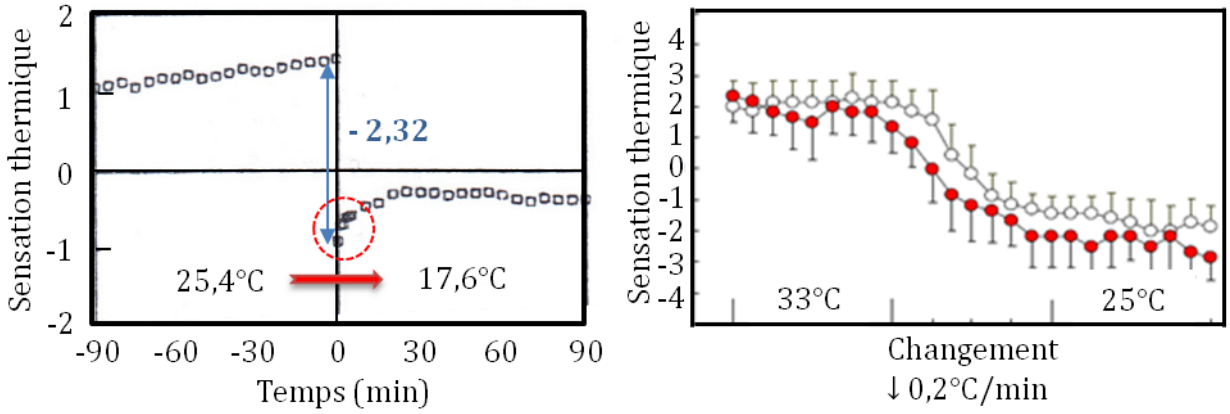


Figure 1.27 : Evolution de la sensation thermique lors d'une transition thermique. A gauche : la transition est brusque et les données ont été obtenues sur 12 jeunes hommes avec une isolation vestimentaire de 1 Clo. [de Dear, Ring *et al.* 1993]. A droite : la transition est progressive. Les points rouges représentent un groupe de 6 japonaises qui ont une température préférée de l'ordre de 30,2°C et les points blancs un groupe de 7 japonaises qui ont une température préférée de l'ordre de 27,6°C [Yasuoka, Kubo *et al.* 2012]

Il est donc nécessaire de différencier les relations entre la sensation thermique et les variables physiologiques qui ont été obtenues en régime transitoire brusque de celles qui ont été obtenues en régime transitoire progressif.

Les variables physiologiques qui ont déjà été reliées à la sensation thermique sont regroupées dans le Tableau 1.3 pour le régime stationnaire et dans le Tableau 1.4 pour le régime transitoire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 1.3 : Les variables physiologiques liées à la sensation thermique en régime stationnaire

Variable physiologique liée à la sensation thermique en régime stationnaire	Observations sur le lien existant entre la sensation thermique déclarée et la variable physiologique *(r : coefficient de corrélation)*	Références
Température du visage	r compris entre 0,6 et 0,9, d'après l'expérimentation de Nishimura et Genno exposées en 1993. r = 0,9 d'après les travaux de thèse de Fabrice De Oliveira.	[Katsuura, Tabuchi *et al.* 1998; De Oliveira 2008]
Température des doigts	r = 0,78, mais uniquement dans la zone « froide » comprise entre 0 et -1,5 sur l'échelle de sensation thermique de la Figure 1.22, page 51. La faible corrélation en environnements chauds est associée à la très faible variation de la température des doigts quand les individus ont chaud.	[Wang, Zhang *et al.* 2007]
Gradient de température entre les doigts et l'avant-bras	r = 0,80, mais uniquement dans la zone « froide » comprise entre 0 et -1,5 sur l'échelle de sensation thermique de la Figure 1.22, page 51. L'utilisation du gradient réduit la forte différence interindividuelle de la température des doigts qui est probablement liée à des différences interindividuelles des seuils de déclenchement des mécanismes de vasomotricité.	[Wang, Zhang *et al.* 2007]
Gradient entre température de l'air et des doigts	r ~ 0,81	[Wang, Zhang *et al.* 2007]
Différence maximale de température locale	La différence diminue lorsque la température ambiante augmente entre 21 et 29°C. Au froid, la distribution des températures sur le corps est moins uniforme.	[Yao, Lian *et al.* 2008]
Température cutanée moyenne[10]	La corrélation est forte et positive quand la température cutanée moyenne est comprise entre 29 et 34°C. Au-delà ou en-dessous de cette gamme de valeur, la sensation thermique reste à peu près stable alors que la température cutanée moyenne continue à évoluer.	[Gagge, Stolwijk *et al.* 1967; Zhang 2003; Yao, Lian *et al.* 2008; Zhang, Arens *et al.* 2010c]
Perte évaporatoire	La corrélation est positive et non négligeable quand la perte évaporatoire > à 40 kcal/m²/h.	[Gagge, Stolwijk *et al.* 1967]
Variabilité de la fréquence cardiaque	Le rapport (LF_{norm}/HF_{norm})[11] de l'électrocardiogramme (ECG) est plus faible lorsque la sensation thermique est neutre et il augmente lorsque les sujets s'écartent de cette sensation « neutre ».	[Yao, Lian *et al.* 2008]
Activité du cerveau	La puissance relative de la bande β de l'électroencéphalogramme (EEG) augmente quand la sensation s'écarte de la neutralité et surtout quand elle atteint les extrémités « très froid » ou « très chaud ».	[Yao, Lian *et al.* 2008]

[10] La température moyenne cutanée correspond à la moyenne des températures cutanées mesurées sur différentes zones du corps et pondérées ou non par rapport au pourcentage de surface qu'elles représentent. Un article récent de Liu *et al.* préconise d'utiliser une température cutanée moyenne calculée à partir de 10 sites différents : pied, mollet, cuisse, abdomen, poitrine, dos, main, bras supérieur, avant-bras et front [Liu, Lian *et al.* 2011].

[11] L'étude du rapport LF/HF correspond à une analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) dans le domaine fréquentiel. Ce rapport est calculé à partir de la densité spectrale de puissance, sachant que la bande LF est comprise entre 0,05 - 0,15Hz et que la bande HF est comprise entre 0,15 - 0,5 Hz [Malliani, Pagani *et al.* 1991]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 1.4 : Les variables physiologiques liées à la sensation thermique en régime transitoire

	Variable physiologique liée à la sensation thermique en régime transitoire	Observations sur le lien existant entre la sensation thermique et la variable physiologique *(r : coefficient de corrélation)*	Références
TRANISTION BRUSQUE	**Température de peau moyenne ou locale et sa vitesse de variation**	Les relations existantes sont en accord avec l'activité dynamique des thermorécepteurs qui est fonction de la température de peau absolue et de la vitesse de variation de la température de peau	[Gagge, Stolwijk *et al.* 1967; de Dear, Ring *et al.* 1993]
	Température interne et sa vitesse de variation	le sens de variation de la température interne change nettement (comme la sensation thermique) lorsque la transition thermique brutale implique un environnement chaud (passage d'un environnement neutre à un environnement chaud ou inversement)	[Gagge, Stolwijk *et al.* 1967]
	Humidité de la peau	r ~ 0,54, lorsque la transition est forte (-8°C : 32°C => 24°C)	[Chen, Hwang *et al.* 2011]
	Perte en eau	r ~ 0,42, lorsque la transition est forte (-8°C : 32°C => 24°C)	[Chen, Hwang *et al.* 2011]
TRANISTION PROGRESSIVE	**Température de peau moyenne**	r ~ 0,5, lors d'une transition froide et chaude	[Yasuoka, Kubo *et al.* 2012] [Katsuura, Tabuchi *et al.* 1998]
	Température de peau locale	r = 0,6 sur le front et r = 0,55 sur l'avant-bras	[Katsuura, Tabuchi *et al.* 1998]
	Flux thermique	r = -0,76 sur la cuisse, r = -0,84 sur le bras. Il est supposé que les thermorécepteurs sont particulièrement sensibles aux flux de chaleur entrants et sortants au niveau de la peau	
	Différence entre la température cutanée moyenne et la température d'air	r = 0,86. Cette relation est une analogie avec le flux thermique	
	Flux sanguin	r=0,5	

En accord avec les résultats des expérimentations psychophysiologiques exposés dans les deux tableaux, la majorité des modèles de prédiction de la sensation thermique en régime stationnaire et transitoire utilisent des températures cutanées moyennes ou locales et/ou la température interne et la dérivée de ces variables (en régime dynamique) [Walgama, Fackrell *et al.* 2006; Cheng, Niu *et al.* 2011].

1.2.3.2. Les variables physiologiques reliées au confort thermique

Les études psychophysiques ou psychophysiologiques sur le confort thermique sont beaucoup moins nombreuses que celles sur la sensation thermique car le confort thermique est souvent associé à la sensation thermique et les auteurs se contentent donc d'observer les évolutions des variables physiques et physiologiques en fonction de la sensation thermique pour faire des conclusions sur le confort thermique. Toutefois, quelques études ont étudié les scores de confort thermique en fonction de la physiologie humaine.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

En régime stationnaire, le confort thermique ou plutôt l'inconfort thermique (souvent plus facile à évaluer) est relié aux variables présentées dans le Tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Les variables physiologiques reliées au confort thermique en régime stationnaire

Variable physiologique liée au confort thermique en régime stationnaire	**Observations sur le lien existant entre l'inconfort thermique et la variable physiologique** *(r : coefficient de corrélation)*	**Références**
Température de peau moyenne	Elle est surtout reliée à l'inconfort dans des environnements froids.	[Gagge, Stolwijk *et al.* 1967; Houdas et Guieu 1977]
Température corporelle	Elle est reliée à l'inconfort dans des environnements chauds.	[Nadel 1977]
Cartographie des températures cutanées locales	Quand la distribution des températures locales sur le corps s'écarte de la distribution « idéale » associée à un niveau de confort, le risque d'inconfort augmente.	[Candas 2000]
Frissons	Ils sont uniquement associés à l'inconfort dans des environnements froids.	[Houdas et Guieu 1977]
Débit sudoral local	r = 0,95. Le lien avec l'inconfort est visible dans les environnements chauds.	[Nadel 1977]
Mouillure cutanée	r = 0,788 à 25°C et à 32°C. Dans un environnement chaud, l'inconfort augmente avec l'inconfort.	[Gagge, Stolwijk *et al.* 1967; Galeou, Grivel *et al.* 1989; Lee, Nakao *et al.* 2011]
Rapport LF/HF	Il est significativement plus élevé pour des situations d'inconfort thermique que pour des situations de confort thermique.	[Liu, Lian *et al.* 2008]

Cependant, les relations entre le confort thermique et les variables physiologiques sont souvent moins fortes que celles entre la sensation thermique et les variables physiologiques. Elles sont rarement utilisées dans les modèles de confort thermique. Seul le lien entre la sensation thermique et le confort thermique est souvent utilisé. Cette relation est spécifique et elle est de plus en plus controversée. Elle consiste à considérer que la sensation de « ni chaud, ni froid » est associée à un état de confort et dès que la sensation s'écarte de cette neutralité, l'inconfort augmente (cf. Figure 1.28). Par exemple, Fanger a développé l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), correspondant au pourcentage de personnes insatisfaites, à partir du raisonnement suivant : tous les individus qui avaient déclaré une sensation thermique supérieure à 2 en valeur absolue (sur l'échelle ASHRAE), étaient en situation d'inconfort [Fanger 1970]. Il a alors comptabilisé, pour chaque vote moyen de sensation thermique (PMV), le pourcentage d'insatisfaits (c'est-à-dire le pourcentage d'individus ayant déclaré une sensation thermique $\geq|2|$) pour obtenir le PPD. Il obtient que l'inconfort est minimal (PPD = 5%) quand la PMV=0.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

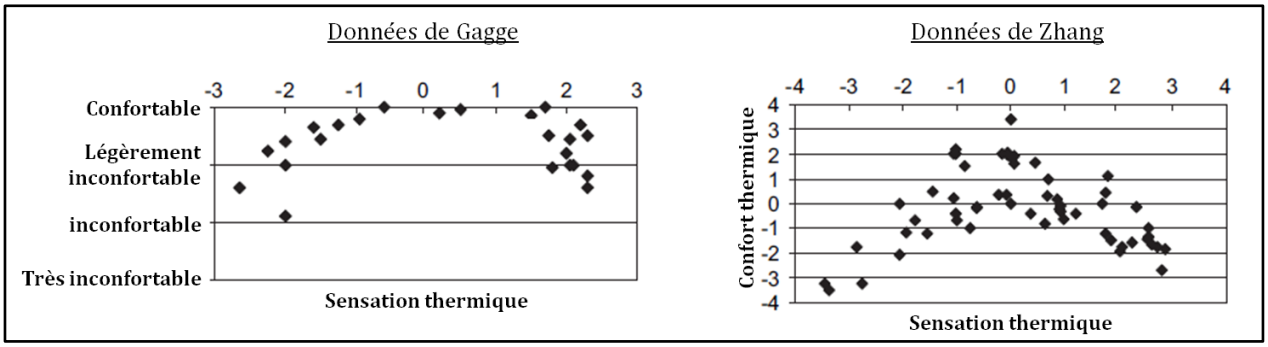


Figure 1.28 : Evolution du confort thermique en fonction de la sensation thermique globale dans des environnements stables et uniformes. A gauche : graphique réalisé à partir des données de Gagge et al. [Gagge, Stolwijk et al. 1967], à droite : graphique réalisé à partir des données de Zhang et al. [Zhang, Arens *et al.* 2010a]. Echelle de sensation thermique s'étendant de -4 : extrêmement froid à 4 : extrêmement chaud. Echelle de confort pour le graphique de droite : -4 : très inconfortable, -2 : inconfortable, 2 : confortable, 4 : très confortable.

Cependant, certains auteurs montrent que la zone de confort peut se situer dans une zone un peu plus chaude ou un peu plus froide suivant les individus. La zone sensorielle de « ni chaud, ni froid » permet, pour la majeure partie des gens, de garantir l'absence d'inconfort thermique marqué mais elle ne peut pas prétendre garantir un état de confort [Candas 2000]. De plus, l'insatisfaction ne varierait pas forcément symétriquement de part et d'autre du point de neutralité : pour certaines personnes, le froid serait plus mal jugé alors que pour d'autres ce serait le chaud qui serait plus mal jugé. Ces différences de relation entre la sensation thermique et le confort thermique peuvent s'expliquer par des facteurs tels que les saisons, l'origine géographique des individus, le type de bâtiment ou par d'autres facteurs individuels non clairement identifiés [Van Hoof, Mazej *et al.* 2010].

Ces constations soulignent l'intérêt de déterminer des classes d'individus pour améliorer la prédiction du confort. De plus, l'idée de caractériser ces classes d'individus par des particularités physiologiques permettrait de mieux comprendre les causes des différences interindividuelles au niveau du ressenti thermique.

En régime transitoire, la relation entre le confort thermique et la sensation thermique est beaucoup plus complexe [Hensen 1990] puisque le confort n'évolue pas forcément à la même vitesse que la sensation thermique [Gagge, Stolwijk *et al.* 1967].

Il existe peu d'études sur la caractérisation du confort thermique par des variables physiologiques, en situation transitoire. Le résultat majeur qui a été obtenu par Cabanac pour la caractérisation d'un confort local et par Attia et Engel [Attia et Engel 1982; Cabanac 2003] pour le confort global est que, pour des individus en hypothermie, les températures chaudes sont

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

agréables et les températures froides sont désagréables et inversement pour les individus en hyperthermie. La température interne ou l'état thermique des individus joue donc un rôle majeur dans l'état de confort des individus. Cabanac a alors introduit la notion d'alliesthésie selon laquelle la dimension hédonique de la sensation est modulable suivant les circonstances. Il met en évidence que toute stimulation thermique qui va dans le sens du rétablissement de l'homéostasie (ou de la réduction du stress thermique) est perçue comme agréable alors que toute stimulation qui menace l'homéostasie est perçue comme désagréable [Cabanac 1981; Cabanac 2003]. Cette recherche de l'équilibre pour atteindre le plaisir implique que la **température interne** mais également la **température cutanée moyenne** (lorsque la température interne est inchangée) aient des rôles importants dans l'établissement d'un état de confort.

De plus, lors d'une transition qui tend à ramener le corps vers l'homéothermie (passage d'un état thermique déséquilibré à un état thermique neutre et équilibré), le plaisir ressenti par les volontaires peut être bien supérieur à celui ressenti dans une situation stable. Cette remarque permet de réfléchir à la pertinence d'utiliser l'échelle de la norme NF EN ISO 10 551 pour l'évaluation affective du ressenti thermique. En effet, cette échelle n'est graduée que dans l'inconfort. Elle manquerait donc de précision pour des situations transitoires qui peuvent susciter des niveaux de confort bien plus élevés que l'état « confortable ». Une échelle du même type que celle de Zhang qui propose une graduation du côté du confortable et du côté de l'inconfortable pourrait être une alternative dans des situations transitoires [Zhang 2003].

1.2.3.3. Première sélection des paramètres cutanés à mesurer

A partir de cette caractérisation de la sensation thermique et du confort thermique, il est possible de sélectionner des paramètres physiologiques qui sont reliés au ressenti déclaré et qui seraient susceptibles de nous fournir des informations sur les différences interindividuelles de ressenti s'ils sont inclus dans les expérimentations.

Les propriétés cutanées thermiques apparaissent particulièrement bien reliées au ressenti thermique. Les variables associées à ces propriétés thermiques ont été choisies à partir de critères « techniques » ou « pratiques ». Même si la démarche est multiparamétrique, il est nécessaire de ne pas encombrer le volontaire par une quantité trop importante de mesures par contact, afin que son « bien-être » ne soit pas biaisé. Par exemple, la température cutanée moyenne a été éliminée car elle nécessite un trop grand nombre points de mesure, sur des zones du corps parfois difficilement accessibles. Elle pourrait induire une gêne ou un stress de la part du volontaire. De même, le flux thermique n'a pas été retenu. Les mesures sans contact de températures de peau

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

locales, sur des zones facilement accessibles telles que le visage, les mains, et les avant-bras ont été privilégiées. Chaque zone présente des particularités différentes, liées, entre autres, aux différences de vascularisation ou d'innervation et apporte une information différente sur la thermorégulation et le ressenti :

- **le visage** est une zone en interaction permanente avec l'environnement qui doit s'adapter et qui est doté d'un comportement vasculaire très inhomogène (zone stable : front ; zones plus réactives : joues, nez). La sensation (et le confort) ressentie sur cette zone est similaire au ressenti global dans un environnement chaud [Arens, Zhang *et al.* 2006]. Elle est donc probablement une zone clé.
- **les mains** sont des zones qui sont aussi confrontées aux sollicitations climatiques. Elles ont un comportement vasculaire très actif et le ressenti au niveau de ces zones est souvent révélateur du ressenti global dans des environnements froids [Arens, Zhang *et al.* 2006].
- **l'avant-bras** est souvent protégé par des vêtements. Il présente donc probablement un autre comportement face aux sollicitations thermiques. Il est susceptible de fournir des informations complémentaires.

De plus, comme une différence de températures cutanées entre deux zones (front – joue ou front – doigts par exemple) peut refléter une inhomogénéité thermique (plus ou moins forte) et parfois un inconfort, il a été choisi d'exploiter ce paramètre pendant les expérimentations.

D'autre part, la température interne n'a pas été retenue car, les moyens de mesure précis tels que la température rectale sont souvent compliqués à mettre en place sur des volontaires.

En plus des températures cutanées locales, des variables reflétant chacun des mécanismes de thermorégulation ont été sélectionnées, c'est-à-dire une mesure de la perte évaporatoire (sudation) et une mesure du flux sanguin. La mouillure cutanée a été éliminée car elle ne représente pas la quantité de chaleur qui a été évacuée. Seule l'évaporation peut la représenter.

Tableau 1.6 : Première sélection des variables physiologiques à mesurer

Propriétés	Variables	N° des chapitres
Thermique	Température de peau locale	2, 3
Thermique	Différence de température entre plusieurs zones du corps	2, 3
Vasculaire	Flux sanguin	3
Hydrique	Perte évaporatoire	2, 3

Toutes les variables sélectionnées (cf. Tableau 1.6) reflètent des propriétés cutanées qui sont en lien direct avec les mécanismes de thermorégulation. Mais n'y aurait-il pas d'autres

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

propriétés cutanées « non thermo-vasculaires » qui pourraient nous fournir des informations complémentaires et nous permettre de mieux comprendre les différences interindividuelles de ressenti thermique ? Des éléments de réponses seront apportés plus loin grâce à la partie 1.3. sur la peau. D'autres variables cutanées seront alors identifiées pour être intégrées dans les expérimentations.

Dans la partie suivante, les facteurs d'influence du ressenti thermique vont être présentés, afin d'établir un état des connaissances actuelles sur les différences interindividuelles et d'identifier les facteurs qui devront être maîtrisés durant les expérimentations.

1.2.3.4. L'influence des facteurs individuels

Face à une stimulation thermique donnée, le ressenti thermique présente des différences interindividuelles. Différents individus peuvent éprouver des ressentis différents même si ils sont confrontés à la même stimulation thermique. Par exemple, sur 64 sujets, l'écart quadratique moyen sur la température ambiante souhaitée peut atteindre 1,2°C [Olesen 1982]. Comme il a pu être noté dans la partie 1.1.5.5. , des facteurs liés à des particularités individuelles telles que l'âge, le sexe, les habitudes de vie ont des impacts sur les mécanismes de régulation autonome. Mais, ces mêmes facteurs ont-ils un effet sur le ressenti thermique et peuvent-ils expliquer les différences interindividuelles de ressenti déclaré ? Quelques auteurs se sont penchés sur ces questions. Les résultats peuvent diverger d'un auteur à un autre mais des tendances ont été relevées.

1.2.3.4.1. L'âge

Il a pu être mis en évidence que l'âge influence peu la température de neutralité thermique[12] [Fanger 1970]. De même, les environnements thermiques préférés (pour les plus de 68 ans : 24,5°C – 25,7°C *vs.* pour les moins de 23 ans : 25,0°C – 25,6°C) [Olesen 1982] et la satisfaction thermique des individus en hiver, automne et printemps [Choi, Aziz *et al.* 2010] sont similaires pour tous les âges. Seule la satisfaction thermique en été a tendance à être meilleure pour les plus de 40 ans mais cette tendance est non significative (de l'ordre de 0,1) [Choi, Aziz *et al.* 2010]. De nombreuses études ont montré que les faibles différences de ressenti thermique liées à l'âge pourraient s'expliquer par des différences du niveau d'activité et des différences de tenue vestimentaire [Olesen 1982; Havenith 2005; Van Hoof 2008].

[12] La température de neutralité thermique correspond à la température ambiante pour laquelle un individu a déclaré avoir « ni chaud, ni froid ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2.3.4.2. Le genre

Concernant les différences entre les hommes et les femmes, elles sont non significatives au niveau des températures préférées, des températures de neutralité thermique [Fanger 1970; Charles 2003; Van Hoof 2008] et des sensations thermiques déclarées en été [Cena et de Dear 2001]. Mais, les femmes ont tendance à avoir plus froid en environnement froid avec une tenue vestimentaire et une activité identiques à celles des hommes [Parsons 2002b]. Elles sont également plus sensibles aux déviations de la température par rapport à la température optimale [Fanger 1970; Chung et Tong 1990; Van Hoof 2008] et elles déclarent plus souvent un inconfort thermique [Cena et de Dear 2001; Karjalainen 2007]. Dans la vie de tous les jours, elles ont tendance à préférer des températures ambiantes plus élevées [Olesen 1982; Karjalainen 2007], ce qui pourrait être lié à leurs tenues vestimentaires plus légères. Une étude récente sur des chinois a montré, grâce à l'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque (cf. note de bas de page n°11, page 60), que les femmes préfèrent des environnements neutres ou légèrement chauds alors que les hommes préfèrent des environnements neutres ou légèrement froids : l'inconfort froid est moins élevé que l'inconfort chaud chez l'homme et inversement chez la femme [Lan, Lian *et al.* 2008].

1.2.3.4.3. L'acclimatation physiologique, l'origine géographique

Dans la majorité des études, l'acclimatation physiologique (liée, par exemple, à la zone géographique de vie des individus) ne se répercute pas significativement sur les températures de neutralité thermique [Chung et Tong 1990; Charles 2003]. Dans l'étude d'Olesen, une seule différence au niveau des températures préférées a été identifiée entre les Danois qui ont l'habitude de travailler dans le froid et les personnes vivant dans les tropiques (24,7°C vs. 27,2°C respectivement) [Olesen 1982]. D'autre part, lorsque des individus suivent un programme d'acclimatation au chaud, ils présentent des modifications de leurs réponses physiologiques après quelques jours (cf. partie 1.1.5.5.2. page 36) mais leurs sensations thermiques déclarées varient très peu [Parsons 2002b]. Cependant, l'acclimatation physiologique est susceptible d'influencer la sensibilité des individus à un changement de température : des personnes habituées à travailler et à vivre dans des climats chauds acceptent plus facilement de travailler dans des environnements chauds (que froids ou neutres) et elles sont plus efficaces que des personnes qui viennent des climats froids [Olesen 1982; Charles 2003]. Des études sur l'acclimatation au froid ont montré une diminution de l'intensité de froid perçue [Leppäluoto, Korhonen *et al.* 2001]. Certains auteurs ont suggéré que les différences observées entre des individus issus de régions géographiques

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

différentes pourraient davantage être influencées par des attentes et des comportements sociaux et culturels particuliers que par des réponses physiologiques spécifiques [Charles 2003].

1.2.3.4.4. D'autres facteurs individuels

Une étude d'Erlandson *et al.* portant sur des individus vivant dans des régions chaudes, a montré qu'un certain nombre de facteurs individuels tels que la masse corporelle, la consommation de tabac, le niveau de santé, l'activité physique habituelle n'avaient pas d'effet sur la sensation thermique [Erlandson, Cena *et al.* 2003; Frontczak et Wargocki 2011].

Yasuoka *et al.* ont mis en évidence que les individus qui préfèrent des températures ambiantes supérieures à 29°C déclarent des sensations thermiques plus faibles que ceux qui préfèrent une température inférieure à 29°C, surtout lors d'une diminution progressive de la température ambiante (33°C à 25°C) [Yasuoka, Kubo *et al.* 2012].

Les femmes qui souffrent du syndrome du froid (appelé « coldness » en anglais) éprouvent un inconfort au froid plus élevé que les autres femmes. Ce syndrome touche 30% des femmes japonaises et rarement les hommes. Il correspond à une sensation de froid persistant dans tout le corps et les extrémités même dans des environnements chauds (20-23°C) en hiver ou dans des environnements climatisés (23-26°C) l'été. Il semble associé à une diminution plus forte de la température des extrémités liées probablement à une forte vasoconstriction au niveau des doigts des mains et des pieds [Nagashima, Yoda *et al.* 2002].

D'autre part, la prise de certains médicaments est susceptible de modifier le ressenti thermique [Verheyen, Theys *et al.* 2011]. Selon une étude de Parsons, le handicap physique (comprenant paralysie cérébrale, accident vasculaire cérébral, cécité, paralysie, troubles cardiaques, absence de membres, etc.) n'a pas d'impact significatif sur les niveaux de sensation thermique déclarée [Parsons 2002b]. Toutefois, les variations des réponses ont été particulièrement élevées, dans cette étude, pour des conditions thermiques froides et neutres. Il est donc supposé que les exigences de confort thermique doivent être considérées individuellement ou au moins pour chaque handicap physique [Parsons 2002a; Verheyen, Theys *et al.* 2011].

1.2.3.5. L'influence des facteurs temporels

Des différences intra-individuelles de ressenti thermique ont également pu être mises en évidence. Elles sont globalement liées à des facteurs temporels tels que les rythmes biologiques et

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

à des facteurs liés au contexte. Les différents facteurs temporels seront explicités dans cette partie et les facteurs liés au contexte seront abordés dans la partie suivante.

1.2.3.5.1. Le rythme circadien

D'après Olesen, le rythme circadien (cf. partie 1.1.5.5.1. , page 35) ne semble pas modifier le ressenti thermique déclaré puisque la température préférée est quasi identique toute la journée et la nuit. Les sujets ont juste tendance à préférer un environnement un peu plus chaud après le déjeuner [Olesen 1982]. Mais une autre expérimentation plus récente a mis en évidence que pour les hommes, la température ambiante associée à un début d'inconfort est plus élevée le matin que l'après-midi. Les femmes ont à peu près le même seuil de température d'inconfort toute la journée. L'effet jour-nuit pour les femmes pourrait être masqué par l'effet du cycle menstruel [Shoemaker et Refinetti 1996].

1.2.3.5.2. Le cycle menstruel

Concernant l'impact du cycle menstruel de la femme sur son ressenti thermique, il semblerait que la température préférée des femmes soit plus élevée pendant la phase lutéale (après la phase ovulatoire) que pendant la phase folliculaire [Kim et Tokura 1997]. Il a également été montré que la température associée à un début d'inconfort chaud global diminue entre le début et la fin du cycle alors que la température associée à un début d'inconfort froid ne change pas au cours du cycle menstruel [Shoemaker et Refinetti 1996]. De même, Yasuhara et al. ont montré que les scores d'inconfort au froid (suite à une transition thermique passant de 29,5°C à 23,5°C) ainsi que les sensations thermiques des extrémités ne sont pas différentes suivant la phase menstruelle des femmes [Yasuhara, Iwama *et al.* 2007].

1.2.3.6. L'influence du contexte

1.2.3.6.1. Le climat, les saisons

La température extérieure c'est-à-dire le climat ou la saison sont susceptibles de modifier la sensation thermique déclarée et la température de neutralité thermique. En effet, les expérimentations, qui se déroulent dans des climats chauds ou pendant des saisons chaudes, rapportent des températures de neutralité thermique et de confort plus chaudes [Charles 2003; Frontczak et Wargocki 2011].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2.3.6.2. Le type de bâtiment

Le type de « ventilation » des bâtiments modifient également les exigences thermiques. Dans des pays chauds et pendant la saison chaude, la température de neutralité et de confort est plus élevée dans des bâtiments à ventilation naturelle que dans des bâtiments climatisés. L'inverse est observé dans des pays plus froids comme le Royaume Uni [Frontczak et Wargocki 2011].

1.2.3.6.3. Les interactions sensorielles

Le contexte environnant (autre que thermique) semble avoir un impact non négligeable sur le ressenti thermique. Le mécanisme de perception sensorielle qui consiste à intégrer plusieurs sensations (cf. partie 1.1.6.2.3. page 45) laisse, en effet, à penser que les différentes sensations peuvent interagir et que ces interactions peuvent modifier l'image que l'on se fait de chacune de ces sensations. Ainsi, Candas et Pellerin ont mis en évidence que le plaisir thermique peut être altéré par le bruit dans des environnements chauds [Pellerin et Candas 2003]. Ou encore, Alm a montré qu'une différence de 1°C a le même effet sur la perception thermique qu'une différence de 3,8 dB (au niveau de la pression décibel) ou qu'une différence de 7 decipol (au niveau de la qualité de l'air) [Van Hoof 2008]. D'autre part, Depecker et Achard ont observé qu'un inconfort visuel dû à un éblouissement provoque un inconfort thermique probablement parce que l'éblouissement déclenche un mécanisme d'anticipation de surchauffe [Narçon 2001]. Le confort thermique aurait tendance à être plus élevé lorsque le niveau de la température de couleur est de l'ordre de 5000°K plutôt que de l'ordre de 2700°K [Candas et Dufour 2005]. Rohles a aussi constaté qu'en ajoutant des boiseries, des tapis, du mobilier confortable et des lampes de faibles luminosités dans une chambre climatique, les sujets ont la sensation d'avoir plus chaud alors que les conditions thermiques sont identiques [Van Hoof 2008]. De même, Oseland a observé que, même si les conditions thermiques sont identiques, les volontaires ont plus chaud dans leur maison que dans leur bureau et que dans une chambre climatique [Oseland 1995]. D'autre part, toute information transmise aux volontaires, sur l'environnement, qu'elle soit exacte ou inexacte, semble avoir un impact sur la sensation thermique déclarée [Narçon 2001; Van Hoof 2008].

1.2.3.7. Bilan sur les facteurs d'influence

Concernant l'origine des différences interindividuelles, on constate que les résultats sont divergents. Cette divergence peut être liée à la précision de la sélection du panel. Si le panel n'est pas assez sélectif, les effets de différents facteurs individuels (genre et ethnicité par exemple) peuvent se superposer et masquer l'effet d'un seul facteur. D'autre part, les protocoles et surtout la manière de former les groupes avec des ressentis thermiques distincts sont différents et pas

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

toujours adaptés. Par exemple, les questionnaires sur le ressenti permettent de récupérer un score de sensation thermique ou de confort thermique à partir d'une échelle. Mais cette échelle ne signifie probablement pas exactement la même chose pour tous les volontaires. Un volontaire peut dire d'une ambiance qu'elle est « froide » alors qu'un autre dit qu'elle est « très froide » alors que les deux individus ressentent exactement la même chose intérieurement. L'information récupérée par les questionnaires est relative à chaque individu. C'est surement une des raisons pour laquelle l'analyse du ressenti thermique est extrêmement complexe. D'ailleurs, pour surmonter cette difficulté, beaucoup d'auteurs utilisent la température préférée ou la température associée à la neutralité thermique. Ces deux dernières données peuvent être comparées entre les individus. Mais sont-elles suffisantes pour définir les différences interindividuelles de ressenti global observées au quotidien ? N'y aurait-il pas d'autres moyens de construire des classes d'individus pour évaluer les différences interindividuelles ? Cette question sera traitée dans le chapitre 2 et 3.

Globalement, le genre semble avoir un impact significatif sur le ressenti : les femmes sont plus sensibles aux environnements froids et aux changements de température. L'effet de l'âge est surtout observé dans les environnements chauds. Celui de l'acclimatation physiologique est notable principalement lorsque les individus sont issus de pays avec des climats très différents. Dans tous les cas, l'effet de ces facteurs individuels est beaucoup moins clairement définis pour le ressenti thermique que pour les mécanismes physiologiques de thermorégulation. Est-ce lié aux protocoles des expérimentations ou à l'absence (ou le manque) de lien entre la physiologie humaine et le ressenti thermique ?

Concernant les différences intra-individuelles, il a pu être mis en évidence que le contexte général (climat, saison, type de bâtiment, bruit, etc.) et les rythmes biologiques peuvent avoir un impact sur le ressenti. Il est donc nécessaire de maîtriser tous ces facteurs durant les expérimentations que nous mettrons en place.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3. Les interactions entre la peau et l'environnement thermique

La peau correspond à une enveloppe vivante viscoélastique à la fois résistante et fragile qui constitue l'organe le plus lourd (5 kg avec le sang soit environ 16% du poids total du corps) et le plus étendu de l'organisme (de l'ordre de 2m²). Elle est composée d'une multitude de glandes et de cellules : dans 1 cm² de peau, on ne dénombre pas moins de 10 follicules pileux, 100 glandes sudoripares, jusqu'à 2500 cellules sensorielles, 3 mètres de capillaires sanguins et lymphatiques ainsi que 12 mètres de fibres nerveuses [Mélissopoulos et Levacher 1998; L'Oréal 2011]. Grâce à cette composition très riche et à son importante surface de contact avec l'organisme, la peau participe considérablement aux processus physiologiques et pathologiques. Mais elle délimite aussi le soi du non soi et nous permet de percevoir notre environnement et d'interagir avec lui. D'ailleurs, nous avons déjà montré, dans les parties précédentes de ce manuscrit, l'implication de la peau dans les interactions de l'Homme avec son environnement thermique : à travers la présentation des activités de l'innervation cutanée (cf. partie 1.1.5.3. page 26 et la partie 1.1.6.2.1. page 42), de la microcirculation cutanée (cf. partie 1.1.5.4.1. page 29), des glandes sudoripares (cf. partie 1.1.5.4.3. page 33) et des liens entre les propriétés cutanées thermo-vasculaires / hydriques et le ressenti thermique (cf. partie 1.2.3. page 57).

La peau est le siège de la fonction de thermorégulation et de la fonction sensorielle mais elle est aussi capable d'exercer une multitude d'autres fonctions qui sont étroitement liées telles que la fonction de protection, métabolique, d'échanges, de réparation, *etc.* La perturbation de n'importe quelle fonction peut entrainer une modification des autres fonctions. Il est fort probable que la perturbation des propriétés thermo-vasculaires lors des mécanismes de thermorégulation se répercute sur d'autres propriétés cutanées telles que les propriétés de perméabilité ou autres. Il pourrait donc être intéressant d'identifier des variables cutanées « non thermiques » qui seraient susceptibles d'être influencées par les mécanismes de thermorégulation. Ces variables pourraient nous aider à mieux caractériser les différences interindividuelles de ressenti thermique.

Avant d'identifier ces variables cutanées, la structure et les composants de la peau ainsi que ses différentes fonctions seront présentés dans les parties suivantes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3.1. La structure et les principaux composants de la peau

La peau est composée de trois couches distinctes (l'hypoderme, le derme et l'épiderme) superposées sur 3 mm d'épaisseur, avec, en surface, un film hydrolipidique et une flore cutanée. Elle héberge des annexes épidermiques (glandes sudoripares, glandes sébacées et follicule pileux), un réseau dense de vaisseaux sanguins et lymphatiques, un réseau tout aussi dense de fibres nerveuses, et des cellules immunitaires. Les particularités et les rôles de chacun de ces composants seront détaillés, dans cette partie. Les glandes sudoripares, la vascularisation sanguine ainsi que l'innervation cutanée seront abordées de façon succincte car elles ont déjà été présentées dans différentes parties sur les mécanismes de thermorégulation et de perception (cf. respectivement : partie 1.1.5.4.3. , page 33 ; partie 1.1.5.4.1.2. , page 30 et partie 1.1.6.1. , page 40).

1.3.1.1. Les trois couches principales de la peau

La peau est constituée de trois couches qui ont chacune des caractéristiques bien spécifiques (cf. Figure 1.29) :

- **L'hypoderme**

Il correspond à la couche la plus profonde. Il est composé d'adipocytes qui stockent les graisses et qui constituent des tissus adipeux responsables de la plasticité du tissu cutané et d'une partie de l'isolation thermique. Il sert de passage aux vaisseaux sanguins et aux nerfs destinés au derme.

- **Le derme**

Il correspond à une couche intermédiaire de tissu de soutien fibroélastique. Il peut être divisé en 2 : le derme réticulaire qui a une structure dense en fibres et désordonnée et le derme papillaire qui se trouve à l'interface avec la couche supérieure (l'épiderme) et qui a une structure fibreuse et ordonnée. Il est constitué d'eau à 80%, de fibroblastes qui synthétisent les éléments de la matrice extracellulaire (collagène, élastine, substance fondamentale : eau + sels minéraux + macromolécules, glycoprotéines) et de cellules migratrices de défense (mastocytes, leucocytes et macrophage). Il est richement vascularisé et ses vaisseaux sanguins (capillaires, artères, veines) contiennent deux types d'hémoglobine : la désoxyhémoglobine (Hb) et l'oxyhémoglobine (HbO2). Il possède également des annexes cutanées (canal excréteur des glandes sudoripares, poils et glandes sébacées), des nerfs, des terminaisons nerveuses et des récepteurs sensoriels (corpuscules de Meissner, de Ruffini et de Pacini : Figure 1.12, page 40).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– **L'épiderme**

Il correspond à la couche la plus superficielle d'une épaisseur moyenne d'environ 100 µm (entre 40 µm au niveau de la paupière et 1600 µm au niveau des paumes des mains). Il est composé de [Revuz, Surlève-Bazeille *et al.* 2009] :

- kératinocytes (80 à 90%) qui naissent dans les parties profondes, puis qui se divisent et migrent vers la surface en se transformant progressivement (cf. partie 1.3.1.2.),
- de mélanocytes (<1%), qui synthétisent la mélanine responsable d'une partie de la couleur de la peau et de l'absorption des rayons UV,
- de cellules de Langerhans (2 à 7%) qui initient et propagent les réponses immunes dirigées contre les antigènes appliqués sur la peau,
- de cellules de Merkel qui sont d'origine nerveuse et qui correspondent à des récepteurs sensoriels du toucher.

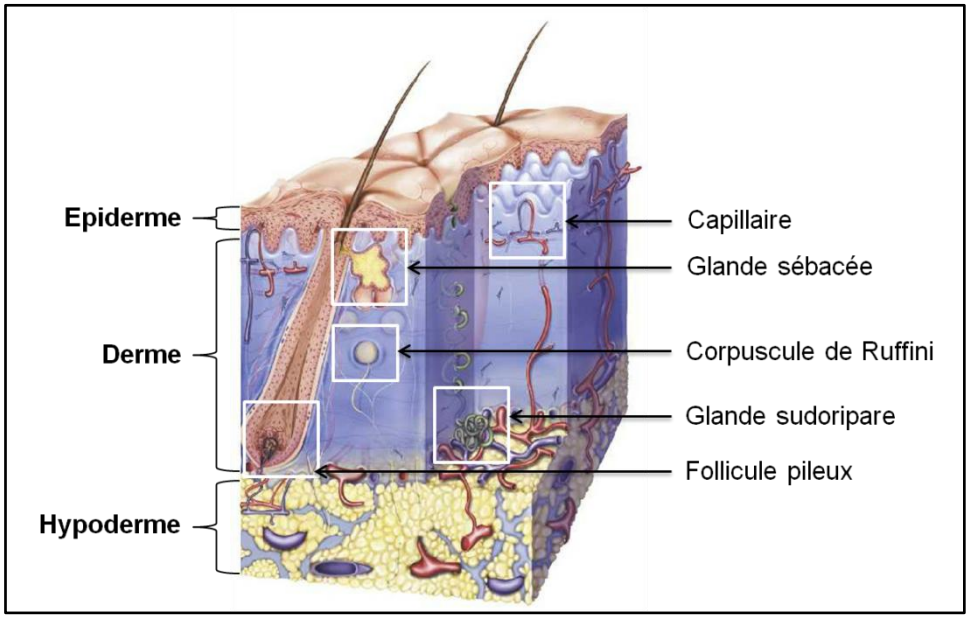


Figure 1.29 : La structure de la peau. (Issue de http://www.skin-science.fr)

Comme l'épiderme est la couche en contact avec le milieu environnant, il est la première cible des mesures cutanées. Il est donc exploré en détail dans la partie suivante.

1.3.1.2. La stratification de l'épiderme

Comme évoqué dans la partie précédente, les kératinocytes se transforment en migrant vers la surface. Cette différenciation peut se diviser en plusieurs étapes ou couches : la couche basale, la couche épineuse, la couche granuleuse et la couche cornée [Moussard 2003] (cf.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure 1.30). Ce processus de renouvellement de l'épiderme est continu et peut durer entre 30 et 45 jours. Il est principalement régulé par le pH, le calcium et la vitamine D.

Les étapes finales (à l'interface entre la couche granuleuse et la couche cornée) de la formation de la couche la plus superficielle, appelée couche cornée ou stratum corneum (SC) sont les suivantes :

- les cellules de la couche granuleuse perdent leur noyau et leurs organites intracellulaires
- le contenu des grains de kératohyaline (qui produisent une protéine : la profilaggrine) de la couche granuleuse est déversé dans le cytoplasme provoquant la formation d'une matrice constituée de macrofibrilles de kératine (grâce à la filaggrine)
- la membrane plasmique des kératinocytes est remplacée par une coque protéique rigide : l'enveloppe cornée
- les desmosomes qui unissent les kératinocytes dans les couches inférieures sont remplacés par des cornéodesmosomes qui assurent la cohésion
- les corps lamellaires (lipides et enzymes) déversent leur contenu par exocytose dans les espaces intercellulaires de la couche cornée pour y former un ciment fait de lamelles lipidiques (cf. Figure 1.30)

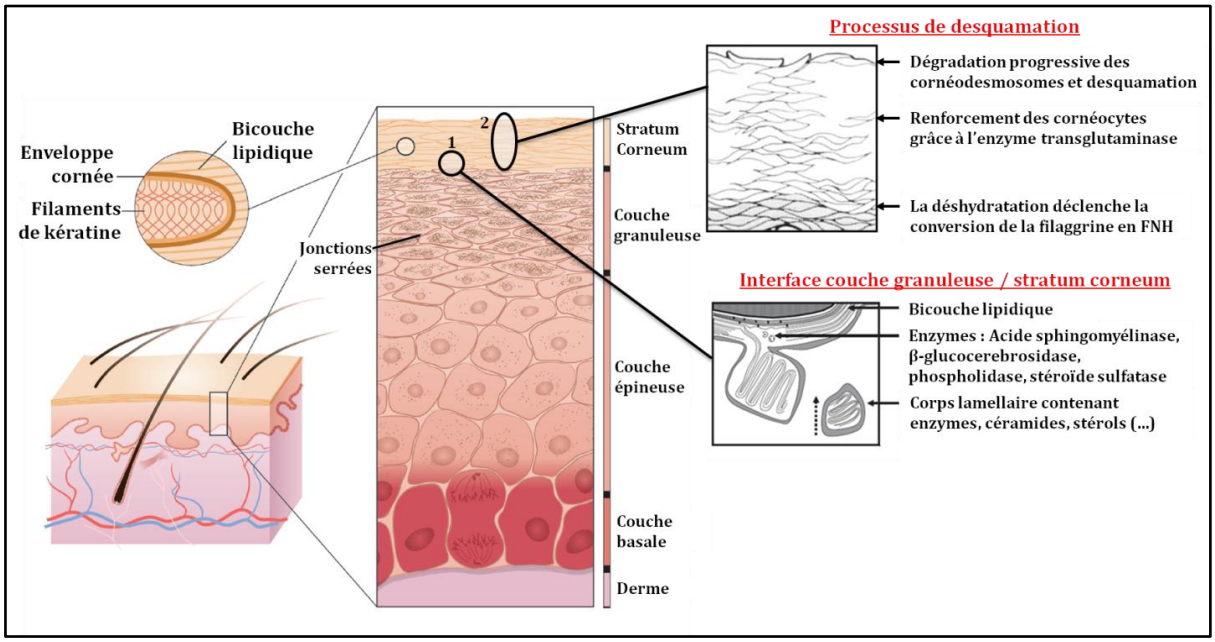


Figure 1.30 : structure de l'épiderme et représentation des principales étapes de différentiation des kératinocytes, de formation du stratum corneum et de la desquamation. Réalisée à partir de : [Rawlings et Matts 2005; Segre 2006; Proksch, Brandner *et al.* 2008]

Cette couche cornée est constituée, suivant la zone anatomique, de 4 à 20 couches de cornéocytes qui correspondent à des cellules mortes (sans noyau ni organite cytoplasmique)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

très aplaties. Cette couche peut être divisée en trois zones [Rawlings, Scott *et al.* 1994; Lafforgue 2008] de la plus profonde à la plus superficielle :

– **Une zone compacte**

Celle-ci est formée de cellules, remplies de kératine (plus spécifiquement de filaggrine) et d'eau, étroitement soudées par des cornéodesmosomes. Elle est souvent assimilée à un simple système à deux compartiments (cf. Figure 1.31) : un mur avec des briques (les cornéocytes), et du ciment (les lipides intercornéocytaires) [Elias 1983]. Mais, contrairement à un mur, elle n'est pas figée : elle est dotée d'une activité métabolique régulée et elle est liée à la partie la plus profonde de la peau.

– **Une zone intermédiaire**

La filaggrine y est protéolysée en acides aminés polaires libres, en acide urocanique (UCA) et en acide pyrrolidone carboxylique (PCA) appartenant au **Facteur Naturel d'Hydratation** (FNH, appelé NMF en anglais pour « Natural Moisturizing Factor ») de la couche cornée (cf. Figure 1.30). A ce niveau, les cornéodesmosomes commencent à être fragilisés et les cornéocytes sont renforcés par une enzyme : la transglutaminase.

– **Une couche desquamante**

A ce stade, les cornéodesmosomes se dégradent par l'action d'enzymes spécifiques. Les cellules perdent, alors, leur cohésion. Leur barrière est affaiblie et elles se détachent en perdant les éléments du FNH (cf. Figure 1.30).

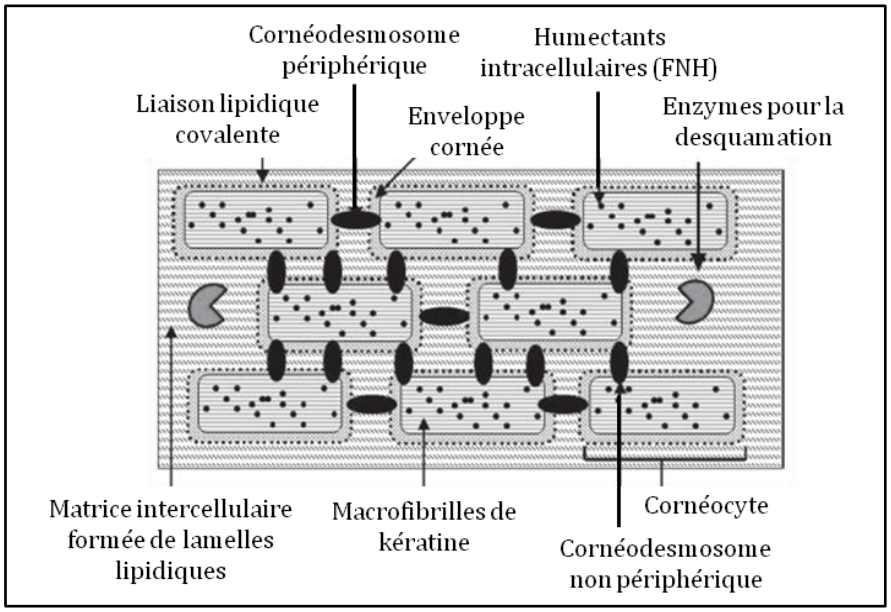


Figure 1.31 : Représentation schématique du modèle « briques et ciment » de l'organisation de la couche cornée. FNH : Facteur Naturel d'Hydratation [Rawlings 2010]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, la couche cornée n'est pas en contact direct avec l'environnement, elle est recouverte par un film cutané constitué essentiellement des produits issus de la kératinisation épidermique (cellules cornées remplies de kératine qui desquament), d'un film hydrolipidique et de micro-organismes constituant la flore cutanée. Les parties suivantes décriront le film hydrolipidique et la flore cutanée.

1.3.1.3. Le film hydrolipidique

Il constitue l'ultime frontière entre l'organisme et l'environnement, puisqu'il recouvre la couche cornée en s'insinuant dans ses espaces intercornéocytaires. Son épaisseur varie entre 0,5 et 4 µm suivant la zone anatomique. Ce film correspond à une émulsion (du type eau dans l'huile) naturelle et « physiologique » composée de deux phases :

- **Une phase aqueuse**

Elle est constituée essentiellement d'eau provenant de l'atmosphère et du derme, de la sueur (hydrophile), de substances dissoutes minérales, telles que du chlorure de sodium, ainsi que des substances organiques telles que des composants du FNH : urée, ammoniaque, acides aminés, acide urique, acide lactique et sucres.

- **Une phase lipidique**

Elle est constituée de sébum (lipophile) sécrété par les glandes sébacées et de lipides élaborés par les cellules épidermiques.

La partie hydrosoluble est responsable, en partie, du pH acide de la peau, compris entre 4,2 et 6,1 suivant la région anatomique [Crickx 2005].

Ce film a essentiellement un rôle de protection [Mélissopoulos et Levacher 1998] :

- les lipides et l'acidité du film préviennent la croissance des germes pathogènes.
- L'acidité du film favorise la dégradation des cornéodesmosomes et la desquamation.
- les éléments du FNH qui ont un fort pouvoir hygroscopique, mais aussi le film lipidique, aident à maintenir l'humidité de la peau en empêchant l'évaporation.

Une détérioration du film hydrolipidique peut engendrer des pathologies cutanées. L'état de ce film peut refléter un type de peau : une peau sèche aura un film hydrolipidique altéré par un manque d'eau ou de lipide, une peau grasse aura un film avec un contenu en sébum trop important [Morel 2001]. La structure de ce film peut également varier en fonction de facteurs génétiques, de l'âge des individus, de l'état physiologique de l'individu et de la zone anatomique [Goetz et Busser 2007].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3.1.4. La flore cutanée

Le stratum corneum est imperméable aux grosses molécules et aux bactéries. Mais au niveau de la couche desquamante du stratum corneum, il y a des espaces vides où des colonies bactériennes peuvent se loger. La partie supérieure du canal des poils constitue un réservoir bactérien privilégié car le mélange de sébum et de débris kératiniques ainsi que la température plus élevée constitue un excellent milieu pour les micro-organismes. Les principaux facteurs favorables à cette flore résidente cutanée sont, en effet, la présence de nutriments (le pH), l'humidité et la chaleur. Même si les bactéries ne doivent pas être présentes en trop grand nombre, la flore est essentielle pour la protection de la peau puisque des bactéries spécifiques sont capables de dégrader les lipides sécrétés par les glandes sébacées en acides gras insaturés qui possèdent une forte activité antimicrobienne vis-à-vis de certaines bactéries et champignons.

1.3.1.5. Les annexes cutanées

Des phanères (poils et ongles) et des organes autonomes correspondant à des glandes exocrines (glandes sudoripares, glandes sébacées) sont annexés à la peau. Les phanères ne seront pas abordés car ils n'ont pas fait l'objet d'une quelconque analyse dans ce travail de thèse. Concernant l'activité des glandes sudoripares et en particulier des glandes eccrines, elle a déjà été décrite dans la partie 1.1.5.4.3. , page 33. Seuls les principaux rôles de ces glandes ainsi que les facteurs influençant leur activité et les glandes sébacées seront exposés dans cette partie.

1.3.1.5.1. Les glandes sudoripares eccrines

Comme il a déjà été évoqué, les glandes sudoripares eccrines ont un rôle majeur dans les mécanismes de thermorégulation et en particulier dans le refroidissement du corps. Mais, la sueur sécrétée par ces glandes joue également d'autres rôles [Mélissopoulos et Levacher 1998; Agache et Candas 1999; Agache 2000f] tels que :

- la conservation d'une hydratation minimale grâce à la présence, dans la sueur, d'eau (à 99%) et de certains éléments du FNH tels que le lactate et l'urée (cf. Tableau 1.7),
- la préservation des propriétés biomécaniques d'extensibilité et d'élasticité du SC, même dans une atmosphère sèche, grâce à la conservation minimale de l'hydratation,
- la stimulation de la desquamation grâce à la présence de lactates dans la sueur,
- la limitation de la prolifération de germes pathogènes grâce au pH acide de la sueur,
- la participation à la défense immunitaire grâce aux immunoglobulines de la sueur,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– la diminution du frottement (meilleure préhension des objets) grâce à l'abaissement de l'énergie de surface et donc à l'augmentation de la mouillabilité de la surface cutanée, *etc.*

Les glandes sudoripares eccrines n'agissent donc pas uniquement sur les propriétés thermiques et hydriques de la peau.

D'autre part, la sudation eccrine peut être déclenchée par d'autres facteurs qu'un environnement thermique particulier, tels que des processus biologiques (hypoglycémie, augmentation du métabolisme basal, fièvre), l'ingestion d'une boisson chez un sujet mal hydraté, ainsi que l'émotion, le stress et la peur (avec une sudation psychique sans élévation de la température cutanée).

Tableau 1.7 : Composition standard de la sueur [Agache et Candas 2000a]

Composants	Quantité	Unité
Na^+	< 40	mM
K^+	4 à 20	mM
Cl^-	< 20	mM
CO_3H^-	15 à 20	mM
Ammoniaque	0,5 à 8	mM
Lactates	10 à 15	mM
Urée	0,15 à 0,25	mg/mL
Glucose	2 à 5	µg/mL
Protéines totales	0,15 à 0,25	mg/mL

1.3.1.5.2. Les glandes sébacées

Les glandes sébacées sont souvent annexées aux poils (cf. Figure 1.32), sauf pour des régions comme les lèvres et les paupières. Elles sont situées dans le derme et elles sont vascularisées mais non innervées. Leur taille et leur densité varient en fonction de leur localisation. Elles sont plus grandes et plus nombreuses au niveau du visage (particulièrement au niveau du front) et de la partie supérieure du dos (~400 à 900/cm²) qu'au niveau des avant-bras (50 à 100/cm²) [Mélissopoulos et Levacher 1998].

Leur produit de sécrétion est une substance lipidique : le sébum. Il est déversé dans le canal excréteur de la glande sébacée puis dans le canal pilo-sébacé. On en trouve sur tout le corps, excepté au niveau des zones palmaires et plantaires. Lorsqu'il arrive en surface, il appartient au film hydrolipidique. Il résulte de la désintégration (c'est-à-dire prolifération de cellules basales suivie d'une différenciation) des cellules sébacées peu avant leur sortie de la glande. La quantité de sébum sur une zone déterminée est à peu près constante pour chaque

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

individu et se reconstitue complètement après ablation. Cette quantité est appelée niveau courant (en anglais : « casual level »). Le sébum est particulièrement abondant sur la tête, le visage (front : ~100 à 200 µg cm^{-2}), le cou, les épaules, le dos et le thorax antérieur alors qu'il est présent en très faible quantité sur des zones telles que les bras (~40 µg cm^{-2}) ou les jambes (~5 µg cm^{-2}). Le sébum rend la peau hydrophile et lui confère des propriétés tribologiques particulières.

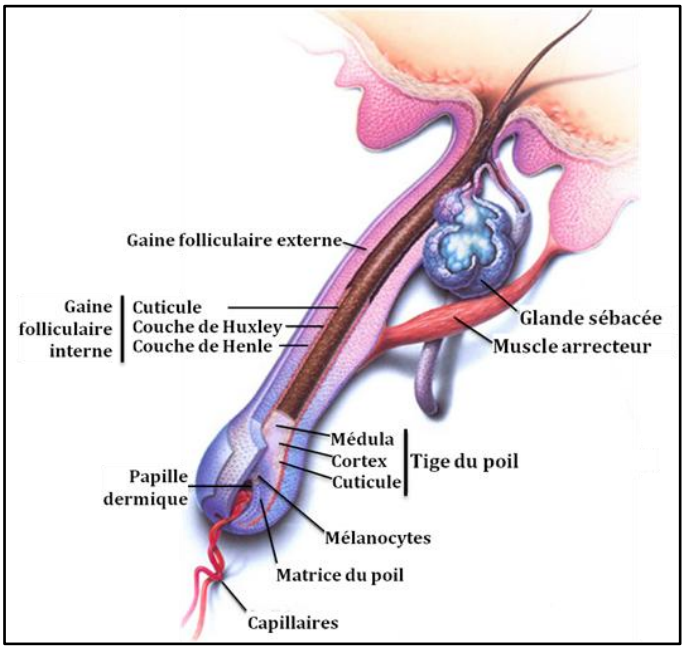


Figure 1.32 : Follicule pilo-sébacé

Différents facteurs influencent la sécrétion et l'excrétion de sébum [Meynadier 1980; Agache 2000f; Bernard et Saint-Léger 2009; Farage, Miller *et al.* 2010] :

– **Les facteurs thermiques**

La température cutanée affectent la viscosité (0,552 poise à 38°C *vs.* 0,998 poise à 26,5°C [Butcher et Coonin 1949; Agache 2000b]) et donc l'écoulement des lipides à la surface de la peau. Une augmentation d'1°C augmente l'excrétion de 10%. La sudation prolongée, souvent reliée à une augmentation de la température cutanée, accroit le débit sébacé.

– **Les facteurs temporels**

L'excrétion sébacée dépend de l'heure dans la journée (diminution de 6 à 7% la nuit puis remontée dans la matinée avec un maximum en milieu de matinée) et de la saison (30% supérieur en début d'été qu'en automne). Ces variations chronobiologiques pourraient être liées, en partie, à des variations des propriétés physico-chimiques du sébum. Le cycle menstruel a également un impact puisque des modifications de la kératinisation et de l'état d'hydratation des cornéocytes surviennent au cours du cycle et se répercutent sur le calibre du

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

petit canal folliculaire ce qui modifie le flux selon la loi de Poiseuille (relation inversement proportionnelle entre le flux et la puissance quatrième du rayon d'un tube) [Revuz, Surlève-Bazeille *et al.* 2009].

- **Les facteurs hormonaux (liés à l'âge et au sexe, par exemple)**

Les androgènes et les hormones ovariennes, thyroïdiennes, hypophysaires (…) ont une influence majeure sur la prolifération des cellules et la sécrétion sébacée et donc sur l'excrétion.

- **Les autres facteurs possibles : aliments, soleil, *etc.***

Le régime alimentaire peut modifier l'excrétion de sébum, le rayonnement UV stimule fortement l'activité sébacée, *etc.*

Les rôles physiologiques du sébum ne sont pas clairement établis. Mais certains de ces rôles ont été mis en évidence [Mélissopoulos et Levacher 1998; Agache 2000f] :

- un détergent naturel puisque le sébum confère à la peau une mouillabilité amphiphile et les acides gras libres peuvent être assimilés au savon et les cires au caractère gras.
- une protection contre une déshydratation excessive dans un environnement à faible HR [Fluhr, Mao-Qiang *et al.* 2003; Choi, Man *et al.* 2005].
- une photo-protection

1.3.1.6. La vascularisation cutanée

Contrairement à l'épiderme qui n'est pas du tout vascularisé, le derme et l'hypoderme sont richement vascularisés par un réseau d'artérioles de moyen et petit calibre, de capillaires et de veinules. L'organisation de la microcirculation sanguine a déjà été décrite en détail dans la partie 1.1.5.4.1.2. page 30. La peau possède également un système lymphatique au niveau du derme et de l'épiderme qui est à sens unique et qui rejoint la circulation sanguine : il prend naissance au niveau du sommet des papilles dermiques et il suit ensuite le trajet du réseau veineux.

Il a bien été précisé que la régulation du débit sanguin est assurée de façon directe par le système nerveux sympathique (dont la stimulation entraine une vasoconstriction) (cf. partie 1.1.5.4.1.3. page 32), mais elle peut également être assurée de façon indirecte par différents stimuli : mécanique (grattage), physique (température) ou chimique (la pression partielle en oxygène, en gaz carbonique ou pH).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Comme on a pu le constater précédemment, le rôle de la microcirculation cutanée dépasse la simple nutrition de l'organe. En effet, elle est fortement impliquée dans la régulation thermique de l'organisme (jusqu'à 80% du débit sanguin peut être utilisé pour le maintien de l'homéothermie) et dans les conditions mécaniques générales (pression, vitesse, etc.) de la circulation sanguine puisqu'elle représente au moins 9% de la masse sanguine.

En ce qui concerne, le système lymphatique, il a deux rôles principaux :

- le maintien de l'homéostasie

Il assure le retour des liquides, protéines et molécules en excès qui, ayant quitté les capillaires sanguins vers le tissu interstitiel, regagnent ainsi la circulation sanguine.

- une fonction immunitaire

Il transporte des antigènes vers les ganglions lymphatiques [Agache 2000f].

1.3.1.7. L'innervation cutanée

Le réseau nerveux cutané est particulièrement dense puisqu'un centimètre carré de peau contient environ 12 nerfs. Les trois couches de la peau (hypoderme, derme et épiderme) excepté la couche cornée sont innervées. La Figure 1.12, page 40, montre bien que l'innervation cutanée est double :

- **la partie autonome**, évoquée dans la partie 1.1.5.3. page 26, a un rôle crucial dans la thermorégulation et le contrôle de l'inflammation.
- **la partie sensitive**, évoquée dans la partie 1.1.6.1. page 40, a un rôle fondamental dans la fonction sensorielle c'est-à-dire dans l'information du système nerveux sur le toucher, la pression, la vibration, la tension de la peau, la température de la peau, la douleur, *etc.*

Les fibres nerveuses ont un rôle essentiel dans le système nerveux mais d'autres éléments sont également fortement impliqués dans la communication des neurones entre eux : les neuromédiateurs. Récemment, il a été montré que les neuromédiateurs n'étaient pas uniquement synthétisés par les fibres nerveuses mais aussi par de nombreuses cellules de la peau et les cellules épidermiques possèderaient aussi des récepteurs pour les neuromédiateurs [Misery 2000; Boulais et Misery 2008]. Ainsi, les neuromédiateurs peuvent avoir une influence directe sur les activités des cellules cutanées et inversement. Il existe, donc, un lien particulièrement étroit entre le psychisme, le système nerveux et la peau. Ce lien nous conforte dans notre intérêt de relier le confort à des mesures cutanées. Car, tout comme pour

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

le confort, les propriétés de la peau sont liées à la fois aux stimuli extérieurs mais aussi à l'individu composé de son psychisme.

1.3.2. L'eau, un élément essentiel de la peau

Comme dans tout organisme vivant, l'eau est indispensable au corps humain (~70%) et elle fait partie intégrante de la peau (constituée à 70% d'eau, soit environ 8L pour un adulte). D'ailleurs, comme on a déjà pu le constater au cours des parties précédentes, l'hydratation est assurée par différents composants et de différentes façons. Même au niveau du SC où elle est présente en faible quantité, elle a un rôle majeur puisqu'elle assure la conservation de la souplesse, de l'extensibilité et de la résistance du SC grâce à la plastification de la kératine et grâce à sa participation au bon fonctionnement des enzymes intervenant dans de multiples mécanismes cutanés. Cette partie permettra donc d'expliciter la répartition et les états de l'eau dans la peau, les moyens de rétention et les notions en lien avec la perte ou le contenu en eau au niveau de la couche cornée.

1.3.2.1. La répartition de l'eau et ses différents états

Cette eau est répartit de façon inhomogène dans les différentes couches de la peau [Agache 2000f; Estrade 2006; Fluhr et Darlenski 2009] :

- Hypoderme : 20%
- Derme : 80%
- Couches profondes de l'épiderme (sous la couche granuleuse) : 70%
- Interface couche granuleuse / stratum corneum : 40%
- Stratum corneum : 15 à 25% d'eau, 20% à 30% jusqu'à vers la moitié de son épaisseur puis 5 à 10% près de la surface.

La majorité de l'eau dermique est liée à des macromolécules protéiques. Cependant, une autre partie (responsable de l'hydratation) est libre et atteint, par migration épidermique, l'épiderme (grâce à un gradient de concentration). La couche basale de l'épiderme est alors imbibée d'eau. Mais, au cours de la différentiation, la teneur en eau diminue. Au niveau du stratum corneum, l'eau est présente sous plusieurs états suivant sa force de liaison avec la kératine [Berardesca et EEMCO 1997; Agache 2003; Lévêque 2005]:

- **dans les couches les plus profondes, l'eau est fortement liée** (0 à 7% du contenu)

Elle se trouve à l'intérieur des cornéocytes et elle n'est pas congelable.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- **dans les couches moyennes, l'eau est « moyennement liée »** (~ 7 à 35%)

Elle est retenue à l'intérieur des cornéocytes par les éléments du FNH (cf. Tableau 1.8) grâce à leurs pouvoirs hygroscopiques et au phénomène d'osmose. Contrairement à l'eau, les éléments à pouvoir osmotique, tels que les composants du FNH, ne peuvent pas traverser la couche cornée semi-perméable.

- **dans les espaces intercellulaires, l'eau est libre** (plus de 35%)

Elle provient des cornéocytes ou directement de l'épiderme. Elle est congelable et de nombreuses molécules ionisées ou non y sont dissoutes.

1.3.2.2. Les moyens de rétention de l'eau dans le stratum corneum

Afin d'assurer ses fonctions, le SC retient une quantité constante d'eau dans ses cornéocytes (20%) et dans ses espaces intercellulaires (10%) [Gonçalo 2000]. Cette rétention peut se faire principalement grâce au facteur naturel d'hydratation (FNH), à l'enveloppe cornée et à la structure lipidique de la matrice extracellulaire du SC.

1.3.2.2.1. Les éléments du facteur naturel d'hydratation (FNH)

Les composants hygroscopiques **issus de la protéolyse de la filaggrine** et appartenant au facteur naturel d'hydratation (FNH) jouent un rôle majeur dans le maintien de l'eau à l'intérieur des cornéocytes. Ces composants regroupent des acides aminés libres (AAL), l'acide urocanique (UCA) et l'acide pyrrolidone carboxylique (PCA). Ils apparaissent dans les couches profondes du SC et sont présents en forte concentration dans les couches moyennes du SC (cf. Figure 1.33).

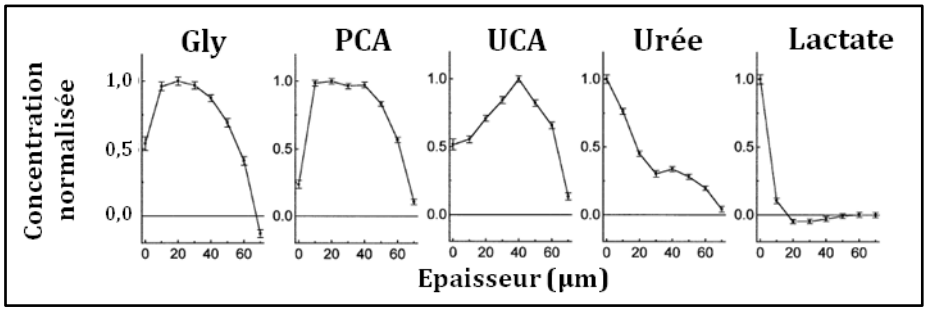


Figure 1.33 : Profils de concentration de différents composants du FNH en fonction de la profondeur du SC de l'éminence thénar (épaisseur ~100µm). La glycine (Gly), l'acide pyrrolidone carboxylique (PCA) et l'acide urocanique (UCA) apparaissent dans les couches profondes du SC et leurs concentrations augmentent entre 70 et 40 µm probablement lors de la protéolyse de la filaggrine. Mais, le lactate apparaît dans les couches superficielles du SC où l'urée est présente en forte concentration, probablement à cause de la sécrétion de la sueur [Caspers, Lucassen *et al.* 2001].

Le PCA est particulièrement connu pour agir comme humectant afin de permettre à la peau de rester hydratée, même dans un environnement sec [Laden et Spitzer 1966]. L'UCA est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

davantage connu pour son pouvoir photoprotecteur [Rawlings, Scott *et al.* 1994] et les AALs pour leur rôle dans le maintien du pH acide de la couche cornée [Coudane 2009].

Le FNH est composé par d'autres éléments qui interviennent également dans l'hydratation de la peau mais qui sont **extracellulaires**. Ils ne proviennent pas du cornéocyte mais plutôt de la sécrétion sébacée et/ou sudoripare et de l'épiderme (par le processus de différenciation). Ce sont, par exemple, le lactate, l'urée, le sodium, le potassium, etc. Ils sont présents davantage à la surface de la peau (cf. Figure 1.33) et ils appartiennent au film hydrolipidique (cf. partie 1.3.1.3. page 77). Nagakawa *et al.* expliquent, dans leur article, que le lactate (issu de la sueur mais peut-être aussi des glandes sébacées et du phénomène de différenciation) et le potassium maintiennent les propriétés physiques du SC (hydratation, pH, rigidité) [Nakagawa, Sakai *et al.* 2004]. Sugawara *et al.* confortent ce résultat. Ils montrent que le PCA, l'urée, le lactate, le sodium et le potassium sont en quantité plus faible dans les peaux sèches [Sugawara, Kikuchi *et al.* 2012].

Tableau 1.8 : Composition du Facteur Naturel d'Hydratation (FNH) [McCallion et Li Wan Po 1993]

Composants	Pourcentage (%)
Acides aminés libres	40
Acide Pyrrolidone Carboxylique (PCA)	12
Lactates	12
Urée	7
Minéraux	18
Autres : sucres, acides organiques, titrates, peptides, etc.	11

La présence du FNH n'est pas suffisante au maintien de l'hydratation du SC. L'intégrité de l'enveloppe cutanée et surtout de la matrice lipidique intercellulaire est indispensable à la conservation de l'eau.

1.3.2.2.2. L'enveloppe cornée

L'enveloppe cornée présente deux structures particulières (cf. Figure 1.34) qui lui permettent de maintenir l'eau reliée aux éléments du FNH dans les cornéocytes :

- **Une structure intracellulaire protéique** rigide et insoluble qui permet de séquestrer les macrofibrilles de kératine à l'intérieur des cornéocytes.
- **Une structure lipidique extracellulaire** constituée d'une monocouche de céramides qui sert d'ancrage aux lipides intercellulaires qui constituent une véritable barrière occlusive.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

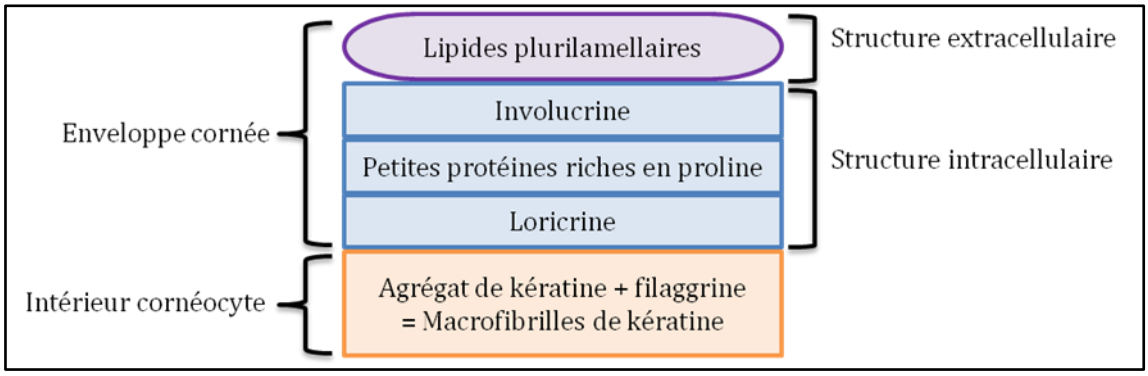


Figure 1.34 : Les composants de l'enveloppe cornée qui constitue une barrière aux fluides. Réalisé à partir des informations de [Kierszenbaum, Validire-Charpy *et al.* 2006]

L'autre élément essentiel est la matrice lipidique intercellulaire.

1.3.2.2.3. La matrice lipidique intercellulaire

La structure lipidique de la matrice extracellulaire de la couche cornée joue un rôle clé dans le maintien de l'eau dans le SC [Moussard 2003]. Les lipides majoritaires du SC sont les céramides (45 – 50%), le cholestérol (25%) et les acides gras libres (15%). Un dérèglement dans la proportion de ces 3 familles de lipides entraine une modification de l'efficacité de la barrière hydrique que constitue la matrice lipidique. D'autres lipides sécrétés par les glandes sébacées sont également présents surtout dans les couches superficielles du SC.

L'organisation des lipides est un élément majeur dans la perméabilité du SC [Potts et Francoeur 1991]. La matrice extracellulaire est organisée en bicouches lamellaires qui alternent des zones hydrophiles et des zones lipidiques hydrophobes (cf. Figure 1.35 page 87). Les lipides y jouent plusieurs rôles. Ils assurent l'étanchéité relative à l'eau de par leurs qualités hydrophobes et ils contribuent à la cohésion des différentes couches et des membranes lipidiques des cornéocytes grâce à des céramides spécifiques à chaînes longues qui réalisent de véritables rivetages moléculaires en s'ancrant dans les couches lipidiques voisines [Haftek 2003].

Cette structure intercellulaire permet de former un treillis qui limite la perte en eau (cf. Figure 1.35) et de maintenir une « hydratation » optimale.

La rétention de l'eau par la couche cornée est considérable puisque sans celle-ci, la perte en eau serait de l'ordre de 8,5 L par jour au lieu de 0,5 L par jour [Estrade 2006].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3.2.3. La perte insensible en eau

La perte quotidienne en eau de 0,5 L comprend l'eau perdue par évaporation transcutanée et celle perdue lors de la respiration. En effet, la peau n'est pas une barrière absolue, l'eau peut traverser la peau de l'intérieur du corps vers l'extérieur :

– soit par **diffusion active**

L'eau diffuse grâce aux canaux excréteurs des glandes cutanées telles que les glandes sudoripares. Même lorsque ces glandes ne sont pas en activité intense, de l'eau peut s'en échapper.

– soit par **diffusion passive** à travers le SC (flux passif de l'eau condensée)

Cette diffusion est décrite par la première loi de Fick. Elle peut avoir lieu grâce à l'existence d'un gradient de pression de vapeur d'eau de chaque côté de l'épiderme [Gabard et Treffel 2000]. Le passage de l'eau se fait principalement dans les espaces intercellulaires et pas dans les cellules. Cette perte en eau est appelée « Perte Insensible en Eau » (PIE) ou « transepidermal water loss » en anglais. Elle équivaut à une perte d'environ 300 à 400 mL par jour dans des conditions normales. Cependant, elle varie suivant les zones anatomiques. Par exemple, elle est de l'ordre de 20,1 ± 4,8 g m^{-2} h^{-1}sur le front et de 10,4 ± 3,1 g m^{-2} h^{-1} sur la face interne de l'avant-bras [Agache 2000f].

La Figure 1.35 illustre les voies d'absorption de l'eau ou d'autres substances.

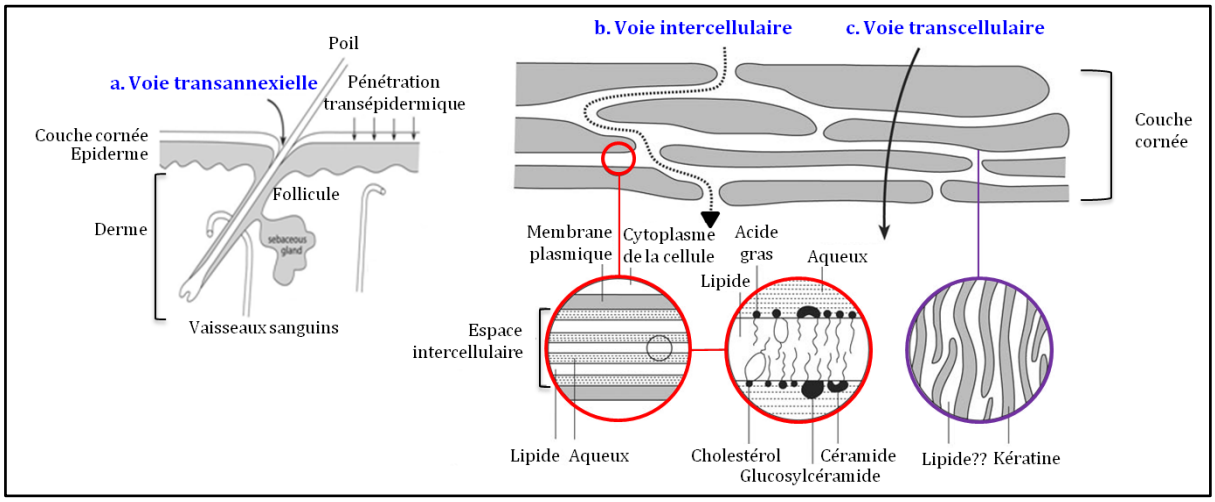


Figure 1.35 : Les trois voies d'absorption percutanée. Elles sont similaires aux voies d'élimination mais inversées. La voie transannexielle ne représente qu'une faible partie de l'absorption percutanée puisque les annexes cutanées représentent 0,1 à 1% de la surface cutanée. La voie intercellulaire au niveau des lipides intercellulaires est davantage empruntée, mais certains composants sont capables de pénétrer les cornéocytes et d'utiliser la voie transcellulaire [Schaefer, Redelmeier et al. 2011]

Ces voies sont similaires mais inverses aux voies d'élimination de l'eau. La voie transannexielle correspond à la diffusion active et les voies intercellulaires et intracellulaires à

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

la diffusion passive. Il a été constaté que la couverture hydrophobe formée sur l'enveloppe des cornéocytes par les céramides ainsi que la présence des cornéodesmosomes forcent l'eau ou d'autres substances à emprunter une voie tortueuse d'une longueur d'environ 880 µm soit 40 à 80 fois l'épaisseur du SC. Ainsi, la perte en eau, tout comme l'absorption de substances, est limitée [Madison 2003; Rawlings et Matts 2005].

1.3.2.4. La notion d'hydratation

Dès que la variation du contenu en eau du SC est étudiée, la notion d'hydratation est souvent évoquée. Or, celle-ci n'est pas uniquement associée à une teneur en eau. Elle est en lien avec l'intégrité et la cohésion de la couche cornée, avec des troubles de la différenciation ainsi qu'avec une qualité mécanique et esthétique de la peau. Elle est associée, à la fois, à un phénomène physique et à un phénomène psychosensoriel. Une peau hydratée est perçue comme lumineuse, agréable et douce au toucher [Estrade 2006]. Une peau avec une forte teneur en eau ne sera pas systématiquement considérée comme hydratée. Ce terme d'hydratation sera donc utilisé avec beaucoup de précaution. Les termes « de teneur en eau » ou « de contenu en eau » seront souvent privilégiés lorsque la mesure réalisée est uniquement associée à une quantité d'eau. D'ailleurs, Barel signale qu'il est dangereux de se baser uniquement sur une seule technique de mesure de contenu en eau pour évaluer ce qu'on appelle « l'hydratation de la peau » [Barel 2003]. Plusieurs mesures complémentaires sont nécessaires pour prendre en compte les différentes facettes de l'hydratation.

1.3.3. Les fonctions de la peau

La peau possède des couches avec une ultrastructure et des composants particuliers qui lui confèrent des propriétés spécifiques et qui lui permettent d'exercer un grand nombre de fonctions parfois très complexes. Elle constitue une véritable « forteresse » [Humbert 2009] dont la principale mission est de protéger l'organisme contre les facteurs externes de contraintes physiques, chimiques et environnementales et contre la perte d'ions essentiels, d'eau et de protéines sériques (liées à l'inflammation, au transport d'hormones). Elle correspond à la fois, à :

- **une barrière mécanique contre les chocs et les cisaillements**

La solidité et la résistance de la couche cornée sont assurées par la kératine du SC, l'élasticité et l'extensibilité du derme par les fibres élastiques, les fibres de collagènes et l'eau. La protection contre les chocs et les pressions est assurée par le coussin graisseux de l’hypoderme.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- **une barrière chimique antibactérienne et immunitaire**

Elle est assurée par la kératine de la couche cornée, par l'acidité du film hydrolipidique, par les cellules de Langherans qui communiquent avec le système immunitaire et par le derme qui est capable de mettre en place une réponse inflammatoire

- **une barrière hydrique contre la pénétration de substance exogène et la dessiccation**

Elle est fonction du degré de perméabilité du SC qui dépend de l'arrangement des lipides intercellulaires, de l'ordonnancement des cornéocytes et de la présence des composants du FNH. Elle est souvent associée à ce qu'on appelle la « fonction barrière ».

- **une barrière photoprotectrice, surtout contre les UVB et les UVA**

Elle est assurée grâce à l'épaississement de la couche cornée, par la kératine qui limite les pénétrations des rayons, par l'acide urocanique du film hydrolipidique qui absorbe les UVB, par la mélanine qui réfléchit, disperse et absorbe les UV.

- **une barrière thermique**

Elle est associée à la fonction de thermorégulation. Elle est assurée par la régulation du débit sanguin, la sudation, la contraction des muscles des poils, et par le pannicule adipeux de l'hypoderme qui réduit la déperdition thermique du sang profond. L'implication de la couche cornée n'est pas clairement définie mais les kératinocytes semblent exprimer des canaux cationiques TRP responsables de la détection de chaud et de froid et qui pourraient donc jouer un rôle dans la régulation thermique.

En plus de sa fonction de protection et de défense, la peau assure une **fonction métabolique** (production de vitamine D à partir du cholestérol dans la peau et libération d'acides gras et de glycérol à partir de triglycérides) et **sensorielle** (grâce à l'innervation cutanée). Elle présente également une **capacité d'auto-réparation** qui lui permet de maintenir son intégrité pour faire face à tous ses rôles. Cette capacité comprend :

- la **fonction de réparation** de la couche cornée (cf. Figure 1.36) qui correspond au renouvellement programmé de l'intégrité (résistance à la dissociation des cornéocytes), de la cohésion (liée aux cornéodesmosomes) et de la desquamation du SC,
- et la **fonction de cicatrisation** correspondant au pouvoir de régénération du derme et de l'épiderme [Coudane 2009].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

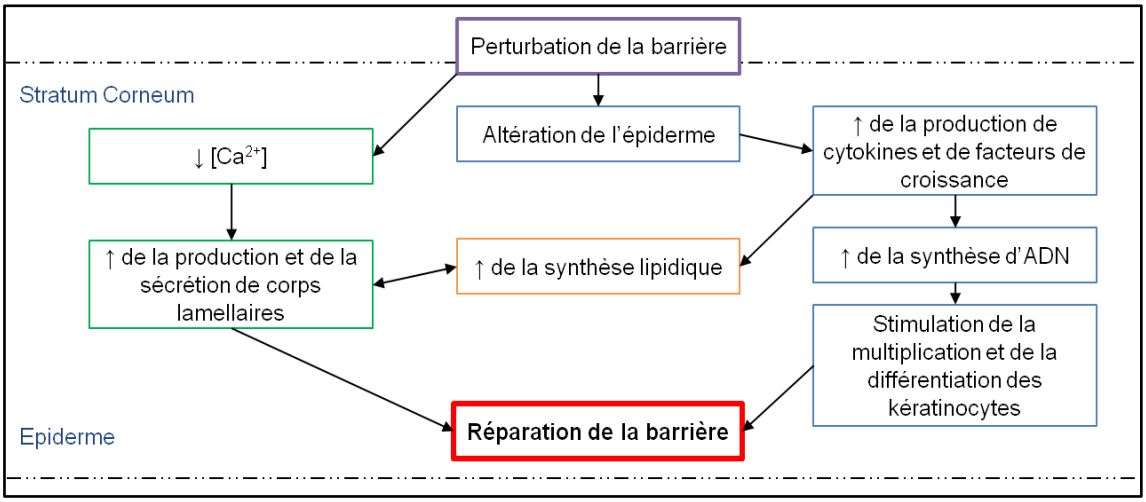


Figure 1.36 : Les différents mécanismes de restauration de la barrière cutanée. ↑ : augmentation, ↓ : diminution. Réalisé à partir de [Elias, Feingold *et al.* 2003]

Malgré la faible épaisseur du SC, il est impliqué dans les fonctions de la peau (cf. Tableau 1.9).

Tableau 1.9 : Les principales fonctions du stratum corneum [Elias 2005]

Mécanismes de défense	Localisation
Barrière mécanique (résistance aux chocs et aux déformations)	Cornéocyte
Barrière antimicrobienne (immunité naturelle) *	Extracellulaire
Exclusion des produits chimiques toxiques et des antigènes	Extracellulaire
Initiation de l'inflammation (activation de la cytokine) *	Cornéocyte
Barrière contre les UV	Cornéocyte
Barrière de perméabilité *	Extracellulaire
Absorption sélective de produits chimiques	Extracellulaire
Hydratation	Cornéocyte
Cohésion / intégrité → desquamation *	Extracellulaire
Interface psychosensorielle	Inconnue
Barrière thermique	Inconnue

** : Activé ou soupçonné d'être activé par le pH du stratum corneum*

Certaines fonctions sont « colocalisées » (cf. Figure 1.37). Par exemple, la fonction de perméabilité est assurée par le caractère hydrophobe, l'organisation supra moléculaire et la distribution des lipides intercellulaires, tout comme la fonction anti-microbienne est assurée par trois de ces lipides intercellulaires [Elias 2005]. Les fonctions de la barrière cutanée n'agissent donc pas indépendamment les unes des autres [Lee, Jeong *et al.* 2006; Fluhr et Darlenski 2009]. Des interactions biochimiques et moléculaires ainsi que des mécanismes communs de régulation les lient entre elles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

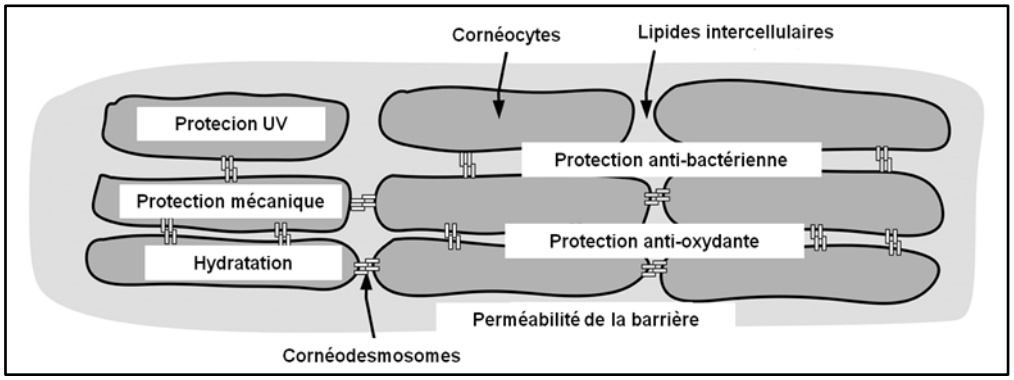


Figure 1.37 : Les fonctions de protection exercées par le stratum corneum [Lee, Jeong *et al.* 2006]

Finalement, ceci signifie que lors d'un stress thermique environnemental, non seulement la barrière thermique cutanée est perturbée et les mécanismes de thermorégulation sont déclenchés mais d'autres fonctions de la barrière cutanée telle que la fonction barrière sont susceptibles d'être modifiées ou impliquées dans le maintien de l'homéostasie. Il est donc fort probable que des propriétés non thermiques et non vasculaires changent au cours d'une sollicitation thermique.

1.3.4. L'impact de la température ambiante sur les propriétés cutanées

Les études psychophysiologiques mentionnées dans la partie 1.2.2. mettent en évidence que les changements de température ambiante déclenchent les mécanismes de thermorégulation qui modifient directement certaines propriétés cutanées telles que :

- les propriétés thermiques : température de peau locale et moyenne, *etc. ;*
- les propriétés vasculaires : débit sanguin ;
- les propriétés hydriques : perte en eau (taux de sudation), mouillure cutanée.

Cependant, peu d'études traitent de l'effet de la variation de la température ambiante sur les autres propriétés cutanées. Pourtant, du fait de l'interrelation entre les fonctions cutanées, il est fort probable qu'une perturbation de la barrière thermique se répercute sur les autres fonctions de la barrière cutanée et modifie des propriétés de la peau qui ne sont pas directement liées aux mécanismes de thermorégulation.

La Figure 1.38 regroupe les différentes propriétés qui sont affectées ou qui seraient susceptibles d'être affectées par un changement de température ambiante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

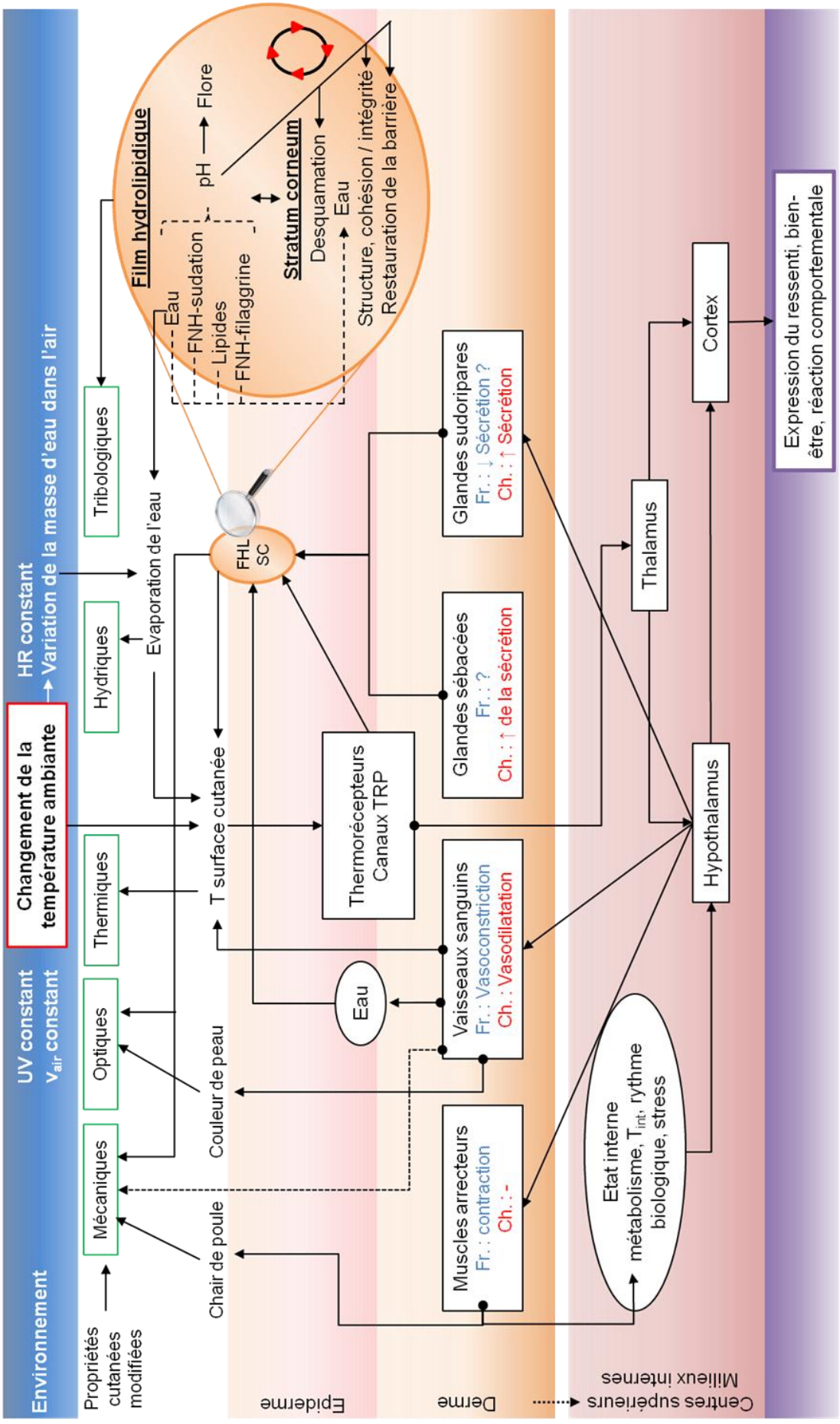


Figure 1.38 : Schéma regroupant les propriétés cutanées modifiées ou susceptibles d'être modifiées par un changement de température ambiante. Les flèches en pointillés représentant des hypothèses. Se reporter au texte pour plus d'informations et au glossaire pour les abréviations. Fr. : au froid, Ch. : au chaud

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Lors d'un changement de température ambiante, la variation du taux de sudation et la variation de la sécrétion sébacée (augmentation d'1°C augmente l'excrétion de 10%) sont susceptibles de faire varier la **composition du film hydrolipidique** :

- la quantité d'**eau** à la surface de la peau ;
- la quantité et la proportion des **lipides** en surface (issus majoritairement du sébum) ;
- la quantité et la proportion des **éléments du FNH** (issus des glandes sudoripares et des glandes sébacées) tels que le lactate, l'urée, *etc.*

Toutes ces modifications de la composition chimique de la couche superficielle sont susceptibles de se répercuter sur le **pH** de la surface cutanée. Or, il a été montré que le pH régule plusieurs fonctions ou mécanismes cutanés (cf. Tableau 1.9) :

- la fonction antimicrobienne ;
- la desquamation des cornéocytes ;
- l'intégrité (associée à la capacité à résister à la dissociation de cornéocytes adjacents) et la cohésion de la couche cornée (dépendant fortement des cornéodesmosomes et associée à la quantité de protéine retirée lors d'une perturbation mécanique) ;
- la restauration de la barrière épidermique : elle est retardée à pH neutre en raison d'une perturbation du processus de traitement des lipides extracellulaires de la couche cornée ;
- la fonction de perméabilité puisqu'un accroissement prolongé du pH augmente la perte insensible en eau [Fluhr 2009].

Cependant, la variation du pH engendrée par un changement de température ambiante est-elle significative et suffisante pour entrainer des modifications des propriétés cutanées en lien avec les fonctions mentionnées juste au-dessus ?

Même sans prendre en compte la variation de pH, de nombreuses études ont déjà démontré que la **perte en eau** (pas forcément toujours « insensible » à cause de la présence probable de la sudation) a tendance à augmenter avec la température de peau [Grice, Sattar *et al.* 1971; Mathias, Wilson *et al.* 1981; Cravello et Ferri 2008]. La **perméabilité de la barrière** cutanée semble donc perturbée par les changements de température ambiante. Mais, la variation de la perte en eau (par évaporation) est-elle associée à la variation du contenu en eau du film hydrolipidique (et en particulier au taux de sudation), à une altération de la fonction barrière (au niveau de l'enveloppe cornée, des lipides intercellulaires, du FNH), à un changement de la masse d'eau dans l'air (l'humidité relative est constante mais la masse d'eau

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

dans l'air peut changer ce qui serait susceptible de modifier le flux passif de l'eau dans la peau qui dépend de la différence de concentration d'eau dans la peau et à l'extérieur), au débit sanguin dans les capillaires [Thiele et van Senden 1966] (la perméabilité des capillaires varie avec l'activité vasomotrice) ?

D'autre part, la modification de la composition lipidique de la surface du SC peut se répercuter sur la perméabilité et les propriétés hydriques de la peau.

Si la barrière cutanée est modifiée par la température ambiante, il est possible que la quantité des éléments du FNH issus de la protéolyse de la filaggrine ainsi que la quantité des différents lipides épidermiques varient. Ceci se répercuterait alors sur l'hydratation de la peau. Toutefois, ces modifications peuvent-elles survenir seulement 30 minutes après une transition thermique dans des environnements dont la température est relativement modérée (17°C à 30°C) ?

Une modification de l'hydratation de la peau pourrait, à son tour, modifier la capacité de la peau à transférer de la chaleur ainsi que l'activité microcirculatoire cutanée [McLellan, Petrofsky *et al.* 2009].

D'autre part, il est probable que les modifications du film hydrolipidique et les changements potentiels de la fonction barrière se répercutent sur les propriétés **mécaniques** de la peau. En effet, Lévêque et De Rigal ont montré que la peau est plus extensible en présence d'eau sur la surface [Tran 2007]. Les propriétés **tribologiques** sont également susceptibles de changer puisque la sueur abaisse l'énergie de surface et donc le frottement et que l'hydratation augmente le coefficient de frottement [Sivamani, Goodman *et al.* 2003].

Un changement de température ambiante engendre aussi une activation différente des **canaux cationiques TRPV** responsables de la sensation de la température et impliqués parfois dans certains mécanismes cutanés. Par exemple, les TRPV1 sont activés par des températures supérieures à 43°C et ils auraient tendance à retarder la restauration de la barrière épidermique alors que les TRPV4 sont activés par des températures supérieures à 35°C et ils accélèrent la restauration de la barrière épidermique [Denda 2009]. Ces canaux TRPV peuvent également être activés par d'autres facteurs tels que le pH acide (inférieur à 6,6) pour les canaux TRPV1 ou la pression osmotique pour les canaux TRPV4. Ils sont parfois exprimés par les kératinocytes (cf. partie 1.1.6.2.1. , page 42). Il peut donc être supposé qu'une modification de l'état de la peau (hydratation, perméabilité, pH, *etc.*), causée par un changement de température, se répercute sur l'activation des canaux TRPV et par là

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

même sur les fonctions cutanées qui sont liées à l'activation de ces canaux. Mais cet impact hypothétique nécessite probablement un temps long d'exposition.

Le changement dans la vasomotricité lié à un changement de température ambiante peut avoir un effet sur les propriétés **optiques** de la peau. En effet, la concentration volumique de l'un des principaux chromophores de la peau (l'hémoglobine) change en fonction de l'activité vasomotrice. La couleur de peau est donc susceptible de changer en fonction de la température ambiante. Des rougeurs apparaissent lors d'une vasodilatation.

Une vasoconstriction prolongée peut également induire une diminution de l'oxygène cutané et une augmentation de la production des radicaux libres (molécules instables) qui sont susceptibles d'engendrer une sécheresse cutanée, une diminution de la kératinisation et parfois même des gelures et des nécroses lorsque l'exposition est prolongée et que les températures ambiantes sont extrêmes.

Cette première réflexion nous a permis d'identifier un certain nombre de paramètres cutanés susceptibles de varier avec la température ambiante et potentiellement avec le ressenti déclaré. Mais il n'est pas envisageable d'explorer tous ces paramètres. Un choix s'impose.

1.3.5. Deuxième sélection des paramètres cutanés à mesurer

Dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à l'impact à court terme (<1 heure) de la température ambiante sur la peau. Les variables cutanées susceptibles de varier **rapidement** avec un changement de température ambiante ont donc été privilégiées.

La température cutanée et le taux de sudation (dans un environnement chaud) sont connus pour changer rapidement, après un changement de température ambiante. Or, ces deux modifications physiologiques se répercutent directement sur **les propriétés du film hydrolipidique** (cf. Figure 1.38). Il a donc été choisi d'explorer les particularités de ce film cutané, c'est-à-dire : le contenu en eau, en sébum, en lactate, en autres éléments du FNH ainsi que l'acidité du film. De plus, l'état de ce film peut se répercuter sur la fonction barrière de la couche cornée. Des variables en lien avec cette fonction telles que la perte en eau, l'intégrité, la cohésion et la capacité de récupération de la couche cornée seront analysées dans différents environnements thermiques. D'autre part, le flux sanguin change également rapidement avec un changement de température ambiante et ce changement se répercute directement sur la couleur de peau qui sera également mesurée. Le Tableau 1.10 regroupe les variables cutanées qui ont été choisies lors de cette étape de sélection (la première étape est exposée page 64).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 1.10 : Deuxième sélection des variables cutanées à mesurer

Propriétés	Variables	N° de chapitre
Vasculaire	Couleur de peau	2, 3
Hydrique/Perméabilité	Perte évaporatoire	2, 3
Hydrique	Quantité d'eau à la surface	2, 3
Chimique/lipidique	Quantité de sébum à la surface	2, 3
Chimique/Hydrique	Quantité des éléments du FNH : Lactate, AAL, UCA, PCA	3
Chimique	pH cutané	2
Barrière	Intégrité du SC	3
Barrière	Cohésion du SC	3
Barrière/Renouvellement	Capacité de récupération de la barrière cutanée	3

Les expérimentations permettront de vérifier que ces variables cutanées varient bien avec la température ambiante sur du court terme (après 30 minutes dans un environnement thermique donné). Mais, surtout elles permettront de déterminer si ces variables sont liées au ressenti thermique et si elles peuvent expliquer, en partie, les différences interindividuelles de jugement thermosensoriel.

1.3.6. L'influence de facteurs non thermiques sur les propriétés cutanées

L'un des objectifs de ce travail est d'évaluer l'impact de la température ambiante sur le ressenti thermique de différents groupes d'individus par l'intermédiaire de mesures cutanées. Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier les facteurs non thermiques qui seraient susceptibles de faire varier les propriétés cutanées. Cette identification permettra de maitriser, dans les expérimentations, ces facteurs « non thermiques » pour analyser uniquement l'impact du facteur thermique sur la peau et le ressenti.

1.3.6.1. Les facteurs environnementaux

Que ce soit l'humidité relative, le vent ou le soleil, tous ces stress environnementaux se répercutent sur l'état de la peau.

En effet, une diminution de l'**humidité relative** ambiante sur de longues périodes, provoque une diminution du contenu en eau du SC, une détérioration de la texture de la peau, une apparition de ridules, une augmentation des marqueurs de l'inflammation cutanée, une amplification de l'hyper-prolifération kératinocytaire lors d'une perturbation de la barrière cutanée [Denda, Sato *et al.* 1998; Denda 2000; Ashida, Ogo *et al.* 2001; Egawa, Oguri *et al.* 2002; Fuchs, Fluhr *et al.* 2005]. Cependant, l'impact de l'humidité relative (25%, 45%, 65% et 85%) à court terme (30 min d'acclimatation) sur la perte insensible en eau est apparu

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

relativement faible dans l'étude de Cravello *et al.* où les températures ambiantes étaient comprises entre 20 et 30°C [Cravello et Ferri 2008] alors qu'il est apparu significatif dans l'étude de Sunwoo *et al.* où la température est de l'ordre de 25°C (la perte insensible en eau était significativement plus élevée et le contenu en eau significativement plus faible dans l'environnement à 10% et à 30% par rapport à l'environnement à 50%) [Sunwoo, Chou *et al.* 2006]. La quantité de sébum surfacique ne semble pas être modifiée par l'humidité relative (10%, 30% et 50%) [Sunwoo, Chou *et al.* 2006]. Cependant, la conversion de la filaggrine en FNH dépend de l'humidité de l'environnement : quand l'environnement est sec la conversion se fait très tôt dans les couches profondes du stratum corneum, alors que dans un environnement humide la conversion se fait dans les couches les plus superficielles [Baran et Maibach 2005]. La quantité d'acides aminés libres diminue lorsque l'humidité relative est réduite [Katagiri, Sato *et al.* 2003].

De son côté, le **soleil** engendre une coloration immédiate de la peau (liée à l'oxydation des pigments mélaniques sous l'effet des UVA) et un bronzage 48h après l'exposition. Il provoque la sécrétion d'acide urocanique (qui absorbe les UVB) dans la sueur, la synthèse de vitamine D (par l'action des UVB), une diminution des défenses immunitaires et la formation de radicaux libres et de coups de soleil lors d'expositions prolongées.

1.3.6.2. La zone anatomique

Les principales propriétés cutanées dépendent du site anatomique [Le Fur, Lopez *et al.* 1999; Lopez, Le Fur *et al.* 2000; Marrakchi et Maibach 2007; Wa et Maibach 2010]. L'influence du site corporel est parfois différente d'une étude à une autre. Toutefois, quelques tendances ont été regroupées dans le Tableau 1.11.

.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 1.11 : Classification des variations anatomiques pour différentes variables cutanées (en situation stable de repos sauf pour le taux de sudation)

Variable	Ordre décroissant des valeurs	Références
Perte insensible en eau	Front, paume > avant-bras, abdomen zones proches du nez > cou, menton > centre des joues ≥ front ≥ joues latérales > avant-bras	[Primavera, Fluhr *et al.* 2005; Marrakchi et Maibach 2007; Tagami 2008]
Quantité d'eau	front, paume > abdomen, jambe cou > joue, front, paupière, menton > nez	[Marrakchi et Maibach 2007] [Berardesca et EEMCO 1997]
Taux de sudation lors d'un exercice	Dos > doigts, pouces, paume front >> menton > joues	[Smith et Havenith 2011]
Quantité de sébum	front > joue >> avant-bras	[Wa et Maibach 2010]
FNH : acides aminés, PCA	avant-bras > visage (joue)	[Egawa et Tagami 2008; Robinson 2009]
FNH : lactate	joue > avant-bras	[Egawa et Tagami 2008]
pH cutané	menton > avant-bras > cou > joue > front	[Marrakchi et Maibach 2007]
Couleur de peau	Coordonnée sur l'axe allant du vert au rouge : Visage, cou, paume de main, plante de pied > tronc, bras, etc. Coordonnée sur l'axe allant du bleu au jaune : Zones exposées au soleil > zones non exposées Luminance, clarté : tronc, intérieur du bras > visage, cou et main	[Fullerton, Fischer *et al.* 1996]
Intégrité du SC	avant-bras, dos, haut du bras >> joue	[Breternitz, Flach *et al.* 2007]
Cohésion du SC	avant-bras, haut du bras > joue, dos	[Breternitz, Flach *et al.* 2007]
Récupération du SC après perturbation	Front >> avant-bras, abdomen, mollet >> dos	[Fluhr, Dickel *et al.* 2002]
Température du SC	menton, cou > front > joue > nez, avant-bras	[Marrakchi et Maibach 2007; Wa et Maibach 2010]
Flux sanguin	nez > menton > joue > front > cou > avant-bras	[Marrakchi et Maibach 2007]

Les différences observées entre les zones anatomiques sont souvent associées à la distribution non homogène des glandes sébacées et des glandes sudoripares sur le corps, à une épaisseur de peau différente suivant les zones, à une exposition au soleil, à une application non homogène de produits de soins sur le corps, *etc*.

1.3.6.3. Les facteurs individuels

1.3.6.3.1. L'âge

La majorité des paramètres cutanés sont influencés par l'âge [Marrakchi et Maibach 2007]. Cependant, les différentes études menées sur ce sujet n'aboutissent pas toutes aux mêmes conclusions et les différences observées ne sont pas toujours significatives. Cependant, il a été possible de distinguer des tendances qui sont regroupées dans le Tableau 1.12.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 1.12 : L'effet de l'âge sur certaines variables cutanées

Variable	Modifications liées à l'âge (> 60 vs. 20-50 ans)	Références
Perte insensible en eau	Diminution avec l'âge et surtout pour les plus de 60 ans	[Primavera, Fluhr *et al.* 2005; Marrakchi et Maibach 2007; Farage, Miller *et al.* 2010]
Quantité d'eau	Diminution avec l'âge Sur le visage, la diminution est légère pour les plus de 66 ans et la tendance est parfois non significative sur certaines zones	[Farage, Miller et al. 2010] [Marrakchi et Maibach 2007]
Taux de sudation lors d'un exercice	Diminution pour les plus de 70 ans	[Giacomoni, Mammone *et al.* 2009]
Quantité de sébum	Valeurs élevées au centre du visage pour les jeunes distribution en « T » sur le visage pour les plus de 66 ans	[Piérard, Piérard-Franchimont et al. 2000] [Marrakchi et Maibach 2007]
FNH : acides aminés, PCA	Augmentation sur la joue et l'avant-bras avec l'âge	[Egawa et Tagami 2008]
FNH : lactate	Augmentation avec l'âge	[Egawa et Tagami 2008]
pH cutané	Constant entre 18 et 60 ans et augmentation pour les plus de 66 ans	[Marrakchi et Maibach 2007] [Parra et Paye 2003] [Waller et Maibach 2005]
Couleur de peau	La clarté des peaux des femmes caucasiennes a tendance à diminuer avec l'âge sur le front et les avant-bras.	[Le Fur, Numagami *et al.* 2000]
Intégrité du SC	Diminution pour les plus de 80 ans	[Ghadially, Brown *et al.* 1995]
Cohésion du SC	NS	
Récupération du SC	Diminution et retard de la récupération chez les plus de 80 ans	[Ghadially, Brown *et al.* 1995]

NS : Non signalé dans la littérature

1.3.6.3.2. Le genre

L'effet du genre sur les mesures cutanées diverge suivant les études. Cependant, il est globalement admis que le genre n'a pas de réel impact sur le pH cutané [Parra et Paye 2003], sur le contenu en eau du SC [Berardesca et EEMCO 1997] et sur la perte insensible en eau [Primavera, Fluhr et al. 2005]. Les différences observées entre les hommes et les femmes dans certaines études pourraient être liées davantage aux différentes habitudes de vie des hommes et des femmes plutôt qu'au sexe en lui-même. Par contre, l'excrétion de sébum semble être influencée par le genre [Piérard, Piérard-Franchimont et al. 2000] : les hommes ont tendance à produire davantage de sébum que les femmes [Giacomoni, Mammone et al. 2009]. De même, le taux de sudation lors d'un exercice physique apparaît plus élevé chez les hommes que chez les femmes [Giacomoni, Mammone et al. 2009]. Ou encore, les hommes ont tendance à avoir une peau plus rouge et plus sombre que celle des femmes [Fullerton, Fischer *et al.* 1996; Jablonski et Chaplin 2000].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3.6.3.3. L'ethnicité

Les différentes ethnicités se distinguent d'abord par leur couleur de peau. Ces variations de couleur sont liées à des différences au niveau de la production de mélanosomes et donc au niveau de la façon de réagir aux UV [Norval 2008]. Six phototypes ont été mis en évidence par Fitzpatrick en 1988 (cf. Tableau 1.13).

Tableau 1.13 : Les différentes classes de phototypes cutanés associées à leurs différentes réactions face au soleil [Astner et Anderson 2004; Norval 2008].

Phototype	Ethnicité	Sensibilité aux UV	Coups de soleil / bronzage
I	blanche caucasienne	Extrêmement sensible	brûle toujours / ne bronze jamais
II	blanche caucasienne	Très sensible	brûle facilement / bronze peu et avec difficulté
III	blanche caucasienne	Modérément sensible	brûle modérément / bronze modérément et uniformément
IV	blanche caucasienne Souvent sud-méditerranéenne	Relativement tolérante	brûle peu et rarement / bronze modérément et facilement
V	Bronzée, Asie/Moyen-Orient	Variable	brûle rarement / bronzage difficile à évaluer car le pigment est déjà présent
VI	Noir, Afro-antillaise	Relativement insensible	Ne brûle jamais

Mais l'ethnicité n'influence pas uniquement la couleur de peau, elle peut avoir un impact sur d'autres propriétés cutanées telles que l'acidité de la peau [Parra et Paye 2003; Rawlings 2006] [Fotoh, Elkhyat et al. 2008], le contenu en eau [Rawlings 2006] [Berardesca et Maibach 2003], la perte insensible en eau [Rawlings 2006] [Berardesca et Maibach 2003; Fotoh, Elkhyat et al. 2008], la sécrétion de sébum [Rawlings 2006], la capacité de récupération de la couche cornée [Berardesca et Maibach 2003], l'intégrité de la couche cornée [Berardesca et Maibach 2003], la quantité des NMF [Rawlings 2006], *etc.*

1.3.6.3.4. Les habitudes de vie

Les habitudes de vie suivantes ont tendance à se répercuter sur différentes propriétés cutanées :

- **l'application de produits de soin**

Les gels douches quotidiens, les crèmes hydratantes et autres produits de soin modifient le film hydrolipidique (pH, quantité des différents composants du FNH, contenu en eau, quantité de sébum surfacique, etc.) et l'hydratation de l'épiderme et du derme.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- **le tabagisme**

Rien que le contact de la fumée de cigarette avec la peau a un effet sur celle-ci. Ce contact engendre une réduction du contenu en eau du SC, favorise le dessèchement de la peau du visage [Just-Sarobé 2008] et expose la peau à une forte concentration de radicaux libres susceptibles d'endommager la peau [Wolf, Wolf *et al.* 1998]. Petitjean *et al.* montrent que la consommation régulière de tabac peut modifier le microrelief et le teint de la peau et réduire le flux sanguin cutané (pas forcément à cause de la nicotine) [Sørensen, Jørgensen *et al.* 2009]) [Petitjean, Mac-Mary et al. 2006].

- **l'alimentation**

Par exemple, la privation calorique réduit les composants du sébum (excepté le squalène) [Pochi, Downing *et al.* 1970], le passage d'un régime riche en graisse à un régime riche en glucide aurait tendance à modifier le contenu lipidique surfacique en augmentant la sécrétion de cholestérol [Nikkari, Schreibman *et al.* 1974], ou encore une alimentation épicée peut provoquer une perte en eau plus élevée [Schaffo 2011].

- **le manque de sommeil**

Il diminue la capacité de la peau à récupérer sa fonction barrière [Altemus, Rao *et al.* 2001].

- **l'activité physique, la prise de médicaments, les drogues, *etc.***

1.3.6.4. Le stress émotionnel

Le stress psychologique a également un impact sur différentes propriétés cutanées. Un stress tel qu'un entretien d'embauche a tendance à augmenter significativement la perte insensible en eau sur la joue [Altemus, Rao *et al.* 2001], à réduire significativement la capacité de récupération de la couche cornée [Altemus, Rao *et al.* 2001; Denda 2009], à modifier la composition du sébum surfacique sans modifier sa quantité totale [Yosipovitch, Tang *et al.* 2007], à changer la couleur de peau [Fullerton, Fischer *et al.* 1996].

1.3.6.5. Les rythmes biologiques

Les paramètres cutanés subissent des rythmes biologiques. Certains rythmes ont été répertoriés dans le Tableau 1.14. L'influence du rythme biologique sur le pH, le contenu en eau, la perte en eau et la température de peau est minime. Seule l'excrétion de sébum est fortement modifiée au cours de la journée.

Pour la couleur de peau, la clarté diminue au cours de la journée et les coordonnées de chromaticité changent également. Mais ces variations sont considérées comme minimes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Fullerton, Fischer *et al.* 1996]. Le flux sanguin présente également un rythme biologique (circadien et ultradien) avec un creux principal à 8h et un pic à 20h [Yosipovitch, Sackett-Lundeen *et al.* 2004]. Mais les variations au cours de la journée sont considérées comme non significatives et minimes [Bircher, De Boer *et al.* 1994]. Concernant les autres variables cutanées telles que la quantité des FNH, l'intégrité, la cohésion et la capacité de récupération de la barrière cutanée, les rythmes biologiques ne sont pas clairement établis.

Tableau 1.14 : Caractéristiques des rythmes biologiques de certains paramètres cutanés. A partir de [Le Fur, Reinberg et al. 2001]

Variables	Zone	Particularités des rythmes biologiques sur 24h		
		creux	pics	Amplitude du rythme entre 8h et 18h
pH cutané	Front	4h		< 2%
	Avant-bras	12h	4h et 16h	< 2%
Contenu en eau	Visage	Pas de variation significative		
	Avant-bras	8h, 16h, 24h	12h, 20h, 4h	< 4%
Perte insensible en eau	Joues	12h, 20h-24h	8h et 16h	< 5%
	Avant-bras	12h, 24h	8h et 16h	< 20%
Quantité de sébum	Front	24h	12h	~ 60%
Température de peau	Visage	Pas de variation significative		
	Avant-bras	12h	4h et 16h	< 4%

Le cycle menstruel influence l'excrétion de sébum (cf. partie 1.3.1.5.2. page 79) et la perte insensible en eau. En effet, cette dernière est plus élevée le jour où la sécrétion en œstrogène et en progestérone est minimale. La fonction barrière semble donc moins efficace au début des règles que pendant les jours qui suivent l'ovulation [Ethel 1997].

1.3.6.6. Bilan

Face à l'analyse des différents facteurs susceptibles de modifier les variables cutanées, un certain nombre de précautions ont été prises dans l'élaboration des expérimentations basées sur les mesures cutanées :

- contrôler l'environnement (HR, Vair, asymétries de rayonnement, *etc.*) pour ne mesurer que l'effet lié à la température ambiante,
- sélectionner un panel « homogène » (surtout au niveau de l'âge et de l'ethnicité) pour observer des différences entre les groupes liées le plus possible à la sensibilité thermique,
- connaître les habitudes de vie des volontaires par l'intermédiaire de questionnaires (sur l'état de fatigue, de stress, *etc.*) et leur faire part d'instructions à respecter (sur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'application de produits de soin, sur l'activité sportive, *etc.*) avant et pendant l'expérimentation,

- suivre objectivement l'état émotionnel du volontaire pendant les expérimentations pour être sûr que les mesures reflètent l'impact de l'environnement thermique et non l'impact du stress que pourrait susciter un événement qui surviendrait durant l'expérimentation. Ou être attentif au comportement du sujet et aux explications données durant l'expérimentation pour le rassurer et éviter un stress quelconque,
- réaliser les mesures toujours sur les mêmes zones anatomiques, le moindre changement pourrait provoquer une variation de la variable mesurée. Les zones doivent être choisies judicieusement, de préférence dans des zones où la variable atteint des valeurs élevées. De cette façon, les variations de niveau seront plus faciles à observer.
- limiter ou avoir conscience de l'impact du rythme circadien surtout pour l'excrétion de sébum et la perte insensible en eau sur l'avant-bras. Les autres variables présentent des variations négligeables entre 8h et 18h.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CONCLUSION

Ce premier chapitre a permis de dégager 3 axes de recherche, pour caractériser les différences interindividuelles de ressenti thermique :

- **Axe 1 : les seuils de perception locaux**

Cet axe permettra de savoir si les différences interindividuelles de sensibilité thermique globale peuvent être reliées à des différences de sensibilité thermique locale c'est-à-dire à des seuils locaux de perception thermique froid / chaud plus ou moins élevés.

- **Axe 2 : les variables « thermo-vasculaires » liées directement à la thermorégulation**

Cet axe permettra de savoir si les différences interindividuelles de ressenti thermique peuvent s'expliquer par des différences au niveau de variables cutanées ayant un lien plus ou moins direct avec les mécanismes de thermorégulation (en termes de gain ou de seuil).

- **Axe 3 : les variables cutanées liées à l'état du film hydrolipidique et du SC**

Cet axe permettra de savoir si les différences interindividuelles de ressenti thermique peuvent s'expliquer par des différences au niveau des propriétés du film hydrolipidique et du SC.

Le chapitre 2 consistera à identifier les axes de recherche les plus pertinents en fonction des résultats des expérimentations préliminaires. Suite à cette identification, une campagne de mesures aura pour objectif de caractériser plus finement, grâce aux mesures cutanées, les groupes d'individus avec des ressentis distincts et d'évaluer l'intérêt de prendre en compte les différences interindividuelles de ressenti et différentes variables cutanées pour prédire la sensation thermique et le confort thermique.

Le chapitre 2 permettra également de mener une réflexion sur différents points essentiels pour la construction et le bon déroulement des expérimentations. Ces points concernent :

- **l'évaluation par les questionnaires du ressenti thermique**,

Des échelles différentes seront utilisées pour évaluer la composante hédonique du ressenti thermique (le confort thermique et le bien-être) à travers les différentes expérimentations.

- **la méthode de construction des groupes d'individus ayant des ressentis distincts,**

Ce point sera abordé dans le chapitre 2 et il sera complété dans le chapitre 3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- **la maîtrise des différents facteurs d'influence**

Les facteurs d'influence des échanges thermiques « passifs », de la régulation thermique autonome, du ressenti thermique et des propriétés cutanées seront contrôlés dans toutes les expérimentations :

- les facteurs individuels seront maîtrisés avant l'expérimentation grâce à une sélection : âge, IMC, ethnicité, santé, tabac, *etc.* Dans la pratique, des compromis seront fait entre les moyens mis à disposition et les critères à retenir pour la sélection du panel.
- les facteurs individuels seront maîtrisés pendant l'expérimentation grâce à des instructions : tenue vestimentaire, posture, activité, boissons, stress, *etc.* La campagne de mesures présentée dans le chapitre 3 proposera un suivi « objectif » de la réactivité émotionnelle des volontaires et donc du stress.
- les facteurs environnementaux tels que l'humidité relative, la vitesse d'air, les tâches solaires, *etc.* seront contrôlés dans la limite des moyens mis à disposition pour cet objectif.
- *etc.*

Toutes les expérimentations tenteront de contrôler au mieux les facteurs d'influence autres que la température ambiante pour analyser uniquement l'effet de la température ambiante sur le ressenti et les mesures cutanées. Mais des compromis devront être faits. Ils seront détaillés dans les différentes expérimentations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 2. Expérimentations préliminaires

Premières investigations des mesures cutanées vis-à-vis des différences interindividuelles de ressenti et construction de la méthodologie expérimentale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

INTRODUCTION

Ce chapitre constitue une première phase exploratoire dans la compréhension des causes physiologiques des différences interindividuelles de ressenti thermique. Il vise à dégager les propriétés physiologiques cutanées qui seraient susceptibles d'être liées et même d'expliquer les différences interindividuelles de ressenti déclaré dans un environnement donné et après un changement de température ambiante. Deux séries d'expérimentations ont été effectuées et trois catégories de propriétés cutanées, choisies à partir de l'étude bibliographique du chapitre précédent, ont été explorées :

- L'**activité neurosensorielle** cutanée analysée avec des mesures des seuils de perception du chaud et du froid ;
- Les **propriétés thermo-vasculaires** cutanées évaluées avec des mesures locales de températures de peau et avec des mesures indirectes de l'activité microcirculatoire ;
- Les **propriétés du film hydrolipidique** évaluées avec des mesures de perte en eau, de contenu en eau du stratum corneum, de pH, de la quantité de lipides surfaciques.

Au-delà de l'exploration de ces trois catégories de mesures, ces premières expérimentations permettent également d'identifier les principales limites des protocoles afin d'améliorer la méthode expérimentale.

Ce chapitre se divise en 7 parties :

- La première partie détaille les protocoles des deux expérimentations.
- La deuxième partie expose les outils d'analyse statistique des données.
- La troisième partie présente la caractérisation des environnements à partir de la stabilité des paramètres physiques et de la gêne occasionnée par certaines de leurs particularités.
- La quatrième partie explique la méthode de construction de 2 groupes présentant des ressentis distincts et expose les particularités de chacun des deux groupes.
- Les trois dernières parties se concentrent respectivement sur les mesures des seuils de perception, sur les mesures locales des températures cutanées et sur les mesures des propriétés du film hydrolipidique. Pour chaque catégorie de variable, l'outil de mesure et les résultats associés sont présentés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1. Protocoles expérimentaux

Deux protocoles, basés sur la même démarche expérimentale, ont été construits. Ce chapitre présente le déroulement général des journées d'expérimentation ainsi que les particularités des deux protocoles.

2.1.1. Déroulement général

La première série d'expérimentations dédiée aux mesures des seuils de perception (associée au protocole A) et la deuxième série d'expérimentations dédiée aux mesures des propriétés du film hydrolipidique et de la couleur de peau (associée au protocole B) se sont déroulées chacune sur 5 jours. Pour les deux protocoles, chaque volontaire a participé pendant 2h et sur 2 jours consécutifs à l'expérimentation. Sur les deux jours, il passait au même moment de la journée pour réduire l'impact du rythme circadien sur les mesures. Chaque phase expérimentale de 2h a été constituée d'une transition thermique chaude (passage d'un environnement neutre plutôt frais à un environnement plus chaud).

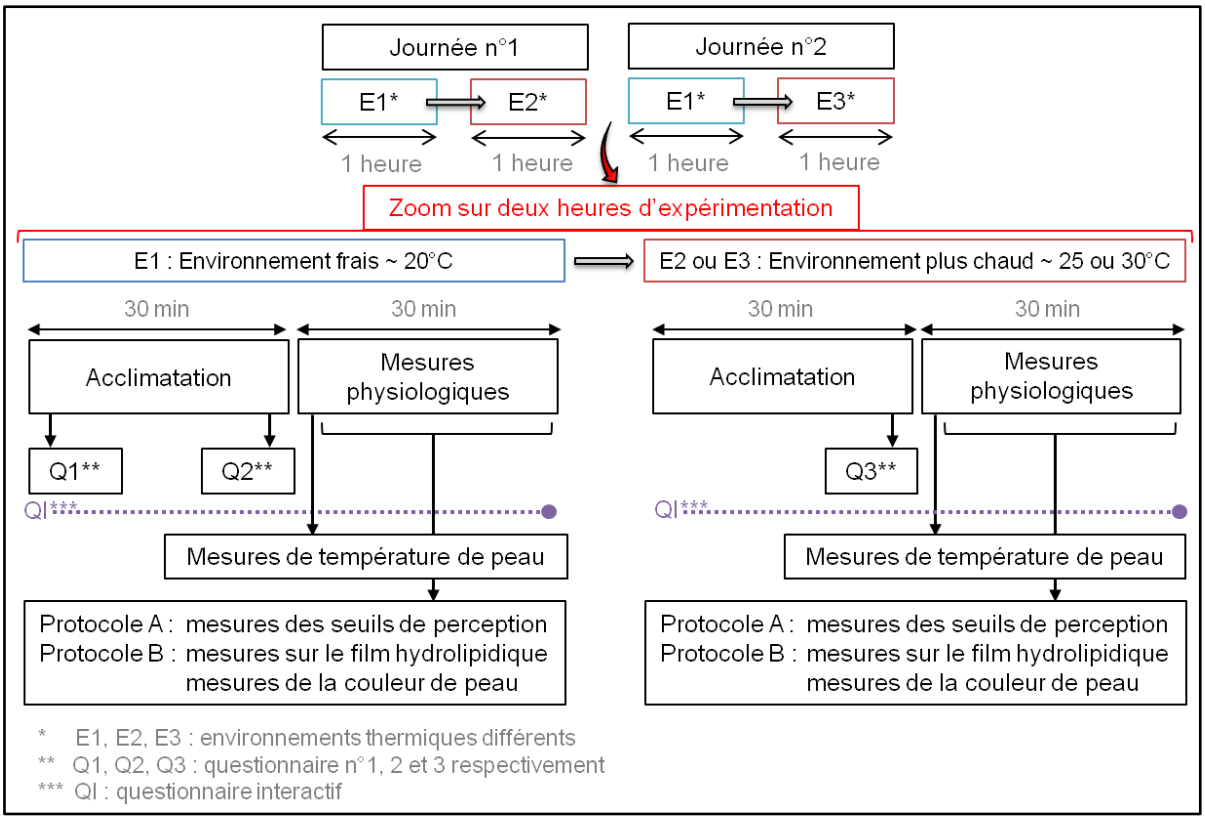


Figure 2.1 : Représentation du déroulement des deux protocoles A et B. Se reporter au texte pour plus d'explications.

Les volontaires sont restés assis pendant 1h dans chacun des environnements thermiques : les 30 premières minutes ont été consacrées à l'acclimatation et les 30 dernières aux mesures physiologiques (cf. Figure 2.1 et Figure 2.2).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

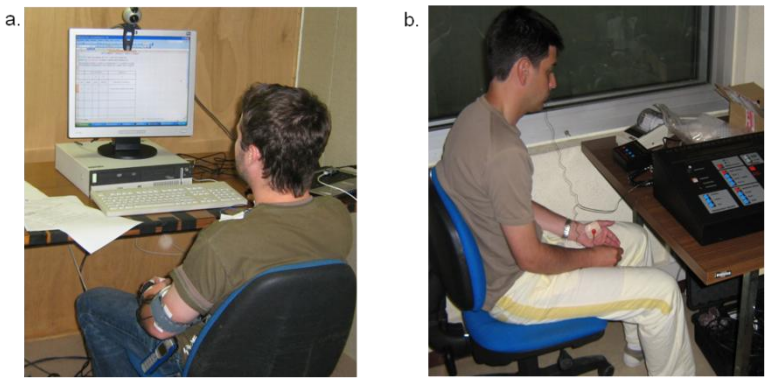


Figure 2.2 : Exemples de situations expérimentales. a. la phase d'acclimatation. b. la phase de mesure

Tout au long de l'expérimentation, les volontaires ont complété des questionnaires (Q1, Q2 et Q3) « classiques » qui sont détaillés dans la partie 2.1.5. page 114. Dans le protocole A, les volontaires ont également eu la possibilité d'exprimer leur sensation thermique et leur bien-être, à n'importe quel moment, à l'aide d'une souris et d'un écran d'ordinateur où figurait un questionnaire interactif (QI) composé de deux échelles (cf. annexe 2). La réponse au QI était obligatoire à la fin de chaque période consacrée aux mesures

2.1.2. Description des zones d'expérimentation

Tous les espaces de mesures sont sans ouverture vers l'extérieur pour éviter les rayons solaires susceptibles de modifier la température ambiante ou de perturber certaines mesures cutanées. Toutefois, des différences, détaillées ci-après, sont bien présentes entre les zones d'expérimentation.

Au niveau du protocole A :

- l'environnement E1 correspond à une salle d'une vingtaine de mètres carrés composée d'ordinateurs et d'appareils de contrôle,
- l'environnement E2 correspond à un local type « bungalow » d'une quinzaine de mètres carrés avec une légère odeur de bois.

Au niveau du protocole B :

- l'environnement E1 correspond à une salle d'une vingtaine de mètres carrés composée d'ordinateurs et d'appareils de contrôle de la veine thermique
- l'environnement E2 et E3 correspond à la veine de la soufflerie climatique c'est-à-dire à un hangar d'une trentaine de mètres carrés équipé de gros ventilateurs bruyants.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Comme indiqué dans le Tableau 2.1, toutes les zones ont été régulées en température. Par contre, seule l'humidité relative de l'environnement E2-E3 du protocole B a été régulée grâce à la soufflerie climatique.

Tableau 2.1 : Caractéristiques des régulations thermiques et hygrométriques des environnements des protocoles

	Protocole A "seuil de perception"		**Protocole B "film hydrolipidique"**		
Environnement thermique	E1	E2	E1	E2	E3
Température de consigne	20°C	30°C	20°C	25°C	30°C
Régulation de T	climatiseur	climatiseur	climatiseur	Soufflerie*	Soufflerie*
Régulation HR	Aucune	Aucune	Aucune	Soufflerie*	Soufflerie*

** La soufflerie climatique Jules Verne (CSTB, Nantes) est décrite en détail sur le site internet suivant : http://www.cstb.fr/nantes/fr/nos-equipements/les-souffleries-climatiques-jules-verne.html*

D'autre part, la régulation de la température a été effectuée par des climatiseurs sauf dans les environnements les plus chauds E2-E3 du protocole B pour lesquels la régulation a été réalisée grâce à un système spécifique de la soufflerie climatique Jules Verne (CSTB, Nantes).

2.1.3. Sélection et caractérisation des panels

Tous les volontaires ont participé à l'étude après avoir lu et accepté les conditions de l'expérimentation, détaillées dans une notice d'informations, et après avoir signé le formulaire de consentement. Ils ont été recrutés en interne (au CSTB) suivant des critères d'âge, de bonne santé et d'absence de traitements médicaux (autre que contraceptif). Un critère sur les antécédents de maladies neurologiques a également été retenu dans le protocole A, alors que des critères sur la peau ont été ajoutés pour sélectionner les sujets du protocole B (cf. Tableau 2.2). Pour des raisons de coût et de disponibilité des sujets, des critères d'inclusion/exclusion tels que le sexe et le tabagisme n'ont pas pu être retenus afin de regrouper un maximum de volontaires.

Les particularités des panels sont regroupées dans le Tableau 2.2. Seule la taille des femmes dans le protocole B est significativement plus faible que celle des hommes. Les autres données anthropométriques sont similaires pour les hommes et les femmes. Dans les deux protocoles, les fumeurs (6 à 10 cigarettes par jours) sont uniquement des hommes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 2.2 : Caractérisation des panels du protocole A et B. * signifie que la moyenne des valeurs est significativement différente (p < 0,05) entre les hommes et les femmes d'après le test de l'ANOVA.

	Protocole A			**Protocole B**		
Critères d'inclusion	Age entre 20 et 40 ans, bonne santé, absence de traitement médical et d'antécédents de maladies neurologiques			Age entre 25 et 40 ans, bonne santé, absence de traitement médical et de problème de peau, peau caucasienne		
Nombre de volontaires	Panel (n=13)	Hommes (n=9)	Femmes (n=4)	Panel (n=13)	Hommes (n=9)	Femmes (n=4)
Age (ans)	31 ± 5	29 ± 6	31 ± 7	29 ± 4	31 ± 4	27 ± 3
Poids (kg)	69 ± 10	73 ± 5	64 ± 14	67 ± 12	71 ± 10	58 ± 11
Taille (m)	1,74 ± 0,05	1,77 ± 0,04	1,70 ± 0,04	1,74 ± 0,06	1,75 ± 0,04	1,67 ± 0,11 *
IMC (kg m^{-2})	22,9 ± 3,0	23,3 ± 1,7	21,9 ± 4,9	22,6 ± 2,9	23,3 ± 3,0	21,1 ± 2,6
Nombre de Fumeur	5	5	0	4	4	0

2.1.4. Consignes pour la standardisation des mesures

Afin de standardiser les mesures, les individus du panel ont dû respecter des consignes. Comme évoqué dans le chapitre précédent (cf. partie 1.1.4.6. page 23), il est nécessaire de prendre des précautions pour que le bilan thermique passif de base de chaque volontaire soit à peu près similaire et pour qu'il ne soit pas influencé par des variables autres que la température ambiante.

Ainsi, les consignes d' « uniformisation du bilan thermique passif de base » ont été les suivantes :

- Ne pas fumer avant l'expérimentation (au moins 3 h avant).
- Ne pas boire d'alcool durant les 12h qui précèdent l'expérimentation.
- Ne pas boire de boissons excitantes (café, thé) 1h avant l'expérimentation.
- Ne pas pratiquer une activité sportive trop intense la veille de l'expérimentation.
- Ne pas s'exposer au soleil avant l'expérimentation.
- Porter la tenue vestimentaire suivante (équivalente à un indice d'isolement vestimentaire d'environ 0,6 Clo) : pantalon, chaussures, chaussettes, tee-shirt.

D'autres consignes ont été respectées afin de ne pas biaiser les mesures cutanées :

- Ne pas appliquer de produits de soin (produits hydratants, gommage, *etc.*) et de maquillage 12h avant l'expérimentation.
- Se raser (visage) au moins 12h avant l'expérimentation (pour les hommes).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.5. Evaluation du ressenti thermique : les questionnaires

Le questionnaire Q1 (commun aux deux protocoles A et B), les questionnaires Q2 et Q3 (présentant des parties différentes suivant le protocole et remplis après 20 minutes d'acclimatation dans E1 et E2-E3 respectivement) ainsi que le questionnaire interactif QI (propre au protocole A) (cf. Figure 2.1, page 110) sont présents dans l'annexe 2. Ils ont permis de récupérer les informations suivantes :

- **des informations générales sur chaque volontaire**

Elles portent sur le sexe, l'âge, le poids, la taille, le tabagisme, les habitudes sportives, les particularités cutanées, le stress habituel, l'état de santé, *etc.* Elles sont obtenues grâce au questionnaire Q1 pour les deux protocoles.

- **des informations sur le respect des consignes**

Elles sont obtenues par les premières questions du questionnaire Q2 pour les deux protocoles.

- **des informations sur l'état général de l'individu** (fatigue, stress, appréhension)

Elles sont obtenues par les questionnaires Q2-Q3 avec des questions à choix multiples.

- **des informations sur l'impact du contexte** (bruit, espace, *etc*.) **sur le ressenti général**

Elles sont obtenues grâce aux questionnaires Q2 et Q3. Dans le protocole A, cette évaluation est réalisée grâce à une question ouverte non orientée, à travers laquelle le volontaire peut s'exprimer librement sur l'environnement et sur ce qu'il ressent. Tandis que dans le protocole B, les questions utilisées sont fermées (réponses "oui/non") et ciblent l'impact de la lumière, la couleur, l'odeur, le bruit, *etc*.

- **des informations sur le ressenti thermique et sur le bien-être général**

Pour le protocole A, elles sont obtenues grâce à un questionnaire interactif (QI) composé de deux échelles visuelles analogiques (EVA) : une sur la sensation thermique et l'autre sur l'état de bien-être (cf. annexe 2). Le volontaire peut alors s'exprimer quand il le souhaite en cliquant sur les échelles affichées en permanence sur un écran d'ordinateur (une réponse est obligatoire à la fin de la phase expérimentale dans un environnement). Pour le protocole B, les informations sont obtenues grâce à des échelles combinées (catégorielles + EVA) présentes sur le questionnaire Q2 et Q3. Les échelles portent sur la sensation thermique, le confort thermique, le niveau de transpiration et de frissons, l'uniformité thermique et l'inconfort général (pas seulement thermique / équivalent de la notion de mal-être) (cf. Annexe 2).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

L'échelle visuelle analogique (EVA) a été utilisée dans le protocole A car elle est couramment employée le domaine de la recherche sur la psychologie pour évaluer la douleur, l'humeur, la motivation et le bien-être et bien d'autres notions subjectives [de Boer, van Lanschot *et al.* 2004]. Elle a l'avantage d'être plus précise dans la retranscription de l'expérience subjective car elle ne force pas le volontaire à choisir une catégorie restreinte contrairement aux échelles catégorielles à plusieurs niveaux proposées dans la norme ISO 10551 [AFNOR 2001] sur l'évaluation du jugement thermique. De plus, quelques auteurs commencent à prouver l'intérêt d'utiliser ce type d'échelle pour l'évaluation de la sensation et du confort thermique [Davey, Reilly *et al.* 2007; Leon, Koscheyev *et al.* 2008]. Il nous a donc semblé intéressant de la tester.

Cependant, suite à des résultats exposés, en aout 2009, dans l'article de Lee *et al.*, d'autres types d'échelle ont été choisis pour l'évaluation du ressenti thermique dans le protocole B. En effet, cet article préconise d'utiliser une échelle catégorielle combinée à une échelle visuelle analogique [Lee, Stone et al. 2010]. L'échelle catégorielle à 9 points de la norme ISO 10 551 [AFNOR 2001] destinée à l'estimation de la sensation thermique semblerait trop restreinte pour discriminer la sensation thermique dans certains cas, alors que l'échelle visuelle analogique semblerait fournir trop de choix pour projeter la sensation thermique [Lee, Stone et al. 2010]. Donc, en utilisant l'échelle à 9 ou 7 points de la norme ISO 10 551, tout en laissant la possibilité aux volontaires de se positionner où ils le souhaitent sur cette échelle (variable continue et non catégorielle), les réponses des volontaires seraient plus fiables.

Les données de ressenti thermique récupérées par les échelles (continues) sur les questionnaires ont été traitées comme des données quantitatives.

2.1.6. Mesures

2.1.6.1. Mesures des paramètres physiques des environnements

La température ambiante et l'humidité relative ont été systématiquement mesurées à l'aide de thermohygromètres HMP 330 (Vaisala - résolution de 0,1°C avec une précision de mesure de 0,17°C). La vitesse d'air a également été mesurée mais de façon ponctuelle avec un anémomètre omnidirectionnel (boule chaude DISA d'une précision de ± 5%).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.6.2. Mesures cutanées

Chaque protocole présente des spécificités au niveau des mesures cutanées effectuées. La mesure de la température de peau est le seul point commun. Les seuils de perception locaux du chaud et du froid ont été mesurés à partir du protocole A alors que les propriétés du film hydrolipidique cutané ont été explorées à partir du protocole B (cf. Figure 2.1, page 110). Les mesures associées aux propriétés du film hydrolipidique ont été effectuées dans l'ordre suivant sur des zones différentes du visage :

- Mesure de la quantité de lipides surfaciques au niveau du stratum corneum.
- Mesure de la perte en eau juste au-dessus du stratum corneum.
- Mesure du contenu en eau des couches superficielles du stratum corneum.
- Mesure de l'acidité de la surface cutanée.

Une mesure de la couleur de peau a également été effectuée afin d'obtenir une première approximation de l'activité microcirculatoire.

Pour une question de lisibilité (comme le nombre de paramètres mesurés est relativement important), le choix des appareils de mesures ainsi que les caractéristiques des différentes variables mesurées n'ont pas été détaillés dans une seule et même partie. Ces éléments seront abordés pour chacune des trois catégories de mesures (mesures des seuils de perception, mesures thermo-vasculaires, mesures des propriétés du film hydrolipidique) au début des parties qui leur sont consacrées.

2.2. Traitements statistiques des données

Globalement, toutes les données cutanées sont analysées selon la même méthode, composée des étapes suivantes :

- **Evaluation de la fiabilité des mesures** : comparaisons des moyennes, des étendues des données, des valeurs extrêmes obtenues dans les expérimentations avec celles fournies par la littérature. Puis, comparaison entre les évolutions (ou les sens de variation) de chacune des variables cutanées avec les différentes températures ambiantes et les évolutions mentionnées dans la littérature.
- **Evaluation des différences interindividuelles** (c'est-à-dire évaluation des différences significatives entre deux groupes caractérisés chacun par un ressenti thermique spécifique) : comparaison, entre les deux groupes, des moyennes ou des distributions,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

de l'évolution des variables cutanées en fonction des températures ambiantes, et du lien établi entre les variables cutanées et la température ambiante.

Les boîtes de Tukey, décrites en détail dans l'annexe 4, ont permis de représenter graphiquement les données. Des outils statistiques ont été utilisés afin d'établir, par exemple, si les différences observées entre les moyennes des deux groupes ou si les évolutions provoquées par les transitions chaudes sont significatives.

2.2.1. Evaluation de la significativité des différences entre des échantillons

2.2.1.1. Les tests statistiques utilisés

La significativité d'une différence de moyennes entre deux ou plusieurs échantillons non appariés (ici, entre les deux groupes ou entre les environnements thermiques) est évaluée à partir de différents tests choisis en fonction de la nature des distributions des données et du nombre d'échantillons à comparer. Tous les tests présentés dans cette partie ont été effectués à partir du logiciel XLstat 2010.

Si les distributions suivent une loi normale et si les variances sont égales, les tests paramétriques sont utilisés. Dans le cas contraire, ce sont les tests non paramétriques qui permettent de comparer les échantillons. La normalité est vérifiée par le test de Shapiro-Wilk et l'homogénéité des variances est vérifiée par le test de Levène. Dans les deux cas, l'hypothèse nulle (correspondant respectivement à la normalité de l'échantillon et à l'égalité des variances) est rejetée quand la p-valeur (notée respectivement p_{sw} et p_l) est inférieure à 0,05.

Tableau 2.3 : Tests statistiques de comparaison des moyennes d'échantillons indépendants utilisés dans l'analyse de données des expérimentations de ce chapitre

Type de tests	Nombre d'échantillons	Nom du test	Principe	Notation p-valeur
paramétrique	2	Test t de Student	Comparaison de deux moyennes pour des petits échantillons	p_t
non paramétrique	2	Mann Whitney	Comparaisons des rangs de deux échantillons	p_{mw}
paramétrique	>2	ANOVA	Comparaisons de plusieurs moyennes à partir du rapport de variabilité intergroupes et intragroupe	p_{AN}
non paramétrique	> 2	Kruskal Wallis	Même démarche que l'ANOVA avec des rangs	p_{KW}

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les tests choisis dépendent, ensuite, du nombre d'échantillons à comparer et ils sont répertoriés dans le Tableau 2.3. Pour tous les tests présentés, l'hypothèse nulle (correspondant à l'égalité des moyennes ou des échantillons) est rejetée quand la p-valeur est inférieure à 0,05. Tous ces tests ont été utilisés ponctuellement lors de toutes les phases de la méthode d'analyse.

2.2.1.2. Le test de l'ANOVA à deux facteurs

L'**ANOVA à 2 facteurs** (non mentionné dans le tableau ci-dessus) a été particulièrement privilégiée dans la phase de l'évaluation des différences interindividuelles. Ce test a l'avantage de déterminer simultanément l'effet de deux facteurs indépendants (l'indépendance est vérifiée par un test de corrélation) et de l'interaction de ces deux facteurs sur la variabilité d'une variable. Par exemple, ici, le test de l'ANOVA à 2 facteurs peut évaluer l'effet du facteur « température ambiante » et du facteur « groupe de ressenti » (associé à l'appartenance à l'un des deux groupes d'individus), afin d'expliquer la variabilité d'une variable cutanée telle que la température de peau. Il peut également évaluer l'effet de l'interaction des deux facteurs en déterminant si l'effet du facteur « groupe de ressenti » est différent suivant la modalité du facteur « température ambiante » c'est-à-dire suivant la température de l'environnement. Ainsi, il est possible de déterminer si la dispersion de la température de peau est liée à une dispersion naturelle et à des facteurs perturbateurs non identifiés ou à l'environnement thermique et/ou à l'appartenance à un groupe d'individus. Ce test est plus riche que l'ANOVA à un facteur puisque plus le nombre de facteurs « influents » est plus élevé, et l'explication de la variabilité est donc plus précise.

Concrètement, le test de l'ANOVA à 2 facteurs porte sur l'analyse du rapport de la variance intergroupe (dispersion entre les moyennes) sur la variance intragroupe (dispersion autour de la moyenne). Si la p-valeur est inférieure à 0,05, l'hypothèse nulle, selon laquelle les moyennes sont égales, est rejetée. Il est, ainsi, possible d'identifier les facteurs et les interactions d'influence.

Ce test est paramétrique. Les distributions doivent donc suivre une loi gaussienne et les variances doivent être égales. Cependant, comme le nombre d'observations est faible, la normalité et l'égalité des variances sont vérifiées sur les résidus (écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle) issus du modèle de l'ANOVA à deux facteurs, grâce aux tests de Shapiro Wilk et de Levène.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Si les conditions de normalité et d'égalité des variances ne sont pas respectées, les variables sont transformées afin que leur distribution soit gaussienne.

2.2.1.3. La méthode de transformation de Box & Cox

La **méthode de Box & Cox** a été choisie pour transformer les distributions des variables qui ne suivent pas une loi normale. Cette méthode propose les fonctions de transformation suivantes :

$$y = \begin{cases} \dfrac{x^{\lambda} - 1}{\lambda} \ (\lambda \neq 0) \\ \ln(x) \ (\lambda = 0) \end{cases}$$

Une valeur λ donnant la transformation qui permet de se rapprocher le plus possible d'une distribution normale est alors fournie. Si la distribution de la variable transformée ne suit toujours pas une loi gaussienne, la variable est analysée avec les tests non paramétriques du Tableau 2.3. Sinon, le test de l'ANOVA à 2 facteurs est appliqué à la variable transformée.

2.2.1.4. Les tests de comparaisons multiples par paires

Après le test de l'ANOVA à 2 facteurs, il n'est pas possible de savoir quels sont les échantillons (par exemple à 20°C, 25°C, 30°C) du facteur « environnement thermique » qui diffèrent les uns des autres. Les tests de comparaisons multiples par paires sont alors utilisés et plus particulièrement le **test de Tukey** (car il est ni trop conservatif[13], ni trop permissif) après l'ANOVA à deux facteurs et le **test de Dunn** après le test de Kruskal Wallis. Encore une fois, l'hypothèse nulle d'égalité est rejetée quand la p-valeur est inférieure à 0,05 (notée respectivement p_{tukey} et p_{dunn}).

2.2.2. Evaluation de la significativité de la variation d'une variable

L'effet de la température ambiante sur les variables cutanées ou le sens de variation de chacune des variables entre l'avant et l'après « transition chaude » est déterminé grâce **au test d'hypothèses des rangs signés de Wilcoxon**. Ce test permet de comparer deux mesures d'une variable effectuées sur le même sujet : les données analysées doivent être appariées. L'appariement permet de réduire la variabilité due aux observations : par exemple, si un sujet présente des valeurs particulièrement élevées, cette particularité ne fausse pas l'analyse.

[13] Un test est dit « conservatif » si son risque de première espèce réel est inférieur au risque choisi (si le rejet de H0 est difficile). Plus un test est conservatif moins il est puissant. Il faut donc faire un compromis entre le risque de première espèce et la puissance du test.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, ce test prend en compte à la fois le sens des écarts et l'importance relative des écarts (et non l'amplitude des écarts) en attribuant un « rang » à chaque écart. Il a l'avantage de s'appliquer à des distributions non gaussiennes et d'amoindrir les effets des points atypiques.

Quand la p-valeur (notée p_w) est inférieure à 0,05, l'augmentation ou la diminution de la variable analysée est considérée comme significative. Dans ce cas, l'hypothèse nulle, selon laquelle la somme des rangs des observations présentant un écart positif est égale à la somme des rangs des observations présentant un écart négatif, peut être rejetée et le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie est inférieur à 5%.

Cette analyse est effectuée à partir du logiciel libre Tanagra. Il a été utilisé dans la phase d'évaluation de la fiabilité des données, mais également dans la phase d'évaluation des différences interindividuelles. Dans cette dernière phase, les variations des variables (causées par les transitions chaudes) ont été comparées suivant les groupes d'individus. Ainsi, il est possible de mettre en évidence des différences physiologiques notables entre les groupes.

2.2.3. Evaluation des liens entre des variables

2.2.3.1. Les tests de corrélation

Les tests de corrélation sont utilisés pour mettre en évidence l'existence d'une relation entre une variable cutanée et le ressenti thermique (sensation thermique, confort thermique, inconfort) et pour caractériser cette relation en termes d'intensité, dans la phase d'évaluation des différences interindividuelles. Ainsi, il est possible d'établir si les relations entre les variables cutanées et le ressenti thermique (ou si les différences intra-individuelle) sont différentes suivant les groupes d'individus.

Le **test de corrélation de Pearson** est utilisé quand les distributions sont gaussiennes. Dans les autres cas, le **test de corrélation de Spearman** a permis de mettre en évidence des liens entre les variables. Ce sont les coefficients de corrélations (r) fournis par ces tests qui sont interprétés. Ces coefficients correspondent au quotient de la covariance des deux variables par le produit de leurs écarts types. Ces coefficients sont compris entre 1 et -1. La force de la relation entre deux variables est interprétée de la façon suivante [Held 2010]:

- Si $0,3 < r < 0,5$ (ou $-0,5 < r < -0,3$) : la relation est de faible intensité
- Si $0,5 < r < 0,8$ (ou $-0,8 < r < -0,5$) : la relation est d'intensité moyenne
- Si $r > 0,8$ (ou $r < -0,8$) : la relation est forte

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Seuls les coefficients dont la p-valeur associée est inférieure à 0,05 sont interprétés.

Le coefficient de Pearson est calculé à partir des données brutes, alors que celui de Spearman est calculé à partir des rangs. Ce dernier présente l'avantage de pouvoir caractériser des liaisons non-linéaires (et pas seulement linéaires) monotones et d'être robuste face à des points atypiques [Rakotomalala 2008].

2.2.3.2. L'analyse en composantes principales (ACP)

En parallèle de l'analyse des coefficients de corrélation, l'analyse en composantes principales (ACP) est utilisée pour **visualiser** les liaisons multiples (similarités ou oppositions) entre variables. L'ACP permet de regrouper l'information sur des composantes principales c'est-à-dire sur des nouvelles variables synthétiques indépendantes qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales.

L'ACP normée basée sur l'analyse de la matrice de corrélation (et non l'ACP non normée basée sur la matrice de variance-covariance) a été utilisée dans cette expérimentation car toutes les variables n'ont pas les mêmes unités et qu'il ne faut pas donner plus de poids aux variables qui ont des gammes de valeurs élevées.

L'un des graphiques que l'on obtient avec l'ACP et qui a été utilisé dans cette partie est le **cercle de corrélation**. Il correspond à une projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions correspondant à deux composantes principales. Lorsque les variables sont proches du centre, l'interprétation est hasardeuse et il est nécessaire de se référer à la matrice de corrélations et à d'autres plans factoriels pour interpréter les résultats. Par contre, lorsque deux variables sont loin du centre du graphique, l'interprétation est la suivante :

- si elles sont proches les unes par rapport aux autres, elles sont significativement et positivement corrélées (r proche de 1) ;
- si elles sont orthogonales les unes par rapport aux autres, elles ne sont pas du tout liées entre elles (r proche de 0) ;
- si elles sont symétriquement opposées par rapport au centre, elles sont significativement et négativement corrélées (r proche de -1).Caractérisation des espaces de mesures

2.3. Stabilité des paramètres physiques des environnements

Les moyennes et les écarts types des températures et des humidités relatives sont regroupés dans le Tableau 2.4.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 2.4 : Valeurs des températures ambiantes et de l'humidité relative des environnements (moyenne ± écart type). E1, E2 et E3 correspondent à trois environnements thermiques différents, J1 = journée n°1 ou première phase expérimentale de 2h et J2 = journée n°2 ou deuxième phase expérimentale de 2h pour chaque volontaire.

	Protocole A "seuil de perception"		**Protocole B "film hydrolipidique"**	
Environnement (consigne °C) →	E1 (20°C)	E2 (30°C)	E1 (20°C)	J1 : E2 (25°C) J2 : E3 (30°C)
Température ambiante (°C) – J1	20,5 ± 0,7	29,7 ± 0,7	21,1 ± 0,4	25,8 ± 2,1
Humidité relative (%) – J1	59 ± 10	43 ± 3	52 ± 4	48 ± 9
Température ambiante (°C) – J2	20,0 ± 0,7	30,8 ± 0,4	21,0 ± 0,5	30,2 ± 1,3
Humidité relative (%) – J2	58 ± 5	37 ± 2	50 ± 5	41 ± 3

On peut, alors, constater que la température des environnements frais (E1) est plus stable que celle des environnements plus chauds (E2 et E3). Tous les sujets n'ont pas été confrontés exactement à la même température. L'environnement E2 (25°C) dans le protocole B a été particulièrement différent d'un sujet à un autre. L'analyse de la transition (E1 → E2) du protocole B devra, donc, être réalisée avec prudence. Cependant, dans tous les cas, les volontaires ont subi une transition chaude de 9-10°C (E1→E2 protocole A et E1→E3 protocole B).

Concernant l'humidité relative, elle est plus élevée pour les environnements plus frais et elle est globalement comprise entre 40 et 60% pour le protocole A et entre 40 et 55% pour le protocole B. Même quand l'humidité relative est constante, la quantité d'eau par kg d'air sec varie avec la température ambiante. Pour les deux protocoles, cette quantité a varié entre 8 et 11 g d'eau / kg d'air sec (cf. Figure 2.3). Il est supposé que cette variation est minime (et sans conséquence sur les mesures) par rapport à la variation de la température ambiante.

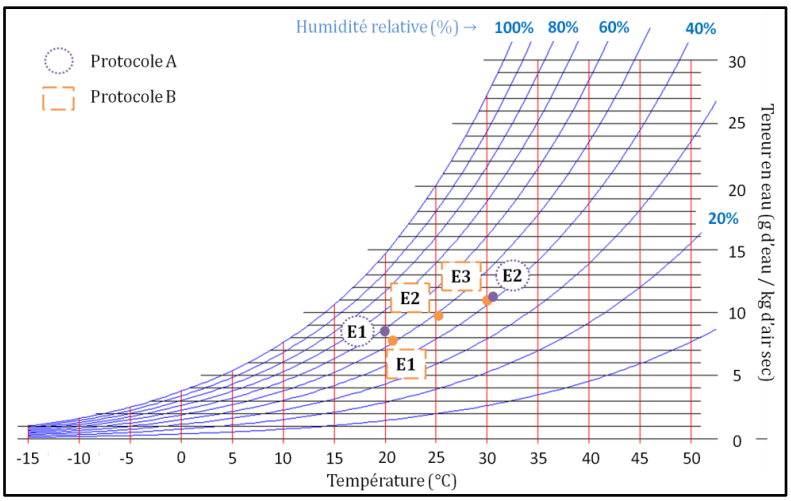


Figure 2.3 : Diagramme psychométrique représentant la teneur en eau des différents environnements thermiques E1, E2 et E3 du protocole A et du protocole B. L'humidité relative est représentée par les lignes obliques bleues, la température ambiante par les lignes verticales rouges et la teneur en eau par les lignes horizontales noires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, la vitesse d'air a été comprise entre 0,3 et 0,4 m s^{-1} durant toutes les expérimentations. Son impact a été considéré comme négligeable.

2.4. Impact du contexte sur les volontaires

Les environnements ont été plus ou moins grands, bruyants, lumineux, avec des odeurs et des dispositions de l'immobilier différentes. D'après le Tableau 2.5, le pourcentage de volontaires gênés par chacune des spécificités des environnements (bruit, odeur, bruit, *etc.*) est différent suivant l'environnement thermique.

Par exemple, dans le protocole B, le pourcentage d'individus gênés par le bruit a été particulièrement plus faible dans l'environnement E1 que dans l'environnement E2-E3 qui est équipé de gros ventilateurs bruyants.

Tableau 2.5 : Caractérisation du contexte des zones d'expérimentation : pourcentage des individus gênés par chacun des éléments (mentionnés dans la colonne de gauche) des environnements. Tableau réalisé à partir des réponses à la question n°6 du questionnaire Q2 et Q3 (cf. Annexe 2) pour les deux protocoles et à partir des remarques exprimées par les volontaires pendant les expérimentations.

Elément gênant du contexte	Protocole A		Protocole B	
	E1	E2	E1	E2 et E3
Couleur	-	-	4%	8%
Odeur	-	-	4%	19%
Bruit	19%	0%	35%	85%
Lumière / Eclairage	23%	8%	27%	31%
Humidité relative	4%	8%	4%	8%
Température ambiante	19%	38%	27%	8%
Termes utilisés pour qualifier l'environnement	-	Endormant, étouffant, sauna	Bureau de travail, entrepôt, laboratoire	Piscine, salle de sport, grand, spacieux

D'après le chapitre précédent, certaines variations de ressenti thermique peuvent donc être liées non seulement à la température ambiante mais aussi aux différentes composantes du contexte (bruit, éclairage, *etc.*). Cependant, pour une première approche exploratoire, il est supposé que l'impact du contexte sur le ressenti est faible et qu'il ne nous empêchera pas de mettre en évidence des tendances concernant les différences interindividuelles de ressenti. Par contre, il sera nécessaire de mettre en place des environnements thermiques moins bruyants et moins différents pour une analyse plus précise.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.5. Caractérisation des groupes présentant des ressentis distincts

Pour analyser les différences interindividuelles de ressenti à partir de mesures physiologiques cutanées, il a été choisi de construire des groupes d'individus qui présentent chacun un « type de ressenti » différent. Ainsi, il suffira d'évaluer si les variables physiologiques de ces groupes sont différentes afin d'établir si il existe un lien potentiel entre les différences interindividuelles de ressenti et les différences interindividuelles physiologiques. Cette partie expose la méthode de construction des groupes et les particularités de chacun des groupes.

2.5.1. Choix du critère de construction des groupes

Les critères utilisés pour mettre en évidence des différences interindividuelles de ressenti thermique varient suivant les études. Par exemple, pour évaluer des différences de confort thermique entre des individus d'âge ou de sexe différent, Fanger s'est basé sur la température ambiante de thermoneutralité (associée à la sensation de "ni chaud, ni froid"), alors que Grivel et Candas, Sassa *et al.* et bien d'autres se sont basés sur la température ambiante "préférée" (associée à un état de confort optimal) [Galeou, Grivel *et al.* 1989]. Très récemment, Yasuoka *et al.* ont étudié les différences interindividuelles de confort thermique grâce à deux groupes formés directement à partir de la température préférée : l'un des groupes préférait des températures supérieures à 29°C et l'autre des températures inférieures à 29°C. Ils ont alors montré que le groupe qui préfère les températures plus chaudes déclare une sensation thermique significativement plus faible et change plus vite de confort thermique au moment de la diminution de la température ambiante (changement progressif de 33°C à 25°C) que l'autre groupe [Yasuoka, Kubo *et al.* 2012]. Cependant, ici, les critères de thermoneutralité et de préférence thermique n'ont pas été sélectionnés pour construire les groupes car ils nécessitent des expérimentations supplémentaires et ils ne fournissent pas d'information sur la sensibilité thermique des individus. En effet, deux individus peuvent avoir la même température de thermoneutralité et/ou préférer la même température ambiante alors qu'ils n'ont pas les mêmes sensibilités au chaud et/ou au froid [Olesen 1982]. Par exemple, dans l'étude de Yasuoka *et al.*, le groupe qui préfère les températures inférieures à 29°C (et non > 29°C) est constitué de 4 personnes sensibles au froid et de 3 personnes non sensibles au froid [Yasuoka, Kubo *et al.* 2012]. Or, dans la vie quotidienne, les plaintes par rapport à la température ambiante sont davantage reliées à des fortes sensibilités (et gênes) thermiques (au froid ou au chaud) plutôt qu'à un manque d'adéquation avec une température

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

de confort. L'Homme ne se plaint pas lorsqu'il se trouve à proximité d'une situation de confort thermique probablement parce qu'il s'adapte physiologiquement facilement. Par contre, lorsqu'il s'éloigne de cette situation de confort, son degré de gêne dépend souvent de sa sensibilité thermique. Par exemple, dans un environnement froid (même si le froid est modéré), un individu sensible au froid a tendance à déclarer une gêne peut-être en lien avec une difficulté à s'adapter physiologiquement au froid, alors qu'un individu non sensible au froid ne ressent pas de gêne particulière, il s'adapte peut-être plus facilement.

Il nous a donc semblé plus judicieux de construire les groupes par rapport à un **critère de sensibilité thermique** et plus particulièrement de **sensibilité au froid** (et aux températures modérées), car, dans un pays tempéré tel que la France et plus particulièrement sur Nantes, la sensibilité au "froid modéré" est souvent plus problématique (dans les environnements climatisés par exemple) que la sensibilité au chaud. Pour former des groupes avec des sensibilités thermiques distinctes, nous nous sommes basés sur les scores de sensation thermique déclarés dans l'environnement E1 (20°C).

Dans chacun des deux protocoles, les sujets ont été confrontés deux fois (sur deux jours consécutifs) à un environnement dont la température était aux alentours de **20°C**. Ils ont déclaré leur sensation thermique à partir de l'échelle du questionnaire QI pour le protocole A et à partir de l'échelle à 7-points de la question n°7 du questionnaire Q2 et Q3 pour le protocole B (cf. annexe 2). Deux groupes ont alors été construits:

- le groupe **G1** est composé de sujets qui ont toujours déclaré des sensations thermiques **supérieures ou égales à -0,5** (entre « ni chaud, ni froid » et « légèrement froid ») ;
- le groupe **G2** est composé de sujets qui ont déclaré au moins une fois (sur les deux jours) une sensation thermique **inférieure ou égale à -1,00** (« légèrement froid »).

Ce choix est conforté par l'indice PMV. En effet, cet indice prévoit un score moyen de sensation thermique de l'ordre de -0,4 dans nos conditions d'expérimentation (Ta = 20°C, v_{air} = 0,3 m s^{-1}, I_{clo} = 0,6). Il peut donc être supposé que les individus qui déclarent un score inférieur ou égal à -1,00 à 20°C sont plus sensibles au froid que la population moyenne.

Les deux expérimentations permettent d'étudier le comportement « sensoriel » et « physiologique » des deux groupes de sensibilité au froid après des transitions chaudes qui devraient modifier différemment l'état de confort de chacun des groupes. Mais ces différentes modifications sensorielles pourront-elles s'expliquer par des comportements physiologiques particuliers ?

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.5.2. Caractérisation non sensorielle des groupes

Les principales caractéristiques des groupes pour le protocole A et B sont réunies dans le Tableau 2.6. Afin d'identifier les limites de l'analyse, les corrélations entre les modalités des groupes de sensibilité thermique (modalité 1 : "pas sensibles au froid" ; modalité 2 : "sensibles au froid") et d'autres facteurs particuliers (évalués à travers le questionnaire Q1), ont été étudiées grâce à une ACP.

Tableau 2.6 : Caractérisation des groupes : Nombre total de sujets et d'hommes, âge et Indice de Masse Corporelle (IMC) (moyenne ± écart type), nombre de fumeur pour chaque groupe.

	Protocole A – seuil de perception		Protocole B – film hydrolipidique	
	Groupe G1	Groupe G2	Groupe G1	Groupe G2
Nb total	6	7	6	7
Nb d'hommes	4	5	5	4
Age (ans)	32 ± 7	30 ± 4	28 ± 2	31 ± 5
IMC (kg m^{-2})	22,6 ± 3,0	23,2 ± 3,2	21,6 ± 1,5	23,5 ± 3,7
Nb Fumeurs	3	2	4	0

Nb : Nombre, IMC : Indice de Masse Corporelle

Les cercle de corrélation de la Figure 2.4 mettent en évidence que la sensibilité thermique des volontaires (représentée par les différents groupes) n'est pas corrélée à d'autres facteurs individuels pour le protocole A alors qu'elle est corrélée au degré de transpiration habituelle et au tabagisme dans le protocole B.

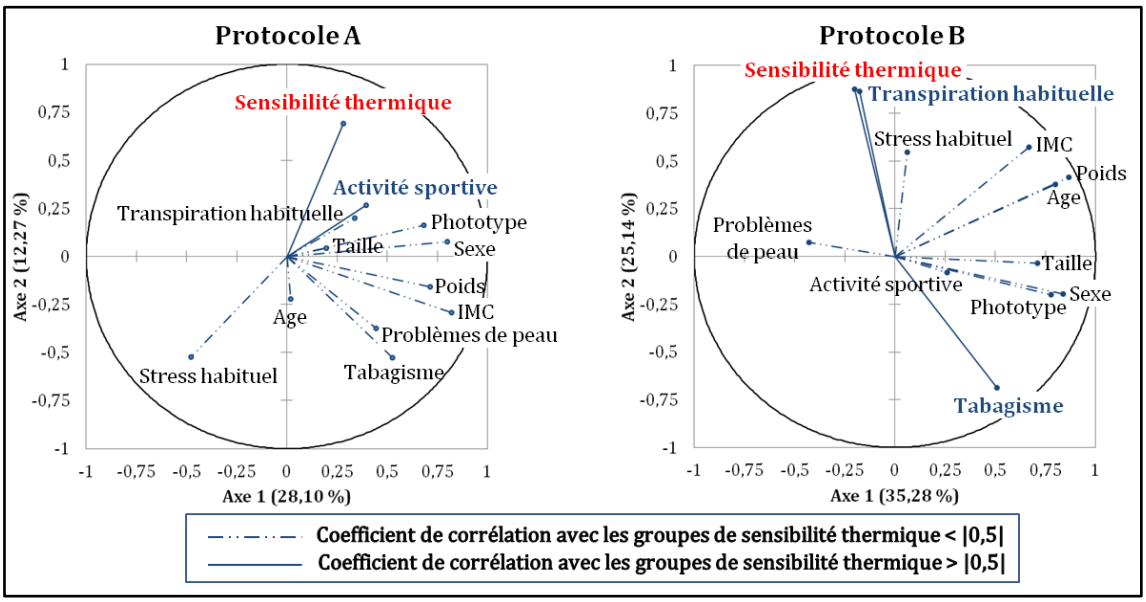


Figure 2.4 : Cercle de corrélation de l'ACP de Spearman représentant le lien entre la sensibilité thermique des volontaires et d'autres caractéristiques des volontaires telles que l'âge, le genre (modalité "femme" codée 1 et modalité "homme" codée 2), etc. Le panel du protocole A est représenté à gauche et celui du protocole B à droite.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les individus qui ne sont pas « sensibles au froid », dans le panel du protocole B, ont tendance à transpirer moins et sont en majorité des fumeurs. Pour le reste de l'analyse, il ne sera pas possible de déterminer, directement, si les effets observés avec les groupes de sensibilité thermique, lors du protocole B, sont réellement liés au degré de sensibilité au froid et pas au tabagisme.

2.5.3. Caractérisation du ressenti des groupes

Le ressenti thermique des deux groupes a changé en fonction des températures ambiantes des environnements, ce qui est en accord avec les nombreuses études conduites sur la sensation thermique et le confort thermique (cf. partie 1.2.3.1. et 0page 58 et 61). En effet, le test des rangs signés de Wilcoxon montre que la sensation thermique est significativement plus élevée dans l'environnement à 30°C après la transition chaude (20°C → 30°C), dans les deux protocoles. Cependant, des différences de ressenti existent entre les deux groupes :

- Contrairement aux individus du groupe « sensible au froid » G2 qui déclarent des sensations thermiques significativement plus élevées dans l'environnement à 25°C que dans l'environnement à 20°C, les individus du groupe G1 ne discriminent pas l'environnement E1 (20°C) et l'environnement E2 (25°C) puisqu'ils n'ont pas déclarés des sensations thermiques significativement différentes dans ces deux environnements.
- La sensation thermique moyenne du groupe G1 est significativement plus élevée que celle du groupe G2 dans l'environnement le plus frais à 20°C (pour le protocole A : $p_{tukey} = 0,016$, pour le protocole B : $p_{mw} < 0,0001$).
- L'écart moyen de sensation thermique (ΔSth) entre l'avant et l'après transition chaude est significativement plus élevé pour le groupe G2 que pour le groupe G1 dans les deux protocoles (pour le protocole A : $p_t = 0,003$ avec ΔSth = 1,0 pour G1 vs. ΔSth = 1,9 pour G2 ; pour le protocole B : $p_{tukey} = 0,006$ avec ΔSth = 0,8 pour G1 vs. ΔSth = 1,8 pour G2)
- Le confort thermique des individus du groupe G2 augmente significativement après les 2 transitions chaudes dans le protocole B (cf. Tableau 2.7) alors que celui des sujets du groupe G1 ne change pas significativement suivant les différents environnements thermiques.
- L'inconfort moyen du groupe G1 est significativement plus faible que celui du groupe G2, dans l'environnement E1 le plus frais ($p_{tukey} = 0,006$), dans le protocole B. Par

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

contre, dans le protocole A, l'état de bien-être n'est pas significativement différent pour les deux groupes.

Tableau 2.7 : Valeurs des p-valeurs du test des rangs signés de Wilcoxon appliqué aux scores de ressenti (sensation thermique, confort thermique, état de bien ou inconfort) de tous les volontaires confondus et par groupe de sensibilité au froid.

		Protocole A		**Protocole B**		
		Sensation thermique	Etat de bien-être	Sensation thermique	Confort thermique	Inconfort
Groupe G1	Transition 20°C à 25°C	-	-	0,450	0,285	0,357
	Transition 20°C à 30°C	0,002	0,239	0,026	0,492	0,066
Groupe G2	Transition 20°C à 25°C	-	-	0,017	0,018	0,141
	Transition 20°C à 30°C	0,001	0,363	0,017	0,042	0,102

Dans le protocole A, le groupe G2 peut être qualifié de « sensible au froid ». En effet, en accord avec la méthode de construction des groupes, le groupe G2 a bien déclaré une sensation thermique moyenne significativement plus faible que celle du groupe G1 dans l'environnement le plus froid alors que les deux groupes ont déclaré une sensation thermique moyenne similaire dans l'environnement le plus chaud. L'écart moyen de sensation thermique entre l'avant et l'après transition chaude est significativement plus élevé pour le groupe G2 que pour le groupe G1. Par contre, il n'y a pas de différence au niveau de l'évolution de l'état de bien-être des deux groupes entre l'avant et l'après transition chaude.

Dans le protocole B, le groupe G2 peut être qualifié de « sensible au froid » pour les mêmes raisons, mais aussi parce que les individus de ce groupe ressentent un inconfort général plus élevé que celui des individus du groupe G1 dans l'environnement le plus frais. Le confort thermique moyen du groupe G2 a également tendance à être plus faible que celui du groupe G1 mais cette tendance n'est pas significative. Par contre, le confort thermique de chaque individu du groupe G2 augmente bien significativement après les deux transitions chaudes, alors que les individus du groupe G1 ne change pas significativement de confort thermique après les transitions chaudes. Les individus du groupe G2 semblent également plus discriminants ou plus sensibles aux changements de température ambiante que les volontaires du groupe G1 puisqu'ils différencient l'environnement E1 (20°C) et E2 (25°C) en termes de sensation thermique. Chaque groupe du protocole B représente une catégorie d'individus avec une sensibilité thermique bien particulière qui se répercute directement sur l'évolution de leur état de confort général lors des transitions chaudes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.6. Etude des seuils de perception thermique

L'étude des seuils de perception thermique correspond à la première phase des expérimentations préliminaires. Elle est associée au protocole A. Elle permet de déterminer si les différences interindividuelles de ressenti thermique peuvent s'expliquer par des différences interindividuelles de sensibilité thermique locale. En d'autres termes, elle consiste à répondre aux questions suivantes : les individus sensibles au froid "modéré" ont-ils des seuils de perception au chaud et/ou au froid significativement plus faibles ou plus élevés que les individus non sensibles au froid ? Ou encore, les individus sensibles au froid "modéré" présentent-ils une activité neurosensorielle particulière ? L'évaluation des seuils de perception thermique a été menée dans deux environnements de température différente afin de déterminer si la température ambiante peut mettre en exergue des différences potentielles entre les individus.

Les résultats seront exposés après la présentation du choix de l'appareil de mesure et des différentes particularités de la détermination des seuils de perception thermique.

2.6.1. Mesure des seuils de perception thermique

2.6.1.1. Choix de l'appareil de mesure des seuils de perception thermique

La majorité des appareils destinée à la mesure des seuils de perception thermique utilise le principe de l'effet Peltier, selon lequel un gradient de température peut être créé dans une plaque grâce au passage d'un courant électrique dans plusieurs jonctions de semi-conducteurs. Le TSA-II NeuroSensory Analyzer (Médoc, Israël) [Medoc 2007] a été sélectionné car il est couramment utilisé [Rambaud 2000] et il présente une forte reproductibilité [Chong et Cros 2004].

2.6.1.2. Dispositif TSA-II

Le TSA-II mesure les seuils de la sensation au chaud et de la sensation au froid grâce à trois éléments essentiels (cf. Figure 2.5) :

- Une thermode posée sur la peau du volontaire.

Ce dispositif est capable d'envoyer un stimulus thermique particulier (chaud, froid) à la surface de la peau. Il est construit autour d'un élément à effet Peltier qui crée un gradient de température (dépendant d'un courant électrique) au niveau de la plaque de contact. Un circuit d'eau permet de refroidir ou de réchauffer la surface opposée à la plaque de contact et trois thermistances contrôlent la température de la plaque de contact et du circuit d'eau.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– Un boîtier de réponse pour l'expression du ressenti

Ce boîtier, mis à la disposition du volontaire, comprend 2 boutons : l'un permet d'exprimer qu'il a ressenti un stimulus : OUI, l'autre permet d'exprimer qu'il n'a rien ressenti : NON.

– Un ordinateur équipé d'un logiciel spécifique

Il gère les différentes méthodes de stimulation grâce à des algorithmes développés pour minimiser les variantes subjectives.

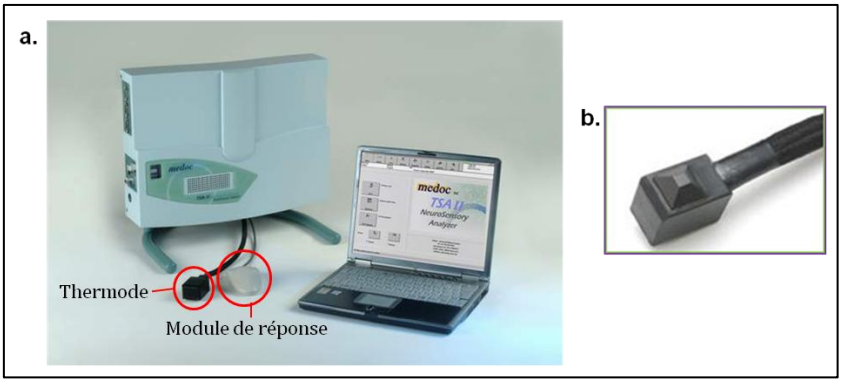


Figure 2.5 : a. L'analyseur neurosensoriel TSA-II (Médoc). b. La thermode (5x5mm) [Medoc 2007]

La plus petite des thermodes disponibles (5x5 mm) a été sélectionnée car il semblerait que la sensation est davantage corrélée à l'innervation épidermique lorsque la thermode est petite [Khalili, Wendelschafer-Crabb *et al.* 2001]. Or, cette particularité est importante puisque nous cherchons à obtenir des informations sur la réponse des fibres nerveuses C et Aδ (et donc sur l'innervation cutanée) à travers, respectivement, la mesure des seuils au chaud et au froid.

2.6.1.3. Méthode de détection des seuils

Il existe différentes méthodes de stimulation. Elles sont répertoriées avec leurs avantages et leurs inconvénients sur la Figure 2.6.

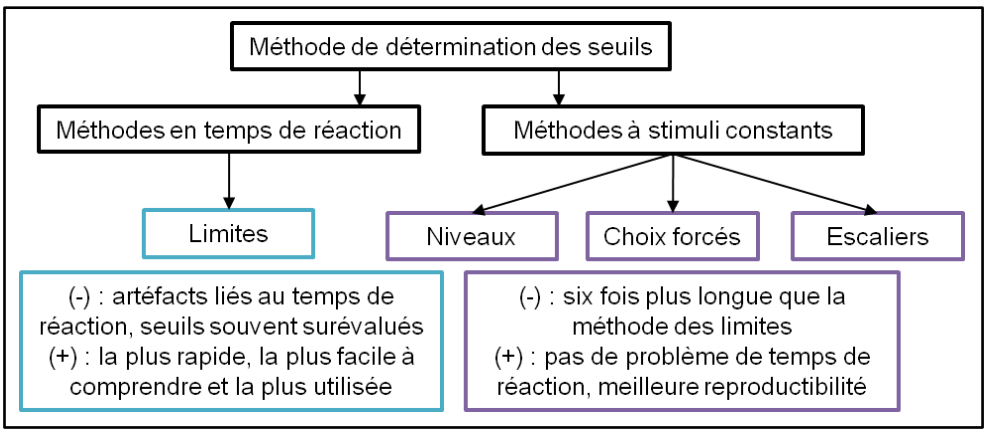


Figure 2.6 : récapitulatif des principales méthodes de détection des seuils de sensation thermique avec leurs avantages et inconvénients. Réalisé à partir de [Rambaud 2000; Medoc 2003]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La **méthode des niveaux** a été sélectionnée car elle est la plus rapide des méthodes (à stimuli constants) indépendantes du temps de réaction des sujets. Reulen *et al.* confortent ce choix en montrant que la méthode des niveaux est préférable à celle des limites[14] [Reulen, Lansbergen *et al.* 2003].

Dans la méthode des niveaux, l'intensité du stimulus est fixe et prédéterminée. Le sujet doit exprimer s'il a ressenti ou non le stimulus après chaque stimulation indiquée par un signal sonore. Avant le début du test, l'opérateur choisit un échelon initial ou un "pas" de température. Les stimuli augmentent par "échelon" prédéterminé jusqu'à la première réponse OUI. Les stimuli diminuent alors par moitié jusqu'à ce que le patient réponde NON. Puis, à chaque changement de direction (OUI↔NON), l'échelon est diminué de moitié et le stimulus augmente après un NON et diminue après un OUI. Le test est terminé quand l'échelon atteint la valeur finale fixée par l'utilisateur (ici, 0,1°C). Le seuil (en °C) est déterminé à partir de la moyenne du dernier OUI et du dernier NON [Medoc 2003].

2.6.1.4. Paramétrage du logiciel

Comme mentionné dans le chapitre 1 (cf. partie 1.2.2. page 53), les seuils de perception sont influencés par des variables telles que la température d'adaptation, la vitesse de changement de la température, *etc.* Ces variables ont été paramétrées de la même façon pour tous les tests à partir des indications de la notice [Medoc 2003] et des conditions les plus courantes. Tous les paramétrages sont indiqués sur la Figure 2.7.

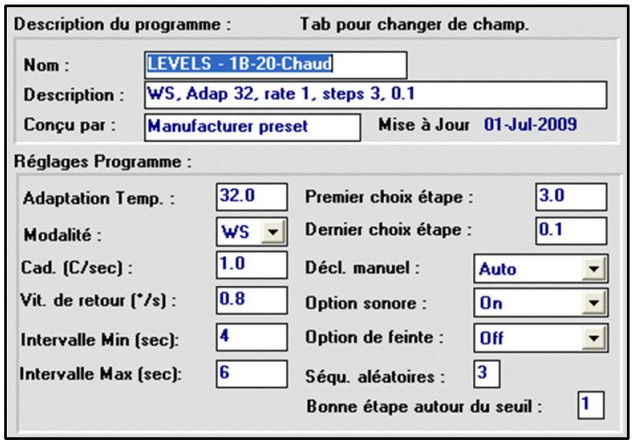


Figure 2.7 : Ecran de paramétrage de la méthode des niveaux : la température d'adaptation vaut 32°C, la vitesse de changement de la température (température d'adaptation → température du stimulus) : 1°C s^{-1}, la vitesse de retour : 0,8°C s^{-1}, le temps minimum et le temps maximum entre deux stimuli : 4 et 6 secondes respectivement, le premier échelon de température : 3°C, l'échelon le plus petit : 0,1°C, le nombre de séquence : 3.

[14] Lors de la méthode des limites, la stimulation thermique augmente progressivement en intensité jusqu'à ce le sujet appuie sur OUI pour mentionner qu'il a perçu une sensation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La température d'adaptation (cf. partie 1.2.2.1. page 53), associée à la sensation de "ni chaud, ni froid", a été fixée à 32°C lorsque la température ambiante était de l'ordre de 20°C et à 33°C lorsque la température ambiante était de l'ordre de 30°C, la température de peau étant plus élevée à 30°C. Le plus petit échelon, correspondant à la précision du seuil, a été fixé à 0,1°C. La valeur de seuil finale qui sera analysée correspond à la moyenne obtenue à partir de trois séries de mesures (sachant que si les réponses d'un volontaire ne sont pas logiques lors d'une série de mesures, le logiciel ne fournit pas de valeur de seuil).

2.6.1.5. Zone de mesure

La mesure a été réalisée sur le visage car c'est une partie du corps particulièrement innervée qui présente une très bonne sensibilité thermique contrairement aux extrémités [Stevens 1998].

La thermode a été positionnée sur la zone maxillaire, traversée par le nerf trijumeau (cf. Figure 2.8). Cette zone a l'avantage d'avoir une densité de poil moins importante que la zone mandibulaire et d'être plus sensible à la pression, aux vibrations et à la discrimination tactile que la zone ophtalmique [Posnick, Zimbler *et al.* 1990]. Les mesures ont été réalisées à droite et à gauche du nez et elles ont été randomisées.

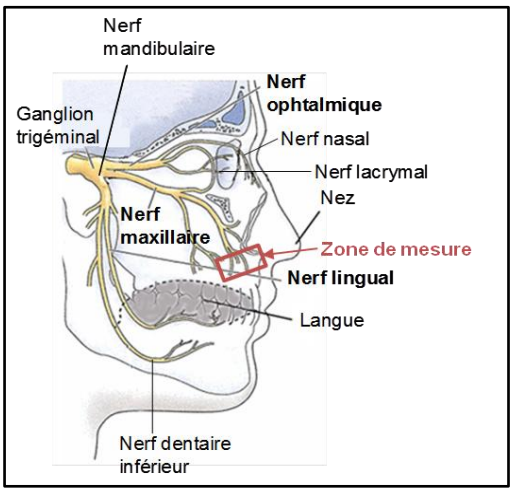


Figure 2.8 : Représentation des branches du nerf trijumeau et en particulier de la branche maxillaire qui innerve la zone de mesure des seuils de perception. Modifié à partir de [Maillet 2011]

Une étude complémentaire avec la mesure des seuils de perception à un courant électrique a également été réalisée sur la même zone. Elle est présentée dans l'annexe 1.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.6.2. Résultats et discussions

2.6.2.1. Fiabilité des mesures : confrontation aux données de la littérature

Cette partie a pour objectif d'évaluer la pertinence des seuils de perception thermique obtenus à l'aide du protocole A. Cette évaluation est réalisée à la fois à partir des informations fournies par la littérature sur les valeurs moyennes, sur la relation entre les seuils au froid et au chaud, sur l'impact de la température ambiante sur les seuils et à partir d'une réflexion sur les valeurs atypiques obtenues au cours de l'expérimentation.

Les valeurs moyennes

Les valeurs moyennes des seuils de perception sont proches de celles obtenues dans la littérature. En effet, la valeur moyenne des seuils de perception du froid obtenue dans des conditions standards (~20°C) est légèrement plus faible que celle obtenue dans l'étude d'Essick *et al.* (-1,1 ± 1,1°C *vs.* -0,8°C) [Essick, Guest *et al.* 2004]. Celle des seuils de perception du chaud (à ~20°C) est également légèrement plus faible que celle obtenue dans cette même étude (1,0 ± 0,4°C *vs.* 1,2°C) (cf. Figure 1.25, page 55). Les faibles différences observées sont probablement liées à la zone de mesure et au contexte qui ne sont pas exactement les mêmes dans notre étude et dans celle d'Essick *et al.* Les valeurs obtenues semblent donc fiables. Seuls quelques seuils de perception, visibles sur la Figure 2.9, ont des niveaux particulièrement élevés et se trouvent en dehors de la gamme de valeurs habituellement mentionnée dans la littérature.

Les valeurs atypiques

Les valeurs extrêmes atypiques sont supérieures à 2°C en valeur absolue. Elles ont, majoritairement, été obtenues dans l'environnement le plus frais à 20°C. Elles ne semblent pas aberrantes puisqu'elles sont obtenues à partir d'une moyenne calculée à partir de trois mesures et que les écarts types associés à ces trois mesures sont relativement faibles (cf. Figure 2.9). Elles reflètent une réelle sensibilité thermique locale individuelle.

Ainsi, le sujet n°10 présente une faible sensibilité locale au froid et au chaud dans les deux environnements ; le sujet n°8 présente une faible sensibilité locale au froid, mais uniquement dans l'environnement le plus frais ; et le sujet n°1 présente une faible sensibilité locale au chaud dans l'environnement E1 (20°C) uniquement sur un côté. La sensibilité du sujet n°10 est peut-être liée à son origine ethnique alors que celle du sujet n°8 est probablement associée à son état thermique dans l'environnement le plus frais. En effet, le sujet n°8 est le seul à avoir déclaré ressentir des frissons et à avoir la "chair de poule". On

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

peut supposer que les frissons et/ou l'horripilation (phénomène pendant lequel les poils se lèvent pour tenter d'emprisonner l'air chaud à la surface du corps) perturbent le mécanisme de transduction spécifique du froid.

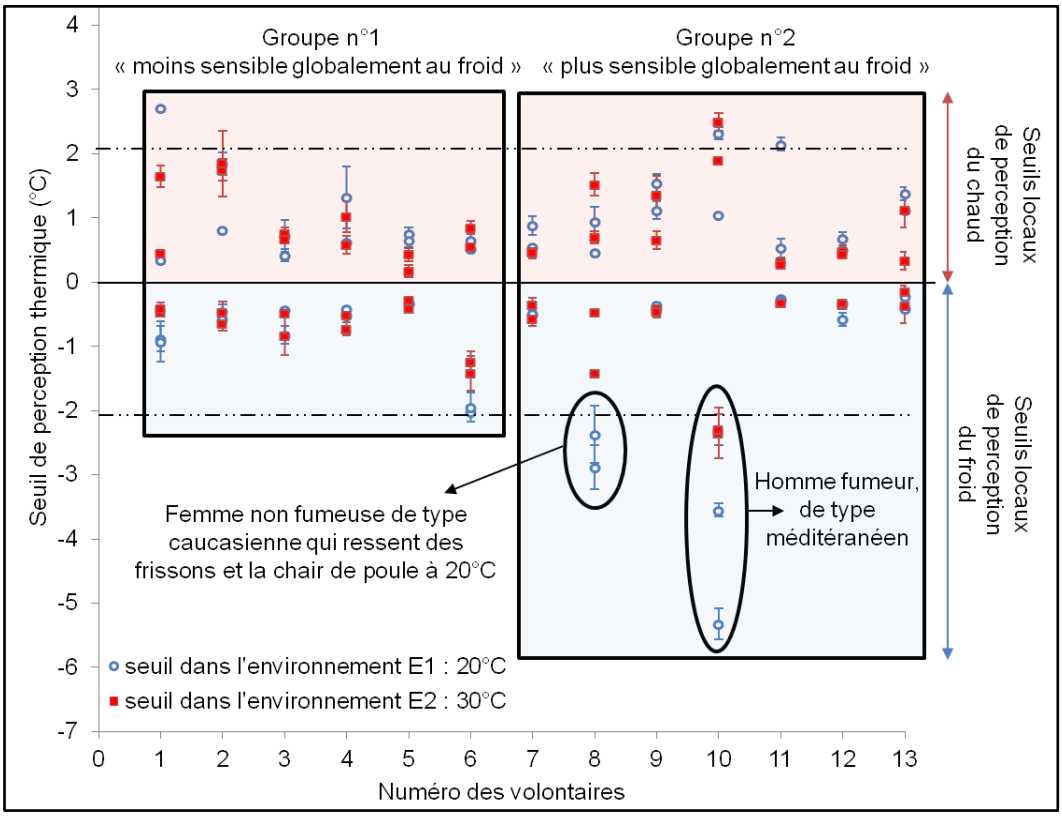


Figure 2.9 : Valeurs moyennes et écarts types des seuils de perception du chaud (valeurs > 0°C) et du froid (valeurs < 0°C) mesurés sur la zone maxillaire droite et gauche du visage, dans l'environnement à ~20°C (ronds bleus) et dans l'environnement à ~30°C (carrés rouges) pour chacun des volontaires.

Quant à la sensibilité du sujet n°1, il semblerait que ce soit une spécificité d'une zone de son visage et que cette spécificité soit accentuée dans l'environnement le plus frais.

Le lien entre les seuils de perception au chaud et les seuils de perception au froid

Dans cette expérimentation, les individus plus sensibles au chaud ont tendance à être plus sensibles au froid. En effet, le test de corrélation de Pearson met en évidence que les seuils au froid (en valeur absolue) sont corrélés aux seuils au chaud ($r = 0,7$) dans l'environnement à 30°C, dans lequel il n'y a pas de valeurs extrêmes. Or, cette relation entre les seuils au chaud et au froid a déjà été mentionnée dans la littérature (cf. partie 1.2.2.2. page 55) et conforte la pertinence des données obtenues.

L'effet de la température ambiante

La température ambiante a eu un impact très ponctuel sur les seuils de sensation au froid (pour le sujet n°8, par exemple). Globalement, la température ambiante n'a pas modifié

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

significativement les seuils de perception du froid et du chaud, puisque la p-valeur du test des rangs signés de Wilcoxon, comparant les données obtenues dans E1 et celles obtenues dans E2, est de l'ordre de 0,2 pour les seuils au froid et de l'ordre de 0,3 pour les seuils au chaud. Ce résultat est plutôt en accord avec la littérature qui mentionne que les seuils de perception ne changent pas lorsque la température cutanée augmente entre 27°C et 37°C [Hagander, Midani *et al.* 2000]. Ici, l'augmentation de la température ambiante (de 20°C à 30°C) a bien engendré une augmentation de la température de joue (moyenne : 31,6°C à 20°C et 34,4°C à 30°C) d'environ 2,8°C (minimum de variation : 0,7°C ; maximum de variation : 3,7°C), mais pas de changement des seuils de perception. Ceci était prévisible et témoigne encore une fois de la pertinence des données.

2.6.2.2. Lien entre la sensibilité thermique globale et la sensibilité thermique locale

Cette partie vise à déterminer si le groupe G2 sensible « globalement » au froid présente des seuils de perception thermique significativement différents de ceux du groupe G1.

Les données brutes des seuils au froid et au chaud ont été transformées selon la méthode décrite dans partie 2.2.1.3. (cf. page 119), afin que leurs distributions soient normales et qu'elles puissent être analysées par des tests paramétriques tels que le test de l'ANOVA à deux facteurs. La transformation $y = \frac{1}{\sqrt{|x|}}$ est appliquée aux seuils de perception du froid et la transformation $y = \ln(x)$ est appliquée aux seuils de perception du chaud. Les résultats du test de l'ANOVA à deux facteurs avec interaction sur les données brutes transformées des seuils de perception sont répertoriés dans le Tableau 2.8. Le premier facteur est l'environnement thermique, le deuxième, le groupe de sensibilité thermique. Le tableau montre que le groupe G2 sensible au froid ne présente pas une sensibilité thermique locale moyenne (ou des seuils de perception au chaud et au froid) significativement différente du groupe G1 non sensible au froid. L'absence de significativité est également présente lorsque les deux sujets présentant des valeurs particulièrement atypiques sont éliminés de l'analyse.

Tableau 2.8 : Significativité p du test de l'ANOVA à 2 facteurs (facteur 1 : température ambiante, facteur 2 groupe de sensibilité "globale" au froid) avec interaction appliqué aux valeurs transformées des seuils de perception

Facteurs	Seuil au froid (SF)	Seuil au chaud (SC)
Environnement thermique	0,648	0,283
Groupe de sensibilité au froid	0,588	0,843
Interaction	0,835	0,629

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Quel que soit l'environnement thermique (E1 ou E2), les conclusions sont les mêmes puisque l'effet de l'interaction « environnement * groupe » est non significatif. La température ambiante des environnements thermiques n'a pas permis de mettre en évidence des différences de sensibilité thermique locale.

Même si la Figure 2.10 montre que la valeur moyenne et/ou la médiane des seuils de perception au froid dans l'environnement à 20°C et à 30°C et des seuils de perception au chaud obtenus dans l'environnement à 30°C ne sont pas identiques pour les deux groupes de sensibilité thermique "globale", les différences ne sont pas statistiquement significatives.

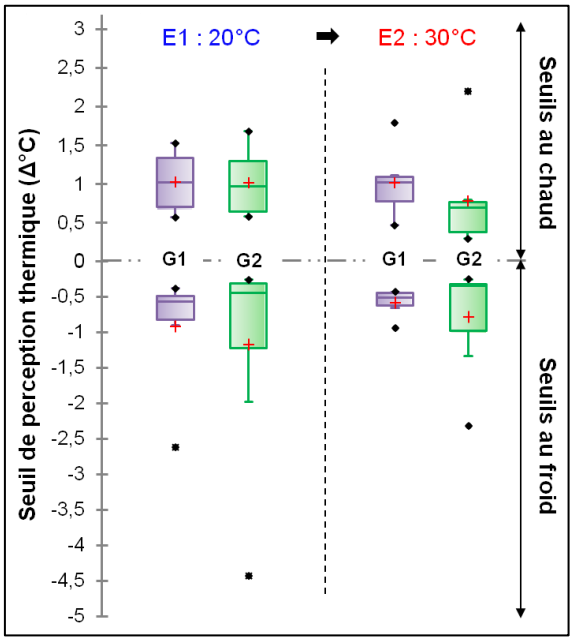


Figure 2.10 : Boîte de Tukey comparant les seuils de perception au chaud et au froid du groupe G1 non sensible « globalement » au froid et du groupe G2 sensible « globalement » au froid dans l'environnement frais E1 (20°C) et dans l'environnement chaud E2 (30°C).

Les différences de sensibilité thermique « globale » entre les volontaires de ce panel ne semblent donc pas s'expliquer par des différences de sensibilité thermique locale, représentée ici par les seuils de perception thermique.

Cette absence de lien entre l'activité neurosensorielle et la sensibilité thermique « globale » est renforcée par les résultats sur les seuils de perception à un courant électrique présentés dans l'annexe 1. Les deux groupes de sensibilité globale au froid ne présentent pas de différences significatives au niveau de leur sensibilité locale à un courant électrique stimulant les fibres Aδ (véhiculant l'information de froid) et à un courant électrique stimulant les fibres C (véhiculant l'information de chaud). Cependant, il peut être constaté que la tendance observée à 30°C sur la plus forte sensibilité au chaud du groupe G2 dans un environnement chaud se retrouve avec les seuils à 5Hz (stimulant les fibres C véhiculant

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'information de chaud). L'absence de significativité est peut-être liée à un ou deux sujets du groupe G2 qui ne sont pas suffisamment sensibles au froid pour appartenir au groupe G2. Il serait nécessaire d'inclure davantage de sujets dans l'analyse pour conclure.

Suite aux résultats de cette approche exploratoire, l'activité neurosensorielle ne semble pas être un bon paramètre pour caractériser les différences de sensibilité globale au froid.

Cependant ceci ne signifie pas que l'activité neurosensorielle ne serait pas un bon indicateur pour caractériser les différences de sensibilité au chaud par exemple. D'ailleurs, en effectuant une analyse similaire sur des groupes construits à partir des sensations thermiques dans l'environnement le plus chaud (E2), il a pu être mis en évidence que le groupe qui déclare des sensations thermiques plus élevées dans E2 a une sensibilité locale au froid qui augmente dans l'environnement E2 à 30°C (p_w = 0,04 : SF(E1) = -1,0 vs. SF(E2) = -0,6). L'autre groupe ne montre pas d'évolution particulière de ses seuils de perception en fonction de la température ambiante. Le lien entre la sensibilité thermique locale et globale semble donc possible, même si il n'a pas pu être mis clairement en évidence lors de cette expérimentation.

Des différences d'activité neurosensorielle seraient peut-être davantage significatives pour des individus présentant des différences de sensibilité thermique globale plus fortes que dans cette expérimentation. La confrontation à des environnements thermiques plus extrêmes pourrait peut-être également permettre de mettre en évidence des différences significatives.

D'autre part, il est important de préciser que la classification ascendante hiérarchique (CAH) appliquée aux données de seuils de perception thermique permet de mettre en évidence des groupes d'individus présentant chacun une sensibilité thermique locale significativement différente. Cependant, ces groupes ne sont pas caractérisés par une sensibilité thermique "globale" particulière. Ces groupes sont probablement caractérisés par un autre critère que nous ne sommes pas parvenus à identifier avec les informations récupérées au cours de cette expérimentation. Des différences interindividuelles sont donc présentes aussi bien au niveau de la sensibilité thermique locale, qu'au niveau de la sensibilité thermique globale mais les différences de l'une ne semblent pas expliquer les différences de l'autre.

2.7. Etude des propriétés thermo-vasculaires cutanées

La température cutanée est connue pour varier en fonction de la température ambiante tout comme le ressenti thermique. D'ailleurs, elle est souvent intégrée dans les modèles de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

prédiction de la sensation thermique. Elle permet de prévoir les différences intra-individuelles de ressenti thermique. Cependant, aucune étude, à notre connaissance, n'a utilisé ce paramètre pour caractériser les différences interindividuelles de ressenti thermique. Cette partie a donc pour objectif d'évaluer si les groupes distincts de sensibilité thermique au froid présentent des propriétés thermiques significativement différentes susceptibles d'expliquer leur ressenti thermique déclaré et l'évolution de leur état de confort après une transition chaude. Comme les propriétés thermiques sont liées aux propriétés vasculaires, il a été choisi de compléter cette analyse avec une étude de l'activité microcirculatoire. Pour des raisons de coût et de facilité de mise en place des mesures, une mesure indirecte a été choisie pour approximer, dans un premier temps, l'activité microcirculatoire cutanée. Cette mesure correspond à l'évaluation de la couleur de peau. Contrairement à la température de peau qui a été mesurée à la fois dans le protocole A et dans le protocole B, la couleur de peau n'a été mesurée que dans le protocole B. Les résultats seront discutés après la réflexion sur le choix des méthodes de mesures et après la présentation des différentes particularités des mesures.

2.7.1. Mesures des propriétés thermo-vasculaires

2.7.1.1. Mesure de la température cutanée

2.7.1.1.1. Choix de l'appareil de mesure

La partie 1.2.3.3. du chapitre précédent (page 64) indique que la mesure de la température de peau sans contact a été privilégiée dans cette étude. Toutes les mesures sans contact ont pour objectif de simuler la distribution spatiale de la température d'une scène à partir de la détection du rayonnement électromagnétique situé dans l'infrarouge (IR).

En effet, tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique dont l'énergie (E en W m^{-2}) est fonction de sa température de surface absolue (T en °K) :

$$E = \sigma.\varepsilon.T^4 \qquad \textbf{[2.7-1]}^{15}$$

Avec σ : la constante de Stefan-Boltzmann (5,7 10^{-8} W m^{-2} K^{-4})

ε : émissivité de la surface (entre 0 et 1 et vaut ~ 0,98 pour la peau) (cf. note 4, page 20).

Comme la peau a une température qui peut s'étendre entre environ 20°C (dans un environnement plutôt froid) et 37°C (dans un environnement plutôt chaud) [Agache 2000h],

[15] Cette équation correspond à la loi de Stefan-Boltzmann, elle se déduit de la loi de Planck

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

elle émet un rayonnement compris entre 2 et 20 µm avec un maximum d'émission[16] aux alentours de 9 et 10 µm [Hassan, Chernomordik *et al.* 2006]. Ce rayonnement se trouve bien dans la zone de l'infrarouge (0,75 µm – 1 mm).

Il existe plusieurs types de caméras IR destinées à des applications parfois très différentes : industrielles, militaires ou encore médicales. Il est évidemment impossible de décrire toutes les technologies existantes.

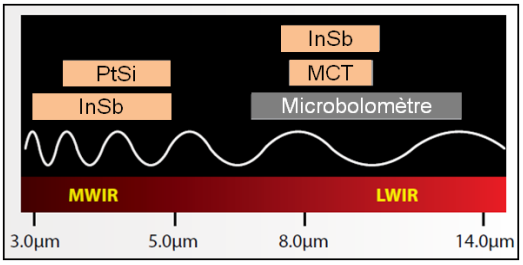


Figure 2.11 : Exemples de différents détecteurs utilisés dans les caméras IR associés à leur bande spectrale de détection. Sur fond gris : détecteur thermique, sinon détecteur quantique. MWIR : Moyennes longueurs d'onde IR et LWIR : Longues longueurs d'onde IR [FLIR 2012]

Cependant, deux types de caméras IR peuvent se distinguer, selon leur gamme de détection (cf. Figure 2.11), sachant que chaque gamme correspond à une zone où l'absorption atmosphérique est faible :

– **des caméras longues longueurs d'onde**

Leur bande spectrale de détection est comprise entre 7 et 12,5 µm. Elles fonctionnent dans la bande d'absorption IR de l'eau. Or, comme le stratum corneum contient environ 30% d'eau, la mesure de température est très superficielle. Cette particularité est un inconvénient pour des applications dermatologiques [Agache 2004b]. Leur détecteur peut être de deux types :

- Soit thermique avec une matrice de microbolomètres (résistance électrique variant en fonction de la température) non refroidis placés dans le plan focal de l'objectif (type FPA)[17]. Cette technologie est relativement peu chère, facile à mettre en œuvre et offre une bonne qualité d'image thermique [Zani 2001].
- Soit quantique avec des capteurs réalisés à partir de HgCdTe (Mercure, Cadmium, Telluride : MCT) ou recouverts de GaAs/AlGaAs (photodétecteur infrarouge à puits quantiques : QWIP). Ils sont intégrés à un système cryogénique qui fait descendre leurs températures à une valeur extrêmement

[16] Il est obtenu grâce à la loi du déplacement de Wien

[17] FPA : "Focal Plane Array". Nouvelle technologie qui remplace le système à balayage mécanique. Les différentes cellules du détecteur mesurent simultanément le rayonnement émis par tous les points de l'image. Cette technologie offre une meilleure résolution temporelle, thermique et spatiale [Zani 2001].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

basse, afin que le bruit lié à la chaleur reste inférieur au signal provenant de la scène. Ce système est très coûteux mais plus rapide et plus sensible que les détecteurs thermiques.

- **des caméras moyennes longueurs d'onde**

Leur bande spectrale de détection est comprise entre 2 et 5,5 µm c'est-à-dire en dehors des zones de forte absorption de l'eau [Agache 2004b]. Leur détecteurs sont quantiques (InSb ou PtSi) et donc refroidis et coûteux. Elles sont plus sensibles aux petites différences de température sur la scène observée [Pajani et Audaire 2001] car le rayonnement émis par les faibles longueurs d'onde croît plus rapidement en fonction de la température que celui émis par des longueurs d'onde plus élevées (selon la loi de Planck). Elles sont plus sensibles aux rayons solaires et la transmission atmosphérique est plus faible [Zani 2001].

Face aux contraintes de coût, une **caméra longues longueurs d'onde** avec un **détecteur thermique** (matrice de microbolomètres non refroidis) a été utilisée pour mesurer la température de peau. En effet, **le modèle Thermacam A20-M** (FLIR system) nous a semblé suffisant puisqu'il permet d'observer des différences de température superficielle d'à peine 0,12°C entre -20°C et 100°C grâce à des images de 160 x 120 pixels avec une fréquence d'acquisition pouvant atteindre 50 Hz. De plus, l'exactitude de mesure est conforme à la norme du secteur c'est-à-dire ± 2°C.

2.7.1.1.2. Mesure par thermographie IR avec la caméra IR A20-M de Flir System

L'énergie IR provenant d'une scène particulière (ici : d'une partie du corps humain) est focalisée par l'optique sur le détecteur thermique IR. Ce détecteur envoie les informations à la partie électronique du capteur qui convertit les mesures du rayonnement IR en une image où chaque pixel correspond à une mesure de température.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

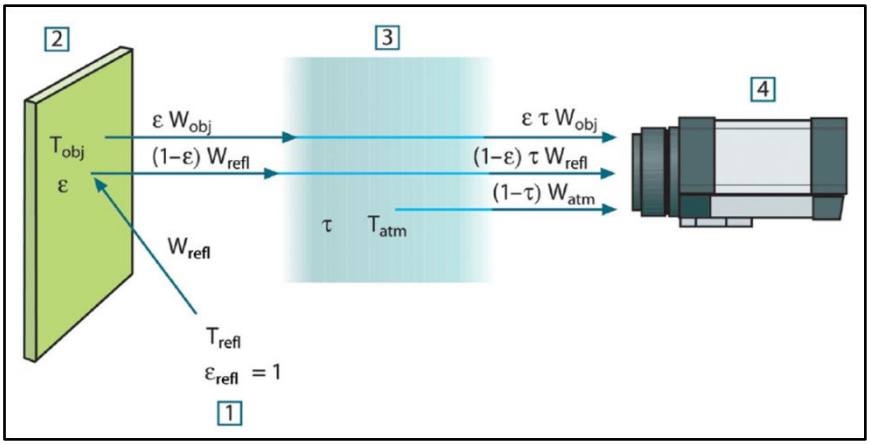


Figure 2.12 : Représentation schématique de la situation de mesure thermographique. 1 : environnement, 2 : objet ou zone du corps, 3 : atmosphère, 4 : caméra, ε : l'émissivité de l'objet, τ : facteur moyen de transmission atmosphérique, W_{obj} : rayonnement perçu provenant de l'objet, W_{refl} : rayonnement perçu provenant de la réflexion sur l'objet des sources ambiantes, W_{atm} : rayonnement perçu provenant de l'atmosphère. [FLIR 2005]

La Figure 2.12 représente la situation de mesure thermographique et permet de déduire l'expression de la tension de sortie mesurée par la caméra (puisque la tension U est proportionnelle au rayonnement perçu W) :

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1-\varepsilon)\tau U_{refl} + (1-\tau)U_{atm} \qquad \textbf{[2.7-2]}$$

U_{obj}, U_{refl} et U_{atm} sont des tensions de sortie théoriques de la caméra pour un corps noir avec une température équivalente à celle de la température de l'objet (T_{obj}), de la température réfléchie (T_{refl}) et de la température ambiante (T_{atm}) respectivement. La relation entre la tension de la caméra et la température a été établie grâce à un étalonnage avec un corps noir.

Il est alors possible de remonter à U_{obj} et donc à la température de l'objet. La température réfléchie, la température ambiante, l'émissivité de l'objet (ε) sont saisies manuellement dans le logiciel par l'expérimentateur et le facteur de transmission atmosphérique (τ) est déduit à partir de la distance de mesure, du taux d'humidité relative et de la température de l'atmosphère indiqués également par l'expérimentateur.

Toutes ces valeurs saisies par l'expérimentateur présentent une incertitude. C'est une des raisons pour laquelle l'incertitude de mesure déclarée par le constructeur est élevée et de l'ordre de ± 2°C.

2.7.1.1.3. Stratégies de réduction de l'incertitude de mesure

Les stratégies suivantes ont été mises en place afin de mieux maîtriser et de réduire l'incertitude de mesure déclarée par le constructeur :

– un étalonnage avec un corps noir étendu (de 20 à 40°C) a été demandé à Flir Systems.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Il a alors été établi, qu'au minimum, l'incertitude est de l'ordre de ± 0,5°C (sans prendre en compte les incertitudes des valeurs rentrées par l'expérimentateur).

– une attention particulière a été portée à la scène de mesure.

Toutes les sources de réflexions, les sources infrarouges et les tâches solaires ont été minimisées voir éliminées. La distance entre la caméra et le sujet est restée fixe.

– Les paramètres environnementaux ont été mesurés précisément.

La température ambiante et l'humidité relative ont été mesurées, avant chaque mesure, avec un thermohygromètre étalonné pour réduire l'incertitude des valeurs saisies dans le logiciel.

– la température d'une zone a été moyennée sur plusieurs pixels et plusieurs images.

Les mesures ont été réalisées sur une durée courte de 30 secondes pour que les sujets ne soient pas gênés par une immobilisation trop longue. Mais une fréquence d'acquisition de 50 Hz a été choisie afin de moyenner sur un maximum d'images (1500). De plus, chaque zone analysée sur l'image (120 x 160 pixels) contenait une dizaine de pixels.

2.7.1.1.4. Traitement des images IR

Afin de récupérer la valeur des températures de certaines zones du corps, les images IR sont analysées, grâce à un programme développé sous Matlab. Les différentes étapes de l'analyse sont les suivantes :

– Sélection manuelle des zones d'intérêt d'une dizaine de pixels sur la première image
– Calcul d'une moyenne (+écart type) sur les 10 pixels de chaque zone sur chaque image
– Puis, calcul d'une moyenne (+écart type) pour chaque zone sur les 1500 images

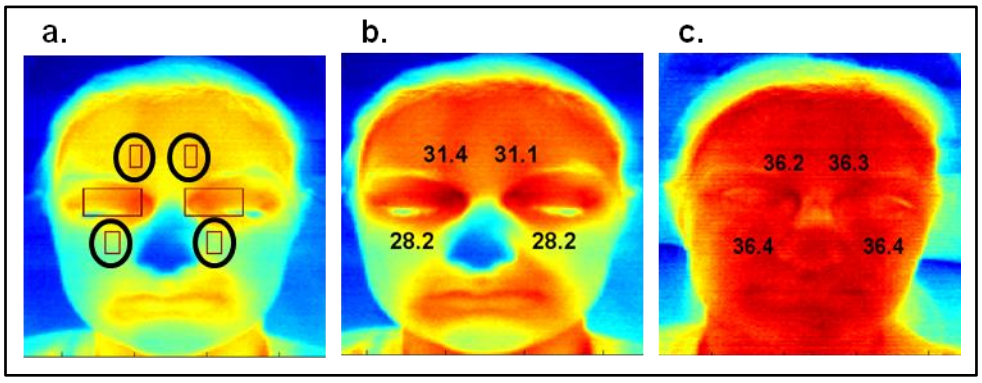


Figure 2.13 : Traitement des images infrarouges : a. positionnement manuel des zones d'intérêts qui sont entourées en noir, b. exemple d'affichage de la température moyennée sur la zone d'intérêt – image IR faite dans une ambiance froide, c. image IR réalisée dans une ambiance chaude

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les zones ont toujours été positionnées sur l'axe frontal de la caméra (par exemple, la partie des joues située sur les côtés n'a pas été sélectionnée) car le facteur de forme du visage peut avoir un impact sur la mesure de température par thermographie IR.

2.7.1.2. Mesure de la couleur de peau

2.7.1.2.1. Choix de l'appareil de mesure

Parmi toutes les techniques de mesures de la couleur de peau regroupées dans le Tableau 2.9, la spectrophométrie a été sélectionnée car elle fournit, facilement, à la fois les coordonnées (L*a*b*) de la couleur de peau et le spectre d'absorption de la peau.

Tableau 2.9 : Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de mesure de la couleur de peau. CIE signifie Commission Internationale de l'Eclairage. [Fullerton, Fischer *et al.* 1996; Piérard 1998; Agache 2000d]

Méthodes	Outils de mesure	Avantages	Inconvénients
Evaluation visuelle	Œil humain + échelle de cotation ou nuanciers chromatiques	Disponible en tout lieu Information subjective de la perception	Eclairage standardisé nécessaire Peu reproductible
Colorimétrie tristimulus Mesure de la lumière rétrodiffusée après filtrage de 3 couleurs : rouge, bleu, vert (RVB)	Lumière blanche + filtres + 3 photocellules + le système de la CIE (coordonnées L*a*b*) Chromameter CR-300	Facile d'utilisation Non encombrant Bonne reproductibilité	Information sur la couleur sans référence exacte aux chromophores
Spectrocolorimétrie ou spectrophotométrie dans le domaine du visible (λ : 400 – 700 nm)	Lumière polychromatique + photodiodes couvertes d'un filtre Spectrophotomètres Minolta, Zeiss	Information sur le spectre d'absorption + coordonnées L*a*b* Facile d'utilisation Bonne reproductibilité	Interprétation des spectres difficile
Analyse d'images en couleur	Images prises par un caméscope + algorithme de traitement	Plus efficace que l'évaluation visuelle, adapté pour comparer différentes zones	Hautement dépendant de la reproductibilité de l'éclairage

Le spectrocolorimètre CM 2600-d (Konica Minolta, Japon) a été utilisé. Contrairement à certain spectrocolorimètre qui n'analyse que des bandes étroites du spectre (spécifiques d'un chromophore), le CM-2600d de Minolta balaie tout le spectre entre 360 et 740 nm (avec des pas de 10nm). Dans le chapitre sur les expérimentations préliminaires, seules les coordonnées dans le système L*a*b* ont été exploitées, alors que dans le chapitre sur la campagne de mesure, une analyse fine du spectre d'absorption a également été effectuée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.7.1.2.2. Principe du spectrocolorimètre

Le spectrocolorimètre éclaire l'échantillon (grâce à une ouverture de 3 ou 8 mm) avec une lumière polychromatique grâce à 3 flashs successifs au xénon. Puis, la lumière réfléchie est dirigée jusqu'à un réseau holographique (ou réseau de diffraction permettant la séparation spectrale) et la détection monochromatique est effectuée grâce à une matrice de photodiodes au silicium recouvertes chacune d'un filtre. La proportion de l'énergie rétrodiffusée à chaque longueur d'onde est analysée.

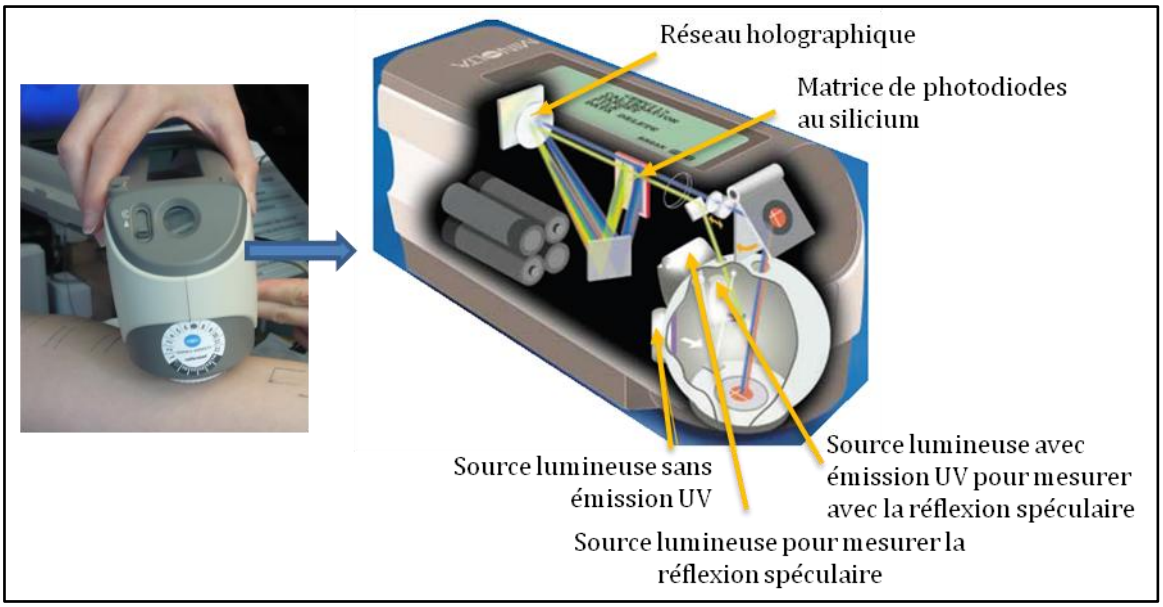


Figure 2.14 : A gauche : Mesure avec le spectrocolorimètre CM-2006d de Minolta. A droite : Principe de mesure du spectrocolorimètre [Konica-Minolta 2007]. Cet appareil est doté d'un contrôle numérique des UV (utile pour mesurer la couleur d'échantillons traités par des azurants optiques qui absorbent dans les UV et réémettent par fluorescence dans le visible, utilisés pour créer une certaine blancheur) et d'un contrôle numérique de la brillance en incluant ou excluant la composante spéculaire. Ces particularités ne seront pas exploitées pour la mesure sur la peau.

Le spectre de rétrodiffusion de la peau peut alors être obtenu et analysé grâce au logiciel Spectramagic. La sélection automatique par l'appareil de 3 longueurs d'onde de référence ou de 3 couleurs (Rouge : 610 nm, Vert : 550 nm, Bleu : 450 nm) permet de calculer également les coordonnées L*a*b*. Ce sont ces coordonnées qui seront analysées dans cette étude.

L'ouverture de 8 mm a été sélectionnée afin d'obtenir la couleur "moyenne" d'une zone relativement grande. Une calibration du blanc (associé au 100% de rétrodiffusion) et du noir (associé à 0% de rétrodiffusion) a été effectuée avant chaque série de mesures.

La mesure a été réalisée sur la joue car elle présente une forte vasomotricité.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.7.1.2.3. Coordonnées de la couleur dans le système CIELAB

Pour bien interpréter les coordonnées L*, a*, b* fournies par le spectrocolorimètre, il est important de bien comprendre ce que représente le système CIELAB[18] [Weatherall et Coombs 1992]. Ce système permet de classer l'ensemble des couleurs existantes dans un volume virtuel grossièrement cylindrique placé dans un espace cartésien à 3 dimensions (cf. Figure 2.15). Il permet de mesurer 3 paramètres : la **luminance** ou la **clarté**, la **chromaticité** ou la **teinte** et la **saturation** ou la **vivacité**. Chaque couleur est un point défini par les 3 coordonnées L*, a*, b*.

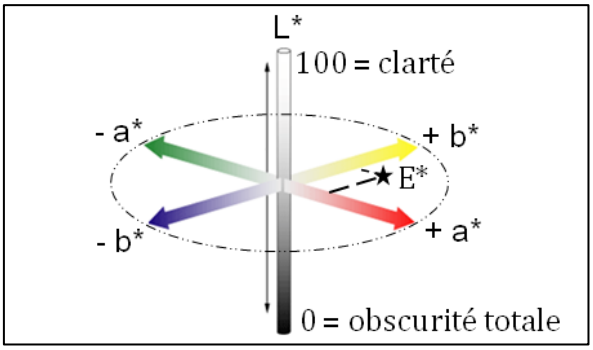


Figure 2.15 : Le système L*a*b* de classification des couleurs. L* : luminance ou clarté. [Agache 2000d]

Le plan horizontal rassemble toutes les teintes possibles. La distance à l'origine mesure le degré de saturation : teinte éteinte près du centre et teinte vive aux extrémités. Le plan comprend deux axes perpendiculaires : l'un qui s'étend du vert (-a*) au rouge (+a*) et l'autre du bleu (-b*) au jaune (+b*). Ces deux axes permettent de définir les coordonnées de chromaticité d'une couleur. (cf. Figure 2.15).

La couleur de la peau résulte de la combinaison de l'absorption et de la diffusion de la lumière dans la peau. La **diffusion** est due à la présence de particules non absorbantes et d'interfaces entre les milieux de natures différentes. Dans la couche cornée, ce sont principalement les filaments de kératine (formant une structure cristalline) qui diffractent ou diffusent la lumière, alors que dans le derme, ce sont les fibres de collagène [Pierard et Uhoda 2005] (cf. Figure 2.16).

[18] Il existe d'autres systèmes de classement des couleurs tel que celui de Munsel (Yxy). Le système de la commission internationale de l'éclairage L*a*b* est couramment utilisé pour les mesures de couleur de la peau.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

L'**absorption** est principalement liée à la présence de 4 chromophores [Stewart, Bernhard *et al.* 2003; Pierard et Uhoda 2005] (cf. Figure 2.16) :

- la **mélanine** au niveau de l'épiderme et du derme superficiel qui comprend l'eumélanine (brun foncé) et la phaeomélanine (jaunâtre à rouge brunâtre)
- les **caroténoïdes** (jaunâtres) au niveau de l'épiderme qui sont des lipides d'origines exogènes
- l'**oxyhémoglobine** (rouge vif) au niveau de la couche papillaire du derme qui se trouve principalement dans les **artérioles** et les **capillaires**
- la **désoxyhémoglobine** (ou hémoglobine réduite – rouge bleuâtre) au niveau du **plexus veineux sous papillaire**.

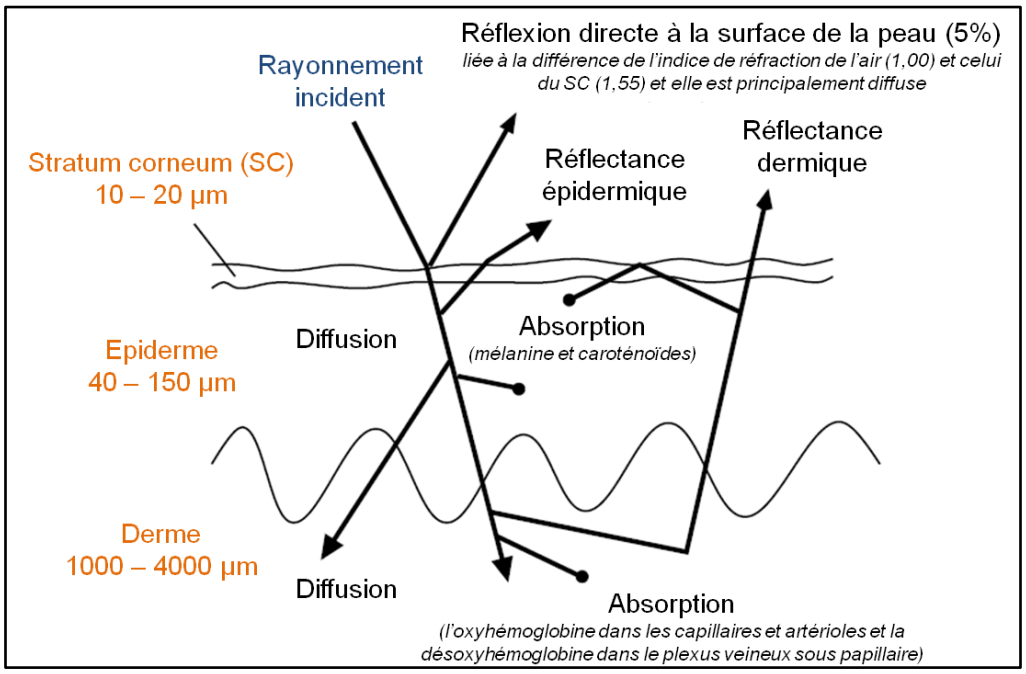


Figure 2.16 : Interaction de la lumière avec la peau. Modifiée à partir de [Fitzpatrick et Freedberg 2003]

Une variation des coordonnées (L*a*b*) peut, en général, s'expliquer par une modification de la quantité de l'un de ces chromophores et principalement de la mélanine et de l'hémoglobine.

Le **jaune** (+b*) est en relation avec le bleu absorbé principalement par la mélanine et légèrement par l'hémoglobine du plexus vasculaire sous-épidermique. Le **rouge** (+a*) est en relation avec le vert absorbé par la désoxyhémoglobine (Hb) et l'oxyhémoglobine (HbO_2) du plexus sous épidermique. Le **bleu** (-b*) est en relation avec le jaune absorbé par HbO_2 dans le derme superficiel [Agache 2000d].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La variation de la quantité d'hémoglobine dans la peau est souvent évaluée à partir de a* et la variation de la quantité de mélanine à partir de L*. Cependant, L* est susceptible de diminuer quand a* augmente et a* est susceptible d'augmenter quand L* diminue [Takiwaki, Miyaoka *et al.* 2002].

2.7.1.3. Zones de mesures et paramètres à analyser

Comme mentionné dans le chapitre précédent (cf. partie 1.2.3.3. page 64), le visage est une zone privilégiée pour les mesures de température de peau. En effet, le visage est une zone découverte, sans protection et en interaction permanente avec l'environnement. En accord avec cette même partie de l'état de l'art, les paramètres thermiques analysés ont été les suivants :

- Les températures locales de joue et de front
- les écarts de température entre le front et la joue

Les températures de joue et du front analysées correspondent à la moyenne de la température obtenue à gauche et de celle obtenue à droite de l'axe central du visage.

Pour cette phase exploratoire, la température a été mesurée uniquement sur le visage afin de faciliter la mise en place de la mesure.

La mesure de la couleur de peau a également été effectuée sur le visage et plus précisément sur une des deux joues (gauche/droite). Les mesures ont été randomisées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.7.2. Résultats et discussions

2.7.2.1. Fiabilité des mesures : confrontation aux données de la littérature

2.7.2.1.1. Températures cutanées locales

Les moyennes et les écart-types des températures de peau sont regroupés dans le Tableau 2.10. Il est difficile de comparer directement les valeurs moyennes obtenues dans cette étude avec celles obtenues dans d'autres études répertoriées dans la littérature. En effet, la température des environnements thermiques, l'isolation vestimentaire des volontaires ainsi que l'âge des volontaires sont différents d'une étude à une autre et ces différences se répercutent directement sur les températures cutanées mesurées.

Tableau 2.10 : Valeurs moyennes et écart types des températures de front, de joue et des écarts de température entre le front et la joue obtenus sur 13 volontaires dans chacun des deux protocoles A et B et dans des environnements thermiques différents.

Paramètres		Température de Front TF (°C)		Température de Joue TJ (°C)		Ecart de température entre front et joue TFJ (°C)	
Protocole		A	B	A	B	A	B
Environnement Thermique	E1 - 20°C	32,5 ± 0,7	32,2 ± 0,6	31,4 ± 1,1	31,4 ± 1,1	1,1 ± 1,1	0,8 ± 1,0
	E2 - 25°C	-	33,0 ± 0,9	-	32,3 ± 1,3	-	0,7 ± 0,8
	E3 - 30°C	34,8 ± 0,3	34,6 ± 0,6	34,4 ± 0,6	34,6 ± 0,7	0,4 ± 0,6	0,0 ± 0,4

Cependant, les observations suivantes permettent de justifier la pertinence des valeurs des températures cutanées obtenues :

- Les températures de front et de joue sont similaires dans les deux expérimentations (protocole A et B).
- les valeurs moyennes obtenues sur le front sont à peu près en accord avec l'étude d'Houdas et Ring qui mentionne une température de front de l'ordre de 32,9°C à 20°C; de 33,9°C à 25°C et de 34,8°C à 30°C [Zhang 2003].
- Les températures du front sont significativement plus élevées que celles des joues ($p_{wilcoxon} < 0,0001$ pour les deux protocoles) comme dans les études répertoriées dans l'article de Wa et Maibach [Wa et Maibach 2010].
- L'écart moyen entre la température du front et des joues, obtenu à 20°C et à 25°C, est proche de 1°C dans les deux protocoles et il est similaire à celui obtenu dans l'étude de Gratt et Sickles [Le Fur, Lopez *et al.* 1999].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Les écarts types des températures des joues sont plus élevés que ceux des températures du front comme dans les études suivantes : [Le Fur, Lopez *et al.* 1999; Marrakchi et Maibach 2007; Wa et Maibach 2010]. Cette observation est associée au comportement vasculaire beaucoup plus stable sur le front que sur les joues.
- La température cutanée augmente significativement avec la température ambiante ($p_{wilcoxon}$ au moins inférieur à 0,005 dans tous les cas), comme dans de nombreuses études [Arens et Zhang 2006].
- La distribution des températures du visage est plus homogène dans l'environnement chaud à 30°C que dans l'environnement frais à 20°C (ou l'écart de température entre le front et la joue est plus faible dans l'environnement chaud) comme dans les études présentées dans la littérature [Arens et Zhang 2006].
- Les températures de joue (TJ) et de front (TF) sont corrélées avec la sensation thermique déclarée (dans le protocole A : r = 0,71 pour TF et TJ ; dans le protocole B : r = 0,70 pour TF et r = 0,77 pour TJ), comme dans l'étude de Nishimura et Genno mentionnée dans le Tableau 1.3, page 60.

Toutefois, une observation sur les écarts de température entre le front et les joues semble contraire à ce qui est mentionné habituellement dans la littérature. En effet, certains sujets ont eu des écarts de température (TFJ) négatifs, c'est-à-dire des températures de joue plus élevées que les températures de front, dans les environnements frais et légèrement chaud :

- 2 sujets fumeurs dans le protocole B et pendant les deux jours consécutifs d'expérimentation ;
- 2 sujets dont 1 fumeur dans le protocole A mais seulement lors de l'un des deux jours d'expérimentation.

Cette particularité est peut-être liée au **tabagisme**. En effet, Myrsten *et al.* ont déjà montré que la température cutanée pouvait augmenter à cause de l'abstinence [Myrsten, Elgerot *et al.* 1977]. Celle-ci a peut-être engendrée une température des joues plus élevée que celle du front. Suivant le degré d'abstinence, les sujets fumeurs n'auraient pas réagi de la même façon. Pour le sujet non-fumeur, cet écart pourrait peut-être s'expliquer par une forte **réactivité émotionnelle** juste avant la mesure qui aurait provoqué des rougeurs au niveau des joues et une température des joues particulièrement élevées par rapport à celle du front. En effet, Fabrice De Oliveira a mentionné dans sa thèse que la réactivité émotionnelle pouvait augmenter de 1°C la température de peau [De Oliveira 2008]. L'analyse des écarts TFJ devra

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

donc être effectuée avec prudence. A l'avenir, il sera nécessaire de contrôler plus finement la réactivité émotionnelle des sujets et de sélectionner des sujets non-fumeurs pour obtenir des données plus fiables.

2.7.2.1.2. Couleur de peau : coordonnées L*, a*, b*

Il est difficile de comparer directement les valeurs des coordonnées L*, a*, b* représentant la couleur de peau « moyenne » des individus du panel car d'une étude à une autre, même si les individus du panel sont de type caucasien, les phototypes des individus sont susceptibles de varier. Or, les différents phototypes sont associés à différentes couleurs (cf. Tableau 1.13) et à différents angles ITA définis par les coordonnées L*et b* de la façon suivante ITA = arctg (L* - 50) / b*. Il est donc plus pertinent d'évaluer la pertinence des données en observant les variations des coordonnées en fonction de la température ambiante.

Tableau 2.11 : Valeurs moyennes et écarts types des coordonnées L*, a*, b* de couleur de peau mesurées dans différents environnements thermiques (E1 à ~20°C, E2 à ~25°C et E3 à ~30°C). La significativité p du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare les valeurs obtenues dans chacun des environnements thermiques E2 et E3 avec les valeurs obtenues dans E1 est représentée par une * lorsque p < 0,05.

		Environnements thermiques		
Variables cutanées		E1 – 20°C	E2 – 25°C	E3 – 30°C
Clarté L*	L*	62,9 ± 3,6	62,7 ± 3,7	61,1 ± 3,0 *
Chromaticité vert-rouge a*	a*	12,7 ± 1,9	12,9 ± 2,2	14,1 ± 1,8 *
Chromaticité bleu-jaune b*	b*	16,7 ± 0,9	16,5 ± 1,3	15,5 ± 1,4 *

D'après le test des rangs signés de Wilcoxon, L* et b* diminuent significativement et a* augmente significativement lors de la plus forte transition chaude (20°C → 30°C) (cf. Tableau 2.11). Cette observation est en accord avec la littérature puisque L* et b* sont connus pour dépendre de la concentration en hémoglobine lorsque le niveau de mélanine est constant et a* est connu pour augmenter avec l'augmentation de la concentration en hémoglobine [Takiwaki 1998; Takiwaki, Miyaoka *et al.* 2002]. Or, la concentration en hémoglobine augmente lorsque la température ambiante augmente. Il est donc tout à fait logique d'obtenir :

- des coordonnées de chromaticité a* plus élevées dans l'environnement à 30°C que dans l'environnement à 20°C ;
- des coordonnées de chromaticité b* plus faibles dans l'environnement à 30°C que dans l'environnement à 20°C ;
- des clartés ou luminances plus faibles dans l'environnement à 30°C que dans l'environnement à 20°C.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Par contre, la plus faible transition chaude n'a probablement pas engendré une augmentation suffisante de la concentration en hémoglobine pour provoquer une modification significative des coordonnées de chromaticité. Ce manque d'évolution significative de la couleur de peau peut également être associé à une transition chaude trop faible pour certains sujets à cause de la régulation instable de la température de l'environnement E2 à 25°C (cf. partie 2.3. page 121). A l'avenir, il sera nécessaire de réguler plus finement les températures ambiantes afin de déterminer si les évolutions observées sont liées à une particularité physiologique ou à une particularité physique de l'environnement.

2.7.2.2. Températures cutanées des groupes de sensibilité thermique

Cette partie expose les températures cutanées des deux groupes de sensibilité au froid afin d'établir si les groupes présentent des états thermiques différents.

2.7.2.2.1. Températures du front

D'après la Figure 2.17, les températures de front mesurées, lors du protocole A, sont similaires pour les deux groupes et dans les deux environnements thermiques. Par contre, lors du protocole B, des différences apparaissent entre les groupes, surtout dans les environnements plutôt chauds. Le groupe G2, sensible au froid, a tendance à avoir des températures au niveau du front légèrement plus élevées et cette tendance est significative à 5,1% dans l'environnement le plus chaud à 30°C (cf. Figure 2.17).

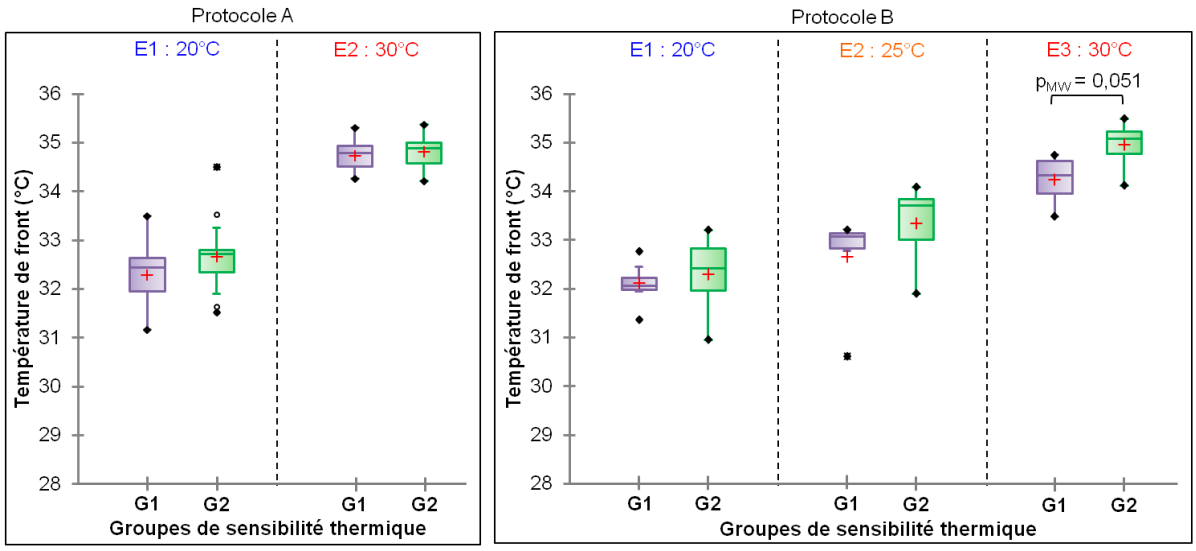


Figure 2.17 : Boîtes de Tukey représentant les températures du front du groupe G1 non sensible au froid et du groupe G2 sensible au froid mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). A gauche : données obtenues à partir du protocole A. A droite : données obtenues à partir du protocole B. Seules les significativité "p" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, ont été représentées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, les résultats des tests des rangs signés de Wilcoxon, exposés dans le Tableau 2.12, montrent que les individus des deux groupes ont une température de front qui augmente significativement ($p_w < 0,05$) après une transition chaude. Les températures de front évoluent dans le même sens après une transition chaude pour les deux groupes de sensibilité thermique et dans les deux protocoles.

Tableau 2.12 : Les p-valeurs du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare les températures cutanées obtenues avant et après la/les transition(s) thermique(s) chaude(s) pour chacun des groupes de sensibilité au froid G1 et G2. Si p < 0,05, les températures de front et de joues ont significativement augmenté et les écarts de températures ont significativement diminué après la transition thermique chaude.

Paramètres →		Température de Front TF		Température de Joue TJ		Ecart de température entre front et joue TFJ	
Protocole →		A	B	A	B	A	B
Transition 1 20°C → 25°C	G1	-	0,05	-	0,2	-	0,2
	G2	-	0,02	-	0,02	-	0,02
Transition 2 20°C → 30°C	G1	0,002	0,03	0,002	0,03	0,01	0,3
	G2	0,001	0,02	0,001	0,02	0,03	0,02

2.7.2.2.2. Températures de joues

Pour les deux protocoles, les tests statistiques montrent que les températures des joues des deux groupes ne sont pas significativement différentes. Cependant, d'après la Figure 2.18, celles du groupe G2 du protocole B ont tendance à être plus faibles dans l'environnement frais à 20°C et plus élevées dans l'environnement chaud à 30°C que celles du groupe G1.

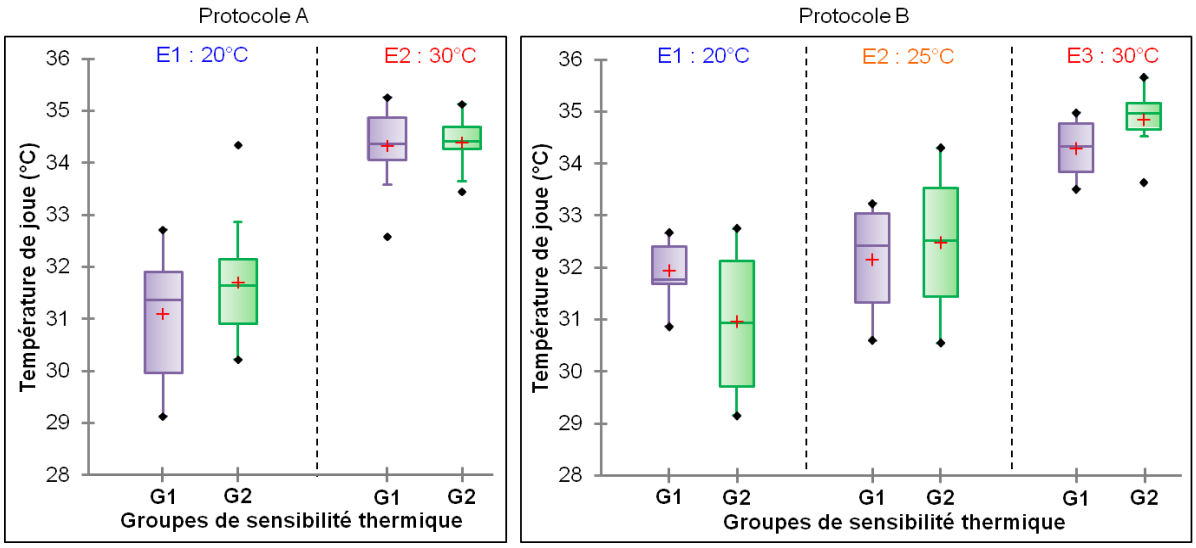


Figure 2.18 : Boîte de Tukey représentant les températures des joues du groupe G1 non sensible au froid et du groupe G2 sensible au froid mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). A gauche : données obtenues à partir du protocole A. A droite : données obtenues à partir du protocole B. Seules les significativités "p" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, ont été représentées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, le Tableau 2.12, permet de mettre en évidence que les températures des joues du groupe G1 du protocole B n'ont pas augmenté significativement après la transition chaude la plus faible (20°C → 25°C) contrairement au groupe G2. D'ailleurs, les tests de comparaisons multiples de Tukey, effectués après le test de l'ANOVA à 2 facteurs (environnement thermique et groupe de sensibilité thermique), et appliqués aux données de températures de joues du protocole B, montrent que la température moyenne de joue dans l'environnement à 20°C est significativement différente et celle dans l'environnement à 25°C (p_{tukey} = 0,029), alors que le groupe G1 a des températures de joue moyennes similaires dans ces deux environnements thermiques (p_{tukey} = 0,99).

2.7.2.2.3. Ecarts de températures entre le front et les joues

L'écart de températures entre le front et les joues représente l'homogénéité de la distribution des températures du visage. D'après la Figure 2.19, cet écart est similaire pour les deux groupes de sensibilité thermique dans le protocole A, alors qu'il a tendance à être plus élevé pour le groupe G2 que pour le groupe G1, dans le protocole B. Cette dernière tendance est significative dans l'environnement le plus frais à 20°C, puisque la significativité du test de Tukey, qui compare les écarts des deux groupes, est de l'ordre de 0,002 (cf. Figure 2.19). Dans le protocole B, les groupes G2 et G1 semblent donc réguler leur température de visage différemment dans l'environnement frais.

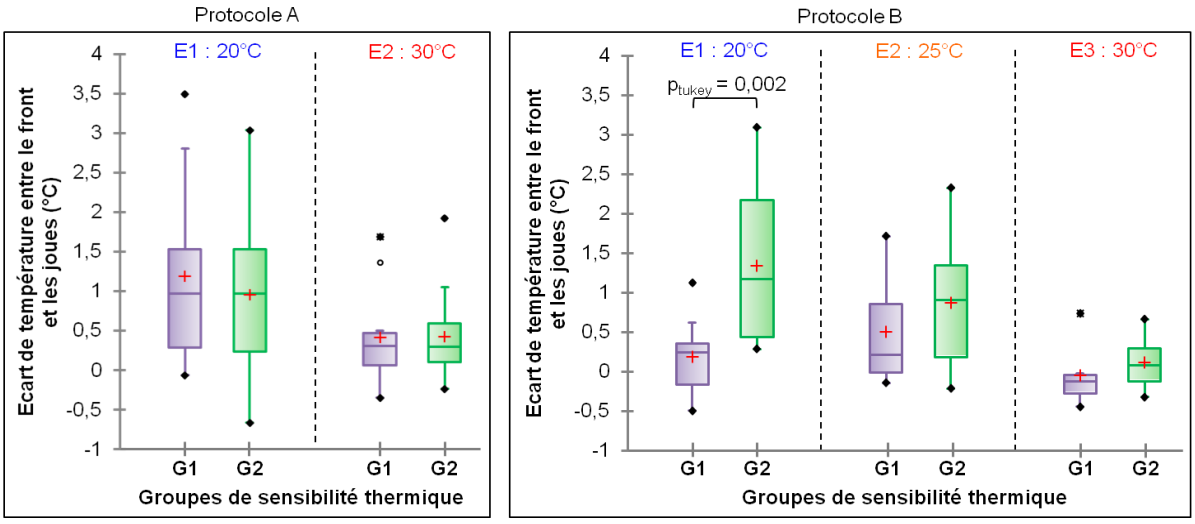


Figure 2.19 : Boîte de Tukey représentant les écarts de températures entre les joues et le front du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) obtenus dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). A gauche : données obtenues à partir du protocole A. A droite : données obtenues à partir du protocole B. Seules les significativités "p" proches ou inférieures à 0,05 qui témoignent d'une différence entre les groupes, ont été représentées.

D'autre part, la Figure 2.19 ainsi que le Tableau 2.12 montrent que les écarts de température du groupe G1 du protocole B ne diminuent pas significativement après chacune

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

des deux transitions chaudes, alors que le groupe G2 du protocole B ainsi que les deux groupes du protocole A ont des écarts qui diminuent significativement avec l'augmentation de la température ambiante.

2.7.2.3. Couleur de peau (L*, a*, b*) des groupes de sensibilité thermique

La couleur de peau a été mesurée uniquement dans le protocole B. D'après la Figure 2.20, la clarté de la peau (L*) des individus du groupe G2 a tendance à être plus élevée et les coordonnées a* plus faibles que le groupe G1 dans l'environnement frais à 20°C. Dans les deux environnements chauds, les coordonnées b* ont tendance à être plus faibles et les coordonnées a* plus élevées pour le groupe G2. Cependant, toutes ces tendances ne sont pas significatives. Les tendances observées, dans l'environnement frais, sont probablement associées aux différences de phototypes. Les différences de couleur entre les deux groupes de sensibilité thermique dans l'environnement à 20°C ne sont pas significatives probablement parce que, d'après la Figure 2.4 (page 126), le facteur « phototype » n'est pas corrélé au facteur de « sensibilité au froid ».

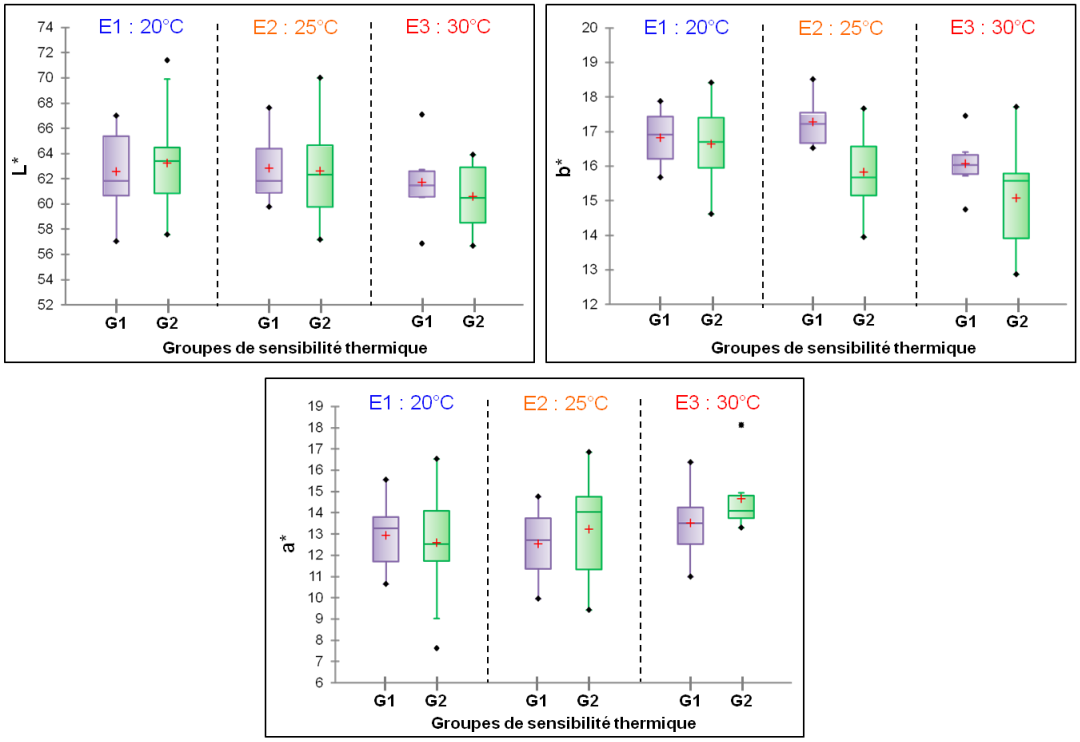


Figure 2.20 : Boîte de Tukey représentant les coordonnées L*, a*, b* de la couleur de peau du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées.

Par contre, les différences (non significatives) de coordonnées a* et b* dans les environnements chauds sont peut-être davantage liées à des différences entre les deux groupes au niveau des mécanismes de thermorégulation lors d'une transition chaude. D'ailleurs,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

d'après le Tableau 2.17, les tests des rangs signés de Wilcoxon montrent que les coordonnées de couleur changent significativement lors de la forte transition chaude pour le groupe G2 mais pas pour le groupe G1 : L* et b* diminuent alors que a* augmente. Le groupe G2 semble avoir une augmentation significative de sa concentration volumique en hémoglobine (oxyhémoglobine et désoxyhémoglobine) lors de la forte transition chaude alors que le groupe G1 semble ne pas avoir une activité microcirculatoire différente après la transition chaude.

2.7.2.4. Liens entre les propriétés thermo-vasculaires et le ressenti

D'après le Tableau 2.13, les températures du front (TF) et des joues (TJ) sont fortement corrélées avec les scores de sensation thermique déclarés (Sth). Les groupes G2 (sensibles au froid) du protocole A et B, ont tendance à avoir des coefficients de corrélation entre les températures cutanées (TF, TJ) et la sensation thermique (Sth) légèrement plus faible que ceux du groupe G1. L'écart de température entre le front et les joues (TFJ) du groupe G1 est faiblement corrélé négativement à la sensation thermique dans le protocole A alors que celui du groupe G2 n'est pas corrélé avec la sensation thermique. Dans le protocole B, ce n'est pas le groupe G1 mais le groupe G2 sensible au froid qui a un écart de température front-joue moyennement corrélé négativement avec la sensation thermique déclarée : plus l'écart de température est faible, plus la sensation thermique du groupe est élevée.

Tableau 2.13 : Coefficients de corrélation de Spearman entre les températures cutanées et le ressenti thermique de chacun des deux groupes G1 et G2.

	PROTOCOLE A				PROTOCOLE B					
	Sensation thermique		Etat de bien-être		Sensation thermique		Confort thermique		Inconfort	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2
TF	0,81	0,77	-0,15	-0,17	0,83	0,69	0,26	0,38	0,32	-0,25
TJ	0,81	0,78	-0,29	-0,17	0,78	0,72	0,22	0,41	0,30	-0,41
TFJ	-0,46	-0,34	-0,09	0,08	-0,27	-0,62	-0,13	-0,40	0,0	0,47

D'après le Tableau 2.13, aucune variable thermique n'est corrélée avec l'état de bien-être déclaré dans le protocole A. Par contre, dans le protocole B, les températures de joue et les écarts de température entre le front et les joues du groupe G2 sont faiblement corrélés aux scores de confort thermique (Cth) et d'inconfort : lorsque les températures de joues augmentent, le confort thermique du groupe G2 a tendance à augmenter et l'inconfort a tendance à diminuer et lorsque les écarts de températures front-joue diminuent, le confort

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

thermique du groupe G2 augmente et l'inconfort diminue. Cependant, il n'existe pas de lien significatif entre les variables thermiques et les scores de confort thermique et d'inconfort pour le groupe G1.

Concernant les paramètres colorimétriques de la peau, il peut être constaté, sur la Figure 2.21, que les coordonnées L*, a*, b* du groupe G1 ne sont pas corrélées aux températures cutanées (TF et TJ) de ce groupe. Seules les coordonnées L* et a* sont corrélées aux écarts de température entre le front et les joues (TFJ).

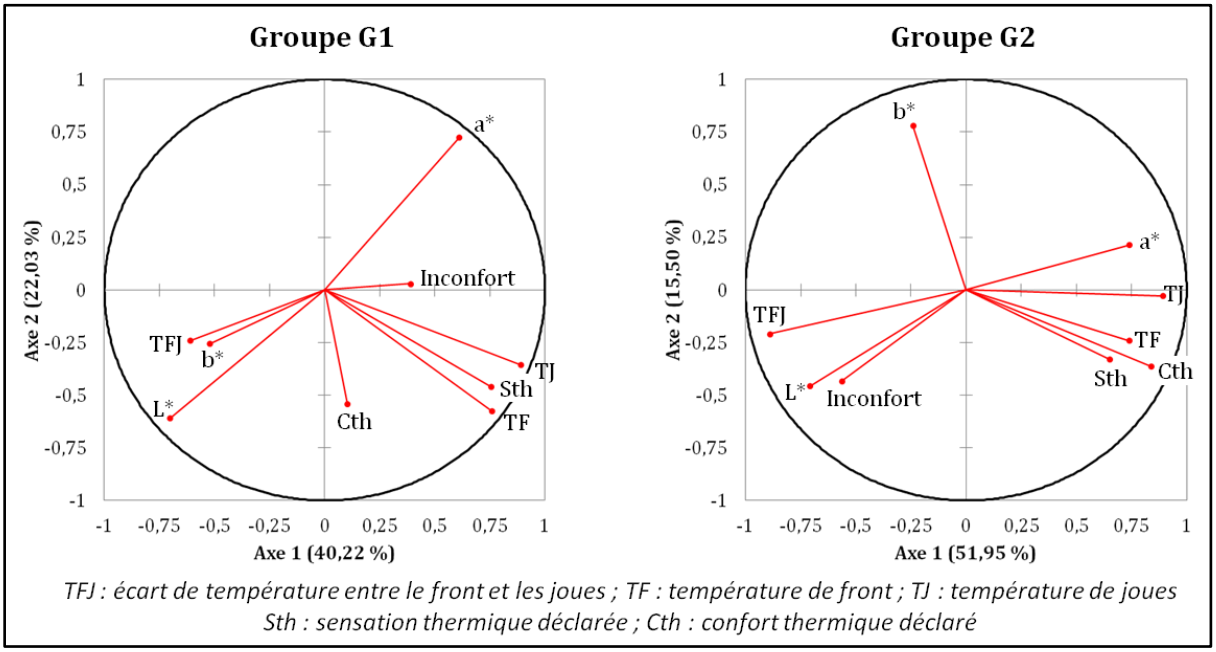


Figure 2.21 : Cercles de corrélation de l'ACP de Spearman représentant les liens entre les différentes variables thermo-vasculaires et le ressenti thermique déclaré à travers le protocole B. A gauche, le cercle est associé au groupe de sensibilité G1 et à droite, au groupe de sensibilité G2.

Par contre, pour le groupe G2, les coordonnées L*, a*, b* sont corrélées faiblement aux scores de sensation thermique (r = -0,4 ; r = 0,5 ; r = -0,4 respectivement). Pour ce groupe, les coordonnées a* sont également corrélées aux scores de confort thermique (r = 0,4) et les coordonnées L* sont corrélées aux scores d'inconfort (r = 0,4). De plus, la relation entre les coordonnées L* et a* et les écarts de températures front-joue est plus forte pour le groupe G2 que pour le groupe G1. Et, contrairement au groupe G1, les coordonnées L* et a* du groupe G2 sont liées aux températures des joues. Pour le groupe G2, l'activité microcirculatoire représentée à travers l'évolution des coordonnées L*, a*, b* semble liée à l'état thermique des individus et aux scores de ressenti déclaré.

Suivant le groupe de sensibilité au froid, les relations entre les variables thermo-vasculaires entre elles et entre chacune des variables thermo-vasculaires et le ressenti déclaré

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

sont différentes. Ceci témoigne bien d'une différence de mécanismes physiologiques entre les deux groupes.

2.7.2.5. Discussion : liens entre la sensibilité thermique et les propriétés thermo-vasculaires

D'après l'expérimentation réalisée suivant le protocole A, les deux groupes de sensibilité au froid semblent avoir le même état thermique avec des températures de joues et de front ainsi que des distributions de températures sur le visage similaires. Cependant, d'après l'expérimentation basée sur le protocole B, les groupes de sensibilité thermique ont des mécanismes de thermorégulation différents. En résumé, le groupe G2, sensible au froid et pour lequel le confort thermique augmente après les transitions chaudes, peut être caractérisé par :

- des températures de joues qui varient davantage avec l'augmentation de la température ambiante. L'étendue des températures de joues sur les trois environnements thermiques est plus importante que pour le groupe G1.
- une température moyenne de front significativement plus élevée, après une transition chaude importante (20°C → 30°C) que celle du groupe G1.
- une hétérogénéité de la distribution des températures sur le visage significativement plus élevée que le groupe G1 dans l'environnement frais avec des températures de front toujours plus élevées que les températures de joues contrairement au groupe G1.
- Une homogénéité qui augmente significativement avec l'augmentation de la température ambiante contrairement au groupe G1.
- Une chromaticité a* qui augmente significativement avec l'augmentation de la température ambiante contrairement au groupe G1. La concentration en hémoglobine augmente probablement davantage pour le groupe G2 et provoque une évacuation de la chaleur vers l'extérieur différente.
- Une clarté L* et une chromaticité b* qui diminue avec l'augmentation de la température ambiante contrairement au groupe G1 dont l'activité microcirculatoire semble beaucoup moins forte.

Le groupe G2 sensible au froid et dont le confort thermique augmente après les transitions chaudes peut donc être caractérisé par des réponses physiologiques de thermorégulation plus fortes que celles du groupe G1 non sensible au froid et dont l'état de confort thermique reste stable. L'activité microcirculatoire du groupe G2 varie plus fortement

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

avec l'augmentation de la température ambiante et engendre de plus fortes variations de la température de peau. Ces plus fortes réactions microcirculatoires chez le groupe G2 sont d'ailleurs reliées à son ressenti déclaré. Par contre, pour le groupe G1, ses réactions physiologiques sont plus faibles et seules les températures cutanées, qui semblent davantage associées aux températures extérieures qu'à des mécanismes internes, sont reliées au ressenti déclaré.

Cependant, toutes ces observations peuvent-elles expliquer les différences de ressenti des deux groupes d'individus G1 et G2 ?

La partie 2.5.2. sur la Caractérisation non sensorielle des groupes (cf. page 126), mentionne que le groupe G2 du protocole B présente une sensibilité au froid différente de celle du groupe G1 mais aussi un niveau de tabagisme différent. En effet, le groupe G1 est composé de 4 fumeurs sur 6 volontaires alors que le groupe G2 ne contient aucun fumeur. Nous allons tenter de définir, à partir des données de la littérature, si les observations effectuées sur le groupe G2, avec le protocole B, sont associées au facteur « tabagisme » ou au facteur « sensibilité au froid ».

D'après la partie 1.3.6.3.4. du chapitre précédent (page 100), le tabac a un effet sur les propriétés cutanées et en particulier sur l'activité de la microcirculation. En effet, le flux sanguin cutané des fumeurs a tendance à être plus faible [Leow et Maibach 1998; Sørensen, Jørgensen *et al.* 2009] et cette tendance n'est pas forcément significative dans un environnement standard mais après le réchauffement d'une zone cutanée, la réponse vasomotrice est significativement réduite chez les fumeurs [Edvinsson, Andersson *et al.* 2008; Avery, Voegeli *et al.* 2009]. L'absence d'évolution de la couleur de peau (associée à la concentration en hémoglobine) du groupe G1 après la forte transition chaude pourrait être associée au tabagisme du groupe G1. De plus, comme le flux sanguin est directement responsable de la température cutanée, il n'est pas étonnant d'obtenir des différences de températures de peau entre les fumeurs et les non-fumeurs. La plus faible température de front du groupe G1 (composé majoritairement de fumeurs), après la transition chaude, pourrait s'expliquer par une plus faible réponse vasomotrice (ou vasodilatation) des fumeurs. De même, cette plus faible réponse vasomotrice lors d'un réchauffement pourrait expliquer l'absence de variation de température des joues entre l'environnement frais à 20°C et l'environnement à 25°C pour le groupe G1. Cependant, dans l'environnement frais, le groupe G1 a tendance à avoir des températures de joues plus élevées que le groupe G2. Or, le tabac ayant un effet vasoconstricteur, on aurait pu penser que le groupe G1 aurait présenté une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

température de joues plus faibles que le groupe G2 (tout comme les températures de front). Cette tendance (non significative) est peut-être associée à l'abstinence. En effet, l'étude de Myrsten *et al.* a montré que la température des doigts peut augmenter pendant une période d'abstinence [Myrsten, Elgerot *et al.* 1977]. Lors de l'expérimentation, les fumeurs ne devaient pas fumer pendant les trois heures qui précédaient l'expérimentation. Ils étaient donc dans une phase d'abstinence. D'autre part, l'étude de Maddook et Coller a montré que la température des doigts et des orteils a tendance à diminuer lorsque les volontaires fument mais, une fois, que les volontaires ont arrêté de fumer, elle augmente progressivement [Maddook et Coller 1932].

Cependant, la sensibilité thermique du groupe G2 pourrait également expliquer la faible température de joue. En effet, l'étude de Yasuoka *et al.* montre que le groupe qui préfère des ambiances avec Ta ≥ 29°C a des températures de mollet plus faibles que le groupe qui préfère des ambiances avec Ta < 29°C dans l'environnement le plus frais à 25°C [Yasuoka, Kubo *et al.* 2012]. La sensibilité au froid pourrait être caractérisée par une température de joue plus faible. Le tabagisme masque ou accentue probablement des comportements thermiques associés à la sensibilité thermique des volontaires.

Concernant l'écart de température entre le front et les joues, à notre connaissance, il n'existe dans la littérature aucune étude abordant l'effet du tabac sur la distribution des températures du visage. Cependant, si les réponses vasomotrices des fumeurs sont réduites, il peut être supposé que l'activité vasomotrice des joues qui est particulièrement importante chez les non-fumeurs sera réduite chez les fumeurs. Ceci pourrait entrainer, chez les fumeurs, une diminution de l'écart de température front-joues voir même une température de joues plus élevée qu'une température de front. D'ailleurs, en analysant les écarts de température (TFJ) entre les fumeurs et les non-fumeurs obtenues dans le protocole A, il a pu être constaté que l'écart de température entre le front et les joues étaient plus faibles chez les fumeurs dans l'environnement à ~20°C ($p_{student}$ = 0,004). Le plus faible écart de température du groupe G1 du protocole B dans l'environnement frais ainsi que l'absence d'évolution significative de cet écart avec la température ambiante semblent donc être associés au tabagisme du groupe G1.

Toute cette analyse nous laisse supposer que les résultats associés au protocole A sont probablement reliés au facteur « sensibilité au froid » et que ceux obtenus avec le protocole B sont davantage associés au facteur « tabagisme ». A priori, les différences de sensibilité thermique « globale » ne seraient pas liées à des différences de températures cutanées. Cependant, il parait indispensable de réaliser des expérimentations avec des panels constitués

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

uniquement de fumeurs ou uniquement de non-fumeurs afin de pouvoir conclure. L'impact d'un facteur masque peut-être l'effet de l'autre facteur. En effet, la présence de fumeurs dans le panel du protocole A a pu masquer une influence de la sensibilité thermique sur la température cutanée et l'analyse n'a pas pu être réalisée sans les fumeurs car le nombre de sujets dans chaque groupe aurait été trop faible.

D'autre part, il semblerait pertinent de prendre en compte le facteur « tabagisme » pour affiner les modèles de prédiction de la sensation et du confort thermique qui sont basés sur la température cutanée puisque celle-ci semble évoluer différemment pour les fumeurs et les non-fumeurs.

2.8. Etude des propriétés du film hydrolipidique

Les propriétés du film hydrolipidique de la peau, excepté la perte en eau, sont rarement, voir jamais, utilisées dans les modèles de prédiction de la sensation et du confort thermique. Pourtant, comme il a pu être noté dans la partie 1.3.4. du chapitre précédent (page 91), ces propriétés sont susceptibles de varier avec la température ambiante et, par là même, avec la sensation thermique. L'objectif de cette partie est de déterminer si certaines propriétés cutanées sont significativement différentes pour chacun des groupes de sensibilité thermique et, si elles sont susceptibles d'aider à la compréhension ou à la prédiction des différences interindividuelles de ressenti.

Les propriétés cutanées analysées dans cette partie ont été évaluées à partir du **protocole B** et regroupent les variables suivantes : la perte en eau, le contenu en eau du stratum corneum, la quantité de lipides surfacique et le pH cutané (cf. partie 1.3.5. page 95).

Dans un premier temps, le choix des appareils de mesures, les particularités des différentes mesures ainsi que les difficultés d'interprétation des différentes variables sont présentés. Puis, dans un second temps, les résultats sont exposés puis discutés.

2.8.1. Mesures des propriétés du film hydrolipidique

2.8.1.1. Mesure de la teneur en eau du SC

2.8.1.1.1. Choix de l'appareil de mesure

La teneur en eau du SC peut être évaluée à l'aide de différentes méthodes regroupées dans le Tableau 2.14. Les méthodes directes sont particulièrement précises mais très coûteuses. Les méthodes indirectes se basent sur les conséquences de la présence d'eau : un

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

tissu mouillé sera plus souple et conduira mieux l'électricité ou la chaleur. Leur principal inconvénient réside dans la mauvaise compréhension de la relation qui lie la variation de la teneur en eau avec la variation de la propriété physique mesurée.

Tableau 2.14 : Différentes techniques de mesures du contenu en eau (CE) du SC [Bernengo et de Rigal 2000]

Méthodes	Type d'appareil	Avantages	Inconvénients
Optiques	Spectroscopie IR RMN	Mesures directes Très précises	Mise en œuvre difficile Coûteuses
Visuelles / Topographiques	Objectif + lumière polarisée	Mise en œuvre facile Bonne approximation	Mesures indirectes Besoin d'un œil expert
Mécaniques	Contrainte dans le plan ou ⊥ au plan de la peau	Mise en œuvre facile	Mesures indirectes Difficiles à interpréter
Thermiques	Conductivité et effusivité thermique	Mise en œuvre facile	Mesures indirectes Peu utilisées pour le CE
Electriques	Mesures en basses, hautes ou hyper fréquences	Mise en œuvre facile Usage courant	Mesures indirectes

Cependant, face aux contraintes de coût, de mise en œuvre et de fiabilité, la **méthode indirecte électrique** a été sélectionnée. Les divers appareils de cette méthode utilisent des domaines de fréquences différents et mesurent des grandeurs différentes (conductance, capacitance ou admittance). Ils n'observent pas les mêmes phénomènes et ils sont associés à des domaines de relaxation différents. Schwann a identifié trois domaines de relaxation diélectrique[19] pour la peau [Bernengo et de Rigal 2000] :

- la relaxation α (entre 0,1 et 1000 Hz) qui est liée au stratum corneum
- la relaxation β (entre 100 kHz et 500 MHz) qui est liée à la polarisabilité des macromolécules et de l'eau qui leur est associée.
- la relaxation γ (entre 3 et 30 GHz) qui est liée à la vibration des molécules d'eau plus ou moins libres dans la peau.

Les mesures en basse fréquence paraissent plus appropriées puisqu'elles se concentrent sur le SC. Cependant, les phénomènes de polarisation d'électrodes sont très importants et interfèrent beaucoup sur les mesures. Les mesures en haute fréquence sont beaucoup moins perturbées par la polarisation des électrodes, mais elles sont associées à la relaxation β. Les phénomènes observés sont donc liés aussi aux couches profondes de la peau. La majorité des

[19] Lorsqu'un matériau présente des domaines de relaxation diélectrique, sa constante diélectrique ou sa tendance à se polariser diminue pour certaines fréquences du courant alternatif.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

appareils fonctionnent dans cette gamme de fréquences. Concernant les mesures en hyperfréquences, la complexité de l'instrumentation ainsi que la difficulté d'interprétation des résultats n'ont pas permis une extension importante de ces mesures. Par conséquent, les **mesures en haute fréquence** semblent plus appropriées. Parmi celles-ci, trois appareils se distinguent [Barel et Clarys 1997; Berardesca et EEMCO 1997; Bernengo et de Rigal 2000]:

- Le Skicon-200 (ISBS, Hamamatsu, Japon) mesure la conductance à 3,5 MHz.
- Le Nova DPM-900 (Nova Technologies, Gloucester-UK) mesure la conductance pour des fréquences supérieures à 1 MHz
- Le Cornéomètre CM-825 (Courage&Khazaka, Cologne Allemagne) mesure les variations de capacité de l'ensemble électrodes + peau, grâce au déplacement de la fréquence de résonance du circuit oscillant couplé à un oscillateur. Les fréquences varient entre 0,9 MHz (milieu très hydraté) et 1,2 MHz (milieu très sec).

Une étude de Barel et Clarys a mis en évidence que le Cornéomètre est plus sensible pour mesurer des faibles niveaux d'hydratation alors que le Skicon est plus sensible pour des niveaux d'hydratation élevés. De plus, le Cornéomètre présente une meilleure reproductibilité (3 – 11% *vs.* 16 – 23%) [Barel et Clarys 1997]. Comme les niveaux d'hydratation que nous cherchons à suivre ne sont pas particulièrement élevés, le **Cornéomètre CM-825** a été choisi.

2.8.1.1.2. Mesure avec le cornéomètre CM-825

Le cornéomètre CM-825 est basé sur la mesure d'une **capacité électrique** d'une portion de peau placée sous la sonde et son principe est similaire à celui d'un condensateur. La sonde est composée d'une plaque en céramique recouverte d'un grand nombre de lignes ou lamelles d'or. Les lignes paires, tout comme les lignes impaires sont liées entre elles pour former un condensateur. Pour éviter tout passage de courant électrique lors des mesures, la sonde est recouverte d'une fine couche d'isolant vitrifié (~20 µm) de faible constante diélectrique (cf. Figure 2.22). Un ressort assure une pression d'application constante. La mesure se déclenche pour une pression de l'ordre de 0,7 – 0,8 N et la pression totale est estimée à 1,3 N [Khazaka 2004]. La surface de mesure est d'environ 49 mm². Quant à la profondeur de mesure, elle a été évaluée entre 60 - 100 µm, mais la contribution d'une couche placée à cette profondeur ne dépasse pas le dixième de celle qu'elle aurait en surface [Bernengo et de Rigal 2000]. La mesure reflète, donc, principalement les **modifications de la constante diélectrique de la couche cornée** (<15µm) et pas de l'épiderme. Le temps d'acquisition est d'environ 3 secondes et la précision de la mesure est estimée à ± 3%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

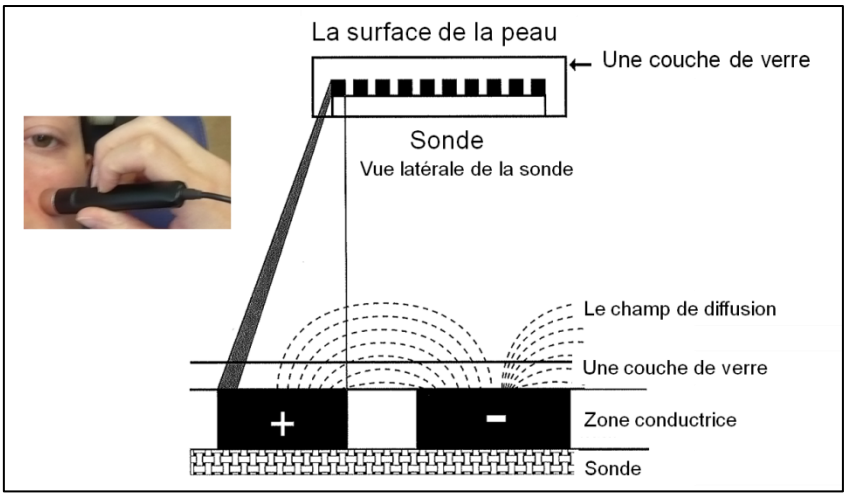


Figure 2.22 : A gauche – Mesure réalisée avec la sonde du corneometer CM 825. A droite – Zoom sur la sonde de mesure

La valeur finale analysée, exprimée en unité arbitraire (u.a.) correspond à la moyenne de **3 mesures effectuées sur trois zones adjacentes de la joue** (la joue a l'avantage d'avoir un contenu en eau relativement élevé par rapport à d'autres zones : se reporter au Tableau 1.11, page 97). La valeur nulle correspond à la valeur de la capacitance dans l'air (matériau sec) associée au minimum d'hydratation et la valeur maximale correspond à celle obtenue avec une solution saline associée au maximum d'hydratation [Khazaka 2004].

2.8.1.1.3. Réflexion sur l'interprétation et les limites de la grandeur mesurée

La mesure de la capacitance de la peau sera assimilée à un contenu en eau (CE) et non systématiquement à une mesure d'hydratation (cf. partie 1.3.2.4. page 88).

Certaines limites doivent être prises en compte :

- **L'absence de relation directe et linéaire entre le CE et les propriétés électriques**

Ceci s'explique par la non-uniformité de la liaison entre l'eau et la kératine (cf. partie 1.3.2. page 83).

- **L'influence de la présence d'ions, d'acides aminés ou autres**

Tous les composés chargés mais aussi la répartition de l'eau entre les fractions libres et liées peuvent influencer la mesure [Gabard et Barel 2009].

- **L'influence de la température de peau**

Une couche cornée froide et humide peut avoir les mêmes propriétés électriques, à une fréquence donnée, qu'un tissu chaud et sec. En effet, la conduction électrique suit la loi d'Arrhénius (du type $\sigma = \sigma_0 \, e^{-\frac{E}{T}}$) qui dépend de l'énergie d'activation E liée au contenu en eau et à la température T du milieu [Berardesca et EEMCO 1997].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.8.1.2. Mesure de l'acidité de la surface cutanée

2.8.1.2.1. Choix de l'appareil de mesure

L'acidité peut être mesurée soit par le pH de la surface, soit par la capacité de la peau à résister à une agression alcaline [Agache 2000c]. Cette dernière méthode est contraignante car elle nécessite l'application de NaOH et d'une substance colorée. L'évaluation de l'acidité par le pH a été privilégiée. Différentes méthodes existent [Parra et Paye 2003] : l'utilisation d'indicateurs colorés de faibles précisions, l'utilisation d'une électrode à hydrogène considérée comme peu commode et la mesure d'une différence de potentiel entre deux électrodes planes en verre couramment utilisée. La dernière méthode a été choisie et plus spécifiquement le **skin pH-mètre PH 905** (Courage & Khazaka, Cologne, Allemagne).

2.8.1.2.2. Mesure avec le pH-mètre cutané PH-905

Le pH-mètre cutané PH-905 détermine l'état d'équilibre acide/base de la peau ou l'état de dissociation des lipides (qui libèrent des ions H^+) dans l'eau (ou la solution aqueuse) apportés à la surface de la peau. Cet appareil est basé sur la différence de potentiel qui s'établit de chaque côté d'une très fine lame de verre séparant deux solutions, et qui est linéairement liée à leur différence de concentration en ions H^+. L'électrode de référence est une électrode au calomel. L'électrode de mesure est entourée de l'électrode de référence et son extrémité est plate afin d'assurer un contact optimum avec le SC (cf. Figure 2.23).

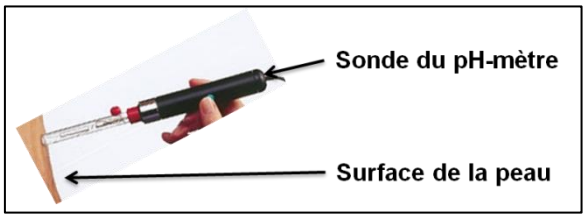


Figure 2.23 : La sonde du pH-mètre cutané (skin pH-meter PH 905)

Lors de la mesure, après avoir été rincée avec de l'eau distillée, la sonde est déposée sur la peau sans appliquer de pression. La précision de la mesure est estimée à 0,1 unité de pH [Agache 2000c]. La valeur finale analysée est exprimée en unité pH comme la **moyenne de deux mesures effectuées sur des zones adjacentes de la joue** (dans la continuité de la bouche, les zones proches du menton ont des valeurs de pH plus élevées que les autres zones : se reporter au Tableau 1.11, page 97).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.8.1.2.3. Réflexion sur l'interprétation et les limites de la grandeur mesurée

Même si les raisons exactes de l'acidité de la peau sont globalement mal connues [Parra et Paye 2003], il est admis qu'une variation de pH cutané peut être associée à une variation au niveau d'une des trois classes de molécules suivantes : les composants du NMF (cf. partie 1.3.2.2.1. 84), les acides alpha-hydroxy comme l'acide lactique ou encore les lipides du type cholestérols, acides gras libres [Parra et Paye 2003; Fluhr, Bankova et al. 2005]. Des petites différences de pH peuvent refléter des modifications significatives à l'échelle moléculaire.

Cependant, la peau n'est pas une solution aqueuse mais un milieu semi-hydrophobique. La définition de pH ($pH = -\log [H^+] = 7$ quand $[OH^-] = [H^+]$) n'est donc pas directement applicable. Le pH mesuré n'est qu'apparent. Il est obtenu à partir de l'extraction des composants hydrosolubles du SC dans le liquide situé à l'interface de la sonde de pH et de la surface cutanée [Parra et Paye 2003]. La quantité des ions hydrogènes est, donc, directement liée à la concentration des autres composants.

2.8.1.3. Mesure de la quantité de lipides surfaciques

2.8.1.3.1. Choix de l'appareil de mesure

Pour une première approche exploratoire, les critères de sélection de l'appareil ont été la **facilité** de mise en œuvre et la **rapidité** de la mesure. Face aux inconvénients et aux avantages des différentes méthodes mentionnées dans le Tableau 2.15, la méthode **photométrique** (immédiate, sans stockage d'échantillons) a été retenue.

Tableau 2.15 : Différentes techniques de mesures du niveau courant des lipides de la surface cutanée (LSC) [Agache 2000a; Piérard, Piérard-Franchimont *et al.* 2000]

Méthodes	Principe	Avantages	Inconvénients
Gravimétrique	Pesée de la quantité de sébum récolté	Approximation du niveau courant des LSC	Besoin d'une balance sensible à 0,01 mg + environnement spécifique
Chromatographique	Evaluation de la concentration d'un composé spécifique (squalène, ester)	Information ciblée sur la proportionnalité de différents composants des LSC	Echantillons à stocker Expertise chimique spécifique et complexe
Photométrique	Mesure de la transparence d'une surface opalescente	Mise en œuvre facile	Imprécisions plus ou moins fortes
Photométrique - film polymétrique opaque et microporeux	Analyse d'images	Evaluation de la distribution et du niveau courant des LSC	Echantillons à stocker Application longue

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Plus spécifiquement, le **Sébumètre SM-810** (Courage & Khazaka, Cologne, Allemagne), d'usage courant, a été choisi afin d'obtenir une première information approximative mais quantitative de la quantité de lipides à la surface de la peau.

2.8.1.3.2. Mesure avec le sébumètre SM-810

La mesure se divise en deux étapes : la **collecte** des lipides cutanés de surface sur une bande plastique translucide suivie de la **mesure** de la quantité de sébum déposée sur la bande grâce à une méthode photométrique. Plus précisément, la sonde de mesure, d'une surface d'environ 64mm², est appliquée pendant 30 secondes sur la peau afin que les lipides de la surface cutanée soient adsorbés par les anfractuosités de la bande (épaisseur d'environ 0,1 mm). Celle-ci devient plus ou moins transparente suivant la quantité de lipides recueillie. La sonde de mesure est ensuite enfoncée dans l'unité principale de l'appareil où la transparence est mesurée. Cette mesure est réalisée grâce à une source de lumière qui est envoyée au travers de la bande et qui est ensuite réfléchie par un petit miroir situé derrière la bande avant d'être captée par une photocellule (cf. Figure 2.24). Le rapport du flux de lumière réfléchie sur le flux de lumière incidente est alors proportionnel à la quantité de lipide prélevée.

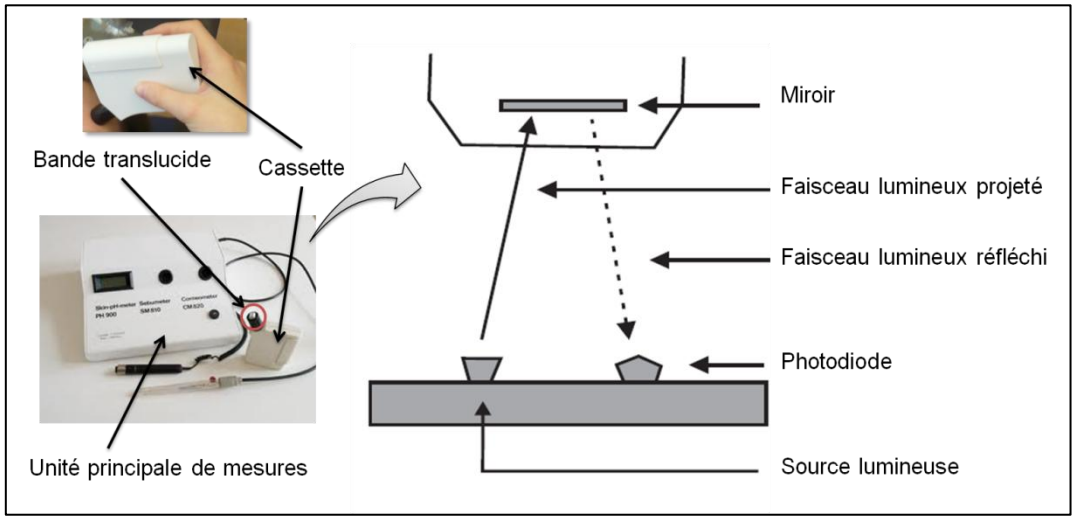


Figure 2.24 : A gauche : l'unité principale du sébumètre SM-810 accompagnée de la cassette de mesure. A droite : description du chemin pris par le faisceau lumineux dans la cassette du sébumètre SM-810 pour la mesure de la transparence de la bande qui a été appliquée sur la peau [Misri et Pande 2005].

Un microprocesseur corrige la valeur mesurée par un facteur constant. En effet, seulement 40% de la quantité totale de lipides à la surface de la peau a été absorbée sur la bande et le facteur de correction permet de prendre en compte cette capacité d'absorption de la bande [Piérard, Piérard-Franchimont et al. 2000]. La valeur affichée correspond à une approximation de la quantité totale de lipides par unité de surface de la peau. Elle représente un indice lipidique dont la précision est d'environ ± 5%. La valeur finale analysée est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

exprimée en $\mu g\, cm^{-2}$ comme la **moyenne de deux mesures effectuées sur des zones adjacentes du centre du front** où la quantité lipidique surfacique est connue pour être relativement élevée (cf. Tableau 1.11 page 97).

2.8.1.3.3. Réflexion sur l'interprétation et les limites de la grandeur mesurée

Une variation de la grandeur mesurée peut être associée à un changement du degré de séborrhée ou de la production sébacée. Mais la mesure est limitée par :

– La constance du coefficient de captation de la bande (du facteur de correction de 40%)

Le coefficient de captation dépend de trois principaux facteurs : le pouvoir absorbant du matériau constituant la bande, la surface disponible sur le capteur et la viscosité des lipides cutanés de surface. Il peut varier suivant les situations de mesures. Par exemple, entre 32°C et 36°C, la viscosité du sébum passe de 855 à 664 mpoise [Agache 2000a]. Donc, suivant la température d'équilibre entre la température cutanée et la température du capteur, le coefficient de captation devrait changer alors qu'il reste constant avec cette mesure. Une variation de la grandeur mesurée par le sébumètre SM-810 pourrait être liée à un changement de viscosité du sébum et non à une variation de la quantité de LSC.

– La saturation de la bande

Quand la quantité de sébum est très forte, la mesure est imprécise.

– La forte variation circadienne (~60%) du sébum (cf. Tableau 1.14, page 102)

2.8.1.4. Mesure de la perte en eau à la surface de la peau

2.8.1.4.1. Choix de l'appareil de mesure

La perte en eau englobe à la fois la **perte insensible en eau** (PIE) (cf. partie 1.3.2.3. page 87) et la **perte par le mécanisme de sudation** (cf. partie 1.3.1.5.1. page 78). Il est quasi impossible de mesurer la PIE d'un côté et le taux de sudation de l'autre. La seule solution serait de bloquer chimiquement le mécanisme de sudation pour s'assurer de ne mesurer que la PIE. Mais, dans ce cas, les mécanismes physiologiques sont modifiés. Ceci est en désaccord avec notre objectif sur la caractérisation "physiologique" du confort. Il a donc été choisi d'utiliser une méthode qui permet de mesurer la perte en eau globale, sachant que, dans les environnements avec une température ambiante inférieure à 25°C, la PIE sera probablement dominante et que dans les environnements avec une température ambiante supérieure à 25°C, le taux de sudation (10 à 20 fois plus élevé que la PIE quand un individu transpire) pourra devenir dominant. Deux types de techniques peuvent alors être choisies : celles développées

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

pour la mesure de la PIE et celles pour la mesure du taux de sudation. Ces dernières [Agache et Candas 1999] sont basées:

- soit sur des pesées et elles nécessitent, alors, une balance de précision ou une quantité minimum de sueur ;
- soit sur l'application de substances (silicone, vaseline ou réactif coloré), mais, elles peuvent manquer de sensibilité ou perturber le phénomène de sudation ;
- soit sur la récupération de vapeur d'eau (mesurée par un hygromètre ou un spectrophotomètre) dans une capsule, mais l'appareillage est coûteux.

Ces techniques destinées à la mesure du taux de sudation n'ont, donc, pas été retenues et **les techniques de mesure de la PIE ont été privilégiées**. Elles sont particulièrement nombreuses [Wilson et Maibach 1989; Gabard et Treffel 2000]. Seules les méthodes commercialisées les plus courantes et apparaissant comme les plus fiables sont présentées. L'Evaporimètre (ServoMed, Suède) et le Téwamètre (Courage & Khazaka, Allemagne) sont très utilisés [Elsner 2003]. Ils sont basés sur la technique de la cavité ouverte contenant 2 paires de capteurs (humidité relative et température). Ils mesurent le gradient de vapeur d'eau s'établissant dans la couche de 10 mm située juste au-dessus de la surface cutanée. Ils ont l'avantage de ne pas altérer les propriétés du SC, de ne pas faire appel à une convection forcée, de ne pas stresser le sujet grâce à la rapidité de la mesure (~ 30s). Cependant, les mesures peuvent être perturbées par un courant d'air (ou la respiration), une fluctuation de l'humidité relative ou un positionnement non vertical de la sonde de mesure. D'autres appareils ont donc été développés pour remédier à ces limites :

- Le Vapomètre (Delphin Technologies, Finlande),

Il est basé sur la technique du cylindre fermé non ventilé et propose une mesure plus rapide (10 à 15 s), plus flexible et moins influencée par les courants d'air. Mais, il est moins sensible que le Téwamètre pour discriminer de faibles fluctuations et il est saturé lors de la mesure de forte PIE [De Paepe, Houben et al. 2005; Shah, Zhai et al. 2005].

- L'Aquaflux® (Biox Systems Ltd., UK),

Il est basé sur la technique de la cavité fermée contenant un condenseur de vapeur d'eau refroidi électroniquement et propose une mesure, a priori, moins dépendante de la température et de l'humidité ambiante, de la pression appliquée, des courants d'air, de l'angle de mesure, que les appareils à cavité ouverte [Imhof, De Jesus et al. 2009]. Il semblerait aussi que sa mesure soit moins rapide mais moins variable que celle du Vapomètre [Schaffo 2011].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dans nos conditions de mesures, les volontaires sont immobiles, allongés et la vitesse d'air de l'environnement est contrôlée. La **précision de mesure** a donc été privilégiée par rapport à la flexibilité d'utilisation de l'appareil. Face au manque de recul scientifique sur l'Aquaflux, au manque de sensibilité et de fiabilité du Vapomètre lorsque la PIE est élevée (ce qui sera probablement le cas dans des environnements thermiques où les volontaires seront susceptibles de transpirer), un instrument à cavité ouverte a été sélectionné : le **Téwamètre TM-300** (Courage & Khazaka, Allemagne). Il est plus contraignant au niveau de la standardisation des conditions de mesure mais plus précis.

2.8.1.4.2. Mesure avec le Téwamètre

La mesure, effectuée par le Téwamètre, de la vapeur d'eau évaporée à la surface de la peau est basée sur la loi de Fick et peut être caractérisée par l'équation suivante :

$$\frac{dm}{A.dt} = -D.\frac{dp}{dz} \qquad \textbf{[2.8-1]}$$

Avec, m : la masse d'eau évaporée (en g) ; t : le temps (en h) ; D : le coefficient de diffusion fixé à ~ $0{,}66.10^{-3}$ g m^{-1} h^{-1} Pa^{-1} ; A : la surface de mesure (en m^2) ; p : la pression de vapeur d'eau (en Pa) ; z : la distance entre la surface de la peau et le point de mesure (en m)

Elle nécessite, donc, le calcul de deux pressions de vapeur d'eau (en deux points différents). Pour ce faire, l'appareil est constitué d'une chambre ouverte où sont placés, en position verticale, l'un au-dessus de l'autre, deux détecteurs à semi-conducteurs sensibles à l'humidité relative et couplés chacun à une thermistance (cf. Figure 2.25). La distance des capteurs par rapport à la surface de la peau a été choisie de façon à ce que l'appareil mesure, dans des conditions optimales, le gradient de vapeur d'eau se mettant en place entre la surface cutanée et l'air ambiant. La pression de vapeur d'eau (p) est calculée à chaque niveau grâce à la formule suivante : $p = HR \times p_{sat}$, avec HR l'humidité relative (en %) mesurée avec les semi-conducteurs et p_{sat} la pression de vapeur saturante calculée par l'appareil grâce à la température mesurée par les thermistances.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

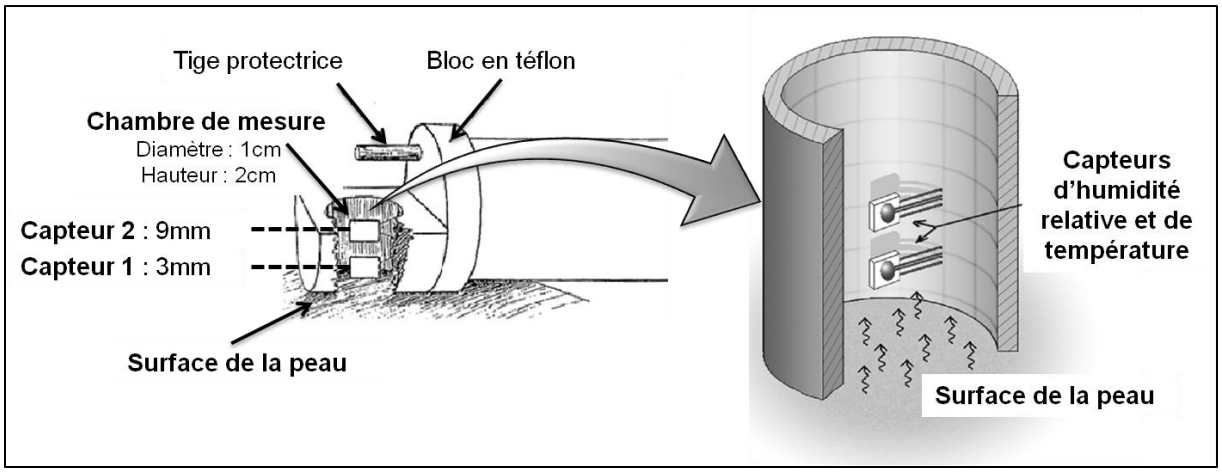


Figure 2.25 : A gauche : schéma de la sonde du Téwamètre TM300 [Gabard et Treffel 2000]. A droite : zoom sur la chambre de mesure [Imhof, De Jesus et al. 2009].

Le Téwamètre mesure le flux d'eau évaporée à la surface de la peau en g m^{-2} h^{-1}. Sa précision est estimée à ± 0,5 g h^{-1} m^{-2} quand l'humidité relative est supérieure à 30% et à ± 1,0 g h^{-1} m^{-2} dans les autre cas. Le temps de mesure est d'environ 30 secondes : ce temps permet d'obtenir une stabilité de la mesure et il est bien inférieur au temps de réponse caractéristique du stratum corneum. Les changements du microclimat liés à l'application de la sonde ont donc peu d'effet sur le résultat obtenu. Toutefois, les modifications intrinsèques ou extrinsèques du microclimat par des phénomènes tels qu'un courant d'air doivent être contrôlés. La mesure a été effectuée sur les joues, juste sous la zone des cernes, car la zone est plane et elle n'est pas perturbée par la respiration.

2.8.1.4.3. Réflexion sur l'interprétation de la grandeur mesurée.

Dans des conditions standards (Ta ~ 20-22°C et HR < 60%), la grandeur mesurée correspond à la PIE. L'hypothèse de base est la suivante : « au niveau de la zone, juste au-dessus de la surface cutanée (entre 0 et 10 mm), le gradient de vapeur d'eau est relié au flux d'évaporation provenant de la peau » [Nilsson 1977] (cf. Figure 2.26). La PIE est souvent utilisée pour évaluer la perméabilité de la barrière cutanée [Loden 2005; Van der Valk, Kucharekova et al. 2005; Wilhelm, Brandt et al. 2005; Darlenski, Sassning et al. 2009] : quand la PIE est élevée, la barrière cutanée est altérée et son rôle de fonction barrière (cf. partie 1.3.3. page 88) n'est plus assuré correctement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

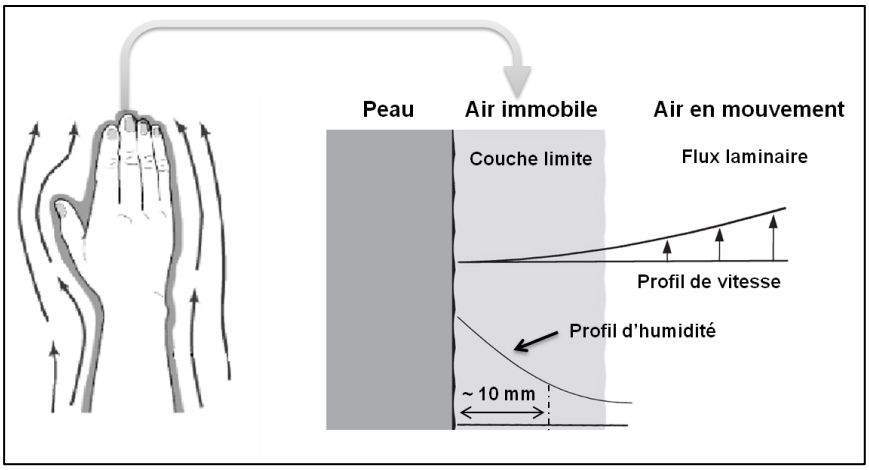


Figure 2.26 : Représentation de la couche limite où se situent les mesures effectuées avec le Téwamètre TM300 et de la convection naturelle juste au-dessus de la peau. Figure réalisée à partir de [Imhof, De Jesus et al. 2009]

Dans des conditions non standards et sans diffusion active (sudation), la mesure ne devient qu'une approximation de la PIE puisque le coefficient de diffusion D (cf. équation **[2.8-1]**) change avec la température ambiante et l'humidité relative de l'environnement (variation d'environ 5% entre 10°C et 30°C), alors que sa valeur est fixe et définie pour des conditions standards, dans le Téwamètre. D'autre part, dans des conditions non standards et avec une diffusion active, la grandeur mesurée correspond à une approximation de la perte en eau globale (active et passive), mais la valeur n'a pas vraiment de sens puisque le coefficient D n'a plus réellement de sens dans cette situation.

2.8.1.5. Facteurs expérimentaux affectant les mesures cutanées

Cette partie rassemble l'ensemble des facteurs expérimentaux susceptibles d'influencer les mesures cutanées et présente les solutions utilisées pour réduire l'influence de ces facteurs.

Ces facteurs sont les suivants :

- **La pression appliquée**

Toutes les mesures cutanées sont sensibles à la pression d'application de la sonde de mesure. Si la pression est trop importante, les propriétés cutanées (de sécrétion ou physiques) peuvent être modifiées. Les sondes ont donc été déposées délicatement sur la surface de la peau avec une pression d'environ 1 N, sauf pour la mesure avec le cornéomètre qui a nécessité une pression plus forte d'environ 1,3 N. La présence d'un ressort sur le cornéomètre a permis d'appliquer une pression similaire pour tous les sujets. L'expérimentateur a toujours été le même afin de limiter les divergences en lien avec la force naturelle de l'expérimentateur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- **La position des sondes de mesure**

La surface en contact avec la sonde est un paramètre essentiel. Si la surface en contact n'est pas optimale, la quantité de sébum ou d'eau mesurée peut être faussée. Une attention particulière a été portée pour déposer les sondes perpendiculairement à la surface cutanée. Pour faciliter cette démarche, les zones de mesures sélectionnées ont été planes et les sujets ont été allongés sur des fauteuils de repos inclinable à 60°. La mesure avec le Téwamètre TM 300 est très sensible à cette dernière précaution puisque le flux de vapeur d'eau doit être bien perpendiculaire à la surface de la peau pour passer à travers les deux capteurs de la cavité ouverte.

- **La calibration des appareils**

Tous les appareils de mesures ont été calibrés par le constructeur au moins dans les 6 mois qui précédaient l'expérimentation. Un contrôle régulier de la calibration a été réalisé pour le pH-mètre cutané PH 905.

- **La contamination des sondes de mesure**

La présence de résidus sur les sondes est susceptible de modifier les valeurs mesurées. La sonde du cornéomètre a été nettoyée après chaque série de mesures sur un même individu. La sonde du pH-mètre a été rincée à l'eau distillée, alors que la bande du sébumètre a été renouvelée après chaque mesure. La sonde du Téwamètre a été déposée sur des zones propres et sécurisées afin que les capteurs restent intacts.

2.8.1.6. Zones de mesures

Pour les mêmes raisons que celles évoquées pour la température cutanée, le visage a été sélectionné pour effectuer les mesures. Les mesures ont été réalisées sur des zones du visage où le paramètre biophysique analysé présente des valeurs relativement fortes (cf. Tableau 1.11 page 98 et Figure 2.27) :

- front pour la quantité de lipides surfaciques,
- sous les yeux au centre des joues pour la perte en eau. Cette zone est moins influencée par les mécanismes de sudation que le front. Elle représente donc davantage la perte insensible en eau. La mesure sur cette zone n'est pas perturbée par la respiration du sujet.
- joue pour la teneur en eau
- joue pour le pH cutané

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

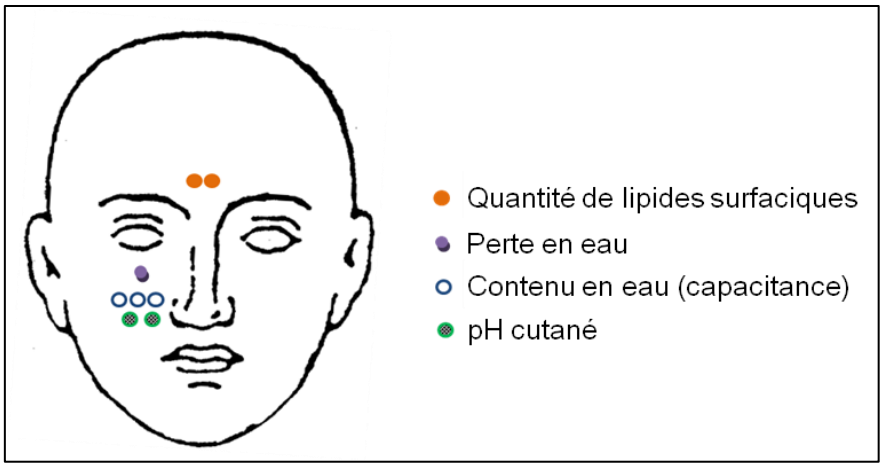


Figure 2.27 : les zones de mesures du protocole B

Pour limiter l'effet du site anatomique de mesure, les précautions suivantes ont été prises :

- Les zones de mesure ont été délimitées afin que la mesure soit toujours effectuée au même endroit.
- Les mesures ont été réalisées sur un seul côté et le choix du côté (gauche/droit) a été randomisé.
- Pour chaque paramètre cutané, une moyenne a été calculée à partir de plusieurs (2 ou 3 suivant les paramètres) mesures adjacentes consécutives (cf. Figure 2.27).

2.8.2. Résultats et discussions

2.8.2.1. Fiabilité des mesures : confrontation aux données de la littérature

Les moyennes et les écarts types des différentes variables cutanées obtenues dans différents environnements thermiques sont regroupés dans le Tableau 2.16.

Tableau 2.16 : Valeurs moyennes et écarts types de certaines variables cutanées mesurées dans différents environnements thermiques (E1 à ~20°C, E2 à ~25°C et E3 à ~30°C). La significativité p du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare les valeurs obtenues dans chacun des environnements thermiques E2 et E3 avec les valeurs obtenues dans E1 est représentée par une * lorsque p<0,05.

			Environnements thermiques		
Variables cutanées		Unité	E1 – 20°C	E2 – 25°C	E3 – 30°C
Perte en eau	PE	g m^{-2} h^{-1}	16,5 ± 5,2	15,1 ± 3,6	**20,5 ± 5,1 ***
Contenu en eau	CE	u.a.	39,8 ± 9,9	41,4 ± 8,1	**46,2 ± 13,8 ***
Quantité de lipides surfaciques	SEB	µg cm^{-2}	68,9 ± 63,5	77,5 ± 73,8	79,2 ± 60,6
pH	pH	pH	5,6 ± 0,5	5,6 ± 0,4	5,6 ± 0,6

u.a. unité arbitraire

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les comparaisons « directes » avec les données de la littérature ne sont pas toujours possibles pour certaines variables, car les conditions expérimentales ainsi que le panel et les appareils de mesures sont différents d'une étude à l'autre. Cependant, il a été possible d'évaluer si l'ordre de grandeur des variables était cohérent.

2.8.2.1.1. Perte en eau à la surface du stratum corneum

Les valeurs de la perte insensible en eau (PIE) mesurées sur les joues dans des environnements dont la température ambiante est comprise entre 22°C et 24°C sont souvent plus faibles (de l'ordre de 11 g m^{-2} h^{-1}) que celles que l'on obtient dans notre étude [Le Fur, Lopez *et al.* 1999; Wa et Maibach 2010]. En effet, beaucoup de travaux ont utilisé l'évaporimètre et non le téwamètre pour mesurer la PIE. Or, les valeurs obtenues avec un évaporimètre sont connues pour être plus faibles que celles obtenues avec le téwamètre TM 300. Par exemple, la PIE mesurée sur l'avant-bras dans un environnement à 22°C est de l'ordre de 4 g m^{-2} h^{-1} avec un évaporimètre et de l'ordre de 12 g m^{-2} h^{-1} avec le téwamètre [Gabard et Treffel 2000]. Il est donc cohérent d'obtenir des valeurs supérieures à 11 g m^{-2} h^{-1} à 20 et 25°C dans notre étude (cf. Tableau 2.16). De plus, comme les valeurs ont été similaires à 20°C sur les deux jours de mesures, les données semblent fiables.

Seule une valeur est particulièrement élevée (> 30 g m^{-2} h^{-1}). Elle a été mesurée le premier jour des mesures dans l'environnement à 20°C. Il est possible que cette valeur soit associée à une réactivité émotionnelle spécifique d'un volontaire au moment de la mesure. Même si beaucoup de précautions ont été prises pour que les sujets soient calmes et détendus, il est possible que, ponctuellement, un sujet n'ait pas été suffisamment détendu au moment de la mesure, ou qu'il ait été surpris. Le volontaire a alors pu réagir en rougissant ou en transpirant (sudation émotionnelle) ce qui a pu engendrer une perte en eau particulièrement élevée et atypique au moment de la mesure. Comme cette valeur de perte insensible en eau ne semble pas représenter une particularité de l'individu mais plutôt une réaction physiologique ponctuelle non reliée à la température ambiante, elle a été éliminée du reste de l'analyse pour ne pas fausser les résultats.

Pour la prochaine campagne de mesures, il sera nécessaire d'introduire une méthode de suivi de l'état de stress ou de réactivité émotionnelle des sujets, au moins au début de la phase de mesure.

D'autre part, en accord avec l'étude de Grice *et al.* et de Cravello et Ferri, la perte en eau a augmenté significativement (p_w = 0,004) après la plus forte transition chaude (20°C →

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

30°C) [Grice, Sattar *et al.* 1975; Cravello et Ferri 2008]. Cette augmentation peut être associée à différents phénomènes physiologiques et physiques :

- Le mécanisme de sudation qui peut être non négligeable chez certains sujets pour des températures ambiantes de l'ordre de 30°C
- Le phénomène de diffusion de l'eau dans la peau qui a tendance à augmenter quand la température des tissus augmente. En effet, en augmentant la température, l'énergie d'activation diminue c'est-à-dire que les molécules d'eau ont besoin de moins d'énergie pour se déplacer de l'intérieur vers l'extérieur. Or si l'eau se déplace plus facilement vers la surface de la peau, la quantité d'eau en surface aura tendance à augmenter et l'évaporation de l'eau en surface se fera plus facilement.
- Le phénomène d'évaporation de l'eau à la surface de la peau est également facilité lorsque la température ambiante augmente (et que l'air n'est pas saturé en eau)
- L'activité de la microcirculation cutanée peut également se répercuter sur l'apport en eau par les capillaires au niveau des couches profonde de l'épiderme. Une forte vasodilatation liée à une augmentation de la température pourrait augmenter la quantité d'eau qui diffuse et par là même l'évaporation de l'eau en surface. Ainsi Thiele *et al.* ont montré le lien potentiel entre la perte insensible en eau et l'activité vasomotrice cutanée [Thiele et van Senden 1966].
- La structure de la barrière cutanée se modifie peut-être en fonction de la température ambiante de façon à laisser davantage l'eau s'évaporer quand la température ambiante augmente afin de préserver l'homéothermie.

Grice *et al.* ont bien montré que la perte insensible en eau (sans la sudation) a augmente exponentiellement avec l'augmentation de la température des tissus [Grice, Sattar *et al.* 1971]. Par contre, la plus faible transition chaude (20°C → 25°C) n'a pas suffi à engendrer une augmentation significative de la perte en eau. Cette observation est en désaccord avec l'étude de Cravello et Ferri sur l'avant-bras et en accord avec l'étude de Chen *et al.* sur l'avant-bras [Cravello et Ferri 2008; Chen, Hwang *et al.* 2011]. L'absence de significativité est probablement associée à une augmentation insuffisante de la température de peau, chez certains sujets, pour augmenter la diffusion de l'eau dans la peau. Elle peut également être associée à une mauvaise stabilité de la température ambiante à 25°C (cf. partie 2.3. 121). Certains sujets ont peut-être vécus des températures trop faibles (< 25°C) qui faussent en partie les résultats obtenus lors de la transition : 20°C → 25°C. Comme mentionné

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

auparavant, les résultats obtenus à partir de cette transition thermique devront être analysés avec précaution.

2.8.2.1.2. Contenu en eau du stratum corneum

Les valeurs du contenu en eau obtenues dans notre étude sont cohérentes avec celles mentionnées par Khazaka [Khazaka 2004]. En effet, une étude sur 349 personnes et sur six zones anatomiques a permis d'établir des gammes de valeurs de capacitance (mesurées avec le cornéomètre CM 825) en fonction du type de peau :

- les valeurs inférieures à 30 u.a. sont associées à des peaux très sèches ;
- les valeurs comprises entre 30 et 40 u.a. sont associées à des peaux sèches ;
- les valeurs supérieures à 40 u.a. sont associées à des peaux normales.

Suivant cette classification, le panel du protocole B est constitué de 8% de peaux très sèches, de 42% de peaux sèches et de 50% de peaux normales. Cette constitution semble cohérente.

Cependant, de nombreuses valeurs de capacitance répertoriées dans la littérature sont plus élevées et de l'ordre de 80 – 90 u.a. [Le Fur, Lopez *et al.* 1999; Wa et Maibach 2010]. Ces différences s'expliquent par l'appareil de mesure : beaucoup de mesures ont été effectuées avec le cornéomètre CM 820 et non pas avec le cornéomètre CM 825. Or, la profondeur de mesure est plus élevée avec le CM 820. Il est donc logique que les valeurs obtenues dans cette étude et mesurées avec le cornéomètre CM 825, soient plus faibles, puisque, quand la mesure est moins profonde, le contenu en eau dans la peau est connu pour être plus faible.

Seul le sujet n°18 présente des valeurs particulièrement faibles de l'ordre de 14 u.a. Cependant, rien ne laisse supposer que les valeurs associées à ce sujet soient aberrantes. Elle reflète probablement une particularité cutanée.

D'autre part, la teneur en eau du stratum corneum augmente significativement (p_w = 0,015) après la transition chaude la plus forte (20°C → 30°C) (cf. Tableau 2.16). Cette observation est en accord avec l'étude de Cravello et Ferri [Cravello et Ferri 2008] et avec l'étude de Spencer qui montre que le contenu en eau du stratum corneum dépend de la température ambiante lorsque l'humidité relative est inférieure à 60% [Spencer, Linamen *et al.* 1975]. A 30°C, il peut être supposé que l'augmentation du contenu en eau est probablement davantage liée à l'augmentation du taux de sudation qu'à l'influence de la température ambiante sur la conduction électrique (évoquée dans la partie 2.8.1.1.3. page 163). Cependant, lors de la plus faible transition chaude, l'augmentation du contenu en eau

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

n'a pas été significative. Cette observation est probablement associée à un faible taux de sudation dans l'environnement à 25°C, ou encore une fois à une température ambiante à 25°C pas assez stable (et parfois inférieure à 25°C), ou à une diffusion de l'eau dans la peau trop faible pour que la quantité en surface augmente.

2.8.2.1.3. Quantité des lipides surfaciques

Dans la majorité des études et dans des environnements standards avec une température ambiante comprise entre 22 et 24°C, la quantité de lipides surfaciques ou le niveau de sébum sur le front est supérieur à 100 µg/cm² en moyenne avec un écart type relativement élevé de l'ordre de 50 µg/cm² [Wa et Maibach 2010]. Seule l'étude de Marrakchi et Maibach mentionne des valeurs du même ordre de grandeur que celles de notre étude : 62,9 ± 28,8 µg/cm². Ces différences entre les études ne sont pas liées à l'appareil de mesure mais peut-être davantage à l'utilisation du Sébumètre SM 810. En effet, il est fort probable que les différences soient associées à la pression appliquée sur la peau. Dans notre étude, le Sébumètre a été déposé délicatement sur la peau sans appliquer une forte pression afin de ne pas modifier le processus d'excrétion du sébum. Cependant, certains articles préconisent d'appliquer une pression constante de 10 N à la surface de la peau grâce au ressort intégré dans le Sébumètre SM 810 [Piérard, Piérard-Franchimont *et al.* 2000]. Cependant, avec une telle pression, il peut être supposé que la quantité prélevée avec la bande est plus élevée qu'avec une pression de l'ordre de 1 ou 2 N.

D'autre part, les écarts types dans notre étude sont relativement élevés et compris entre 60 et 74 µg/cm² (cf. Tableau 2.16). L'une des raisons pourrait être liée à la sélection du panel. En effet, le panel du protocole B n'a pas été sélectionné par rapport au type « cosmétique » de peau. Or, la littérature montre bien que la quantité de lipides surfaciques varie considérablement suivant le type de peau sur le front (103 ± 44 µg/cm² pour une peau normale et 144 ± 43 µg/cm² pour une peau grasse [Le Fur, Lopez *et al.* 1999]). Il n'est donc pas étonnant que les différences entre les sujets soient importantes dans notre étude. D'ailleurs, des valeurs particulièrement faibles (≤10 µg/cm² dans les 3 environnements thermiques) ont été repérées pour le sujet n°23 et des valeurs particulièrement élevées (> 200 µg/cm²) ont également été relevées pour les sujets n°18 et n°20. Ces valeurs ont été mesurées à plusieurs reprises. Elles ne sont donc pas aberrantes. Elles reflètent un type de peau particulier.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Concernant l'évolution de la quantité de lipides surfaciques en fonction de la température ambiante, il semble que la quantité de lipides a tendance à augmenter légèrement, en moyenne, avec l'augmentation de la température ambiante (cf. Tableau 2.16). Cependant, cette tendance n'est pas significative. Seuls deux sujets ont une quantité de sébum qui augmente réellement lors de la transition chaude la plus forte. La température ambiante ainsi que la température de peau n'est a priori pas assez élevée pour observer une augmentation de la quantité de lipides surfaciques. L'affirmation selon laquelle l'augmentation de 1°C de la température de peau engendre une augmentation de 10% de l'excrétion de sébum n'est pas vérifiée ici. Ces dernières observations nous incitent à être prudents quant à l'interprétation de ces données.

2.8.2.1.4. Acidité de la surface cutanée

D'après l'article de Wa et Maibach, les valeurs moyennes de pH sur les joues sont de l'ordre de 5,1 ou de 5,9, suivant les études [Wa et Maibach 2010]. La valeur moyenne que nous obtenons dans notre étude est bien du même ordre de grandeur puisqu'elle vaut 5,6 (cf. Tableau 2.16). Les écarts types, de l'ordre de 0,4 – 0,6, sont également en accord avec la littérature. En général, le pH de la peau est compris entre 4,0 et 6,0 [Parra et Paye 2003]. Ici, environ 3 sujets ont tendance à présenter des pH supérieurs à 6,0. Sur ces trois sujets, deux sont fumeurs. Or, il est probable que le tabagisme augmente le pH cutané. En effet, le pH de la fumée de tabac brun est alcalin de l'ordre de 8,0 et celui de la fumée du tabac blond est de l'ordre de 5,0 mais les industriels ont tendance à ajouter de l'ammoniac dans le tabac blond pour alcaliniser le pH de la fumée afin d'accélérer la délivrance de la nicotine [Biver-Dalle et Humbert 2010]. Ainsi, il est probable que les fumeurs aient tendance à avoir un pH cutané plus élevé que les non-fumeurs. L'autre valeur élevée de pH est peut-être associée à l'utilisation fréquente de détergents par le sujet ou à des problèmes cutanés non identifiés (et non déclarés par le sujet) dans cette expérimentation. Il est possible que le tabagisme fausse l'analyse du pH cutané dans la suite.

D'autre part, aucune étude, à notre connaissance, n'a étudié l'évolution de l'acidité de la surface de la peau avec l'augmentation de la température ambiante. Il n'est donc pas possible de vérifier si l'absence d'évolution du pH des joues avec la température ambiante est cohérente avec les observations de la littérature.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.8.2.2. Liens entre la sensibilité thermique et les propriétés du film hydrolipidique

Cette partie a pour objectif de déterminer si le groupe G2 (défini comme sensible au froid et dont l'état de confort thermique augmente après les transitions chaudes) a des propriétés cutanées (hydriques, lipidiques, *etc.*) particulières dans l'environnement frais et des évolutions des propriétés de la barrière cutanée, après les transitions chaudes, spécifiques et différentes du groupe G1. Les propriétés cutanées explorées sont : la perte en eau, le contenu en eau, la quantité de lipides surfaciques et le pH cutané.

2.8.2.2.1. La perte en eau des groupes de sensibilité thermique

D'après la Figure 2.28, la perte en eau a tendance à être plus élevée pour le groupe G2 que pour le groupe G1, dans tous les environnements. Cependant, cette tendance n'est pas statistiquement significative.

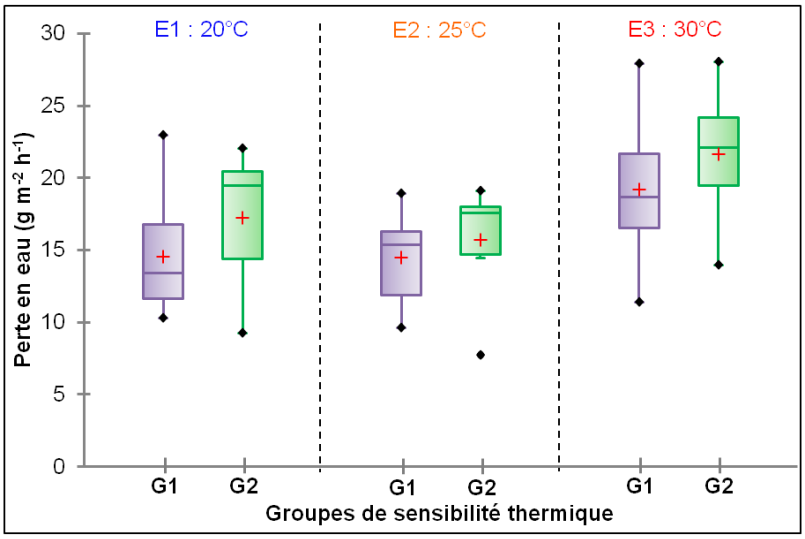


Figure 2.28 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées.

D'autre part, d'après les tests des rangs signés de Wilcoxon dont les p-valeurs sont répertoriées dans le Tableau 2.17, la perte en eau du groupe G2 augmente significativement (p_w =0,018) après la forte transition chaude alors qu'elle ne change pas significativement pour le groupe G1. Les mécanismes physiologiques de thermorégulation et plus spécifiquement de sudation de chacun des deux groupes semblent donc différents.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 2.17 : Les p-valeurs du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare différentes propriétés cutanées obtenues avant et après la/les transition(s) thermique(s) chaude(s). Si p < 0,05, les variables cutanées ont significativement changé après la transition thermique chaude.

	Transition 1 20°C → 25°C		**Transition 2 20°C → 30°C**	
	Groupe G1	Groupe G2	Groupe G1	Groupe G2
Perte Insensible en eau	0,753	0,075	0,075	**0,018**
Contenu en eau	0,463	0,204	0,345	**0,028**
Quantité de lipides surfaciques	0,600	**0,028**	0,173	0,311
pH	0,500	0,866	0,463	0,141
Clarté L	0,600	0,176	0,753	**0,018**
Chromaticité vert-rouge a*	0,463	0,398	0,249	**0,018**
Chromaticité bleu-jaune b*	0,463	0,237	0,075	**0,028**

2.8.2.2.2. Le contenu en eau des groupes de sensibilité thermique

D'après la Figure 2.29, le contenu en eau du SC du groupe G2 a tendance à être plus faible que celui du groupe G1 dans les environnements frais ou modérés et à être plus élevé que le groupe G1 dans l'environnement chaud. Cependant, ces tendances ne sont pas significatives. D'un côté, les tendances du groupe G2 (contenu en eau du SC plus faible et perte en eau plus élevée que le groupe G1) dans les environnements frais et chaud modérés témoignent, a priori, d'une fonction barrière plus affaiblie que celle du groupe G1. D'un autre côté, le contenu en eau du SC ainsi que la perte en eau plus élevés pour le groupe G2 que pour le groupe G1, dans l'environnement chaud, témoignent probablement d'un taux de sudation plus élevé pour le groupe G2 après la forte transition chaude. Il est possible que le groupe G1 ne transpire pas ou très peu dans l'environnement à 30°C par rapport au groupe G2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

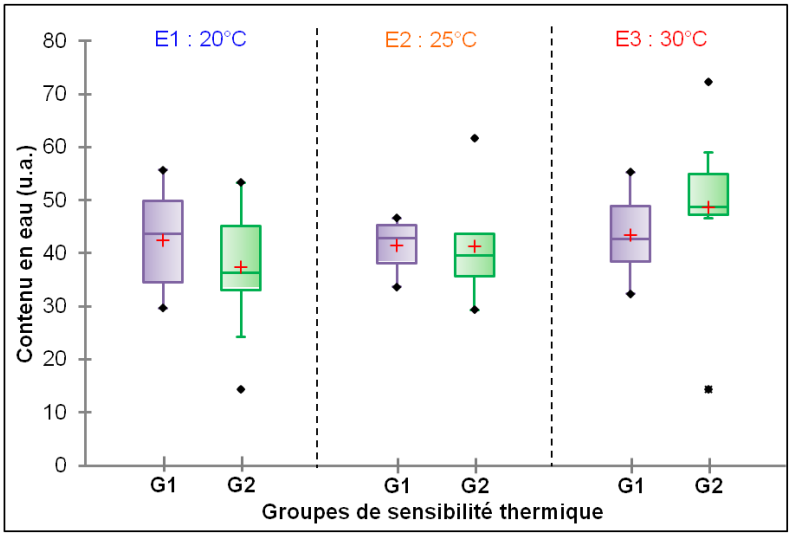


Figure 2.29 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées..

D'ailleurs, d'après les tests des rangs signés de Wilcoxon, seul le groupe G2 a un contenu en eau qui augmente significativement lors de la forte transition chaude (20°C → 30°C) (cf. Tableau 2.17). Le groupe G2 semble donc réagir physiologiquement à cette transition chaude contrairement au groupe G1. Cette réaction physiologique est probablement associée au déclenchement du mécanisme de sudation ou à un mécanisme de vasodilatation plus élevé qui engendrerait un apport en eau, dans les couches profondes de l'épiderme par les capillaires, plus important. Pour le groupe G1, le déclenchement de ces mécanismes de thermorégulation est peut-être moins précoce et nécessite probablement une température ambiante plus élevée.

2.8.2.2.3. La quantité de lipides surfaciques des groupes de sensibilité thermique

D'après la Figure 2.30, le groupe G2 comprend deux sujets (les deux sujets déjà évoquée dans la partie 2.8.2.1.) qui ont une quantité particulièrement élevée de lipides surfaciques dans l'environnement frais et modérément chaud. Le reste du groupe G2 a des valeurs relativement similaires aux valeurs du groupe G1 (la médiane est similaire) dans l'environnement frais à 20°C. Globalement, le groupe G2 a tendance à avoir une quantité plus importante de lipides surfaciques que le groupe G1 surtout dans l'environnement à 25°C. Mais cette tendance est non significative.

Les résultats des tests des rangs signés de Wilcoxon mettent également en évidence que la quantité de lipides surfaciques augmente significativement lors de la plus faible transition chaude (20°C → 25°C) pour les individus du groupe G2 mais pas pour ceux du

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

groupe G1. La tendance du groupe G2 est plutôt en accord avec la littérature qui montre que l'excrétion de sébum augmente avec l'augmentation de la température de peau. Par contre, l'absence d'évolution du contenu lipidique avec la température ambiante pour le groupe G1 montre que ce groupe a probablement besoin d'une température plus élevée pour engendrer une augmentation de l'excrétion de sébum. D'ailleurs, dans l'environnement à 30°C, le groupe G1 semble avoir un contenu lipidique légèrement plus élevé même si cette tendance n'est pas significative.

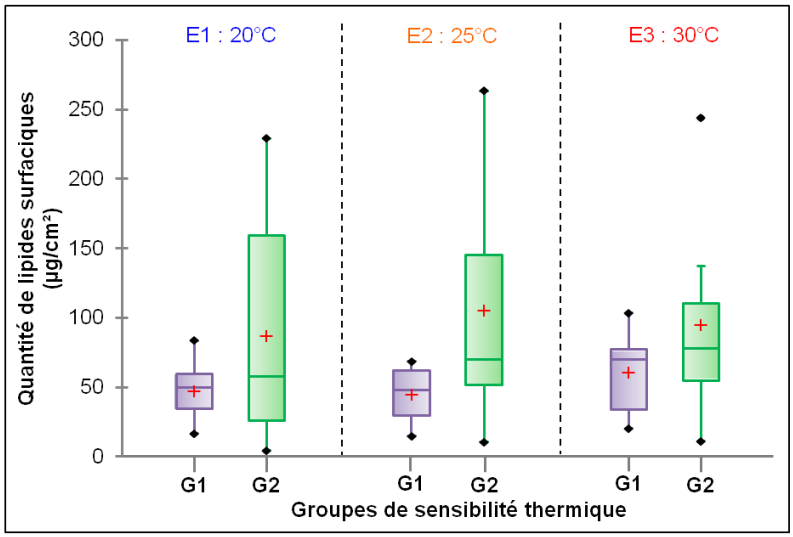


Figure 2.30 : Boîtes de Tukey représentant le contenu en eau du SC du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées.

Cependant, le résultat obtenu pour le groupe G2 lors de la forte transition chaude est plutôt étonnant. En effet, le contenu lipidique n'a pas augmenté significativement (p_w = 0,31 d'après le Tableau 2.17), alors que la température ambiante a augmenté de façon beaucoup plus forte. Cette observation reflète-t-elle un réel mécanisme physiologique ou est-elle liée aux limites de la mesure mentionnées dans la partie 2.8.1.3.3. page 167 ? La présence de sueur à la surface de la peau des individus du groupe G2 ou la modification potentielle de la viscosité du sébum avec la température de peau (qui est plus élevée pour le groupe G2 que pour le groupe G1 sur le front dans l'environnement à 30°C d'après la partie 2.7.2.2.1. page 151) a pu modifier le pouvoir de captation de la bande du sébumètre. Cette modification a pu réduire la quantité de lipides prélevée par la bande même si les lipides surfaciques étaient plus nombreux à la surface de la peau.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.8.2.2.4. L'acidité de la surface cutanée des groupes de sensibilité thermique

D'après la Figure 2.31, la surface cutanée du groupe G2 semble plus acide que celle du groupe G1 dans tous les environnements. Cependant, les tests statistiques montrent que cette observation n'est pas significative. Le groupe G1 est composé de 4 sujets fumeurs dont deux ont des pH cutanés supérieurs à 6,0, d'après la partie sur la fiabilité des données sur l'acidité de la surface cutanée. Le tabagisme est probablement l'une des explications du pH plus élevé du groupe G1.

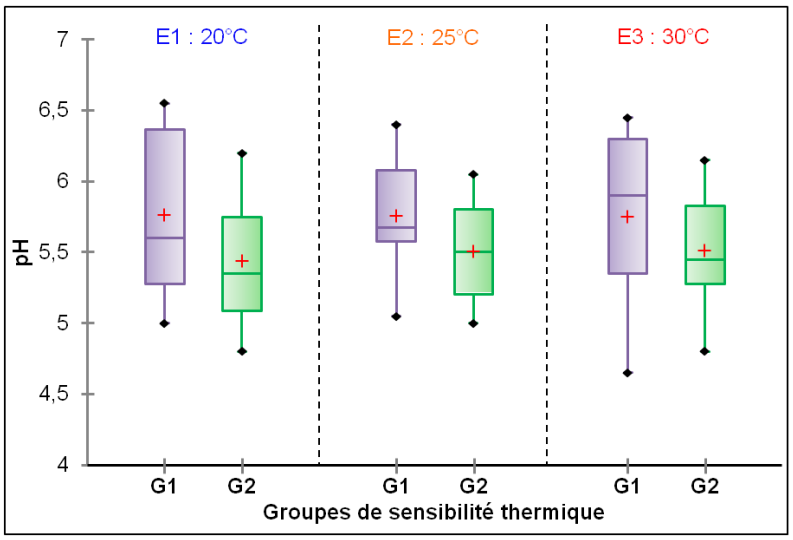


Figure 2.31 : Diagrammes boîte à moustaches représentant le pH cutané du groupe G1 non sensible au froid et du groupe G2 sensible au froid mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées. La croix rouge représente la valeur moyenne.

D'autre part, le Tableau 2.17 montre que le pH n'a pas changé significativement, pour le groupe G1 et le groupe G2, après les deux transitions chaudes. Donc, même si la composition chimique de la surface cutanée (avec une modification du contenu en eau ou de la quantité des lipides) a pu changer significativement pour le groupe G2 dans certaines situations, le pH lui n'a pas changé significativement. La peau est probablement confrontée à des stress thermiques trop faibles pour qu'ils puissent se répercuter significativement sur la composition chimique de la peau et sur le pH cutané. En effet, des variations de pH cutané ont été observées dans des situations où les agressions sont chimiques et relativement fortes. Par exemple, le pH augmente significativement après 1h30 dans une piscine [Gardinier, Guéhenneux *et al.* 2009] ou après l'application de produits détergents.

2.8.2.2.5. Liens entre les propriétés du film hydrolipidique et le ressenti

Dans cette partie, les données brutes et les données centrées (ou les variations individuelles) c'est-à-dire les variations des variables par rapport à la moyenne de chaque

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

individu (sur les trois environnements) ont été analysées. Les variables centrées permettent de réduire la variabilité individuelle.

Pour le groupe G1 (non sensible au froid et dont le confort thermique ne varie pas avec les transitions chaudes), la plupart des variables cutanées représentant l'état du film hydrolipidique ne sont pas liées au ressenti. D'après la Figure 2.32, seules les variations individuelles de perte en eau sont faiblement corrélées à la sensation thermique (r = 0,5). Pour ce groupe G1, le contenu en eau est corrélé négativement au pH (r = -0,4) : l'acidité de la surface cutanée a tendance à augmenter lorsque le contenu en eau augmente.

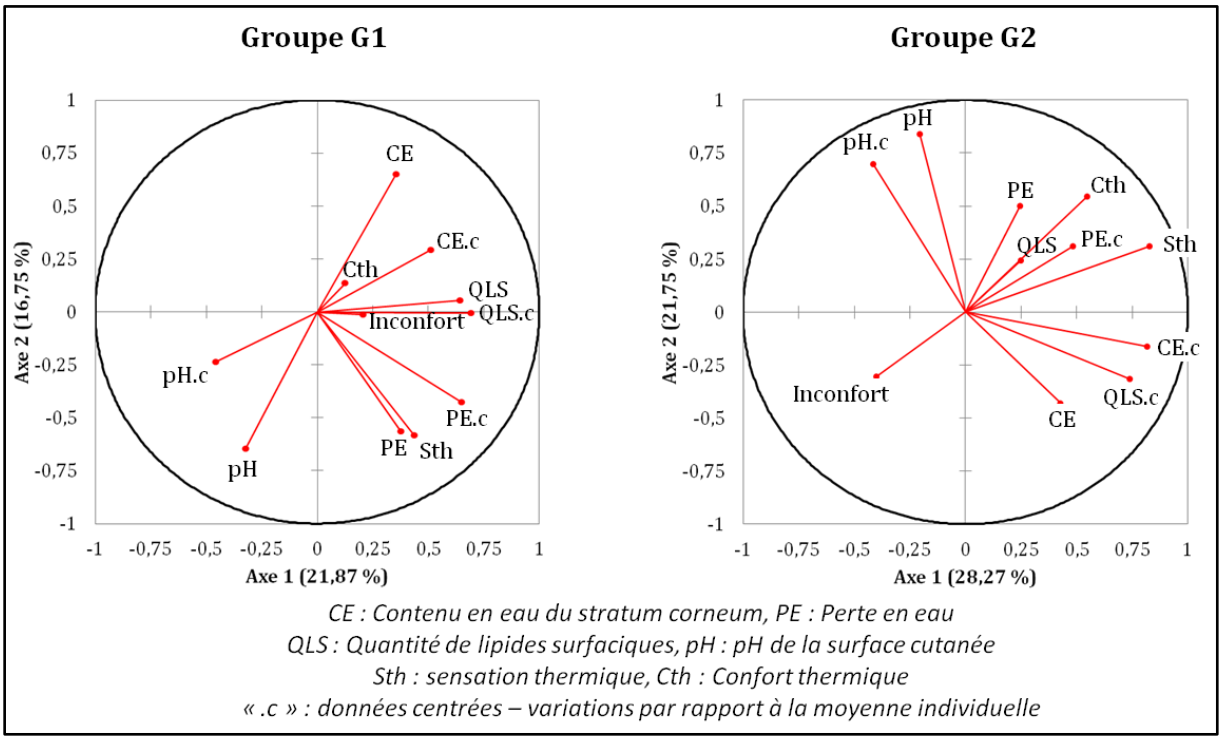


Figure 2.32 : Cercles de corrélation de l'ACP de Spearman représentant les liens entre les différentes variables du film hydrolipidique et le ressenti thermique déclaré. A gauche, le cercle est associé au groupe de sensibilité G1 et à droite, au groupe de sensibilité G2

Pour le groupe G2, la sensation thermique déclarée est légèrement corrélée positivement aux variations individuelles de la quantité de lipides surfaciques (r = 0,4), de perte en eau (r = 0,5) et de contenu en eau (r = 0,6). D'autre part, pour ce groupe, l'acidité de la surface cutanée a tendance à diminuer lorsque la quantité de lipides surfaciques augmente (r = 0,4) et lorsque le contenu en eau du stratum corneum diminue (r = -0,4). Contrairement au groupe G1, les variations individuelles des propriétés du film hydrolipidique du groupe G2 sont liées entre elles :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- les variations individuelles de la quantité de lipides surfaciques sont corrélées positivement aux variations de contenu en eau (r = 0,6) et négativement aux variations de pH (r = -0,6)
- les variations individuelles du contenu en eau du stratum corneum sont corrélées négativement aux variations individuelles de pH (r = -0,4)

Les relations entre les variables du film hydrolipidique et le ressenti déclaré et entre les variables cutanées elles-mêmes sont donc différentes suivant le groupe d'individus. La sensation thermique du groupe G2 semble davantage reliée aux propriétés du film hydrolipidique que le groupe G1. Mais dans les deux cas, les liens avec la sensation thermique déclarée se font avec les variations individuelles et non avec les données brutes et les relations sont faibles. De plus, pour les deux groupes, le confort thermique et l'inconfort ne sont pas reliés aux propriétés du film hydrolipidique.

2.8.2.3. Discussion : liens entre la sensibilité thermique et les propriétés du film hydrolipidique

Les deux groupes distincts de sensibilité au froid ne présentent pas de différences significatives de « niveaux » (moyennes ou rangs) pour chacune des variables cutanées de cette partie et dans chacun des trois environnements thermiques. Par contre, les deux groupes réagissent physiologiquement différemment face à une transition chaude surtout face à la forte transition chaude (20°C → 30°C). Le groupe G1 (non sensible au froid et caractérisé par un état de confort thermique stable) semble avoir des réponses physiologiques de thermorégulation (en particulier des mécanismes de sudation) moins actives alors que le groupe G2 (sensible au froid et dont le confort thermique augmente avec les transitions chaudes) réagit fortement aux transitions thermiques. Les deux groupes semblent avoir des seuils de déclenchement des réponses thermorégulatrices différents.

En résumé, contrairement au groupe G1, le groupe G2 peut être caractérisé par les évolutions suivantes dans l'environnement à 30°C après la transition chaude (20°C → 30°C) :

- Augmentation de la perte en eau probablement associée à une augmentation du taux de sudation ou à une augmentation plus forte de la vasodilatation ;
- Augmentation du contenu en eau probablement associée à une augmentation de la quantité de sueur à la surface du stratum corneum, avant le mécanisme d'évaporation.

L'augmentation de la quantité de lipides surfaciques a été significative pour le groupe G2 seulement après la plus faible transition thermique. Nous supposons que l'absence

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

d'augmentation significative après la forte transition est liée à une défaillance de la mesure (dans un environnement où les volontaires sont susceptibles de transpirer) et non à une réaction physiologique différente de celle observée après la première transition chaude. Cependant, cette hypothèse reste à vérifier.

D'autre part, les liens entre les variations individuelles du contenu en eau, de la quantité de lipides surfaciques et du pH pour le groupe G2 sont peut-être liés à la modification de la quantité de sueur à la surface de la peau après les transitions chaudes. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné dans le premier chapitre, l'augmentation de la transpiration engendre probablement une augmentation du contenu en eau du stratum corneum et une augmentation de l'excrétion de sébum (cf. partie 1.3.4. 91). Ainsi, il est plutôt logique que ces changements se répercutent sur les variations individuelles du pH cutané des individus de ce groupe. Ces relations pourraient également être associées à des modifications de la barrière cutanée avec la température ambiante. Le lien entre l'hydratation de la peau et la quantité de lipides surfaciques a déjà été établi [Choi, Man *et al.* 2005]. Cependant, l'absence de ces relations pour le groupe G1 confirme que ce groupe ne transpire probablement pas (ou peu) après les transitions chaudes ou que les variations des propriétés de son film hydrolipidique ne sont pas perturbées par les deux transitions chaudes testées dans l'expérimentation. Les variations des propriétés du film hydrolipidique du groupe G1 semblent aléatoires et non associées à un mécanisme de thermorégulation.

Des tendances (non significatives) peuvent également caractériser le groupe sensible au froid G2 dans l'environnement frais (où la sensation thermique du groupe G1 est significativement plus élevée que celle du groupe G2) :

- Perte en eau plus élevée que celle du groupe G1 (et pas seulement dans l'environnement le plus frais) : les individus du groupe G2 ont tendance à avoir une barrière cutanée hydrique moins forte que celle des individus du G1.
- Contenu en eau plus faible que le groupe G1 : les individus du groupe G2 semblent avoir une peau moins hydratée. Ce manque d'hydratation explique peut-être la faiblesse de la barrière cutanée du groupe G2 visible à travers la perte en eau plus élevée.
- pH plus faible que le groupe G1 (et pas seulement dans l'environnement le plus frais). Ceci est peut-être lié à une différence au niveau de la barrière cutanée causée par le tabagisme ou par une hygiène de vie différente (utilisation de savon plus ou moins agressifs).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

De plus, d'après l'analyse des corrélations, les changements d'une variable cutanée du groupe G2 semblent se répercuter sur les autres variables cutanées et même parfois sur le ressenti thermique. Toutes les propriétés semblent bien liées entre elles et leurs changements semblent associés à des réponses thermorégulatrices engendrées par les transitions chaudes. Par contre, pour le groupe G1 dont le confort thermique n'évolue pas avec les transitions chaudes, les variations des variables semblent très peu reliées entre elles. Les variations dans ce groupe semblent être aléatoires et non associées à des réponses « communes » de thermorégulation.

Cependant, toutes ces constatations (sur les évolutions significatives et les tendances) qui permettent de différencier le groupe G2 et G1 sont-elles reliées à la sensibilité au froid ou au degré de tabagisme des deux groupes (les 4 fumeurs du panel appartiennent au groupe G1) ?

Il a déjà été évoqué, dans la partie sur l'étude des propriétés thermo-vasculaires cutanées, que le tabac a un effet vasoconstricteur et que les fumeurs ont une réponse vasomotrice réduite lors d'un réchauffement. Mais aucune étude, à notre connaissance, ne montre que le tabagisme a un impact sur le taux de sudation. Il est donc difficile de déterminer si l'absence d'évolution du taux de sudation après la forte transition chaude du groupe G1 est également reliée au tabagisme.

La différence d'évolution du taux de sudation après la forte transition chaude peut être associée à une autre particularité des groupes mis en évidence par les questionnaires : d'après la Figure 2.4 (page 126) les individus du groupe G2 ont eu tendance à déclarer qu'ils transpiraient plus que les individus du groupe G1. Cette déclaration se vérifie lors des transitions chaudes. Or, cette particularité a-t-elle un lien avec la sensibilité au froid du groupe G2 ? Il pourrait être supposé qu'une plus forte perte en eau est un avantage dans les environnements chauds pour réguler la température du corps, mais une plus forte perte insensible en eau est probablement un désavantage au frais ou au froid où il est préférable de ne pas perdre de chaleur. Ceci pourrait expliquer l'augmentation significative de l'état de confort du groupe G2 après les transitions chaudes et la stagnation de l'état de confort du groupe G1 qui ne perd pas plus d'eau après les transitions chaudes. Le groupe G1 semble avoir un seuil de déclenchement des réponses de thermorégulation plus élevé. Le confort thermique semble évoluer lorsque les réponses thermorégulatrices évoluent puisque le groupe G1 a des réponses physiologiques et un ressenti relativement constants, alors que le groupe G2 a un confort qui augmente et des réponses thermorégulatrices fortes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, sauf pour le pH cutané, les différences au niveau de la barrière cutanée observées entre les deux groupes dans l'environnement frais semblent davantage associées à la sensibilité au froid qu'au degré de tabagisme. En effet, le stratum corneum des fumeurs est connu pour être plus déshydraté à cause de la fumée de tabac [Biver-Dalle et Humbert 2010]. Or, dans cette expérimentation le groupe G1 composé d'une majorité de fumeurs est caractérisé par une peau qui semble plus intègre et plus hydratée que celle du groupe G2 composé intégralement de non-fumeurs. La faiblesse de la barrière cutanée du groupe G2 (par rapport à la barrière du groupe G1) semble donc liée à la sensibilité au froid de ce groupe. Cependant, cette hypothèse reste à vérifier avec d'autres expérimentations car les tendances ne sont pas significatives. De plus, il n'est pas possible de déterminer si l'état de la barrière cutanée des individus peut être une cause de sensibilité thermique ou si la sensibilité thermique des individus se répercute sur la fonction barrière de la peau.

Tout comme pour l'analyse des propriétés thermo-vasculaires, il est nécessaire de réaliser des expérimentations supplémentaires avec un panel de non-fumeurs afin de conclure sur le lien entre les propriétés du film hydrolipidique et la sensibilité thermique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CONCLUSION

Les expérimentations préliminaires exposées dans ce chapitre ont permis de dégager des éléments essentiels à prendre en compte dans le protocole de la prochaine campagne de mesures destinée à une caractérisation plus fine des différences interindividuelles de ressenti thermique avec des mesures cutanées. Ces éléments sont les suivants :

- sélectionner plus précisément le panel avec l'ajout de critères d'exclusion ou d'inclusion liés en particulier au tabagisme et si possible au genre des volontaires ;
- maîtriser davantage les environnements thermiques avec des températures ambiantes et des humidités relatives régulées et mesurées précisément en continu ;
- créer des environnements thermiquement différents mais avec des contextes similaires (au niveau du bruit, de la taille, *etc.*) adaptés à l'évaluation sensorielle ;
- suivre objectivement la réactivité émotionnelle ou l'état de stress des sujets surtout avant le début de la phase de mesure afin de s'assurer que les mesures physiologiques sont associées à une réponse individuelle provoquée par la température ambiante et non à une réactivité ponctuelle émotionnelle ;
- explorer le lien entre la sensibilité thermique des individus et les mécanismes de thermorégulation, associés plus particulièrement aux propriétés thermo-vasculaires et hydriques de la peau, plutôt que le lien entre la sensibilité thermique et l'activité neurosensorielle associée aux seuils de perception ;
- inclure des transitions froides en plus des transitions chaudes afin d'obtenir une caractérisation plus complète des différences interindividuelles de ressenti.

Globalement, il semblerait que les individus plutôt sensibles au froid, et dont le confort thermique augmente avec les transitions chaudes, réagissent physiologiquement aux transitions chaudes alors que les individus qui semblent moins sensibles et dont le confort ne change pas avec les transitions chaudes n'ont pas de réponses thermorégulatrices notables. Cependant, cette caractérisation doit être confirmée avec un panel sans fumeur pour s'assurer que le tabagisme de certains sujets n'a pas faussé l'analyse. Toutefois, il serait peut-être également pertinent dans le cadre d'une autre étude d'explorer plus en détail l'impact du tabagisme sur la sensibilité thermique. En effet, le tabagisme serait peut-être un facteur pertinent à prendre en compte dans les modèles de prédiction de la sensation et du confort thermique car il semble avoir un impact non négligeable sur les propriétés thermiques des individus qui servent souvent de base aux modèles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Chapitre 3. Campagne finale de mesures

Identification des différences physiologiques cutanées entre des groupes de sensibilité distincte au froid et évaluation de l'intérêt d'introduire une approche multiparamétrique et des classes d'individus pour la prédiction du jugement thermosensoriel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

INTRODUCTION

Dans un premier temps, ce chapitre consiste, à identifier et à caractériser plus rigoureusement, grâce aux conclusions du chapitre précédent, les différences physiologiques cutanées des groupes de sensibilité au froid. Puis, dans un deuxième temps, il vise à évaluer l'intérêt d'introduire des variables non thermiques et des groupes de sensibilité au froid pour la prédiction de la sensation thermique et du confort thermique.

Tout ce chapitre est construit autour d'une importante campagne de mesures. Celle-ci a été réalisée dans des espaces conçus spécifiquement pour des analyses sensorielles et avec un panel sélectionné à partir de critères rigoureux. Les volontaires ont été confrontés à 6 environnements thermiques de températures modérées comprises entre 17°C et 30°C (avec 2 transitions chaudes et 2 transitions froides). Des mesures thermo-vasculaires liées directement aux mécanismes de thermorégulation telles que le flux sanguin ainsi que des mesures sur les propriétés du film hydrolipidique cutané ont été effectuées après une phase de 30 minutes d'acclimatation dans chacun des 6 environnements. Le ressenti déclaré a également été évalué à partir de questionnaires. De plus, en accord avec les conclusions du chapitre précédent, l'état de détente des volontaires a été contrôlé de façon objective afin d'éviter des biais de mesures liés à la réactivité émotionnelle des sujets.

Ce chapitre se divise en 6 parties :

- La première partie détaille le protocole expérimental ;
- La deuxième partie présente les nouveaux dispositifs de mesures et les méthodes d'extraction des données utilisés au cours de cette expérimentation ;
- La troisième partie expose la démarche du traitement statistique des données et certains outils statistiques tels que la régression par les moindres carrés partiels (PLS) ;
- La quatrième partie présente la caractérisation physique des environnements ;
- La cinquième partie détaille la nouvelle méthode de construction des groupes de sensibilité au froid et expose les particularités de chacun des groupes formés ;
- La sixième partie se concentre sur les résultats. Elle se divise en deux phases :
    - la première consiste à identifier puis discuter les différences physiologiques des deux groupes de sensibilité au froid
    - la deuxième consiste à déterminer, à l'aide de la régression PLS, l'apport des variables cutanées non thermiques et des groupes de sensibilité au froid pour la prédiction du ressenti thermique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.1. Protocole expérimental

3.1.1. Déroulement général

Ce protocole a été construit à partir des observations du chapitre précédent concernant les expérimentations préliminaires et à partir d'analogies avec l'analyse sensorielle du domaine de l'agroalimentaire.

Suffisamment d'environnements thermiques ont dû être créés afin de :

- réaliser des transitions chaudes et des transitions froides ;
- susciter suffisamment de ressentis thermiques différents pour caractériser plus finement le jugement thermosensoriel des volontaires ;
- permettre aux sujets de comparer les environnements à partir de questionnaires appropriés. En effet, les volontaires ont eu tendance à comparer les différents environnements lors de la phase d'expression libre des expérimentations préliminaires. De plus, dans le domaine de l'agroalimentaire, l'évaluation sensorielle de produits tels que des jus d'orange se fait souvent à partir du classement ou de la comparaison de plusieurs produits (ou jus d'orange) différents. La notation est alors plus facile pour les volontaires et la fiabilité des données « sensorielles » est meilleure.

Chaque volontaire a été confronté à 6 environnements thermiques au cours d'une même journée (de 9h15 à 17h15 avec une pause de 2h00 pour manger le midi) afin de garder en mémoire les différents environnements thermiques et d'être à peu près dans le même état (humeur, santé, *etc.*) pour exprimer les différents ressentis. L'impact du rythme circadien est faible entre 8h00 et 18h00 (cf. Tableau 1.14, page 102) et il nous a donc semblé plus important d'évaluer le ressenti de différents environnements thermiques au cours d'une même journée plutôt que de réduire très légèrement l'effet du rythme circadien en réalisant l'expérimentation sur plusieurs jours au même moment de la journée.

L'expérimentation s'est déroulée avec un seul volontaire par jour pendant le mois de juin. Ainsi, les volontaires n'ont pas été influencés par d'autres volontaires et leur état émotionnel ou leur état de détente a pu être évalué de façon objective.

L'ordre des environnements thermiques a été le même pour tous les sujets : 22°C, 17°C, 25°C, repas, 25°C, 19°C, 30°C. Chaque individu a donc vécu une transition froide et une transition chaude le matin et l'après-midi. La pause repas a duré environ 2h. Les volontaires sont restés allongés (dans un fauteuil de relaxation incliné) pendant 1h dans

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

chacun des environnements thermiques : les 30 premières minutes ont été consacrées à l'acclimatation, les 20 minutes suivantes aux mesures physiologiques et les 10 dernières au questionnaire (cf. Figure 3.1). La phase de mesure a été précédée par 10 minutes de « détente » pendant lesquelles le volontaire est resté calme sans parler. Tout au long de ces 10 minutes, son état de détente a été suivi par une mesure objective détaillée dans la partie 3.2.7.2. (page 218). La phase de mesure n'a débuté qu'une fois que le sujet était objectivement détendu afin d'éviter de mesurer des différences physiologiques associées à une réactivité émotionnelle trop élevée du sujet.

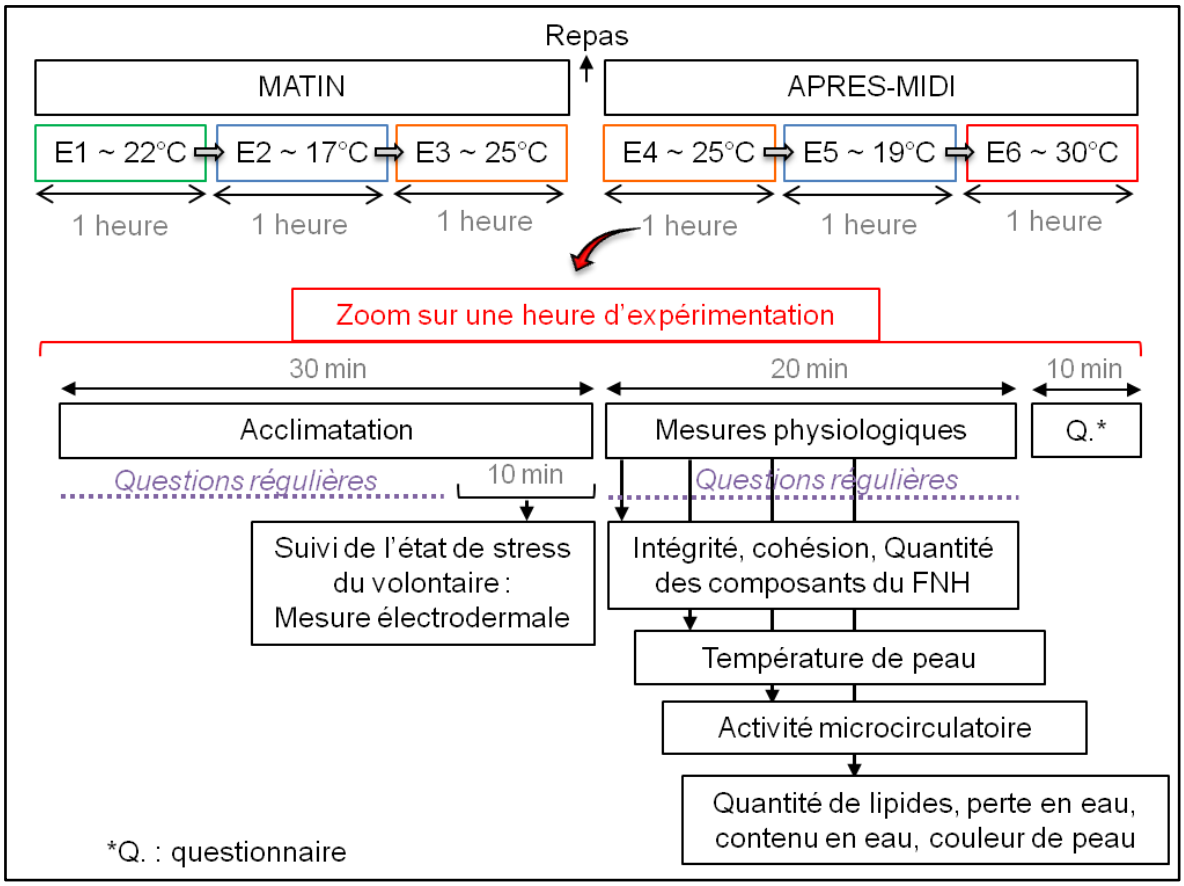


Figure 3.1 : Représentation du déroulement du protocole

Trois types de mesures physiologiques cutanées ont été réalisés pour évaluer les propriétés thermiques, vasculaires et les propriétés du film hydrolipidique, qui comprennent la mesure de la quantité de différents composants du Facteur Nature l'hydratation (FNH) (cf. partie 1.3.2.2.1. page 84), de l'état de la barrière cutanée, de la quantité de lipides surfaciques, de la perte en eau et du contenu en eau (cf. Figure 3.1). Tout au long de la phase d'acclimatation et de mesures, le volontaire a répondu oralement à des questions sur son ressenti et il a complété par écrit un questionnaire après la phase de mesures.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.1.2. Description des zones d'expérimentation

Suite aux remarques effectuées dans le chapitre précédent, une attention toute particulière a été portée sur la conception des espaces d'expérimentation. En effet, deux espaces de mesures ont été conçus pour être adaptés à l'évaluation sensorielle d'un environnement thermique. Nous nous sommes aidés des conseils suivants qui sont donnés dans le domaine de l'agro-alimentaire [Watts, Ylimaki *et al.* 1991] : utiliser des couleurs neutres, des matériaux inodores, un éclairage uniforme incandescent ou fluorescent simulant, si possible, la lumière du jour, une ventilation, *etc.*

Description générale du local expérimental

Un local de type « bungalow » (cf. Figure 3.2) a été utilisé pour créer deux espaces de mesures identiques, d'une quinzaine de mètres carrés chacun (cf. Figure 3.3) et isolés thermiquement.

Figure 3.2 : photographie du local dédié aux expérimentations

Les murs ont été peints en gris, le sol a été recouvert d'une moquette grise et les matériaux d'isolation ont été choisis pour qu'ils ne dégagent pas d'odeur gênante. Deux lampadaires avec ampoule fluorescente ont été choisis pour éclairer les deux espaces d'expérimentation car ils émettent beaucoup moins de chaleur qu'un éclairage à incandescence. Ainsi, la régulation de la température ambiante des espaces n'a pas été perturbée par la chaleur dégagée par l'éclairage.

Une zone « tampon », représentée sur le plan de la Figure 3.3, a également été prévue entre les deux espaces de mesures afin de minimiser le transfert de chaleur entre les deux espaces au moment du passage d'un espace à un autre.

Chaque espace possède une fenêtre qui donne sur l'extérieur afin de simuler un espace de vie « classique » et agréable. Le bungalow peut tourner puisqu'il est surélevé sur des roues (cf. Figure 3.2). Il a donc été orienté de façon à éviter une tâche solaire (c'est-à-dire une source de chaleur extérieure) dans les zones d'expérimentation pendant la période d'expérimentation (entre 9h00 et 18h00).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Le local a également l'avantage d'être situé dans une zone calme sans facteur de perturbation apparent. Il parait donc idéal pour réaliser des évaluations sensorielles.

Régulation des températures ambiantes

Comme indiqué sur la Figure 3.3 au niveau de la salle n°2, un climatiseur mural réversible du type « split system » (MSZ-FA 25, Mitsubishi Electric) a été installé dans chacune des deux salles pour réguler la température ambiante. Les deux principales raisons de ce choix, en dehors de son prix abordable, sont :

- L'absence de bruit gênant dans la zone d'expérimentation.

Contrairement au système monobloc qui est bruyant, le système « split system » est constitué de deux unités : une bruyante placée à l'extérieur (comportant le compresseur) et une située à l'intérieur qui souffle l'air à la température souhaitée.

- La possibilité de chauffer et de refroidir entre 16°C et 30°C avec un seul appareil.

Dans ce type de système réversible, le cycle de compression/détente qui permet de transférer les calories d'un point à un autre d'un circuit frigorifique est inversé suivant que l'on cherche à extraire des calories de la pièce (en mode froid) ou à injecter des calories (en mode chaud).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

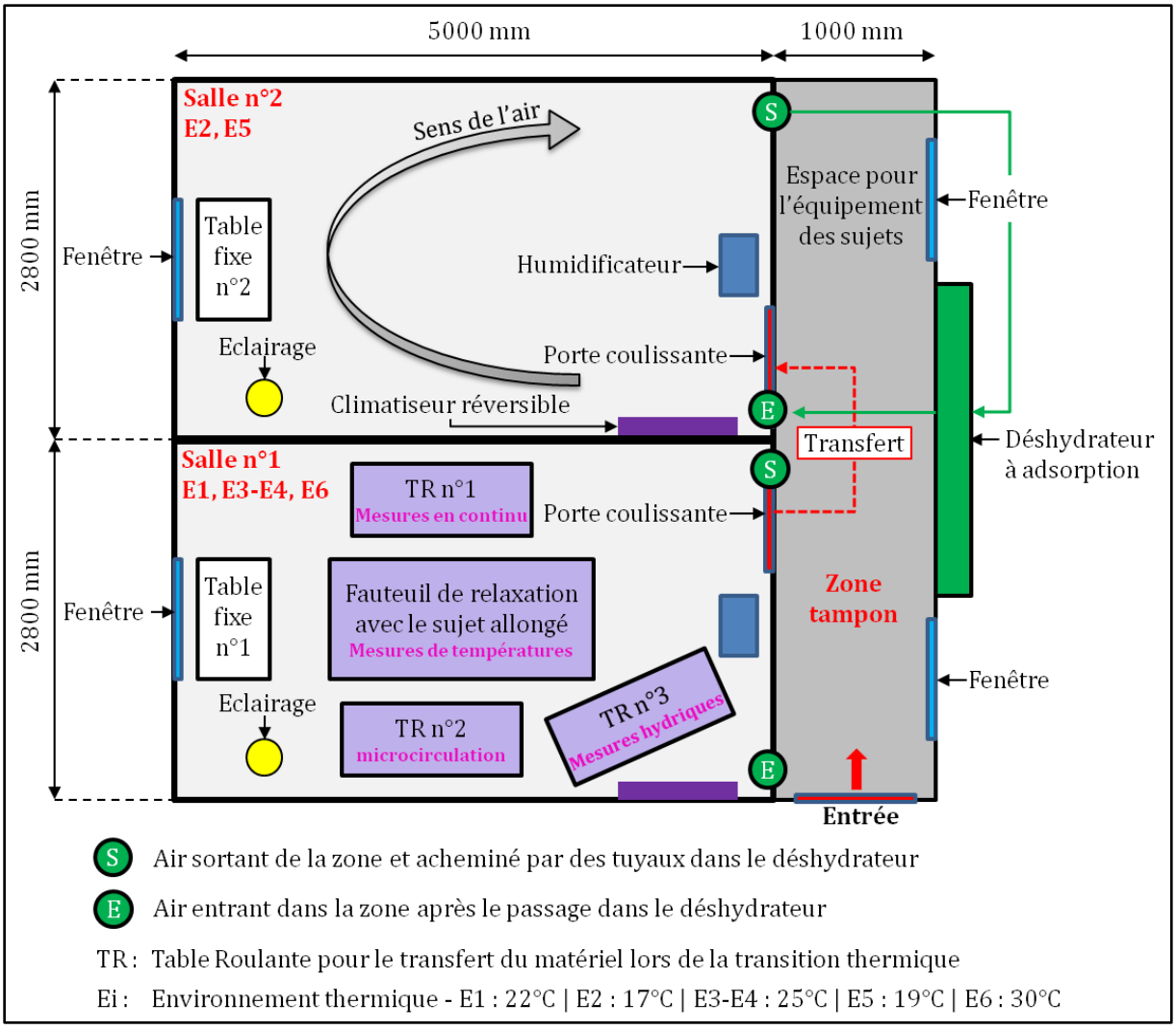


Figure 3.3 : plan du local d'expérimentation composé de deux espaces de mesures identiques (la salle n°1 et la salle n°2) et d'une zone « tampon » permettant le transfert du matériel et du volontaire lors de la transition thermique. Pour une meilleure lisibilité, les appareils de régulation de la température et de l'humidité relative sont représentés dans la salle n°2 et le mobilier « mobile » nécessaire aux mesures est représenté dans la salle n°1.

La salle n°1 a été dédiée aux environnements thermiques plutôt chauds (E1, E3, E4, E6) avec les températures de consigne suivantes : 22°C, 25°C, 30°C et la salle n°2 a été dédiée aux environnements thermiques plutôt froid (E2, E5) avec les températures de consigne suivantes : 17°C, 19°C. Grâce à cette organisation, l'augmentation de la température de consigne dans chaque salle était modérée (entre 2 et 5°C) alors que le sujet subissait des transitions thermiques fortes (variations comprises entre 5°C et 11°C). Cette variation modérée de la température de consigne a permis une stabilisation plus rapide de la température des différents environnements et chaque espace avait au moins une heure pour se stabiliser en température puisque dès que le sujet quittait une salle, la température de consigne était changée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Régulation de l'humidité relative

Un dispositif de régulation de l'humidité relative a également été mis en place pour les deux espaces afin de maintenir une humidité relative relativement constante. Ce dispositif comprend deux éléments (cf. salle n°2 sur la Figure 3.3) :

- un déshydrateur à adsorption (HD 300, HDAS)

Il est capable d'assécher l'air grâce à une roue déshydratante en gel de silice (avec une capacité de déshumidification de 1,5 kg/h et une plage de température comprise entre -8°C et 40°C) et il est représenté en vert sur le plan de la Figure 3.3.

- un humidificateur à ultrasons de 0 à 0.6 kg h^{-1} (Elsteam)

Un seul déshydrateur a été installé pour les deux salles. L'ouverture ou la fermeture de vannes a permis de faire fonctionner le déshydrateur dans la salle n°1 ou dans la salle n°2. Les humidificateurs ont été déclenchés manuellement suivant la valeur de l'humidité relative des espaces.

3.1.3. Sélection et caractérisation du panel

Les volontaires ont été recrutés dans la région nantaise. Chaque volontaire intéressé a répondu à un questionnaire en ligne regroupant des questions sur l'âge, le sexe, le tabagisme, le lieu de résidence, l'état de santé, l'état de la peau, la sensibilité de la peau, la sensibilité au froid et au chaud, les habitudes de vie, etc. Les sujets ont été inclus dans l'étude à partir des critères suivants :

- Femme de type caucasien (peau blanche)
- Non fumeuse
- Agée entre 20 et 35 ans
- Sans problème de peau et sans cicatrice sur le visage et l'avant-bras
- Vivant dans un climat tempéré depuis au moins 2 ans
- En bonne santé, ne prenant aucun traitement médical (excepté un contraceptif)

Dix-huit volontaires ont participé à l'étude après avoir lu et accepté les conditions de l'expérimentation, détaillées dans une notice d'informations, et après avoir signé le formulaire de consentement. Finalement, 13 sujets ont été retenus dans l'analyse. Un sujet a été éliminé car son indice de masse corporel était trop élevé. Les raisons de l'élimination des 4 autres sujets seront abordées dans la suite. Les caractéristiques anthropométriques du panel sont regroupées dans le Tableau 3.1.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 3.1 : Données anthropométriques du panel (avec les 13 sujets analysés)

Age (ans)	22 ± 3
Poids (kg)	55 ± 6
Taille (m)	1,65 ± 0,07
IMC (kg m^{-2})	19,9 ± 1,4
Phototype	Phototype 2 : n=4 Phototype 3 : n=9

3.1.4. Consignes pour la standardisation des mesures

Les volontaires ont respecté les consignes suivantes afin que les données soient comparables entre les sujets :

- Ne pas boire d'alcool durant les 24h qui précèdent l'expérimentation
- Ne pas boire de boissons excitantes (café, thé) 2h avant l'expérimentation
- Ne pas pratiquer une activité sportive trop intense la veille de l'expérimentation
- Ne pas s'exposer au soleil avant l'expérimentation
- Porter la tenue vestimentaire suivante : pantalon pas trop serré, chaussettes, chaussures fermées (basket ou tennis en toile). Un Tee-shirt en coton CSTB à manches courtes a été prêté pour la journée d'essais.

  D'autres consignes ont été respectées au niveau de l'application de produits cosmétiques sur le visage et les avant-bras :
- Le soir de la veille de l'étude : interdiction d'appliquer des produits de soins (crème de jour, crème de nuit, masque, sérum, exfoliant, produit autobronzant, etc.) sur la peau du visage et des avant-bras. Autorisation de nettoyer la peau avec les produits habituels. Le lait démaquillant doit être impérativement enlevé à l'eau.
- Le matin de l'étude : interdiction d'appliquer des produits de soins et du maquillage sur la peau du visage et des avant-bras. Autorisation de nettoyer le visage et les avant-bras avec de l'eau (eau du robinet ou minérale) et de prendre une douche sur le reste du corps.

3.1.5. Mesures des paramètres physiques des environnements

Des thermo-hygromètres ont été disposés dans chacune des deux pièces afin de mesurer en continu la température ambiante et l'humidité relative. Des thermocouples (de type T) ont également été fixés sur tous les murs et le plafond afin de mesurer les températures des différentes parois et de l'air pour calculer la température moyenne

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

rayonnante (cf. note n°10, page 60). Cette température a l'avantage de refléter davantage la température que l'individu perçoit dans la salle. Elle a été utilisée fréquemment dans l'analyse des données à la place de la température ambiante.

La vitesse de l'air a également été mesurée à l'aide d'un anémomètre unidirectionnel lors d'une expérimentation dédiée à cette mesure et reproduisant exactement le protocole avec les changements d'ambiances. En effet, cette mesure n'a pas été réalisée systématiquement car la manipulation de cet outil est délicate. Nous avons donc pu établir l'ordre de grandeur de cette variable dans chacun des environnements thermiques afin d'évaluer si une gêne a pu être engendrée par la vitesse de l'air.

3.1.6. Evaluation du ressenti thermique : les questionnaires

Le ressenti des volontaires a été évalué oralement tout au long de l'expérimentation par les questions suivantes :

- Quelle note attribuez-vous à l'environnement entre 0 associé à « je n'aime pas du tout » et 5 associé à « j'aime beaucoup »?

Cette question a été posée à la fin de la phase de mesure. Les réponses ont été données à partir de l'échelle du bas sur la Figure 3.4. Ces réponses permettent d'étudier la composante « hédonique » du ressenti des volontaires. Elle est du même type que la question sur le « bien-être » du protocole A dans les expérimentations préliminaires. Elle a été choisie car les sujets ont souvent plus de facilité à exprimer s'ils aiment ou pas quelque chose plutôt qu'à quantifier un élément particulier d'un environnement.

- Y'a-t-il un élément de l'ambiance qui vous dérange ? Lumière, couleur, odeur, bruit, espace, humidité, température ?

Cette question a été posée 7 minutes après l'entrée dans chaque environnement. Elle a permis d'évaluer la gêne engendrée par le contexte non thermique et thermique.

- Quelle sensation de chaud/froid ressentez-vous au niveau de … votre corps ? … votre visage ? …vos avant-bras ? … vos mains ?

Cette question a été posée 40 minutes après l'entrée dans l'environnement. Elle est issue de la norme ISO 10551 et elle évalue la sensation thermique « globale » et les sensations thermiques locales. Les réponses des sujets sont fournies à partir de l'échelle du haut de la Figure 3.4.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

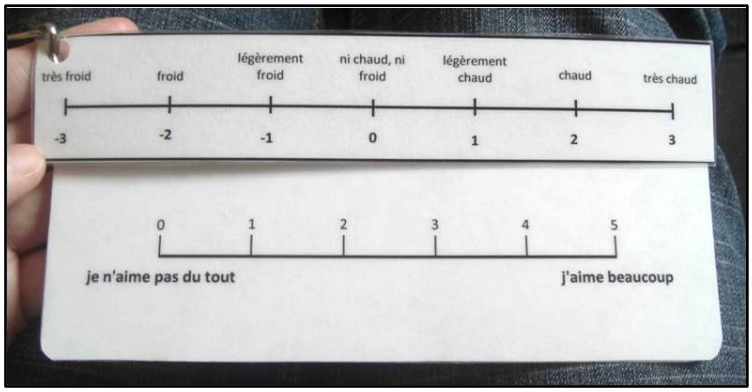


Figure 3.4 : Echelles mises à disposition des sujets afin qu'ils puissent répondre aux questions posées oralement en donnant le chiffre associé à leur réponse. L'échelle du haut permet d'évaluer leur sensation thermique et l'échelle du bas leur appréciation de l'environnement dans lequel il se trouve.

Puis, le ressenti des volontaires a également été évalué par écrit pendant les dix dernières minutes dans chacun des environnements à partir du questionnaire présenté dans l'annexe 3. Ce questionnaire est inspiré de la norme ISO 10551 sur l'évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs [AFNOR 2001]. Lorsque le volontaire répond aux questions, il visualise ses réponses dans les environnements précédents. Il peut ainsi répondre par comparaison et se positionner plus facilement sur les différentes échelles. L'analyse générale est basée sur les questions suivantes :

- Question 3 sur la sensation thermique « générale »
- Question 4 sur le confort thermique
- Question 5 sur la préférence thermique
- Question 8 sur le degré de transpiration
- Question 9 sur le degré des frissons

La question 1 sur la fatigue et la question 2 sur l'état de stress ont été analysées ponctuellement. Toutes les données récupérées par les questionnaires ont été considérées comme des variables « continues » et donc quantitatives.

3.1.7. Contrôle de la réactivité émotionnelle des sujets

Suite à la conclusion du chapitre précédent qui mentionne la nécessité de suivre objectivement l'état de détente des volontaires pendant l'expérimentation pour éviter les « stress » momentanés, nous avons choisi d'intégrer une mesure du niveau d'activation du système nerveux autonome des sujets. Mais, tout d'abord, nous allons préciser ce que l'on désigne par « stress » pour bien comprendre ce que l'on cherche à éviter.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

De façon générale, le stress survient dès qu'un individu doit faire face et s'adapter à une situation qu'il estime comme potentiellement menaçante. Il peut, par exemple, être déclenché par le froid, par un bruit inattendu, par un changement dans la vie quotidienne, par une catastrophe, par la pensée d'un événement passé ou futur désagréable, par des objectifs à atteindre, *etc.* [Lee, Yang *et al.* 2004]. Tous ces facteurs de stress sont susceptibles de déclencher des réactions physiologiques et psychologiques plus ou moins fortes et longues correspondant à l'activation immédiate du système nerveux sympathique (cf. partie 1.1.5.3. page 26). Cette activation provoque alors la libération de noradrénaline et d'adrénaline, une modification du rythme cardiaque, de la pression sanguine, du sens du flux sanguin, de la tension des muscles, de la sudation, de la respiration, de la dilatation de la pupille [Lee, Yang *et al.* 2004]. Or, ces réactions sont susceptibles de se répercuter sur les mesures physiologiques effectuées lors de l'expérimentation.

Nous avons donc cherché à réduire le niveau d'activation des sujets pour leur permettre d'atteindre un état de détente et de confiance et pour éviter les stress momentanés. En effet, un sujet relaxé et « en confiance » aura beaucoup moins de stress momentané et de réactivité émotionnelle. Un effort particulier a été porté sur l'élimination des sources de stress « non thermiques » (bruit soudain, geste soudain et inexpliqué) et sur la communication avec les volontaires afin de leur donner les explications suffisantes pour qu'ils soient en confiance (et pas sur le « qui-vive »). La mesure objective de l'état de détente du volontaire peut être obtenue via une analyse comportementale ou une mesure physiologique de la réactivité émotionnelle [Picard 2007]. C'est cette dernière mesure qui a été privilégiée car elle est plus facile à mettre en place au sein d'une expérimentation qui comprend déjà un grand nombre de mesures. Elle a été intégrée juste avant la phase de mesure pour s'assurer que les sujets étaient calmes.

Le choix de la mesure physiologique ainsi que les particularités de cette mesure sont détaillés dans la partie 3.2.7. page 216.

3.1.8. Mesures pour caractériser les différences interindividuelles de ressenti

Suite à la conclusion du chapitre précédent, les mesures des propriétés thermo-vasculaires et hydriques de la peau ont été privilégiées pour caractériser les différences interindividuelles de ressenti.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les mesures **thermo-vasculaires cutanées** ont été les suivantes :

- **La température de peau**

Cette mesure a été effectuée grâce à une caméra infrarouge comme dans le chapitre précédent (cf. partie 2.7.1.1.2. page 140). Toutefois, le dispositif de mesure a été adapté aux conditions expérimentales. Ces adaptations sont abordées dans la partie suivante (cf. partie 3.2.1. page 207). Les mesures ont été réalisées sur le visage mais aussi sur l'avant-bras (qui est moins souvent confronté aux changements de température) et les mains (qui présentent un comportement particulier face aux températures) pour obtenir davantage d'informations sur l'état thermique du corps. Ainsi, de nouveaux paramètres ont pu être analysés : l'écart de température entre le front et les doigts, entre le front et l'avant-bras, *etc*.

- **La couleur de peau**

Elle a été mesurée grâce à un spectrocolorimètre comme dans le chapitre précédent (cf. partie 2.7.1.2.2. page 144). Par contre, la mesure a été réalisée sur la joue mais aussi sur l'avant-bras et l'analyse n'a pas uniquement portée sur les coordonnées L*, a*, b* mais aussi sur le spectre de réflectance. Cette analyse du spectre a permis d'introduire de nouveaux paramètres et elle a été détaillée dans la partie suivante (cf. partie 3.2.3. page 212)

- **L'activité microcirculatoire – le débit sanguin cutané**

Elle a été effectuée afin d'obtenir une information plus précise sur l'activité de la microcirculation qui est modifiée lors d'un changement de température ambiante. Elle a été mesurée sur les joues et l'avant-bras et la main. Le choix de l' appareil de mesures ainsi que les caractéristiques de la mesure sont détaillés dans la partie suivante (cf. partie 3.2.2. page 207)

Les mesures des **propriétés hydriques cutanées** ont été les suivantes :

- **Le contenu en eau du stratum corneum**

Il a été mesuré sur la joue avec un cornéomètre de la même manière que dans le chapitre précédent (cf. partie 2.8.1.1.2. page 162).

- **La perte en eau juste au-dessus de la surface cutanée**

Elle a été mesurée avec un téwamètre de la même manière que dans le chapitre précédent (cf. partie 2.8.1.4.2. page 169). La mesure a été effectuée sur la joue mais aussi sur l'avant-bras.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- **La quantité de certains composants du Facteur Naturel d'Hydratation (FNH)**

L'évaluation de la quantité de certains composants du FNH associés au pouvoir hygroscopique du stratum corneum apporte une information supplémentaire sur la capacité de la peau à retenir l'eau. Cette évaluation a pu se faire grâce à un « tape stripping », c'est-à-dire à un arrachage mécanique des cellules superficielles, réalisé sur l'avant-bras. Après une analyse chimique des cellules retirées, la quantité des constituants suivants a été fournie : acide urocanique, acide pyroglutamique, acide aminé, lactate, protéine. La méthode de « tape stripping » et d'analyse des échantillons prélevés a été détaillée dans la partie suivante (cf. partie 3.2.4. page 214).

Cette dernière mesure basée sur le « tape stripping » a permis d'analyser d'autres paramètres davantage reliés à l'état de la barrière cutanée ou à la **fonction barrière de la peau**. Ces nouveaux paramètres sont :

- **L'intégrité du stratum corneum**

Elle a été estimée par une mesure de perte en eau après plusieurs « tape stripping ». Le calcul de cette grandeur est précisé dans la partie suivante (cf. partie 3.2.5. page 215)

- **La cohésion du stratum corneum**

Elle a été évaluée à partir de la quantité de protéines prélevée avec les patchs adhésifs du « tape-stripping »

- **La capacité de récupération du stratum corneum après une perturbation mécanique**

Cette mesure présente l'avantage d'être « dynamique » car elle permet d'observer le comportement de la barrière cutanée lorsque celle-ci a été altérée. Les observations faites en dynamique seront peut-être plus significatives que celles faites en statique (sans perturbation de la barrière). La capacité de récupération a été calculée à partir de trois mesures de perte en eau : une réalisée avant le « tape-stripping », une réalisée juste après et une réalisée 15 minutes après. La méthode de calcul est détaillée dans la partie suivante (cf. partie 3.2.6. page 215)

Des **mesures des propriétés lipidiques** ont également été réalisées**.** La quantité de lipides surfaciques a été évaluée à l'aide d'un sébumètre de la même manière que dans le chapitre précédent (cf. partie 2.8.1.3.2. page 166), malgré les doutes mentionnés dans le chapitre précédent sur la pertinence de la mesure dans des environnements chauds où la quantité de sueur à la surface de la peau peut être non négligeable. Cette mesure a pour

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

objectif de fournir un ordre de grandeur de la quantité des lipides en surface du stratum corneum et d'observer l'évolution de cette mesure aussi bien après une transition chaude qu'après une transition froide. Cependant, cette variable devra être analysée avec prudence en tenant compte de l'influence potentielle de la sueur sur la mesure.

Les différentes zones de mesures sont regroupées sur la Figure 3.5. Ce sont des zones découvertes pendant toute l'expérimentation : le visage et l'avant-bras.

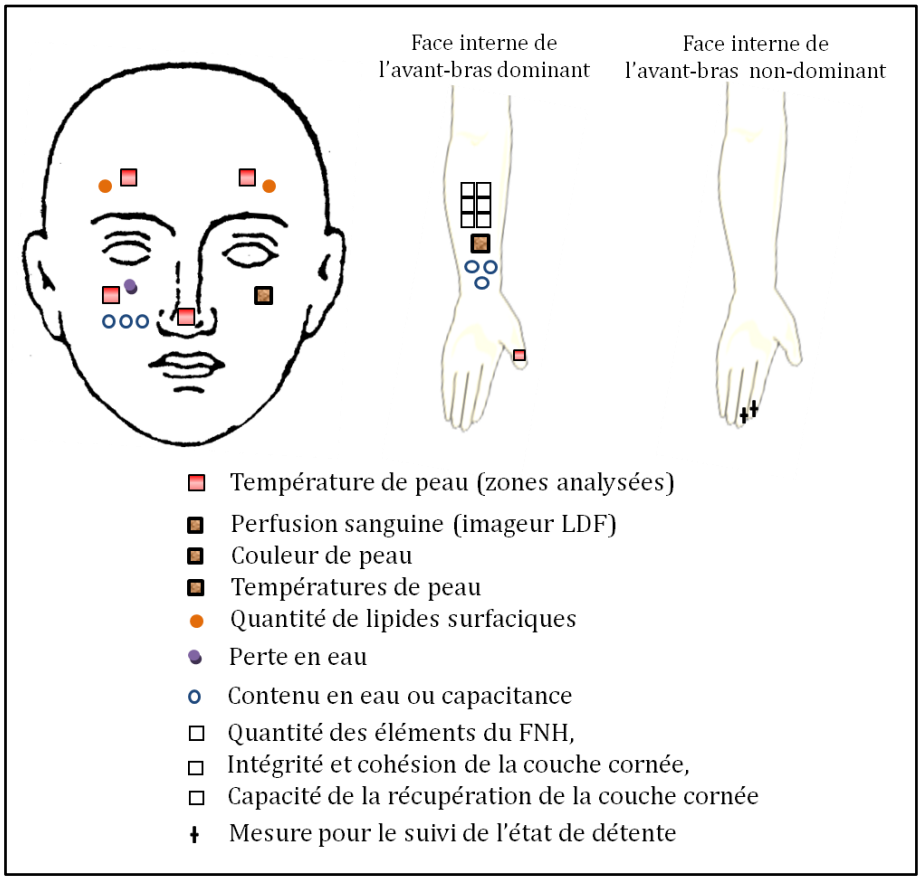


Figure 3.5 : Les zones de mesures

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2. Dispositifs de mesures et méthode d'extraction des données

3.2.1. Dispositif pour la thermographie infrarouge

Comme évoqué dans le chapitre précédent, il est important que la distance entre la caméra et la zone de mesure soit fixe et que le sujet ne bouge pas pendant la mesure. Un système de fixation sur le dossier du fauteuil a été mis en place afin que la caméra reste fixe et que le sujet soit dans une posture confortable au moment de la mesure. Grâce à la fixation sur le dossier et au bras amovible, la caméra a pu être positionnée facilement à chaque changement d'environnement. Un « serre tête » (cf. Figure 3.6.b) a permis de repérer l'emplacement de la tête pour que le visage soit bien centré et ne bouge pas durant la mesure. Des repères visibles sur l'image IR, obtenue en simultané sur l'ordinateur d'acquisition, ont également permis d'affiner le positionnement du sujet. Ces repères ont été positionnés grâce à un programme développé sous Matlab (cf. Figure 3.6.c).

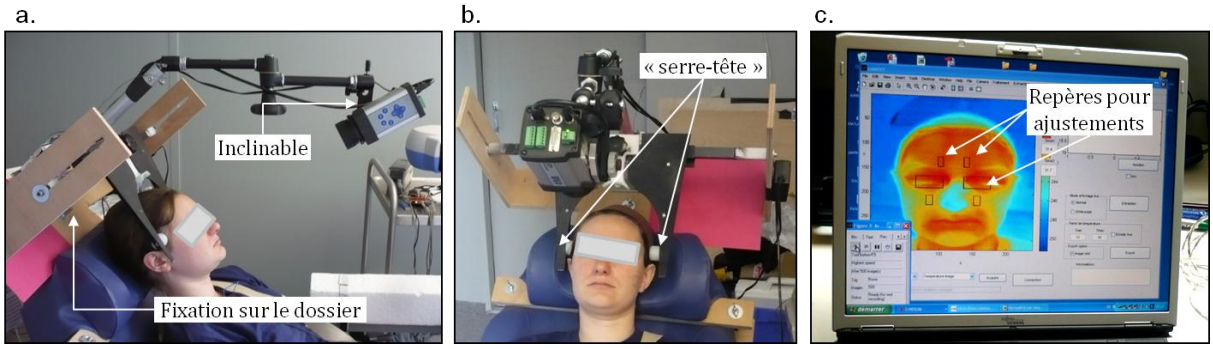


Figure 3.6 : Dispositif de mesure de la température de peau par thermographie IR, adapté aux conditions expérimentales. Se référer au texte pour plus de détails.

D'autre part, grâce au positionnement du local expérimental, aucun rayonnement solaire n'a perturbé la mesure.

Toutes les informations sur la mesure de température de peau avec la caméra infrarouge sont disponibles dans la partie 2.7.1.1.2. du chapitre précédent (page 140).

3.2.2. Mesure de l'activité microcirculatoire

3.2.2.1. Choix de l'appareil de mesure

Il existe plusieurs techniques de mesures non invasives du flux sanguin qui sont répertoriées, en partie, dans le Tableau 3.2 [Agache et Dupond 1994; Berardesca, Lévêque *et al.* 2002; Wright, Kroner *et al.* 2006; Leahy, Enfield *et al.* 2007; Rajan, Varghese *et al.* 2009].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 3.2 : Principales méthodes non invasives de mesure du flux sanguin. Les méthodes de mesures directes de volume ou de flux sanguin sont sur fond rosé, les méthodes de visualisation des microvaisseaux qui mesurent aussi le flux sanguin sont sur fond bleu, les méthodes indirectes sont sur fond violet.

Méthodes	Principe
Photopléthysmographie (PPG) [Agache 2000e]	Mesure de l'intensité de lumière rouge et proche IR rétrodiffusée
Fluxmétrie par Laser Doppler (LDF)	Mesure du décalage en longueur d'onde de la lumière réfléchie par les cellules sanguines en mouvement
Imagerie par Laser Doppler (LDI) [Fullerton, Stücker et al. 2002]	Même principe que la LDF avec création d'images de la répartition spatiale du flux sanguin
Imagerie par Laser Speckle (LCSI) [Briers 2001; Millet, Roustit et al. 2011]	Analyse de la fluctuation de l'effet "speckle"[20] granulaire du laser, liée aux mouvements des cellules mobiles afin d'établir une cartographie en temps réel du flux sanguin
Capillaroscopie / Vidéocapillaroscopie [Carpentier 2000]	Microscopie optique in vivo
Tomographie par cohérence optique (OCT) [Wright, Kroner et al. 2006]	Utilisation de lumière proche IR et de techniques interférométriques pour visualiser des structures biologiques sous la peau (jusqu'à 1 ou 2 mm)
Imagerie par résonance magnétique (IRM)	Principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN) pour visualiser, par exemple, la réponse hémodynamique
Thermographie IR	Mesure de la température de peau, utilisation d'un modèle thermique pour l'estimation du débit sanguin
Mesure de la pression d'oxygène transcutanée. [Agache 2000g]	
Mesure de la clairance thermique ou de la conductivité thermique	Mesure de la quantité de chaleur qu'il faut apporter en un temps t pour maintenir une différence de température entre la surface cutanée et la paroi des vaisseaux

Le choix parmi toutes ces méthodes a été effectué à l'aide des avantages et inconvénients regroupés dans la littérature et en particulier dans l'article de Wright *et al.* [Wright, Kroner *et al.* 2006]. Les méthodes les plus coûteuses telles que l'IRM ainsi que les méthodes qui manquent de recul scientifique sur la mesure de flux sanguin telles que l'OCT et la technique récente basée sur le speckle du laser et la majorité des méthodes indirectes (sauf la mesure de la pression d'oxygène transcutanée) ont été éliminées directement. Les mesures directes ont été privilégiées. La photopléthysmographie n'a pas été retenue car elle ignore la circulation superficielle [Agache 2004a]. **L'imagerie par laser Doppler (LDI)** est apparue pertinente à utiliser. Elle est sans contact, facile à utiliser, dotée d'une bonne résolution spatiale, elle permet de moyenner le flux sanguin sur toute une zone, elle a fait ses preuves pour la mesure du flux sanguin [Fullerton, Stücker *et al.* 2002], *etc*. Toutefois, sa profondeur

[20] L'effet "speckle" correspond à un effet d'interférence optique d'aspect granulaire. Il peut être observé lorsqu'un objet est illuminé par un laser.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

de pénétration est approximative (entre 0,5 mm et 1 mm). Il n'est pas possible de distinguer la circulation du derme moyen et profond (veinules, artérioles) de la circulation superficielle. Or, c'est la circulation superficielle (au niveau des capillaires) qui nous intéresse tout particulièrement car elle a un rôle majeur dans les mécanismes de thermorégulation (cf. partie 1.1.5.4.1.2. page 30). Il aurait été préférable d'utiliser une méthode telle que la capillaroscopie (couplée à un laser-doppler vert) qui cible spécifiquement les capillaires et qui évite des erreurs d'interprétation liées à la méconnaissance du type de vaisseaux analysé [Humbert, Sainthillier *et al.* 2005]. Cependant, la capillaroscopie est plus complexe à mettre en place, la mesure est plus longue, l'opérateur peut avoir un impact plus fort sur la mesure. Ce type de meure est donc plus difficile à intégrer facilement dans un protocole qui comprend un grand nombre de mesures cutanées. Pour une première approche, la méthode LDI et plus précisément le PeriScan PIM3 System (Périmed, Suède) a été retenu pour mesurer un indice de flux sanguin cutané global.

3.2.2.2. Imageur de microcirculation Laser Doppler : le PeriScan PIM3

Le PeriScan PIM3 permet de cartographier la répartition spatiale de la perfusion sanguine (définie comme le produit de la concentration des cellules en mouvement avec la vélocité de ces cellules sanguines) des tissus superficiels (entre 0,5 et 1 mm de profondeur) et de mesurer les variations de cette perfusion. Pour ce faire, il est doté d'un faisceau laser (λ = 670-690 nm, diamètre = 1 mm) de faible puissance et de classe 2[21] qui balaie point par point la peau en enregistrant jusqu'à 255 x 255 points de mesures [Perimed 2011]. Dans le tissu, la lumière émise par le laser est diffusée. Une partie de l'énergie est absorbée par le tissu, l'autre partie est réfléchie à la fois par les structures fixes et les structures mobiles. Une partie de l'énergie réfléchie est captée par un capteur photoélectrique. Seule la partie réfléchie par les structures mobiles (telles que les globules rouges) subit une variation de longueur d'onde : c'est l'effet Doppler. L'amplitude et la fréquence des variations de longueur d'onde mesurées permettent de déterminer le nombre et la vitesse des cellules en mouvement.

Le faisceau laser du PeriScan PIM3 s'immobilise quelques millisecondes pour effectuer une mesure[22]. Ainsi, les artéfacts de mouvement dus à l'effet Doppler parasite

[21] Un laser de classe 2 est un laser de faible risque, d'après la norme NF EN 60825-1/A2. Il ne faut pas fixer le laser. La protection est basée sur un réflexe d'aversion c'est-à-dire un détournement suivi d'un clignement de l'œil.

[22] Système breveté par Périmed

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

généré par le déplacement d'un faisceau en balayage continu sont évités et les mesures ont une plus grande précision (surtout pour des débits de faibles niveaux) et une bonne répétitivité.

Les mesures sont exprimées dans une unité arbitraire et relative : l'unité de perfusion (PU). En effet, la mesure représente davantage une moyenne spatiale de la vitesse des globules rouges dans les vaisseaux sanguins superficiels (principalement dans les capillaires) qu'un flux. En règle générale, cette mesure reflète bien le flux sanguin mais, dans des cas où la vasodilatation ou la vasoconstriction des capillaires est forte, la mesure présente des limites [Edvinsson, Andersson *et al.* 2008].

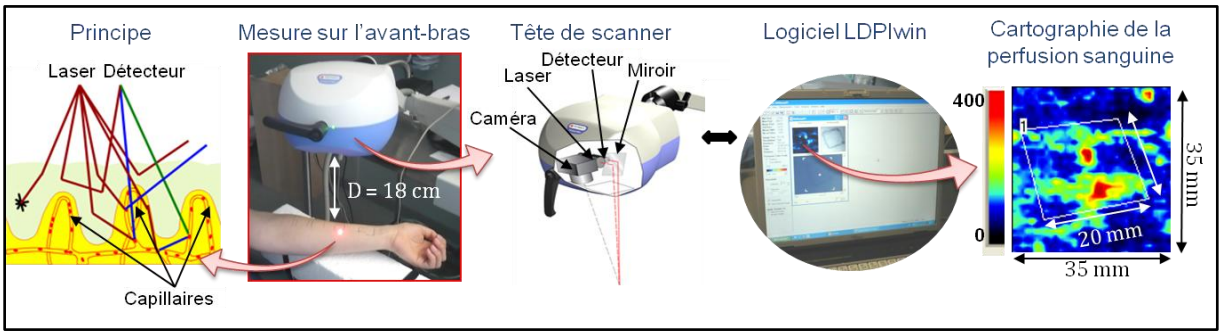


Figure 3.7 : La mesure avec le PeriScan PIM3. Réalisé à partir de photographies prises durant les expérimentations et d'images obtenues sur : [Perimed 2012].

L'ensemble de tous les points de mesure de la zone analysée permet de générer une image où les degrés de perfusion sont représentés par une échelle de couleur. Le logiciel LDPIwin permet, ensuite, de sélectionner manuellement une région d'intérêt (ROI) à partir de laquelle des paramètres tels que la valeur moyenne, minimale, maximale, le pourcentage de variation de la perfusion sanguine sont calculés.

Le paramétrage des mesures est le suivant (cf. Figure 3.7) :

- La région d'intérêt (ROI) d'une taille d'environ 20mm x 20mm est délimitée préalablement, avec un trait de stylo sur la peau, au début de chaque expérimentation ;
- La zone scannée est de 35mm x 35mm ;
- La haute résolution a été choisie : 1 pas de 1mm entre deux points de mesure ;
- 3 scans ont été effectués successivement pour moyenner les résultats et pour vérifier que le sujet n'a pas bougé pendant la mesure ;
- La tête du scanner a toujours été fixée 18 cm au-dessus de la zone cutanée à analyser.

Un compromis a donc été fait entre la taille de la ROI, la résolution, le nombre de scans et le temps de mesure. Le temps de mesure a été de l'ordre de 2 minutes, pour que le sujet puisse rester immobile pendant toute la mesure.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les images, où la présence d'une veine était visible, ont été traitées, à l'aide d'un algorithme de segmentation d'image (seuillage entropique [Glasbey 1993]), développé sous Matlab, afin d'éliminer les points de mesures situés au niveau de la veine car l'information qui nous intéresse est celle associée aux capillaires (jouant un rôle majeur dans l'échange de chaleur) et non celle associée aux veines (cf. Figure 3.8).

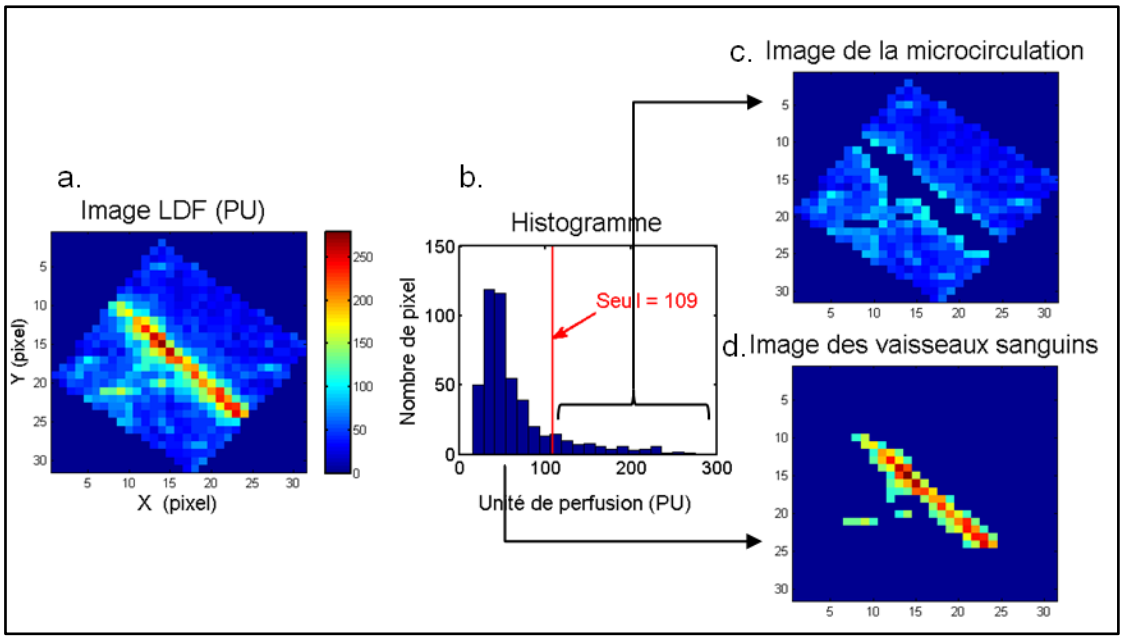


Figure 3.8 : Traitement des images LDF obtenues sur les avant-bras. a. Image initiale LDF effectuée sur l'avant-bras. b. histogramme de l'image initiale et seuil calculé par un programme développé sous Matlab. c. images regroupant les pixels associés à la perfusion sanguine des capillaires. d. images regroupant les pixels associés à la perfusion sanguine des veines.

Les mesures ont été réalisées sur deux zones planes, faciles d'accès et présentant une microcirculation différente : la joue et l'avant-bras (cf. Figure 3.9).

Figure 3.9 : Mesures de l'activité microcirculatoire cutanée au niveau de l'avant-bras (à gauche) et de la joue (à droite) réalisées avec l'imageur Laser Doppler (PeriScan PIM 3, Perimed)

Un dispositif particulier a été mis en place pour la mesure sur l'avant-bras afin d'éviter des tremblements pendant la mesure : le bras a été surélevé par un morceau de polystyrène fixé sur l'accoudoir du fauteuil comme montré sur la Figure 3.9.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.3. Etude du spectre de réflectance obtenu avec le spectrocolorimètre

La mesure de la couleur de peau a été effectuée avec le spectrocolorimètre Minolta déjà présenté dans la partie 2.7.1.2.2. (page 144) du chapitre précédent. Cette mesure donne accès à plusieurs informations telles que les coordonnées L*, a*, b* (analysées dans le chapitre précédent) ainsi que le spectre de réflectance, analysé à l'issue de cette campagne de mesure pour obtenir des informations complémentaires.

Le spectre de rétrodiffusion (ou réflectance) d'une peau blanche a une forme typique :

- Un spectre linéairement croissant (cf. Figure 3.10.a.)

Cette croissance s'explique par la décroissance linéaire de l'absorption de la mélanine (avec l'augmentation de la longueur d'onde). Par exemple, une peau noire a un taux en mélanine plus élevé qu'une peau blanche et un pourcentage de rétrodiffusion globalement plus faible.

- Une dépression entre 500 et 600 nm formant un « W » (cf. Figure 3.10.a.)

Cette forme est liée au double pic d'absorption (à 542 et 577 nm avec un creux à 560 nm) de l'oxyhémoglobine[23] (HbO_2) (cf. Figure 3.10.b.). Pour une peau très pigmentée telle qu'une peau noire, le « W » est inexistant car la mélanine présente en forte quantité masque l'absorption de l'hémoglobine qui a lieu dans les couches plus profondes du derme. Mais, pour une peau caucasienne, le spectre donne bien une information sur l'hémodynamique cutanée. Si la hauteur du « W » augmente, la concentration en hémoglobine augmente et si la saillie du « W » est davantage marquée, la forme oxy de l'hémoglobine augmente (de façon relative à la désoxyhémoglobine) (cf. Figure 3.10.c.).

[23] Des informations sur l'oxyhémoglobine et la désoxyhémoglobine sont fournies dans la partie 2.7.1.2.3. page 150 du chapitre précédent.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

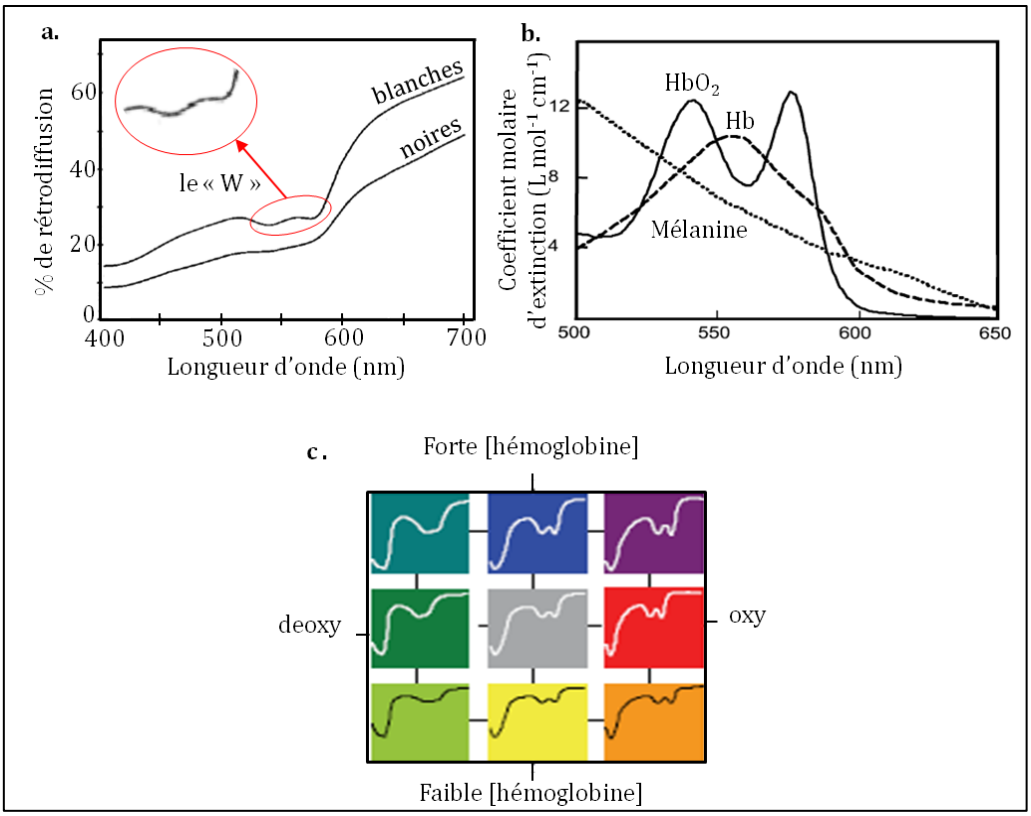


Figure 3.10 : a. Spectre moyen de rétrodiffusion de peaux caucasiennes (ou blanches) et de peaux noires. C1 : creux à 540nm, C2 : creux à 580nm et P : pic à 560nm. Modifié à partir de [Koran, Powers *et al.* 1981]. b. Spectres d'absorption de l'oxyhémoglobine (HbO2), de la désoxyhémoglobine (Hb) et de la mélanine pour des peaux plutôt pigmentées [Sowa, Matas *et al.* 2002]. c. Représentation des différentes modulations possibles du spectre cutané ou du "W" : l'axe x correspond à la saturation en oxygène de l'hémoglobine et l'axe y à la concentration en hémoglobine [Changizi, Zhang *et al.* 2006].

La forme du « W » a été analysée pendant les expérimentations par l'intermédiaire de deux paramètres :

Le critère de saillie ou de saturation de l'hémoglobine en Oxygène noté Crit_O_2 :

$$\boldsymbol{Crit\ O2 = \frac{R(560) - \frac{R(540) + R(580)}{2}}{R(700)} \times 100} \qquad [3.2\text{-}1]$$

Le critère de concentration en hémoglobine noté Crit_conc :

$$\boldsymbol{Crit\ conc\ = \frac{R(700) - \frac{R(560) + R(540) + R(580)}{3}}{R(700)} \times 100} \qquad [3.2\text{-}2]$$

Avec R(λ) le facteur de réflectance ou le pourcentage de rétrodiffusion associé à la longueur d'onde λ en nm. R(540) et R(580) sont associés aux deux creux du W et R(560) au pic du W.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.4. Mesure de la quantité des éléments du Facteur Naturel d'Hydratation

Pour mesurer la quantité des éléments du FNH au niveau du stratum corneum, des patchs adhésifs sont utilisés pour récupérer les cellules des couches superficielles de la peau. La méthode de prélèvement de ces cellules est appelée « tape stripping ».

Méthode de « tape stripping »

La méthode de « tape stripping » consiste à déposer un patch adhésif sur la zone à analyser et à appliquer une pression suffisante et constante sur ce patch avant de le retirer lentement et délicatement (cf. étape N°2 et 3 de la Figure 3.11).

Ici, les patchs utilisés sont des Cornéofix (Monaderm, Monaco) de 20mm x 20mm. Une masse calibrée a été utilisée pour appliquer une pression pendant 5 secondes sur chacun des patchs et la procédure a été répétée 6 fois sur la même zone et par le même expérimentateur, avec 6 patchs différents. Les 6 patchs ont été stockés dans un flacon au frais puis au congélateur avant d'être analysés spécifiquement en laboratoire. Les zones d'analyse sont différentes mais adjacentes dans chacun des environnements. Les facteurs d'influence de la mesure [Lademann, Jacobi *et al.* 2009] tels que le geste, le temps d'application de la pression, la vitesse de décollement du patch, (*etc.*) ont fait l'objet d'une attention particulière.

Quantification des éléments du FNH

Une analyse spécifique basée sur la chromatographie liquide et des méthodes biochimiques[24] a permis d'extraire et de quantifier certains constituants du FNH prélevés sur les 6 patchs adhésifs. Ces composants sont : les lactates, les acides aminés libres (AAL), l'acide urocanique (UCA) et l'acide pyroglutamique (PCA). Les protéines totales ont également été quantifiées et elles représentent la quantité totale de stratum corneum qui a été prélevée [Breternitz, Flach *et al.* 2007]. Les quantités des différents éléments du FNH, exprimées en mg L^{-1}, ont été normalisées par rapport à la quantité de protéines prélevées.

D'ailleurs, la quantité totale de protéines permet également d'évaluer la cohésion du stratum corneum. Une augmentation de la quantité de protéines prélevées témoigne d'une diminution de la cohésion des cellules du stratum corneum qui est principalement liée aux cornéodesmosomes. Inversement, une diminution de la quantité de protéines reflète une augmentation de la cohésion du stratum corneum [Breternitz, Flach *et al.* 2007].

[24] L'analyse a été effectuée par une équipe du CE.R.I.E.S et elle ne sera pas détaillée ici pour des raisons de confidentialité.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.5. Evaluation de l'intégrité du stratum corneum

L'intégrité du stratum corneum est souvent associée au nombre de patchs adhésifs nécessaires pour atteindre un niveau de perte insensible en eau (PIE) élevé et prédéterminé (représentant un certain degré de rupture de la barrière cutanée) [Breternitz, Flach *et al.* 2007]. Dans ce cas, il est nécessaire de mesurer la PIE, après chaque « tape stripping ». Or, ici, il a été choisi de mesurer la PIE après les 6 « tape stripping » (et non après chaque « strip ») pour réduire le temps de mesure et pour que tous les sujets subissent le même stress mécanique. L'intégrité (IntAB) est approximée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{IntAB = DPIE = PIE\ ap0 - PIE\ av} \qquad [3.2\text{-}3]$$

Avec, PIE ap0 : la mesure de PIE juste après les 6 « tape stripping » et PIE av : la mesure de PIE avant le « tape stripping ». Toutes les PIE sont exprimées en g m^{-2} h^{-1}.

Plus DPIE est faible plus la résistance à la dissociation des cornéocytes adjacents est forte c'est-à-dire que l'impact des 6 « tape stripping » est faible et que la perte de l'intégrité du stratum corneum est plus faible. DPIE pourrait représenter le degré de la perte d'intégrité du stratum corneum.

3.2.6. Mesure de la capacité de récupération de la barrière cutanée

De nombreuses études visent à mieux comprendre la fonction barrière de la peau et son processus de réparation. Pour ce faire, beaucoup d'auteurs utilisent la mesure de perte insensible en eau en statique, mais d'autres proposent des méthodes en dynamique pour investiguer le comportement de la barrière cutanée après que celle-ci ait été perturbée (par exemple mécaniquement ou chimiquement). Ils suivent alors la PIE, le pH ou l'hydratation sur une période donnée pour observer l'évolution de la récupération de la barrière cutanée. Ici, il a été choisi de se servir de la méthode de « tape stripping » utilisée pour prélever les cellules superficielles de la peau. En effet, cette méthode engendre une rupture mécanique de la barrière cutanée. Il est, alors, possible de suivre l'évolution d'une variable cutanée avant et après cette rupture. La mesure de perte insensible en eau (PIE) a été choisie pour suivre ce processus de restauration (cf. partie 1.3.3. partie 88) qui se met en place juste après la rupture mécanique de la barrière cutanée. Cette mesure a l'avantage d'être couramment utilisée pour évaluer la perméabilité de la barrière cutanée et d'être l'une des plus adaptée pour distinguer des changements après une perturbation de la barrière [Darlenski, Sassning *et al.* 2009].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La procédure s'est divisée en plusieurs phases :

- Mesure de la PIE avec le téwamètre TM 300 sur une zone préalablement délimitée (cf. Figure 3.11, N°1).
- Réalisation du « tape stripping » décrit au-dessus dans la partie 3.2.4. page 214
- Mesure de la PIE juste après le décollement du dernier patch (cf. Figure 3.11, N°4)
- Mesure de la PIE 20 minutes après (cf. Figure 3.11, N°5)

La capacité de récupération de la barrière cutanée (RécupAB), 20 minutes après la rupture mécanique a été calculée à partir de la formule suivante [Visscher, Hoath *et al.* 2001] :

$$\boldsymbol{Récup\ AB\ (en\ \%) = \frac{(PIE\ ap0 - PIE\ ap20)}{(PIE\ ap0 - PIE\ av)} \times 100} \qquad [3.2\text{-}4]$$

Avec, PIE ap0 : la mesure de PIE juste après les 6 « tape stripping », PIE ap20 : la mesure de PIE 20 minutes après les 6 « tape stripping », PIE av : la mesure de PIE avant le "tape stripping" (cf. Figure 3.11). Toutes les PIE sont exprimées en g m^{-2} h^{-1}.

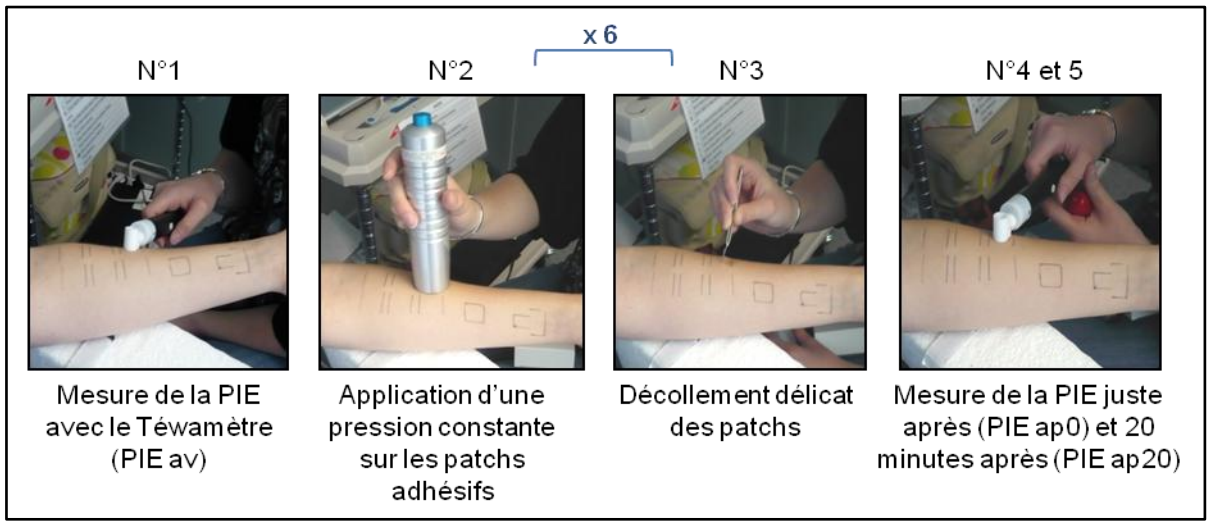


Figure 3.11 : Représentation des différentes étapes de mesure de la capacité de récupération de la barrière cutanée. Les étapes n°2 et n°3 (correspondant à la méthode de "tape stripping") sont répétées 6 fois avant les mesures de PIE réalisées avec le Téwamètre TM 300.

Le « tape stripping » a été réalisé sur l'avant-bras comme le recommande l'article de Breternitz *et al* [Breternitz, Flach et al. 2007], des zones telles que la joue s'irritant trop rapidement.

3.2.7. Méthode de suivi de l'état de détente des sujets

3.2.7.1. Choix de la mesure physiologique de suivi du stress

Les signaux physiologiques suivants ont déjà permis d'étudier, de façon non invasive, l'état de détente ou l'état émotionnel des individus [Lee, Yang *et al.* 2004] :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'électroencéphalogramme, la respiration, l'électromyogramme, la température cérébrale [Dittmar, Gehin *et al.* 2009], les variations de température de peau [Kistler, Mariauzouls *et al.* 1998; Pavlidis, Dowdall *et al.* 2007], l'activité électrodermale [Sequeira, Hot *et al.* 2009; Massot, Baltenneck *et al.* 2010; Setz, Arnrich *et al.* 2010], le rythme cardiaque [Clarion, Ramon *et al.* 2009; Ramon 2009] obtenu par un électrocardiogramme ou un photopléthysmogramme, *etc.* Parmi toutes ces méthodes, l'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque est souvent utilisée pour caractériser le niveau de stress d'un individu [Callister, Suwarno *et al.* 1992; Jovanov, O'Donnall Lords *et al.* 2003; Zhai et Barreto 2006]. La mesure de l'activité électrodermale (c'est-à-dire l'ensemble des phénomènes électriques mesurés à la surface de la peau reflétant l'activité des glandes sudoripares et l'activité du système nerveux autonome) est également un indicateur privilégié. En effet, Ionescu montre que la réponse électrodermale exprime un degré de stabilité et d'instabilité du système sympathique qu'il qualifie de "composant le plus sensible du système physiologique de réaction au stress" [Ionescu-Tirgoviste et Pruna 1993]. De même, Boucsein considère que l'analyse du niveau de base et des fréquences des réponses électrodermales est la méthode la plus adaptée pour le suivi en continu de l'activité du système nerveux autonome déclenché par le stress [Boucsein 1992]. La **mesure de l'activité électrodermale** a donc été choisie pour suivre l'état de stress des volontaires. Elle présente également les avantages suivants :

- Une facilité de mise en œuvre et d'utilisation : les électrodes sont positionnées sur la main. Les autres mesures cutanées réalisées sur le visage ne sont pas perturbées.
- Un suivi ciblé de l'activité du système nerveux sympathique associé à la première phase du stress : la phase d'alarme. Contrairement à d'autres paramètres, tels que la fréquence cardiaque, qui sont influencés à la fois par le système nerveux sympathique et le système nerveux parasympathique, l'activité électrodermale n'est influencée que par le système sympathique [Setz, Arnrich *et al.* 2010].
- Une mesure en continu et en temps réel : le contrôle est immédiat.

La **centrale « Minimotion »,** développée par l'équipe « Capteurs Biomédicaux » de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), a été utilisée pour mesurer la résistance électrodermale (RED) et suivre l'activité électrodermale (en anglais EDA : Electro-Dermal Activity)[25].

[25] L'activité électrodermale peut également être évaluée par la mesure du potentiel cutané mais cette mesure apparaît moins robuste que la mesure de résistance électrodermale [Nocua 2010].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.7.2. Mesure de la résistance électrodermale avec la centrale « Minimotion »

La centrale est basée sur le même principe que les appareils décrits dans les articles suivants : [Massot, Gehin *et al.* 2009; Ramon 2009]. La centrale mesure la RED grâce à une méthode à courant constant. Deux électrodes en Ag/AgCl de 50 mm² (Clark Electrodermal Instruments, ref. E243) sont fixées sur la main (zone à forte densité de glandes sudoripares : > 2000/cm²) non-dominante car le stratum corneum y est moins épais. L'une est placée sur l'index, l'autre sur le majeur au niveau des phalanges distales (cf. Figure 3.12.a.) car ce sont des zones avec une forte activité électrodermale [Boucsein 1992]. Un gel isotonique (Gel-101, Biopac Systems, Inc) est appliqué entre chaque électrode et la peau pour améliorer le contact, faciliter le transfert de charges et réduire l'impédance de la peau liée au stratum corneum. Puis, un courant est injecté à travers la paire d'électrodes de sorte que la densité de courant soit inférieure à 10 µA cm^{-2} (cf. les recommandations dans : [Fowles, Christie *et al.* 1981]). La tension, proportionnelle à la résistance cutanée, est mesurée aux bornes des électrodes.

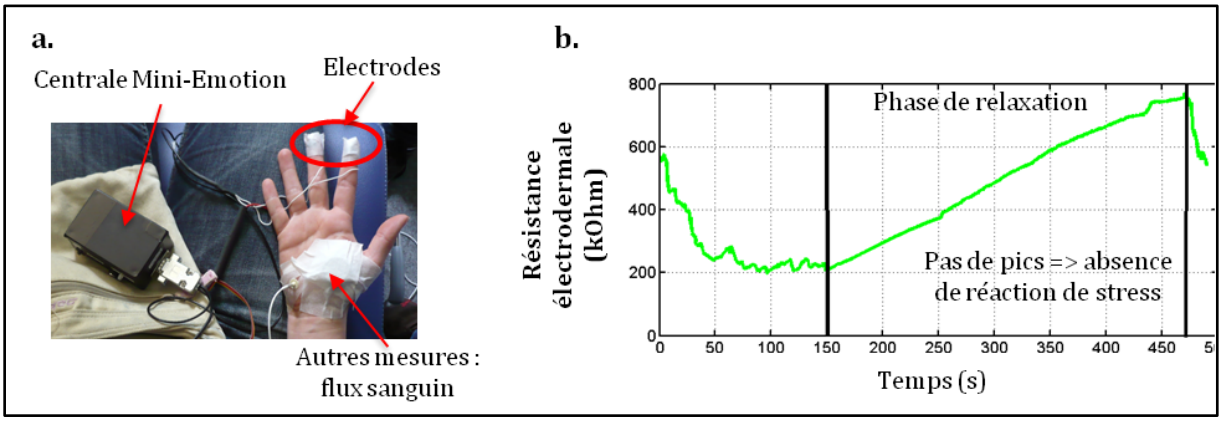


Figure 3.12 : a. Dispositif de mesure de la RED. b. Signal de la RED obtenu en temps réel sur un écran pendant la phase de détente qui précède les mesures.

Il est alors possible de visualiser le signal de la RED (en kΩ) sur un écran d'ordinateur. Ce signal peut être divisé en deux parties :

- **La partie tonique** associée à la variation lente du niveau de base. Une diminution lente (de l'ordre de la minute) du niveau de base de la RED peut être liée à un stress continu comme dans le cas d'un calcul mental alors qu'une augmentation lente peut-être liée à une relaxation ou à un endormissement progressif.
- **La partie phasique** associée aux variations rapides du signal (ou aux pics). Elle peut être caractérisée par l'amplitude et la durée de la réponse. Cette partie peut être "orientée" lorsqu'elle correspond à la réponse à un stimulus précis (tel qu'un bruit) et "non-orientée" lorsqu'il y a une réponse sans stimulus spécifique. La fréquence des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

réponses non orientées peuvent refléter la composante émotionnelle d'une réaction de stress [Setz, Arnrich *et al.* 2010].

Pendant la phase de détente de l'individu, c'est-à-dire 10 minutes avant la phase de mesures, l'augmentation du signal de la RED (liée à la relaxation) et l'absence de pics (ou de réponses phasiques) permettent de s'assurer, en temps réel, que le sujet est détendu et calme (cf. Figure 3.12.b.). Les mesures ne commencent que si le sujet est identifié à partir des signaux de RED comme étant détendu.

3.3. Traitement statistique des données

3.3.1. Démarche générale de l'analyse statistique des données

Tout d'abord, les données brutes ainsi que les variations individuelles de chaque variable (notées Δ) ont été analysées. Une variation individuelle d'une variable correspond à l'écart d'une valeur (associée à un environnement et à un individu) par rapport à un niveau moyen calculé pour chaque individu à partir des 6 valeurs obtenues dans chacun des 6 environnements. Elle peut être représentée par la formule suivante :

$$\Delta X_i(Ej) = X_i(Ej) - \frac{\sum_{j=1}^{6} X(Ej)}{6}$$

Avec, i : numéro du sujet, j : numéro de l'environnement thermique, X : variable cutanée

La variation individuelle a l'avantage de réduire les différences interindividuelles de « niveaux » afin de s'intéresser prioritairement aux variations des variables. En effet, il n'est pas toujours possible d'identifier un comportement commun à un groupe à partir des niveaux des variables cutanées (car ces niveaux sont souvent très dispersés pour des variables physiologiques), alors que les variations des variables permettraient de mettre en évidence un comportement commun.

Les tests statistiques suivants ont été utilisés pour identifier des différences physiologiques significatives entre deux groupes d'individus :

- Le test non paramétrique de **Mann-Whitney**

Il a été utilisé pour déterminer si les « rangs » d'une variable, dans un environnement donné, sont significativement différents entre les deux groupes indépendants.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Le test non paramétrique des **rangs signés de Wilcoxon** (cf. 2.2.2. page 119)

Il a été appliqué aux données pour déterminer si le sens de variation d'une variable cutanée entre l'avant et l'après « transition thermique» est significatif. Les sens de variation de chaque variable ont alors pu être comparés entre les groupes.

- Le test de **l'ANCOVA (analyse de la covariance)**

Il correspond à une extension du test de l'ANOVA (mélange de l'ANOVA et de la régression linéaire) (cf. partie 2.2.1.2. page 118). En effet, comme l'ANOVA, il consiste à déterminer l'effet d'une variable catégorielle indépendante (telle que les « groupes d'individus ») sur une variable continue dépendante (telle qu'une « variable cutanée »). Cependant, dans l'ANCOVA, l'effet est calculé en contrôlant (ou en enlevant) l'effet d'une autre variable continue, appelée covariable (telle que la température ambiante), qui a un impact présumé sur la relation initiale. Ce test est basé non pas sur l'analyse de la variance mais sur l'analyse de la covariance. Dans cette expérimentation, on a préféré utiliser l'ANCOVA plutôt que l'ANOVA car la température ambiante a varié entre les sujets dans chacun des 6 environnements. On a considéré qu'il était plus précis de considérer la variable « température ambiante » (qui a été enregistrée en continu) comme une variable continue plutôt que comme une variable catégorielle. Les résultats de ce test ont été pris en compte uniquement lorsque les résidus du modèle respectaient la normalité d'après le test de Shapiro-Wilk. De plus, ils sont présentés uniquement lorsqu'ils sont significatifs ou lorsqu'ils apportent des éléments complémentaires.

Tous les tests ont été considérés comme significatifs quand : **p-valeur < 0,05**.

Puis, **l'analyse en composantes principales (ACP)**, décrite dans le chapitre précédent (cf. partie partie 2.2.3.2. page 121), a été utilisée pour mettre en évidence des relations linéaires entre les variables cutanées et pour identifier les relations qui sont différentes entre les deux groupes de sensibilité au froid.

Enfin, **la régression « Partial Least Squares » ou la régression par les moindres carrés partiels (PLS)** a été utilisée pour identifier des relations linéaires entre un vecteur (Y) correspondant à une variable sensorielle déclarée telle que la sensation thermique ou le confort thermique et un ensemble de variables indépendantes explicatives X_i correspondant à l'ensemble des variables cutanées. La qualité du modèle obtenu avec la régression PLS a permis de déterminer jusqu'à quel point les variables cutanées peuvent expliquer la variabilité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

du ressenti thermique déclaré pour chaque groupe. Cette méthode est détaillée dans la partie suivante.

3.3.2. La régression Partial Least Squares (PLS)

La régression PLS consiste à effectuer une analyse en composantes principales de l'ensemble des variables indépendantes X (les variables cutanées) de manière à ce que les composantes principales des Xj expliquent au mieux la variable (ou l'ensemble des variables) Y (les variables sensorielles : sensation thermique ou confort thermique) [Tenenhaus, Gauchi *et al.* 1995; Tenenhaus 1998]. De la même manière, les variables Y sont résumées par des composantes principales. Puis, la PLS construit des variables latentes issues de la décomposition de X et Y avec la contrainte que la covariance (X, Y) soit maximale. Ce critère de covariance permet de faire un compromis entre la restitution de la variabilité de X (effectuée avec l'ACP) et l'investigation de la relation entre X et Y (effectuée dans la régression linéaire multiple). Ainsi, il est possible de prédire la variable Y à partir des variables X en séparant mieux le signal (ce qui est synthétique, structuré commun aux données) du bruit (ce qui est plus spécifique à l'échantillon de données étudié).

Il existe deux types de PLS : la PLS1 est utilisée lorsque le nombre de variables Y à prédire vaut 1 et la PLS2 est utilisée lorsque le nombre de variables Y à prédire est supérieur à 1. Ici, seule la PLS1 a été utilisée.

Les principaux avantages de la PLS sont les suivants :

- Le nombre d'observations peut être faible : possibilité d'avoir plus de variables X que d'observations et plus de variables Y que d'observations
- Les résultats de la régression ne sont pas biaisés par la forte colinéarité des variables explicatives X, contrairement à la régression linéaire multiple
- Les résultats de la régression sont obtenus en prenant en compte à la fois X et Y.

Dans notre cas, les variables cutanées (X) étant colinéaires et nombreuses, il nous est apparu nécessaire d'utiliser la régression PLS, plutôt que la régression linéaire multiple, pour relier les variables déclaratives sensorielles aux variables cutanées.

Pour chaque régression PLS, les **variables cutanées X ont été centrées et réduites**. Le nombre de composantes à retenir a été choisi à partir du test du Q^2 qui consiste à quantifier l'apport de la $h^{ième}$ composante de la PLS sur le pouvoir prédictif du modèle : si $\mathbf{Q^2_h} \geq$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

0.00975, la composante PLS sera considérée significative. Puis les éléments suivants ont été analysés :

- La **qualité globale de la régression** qui correspond à la proportion de variance expliquée par les variables latentes du modèle proposé.
- Les valeurs des **VIP** c'est-à-dire de l'**importance relative des variables** X dans l'explication des valeurs de Y.

  Quand les VIP > 1 : les variables sont considérées comme très intéressantes ;

  Quand les VIP < 0,8 et que la valeur absolue du coefficient de la variable dans la régression est proche de 0 : la variable est éliminée et la régression est refaite jusqu'à ce que tous les VIP soient supérieures à 0,8.
- Les valeurs des **coefficients standardisés de la régression** permettent de déterminer les variables qui ont le plus d'effet sur la variable Y à prédire.

3.4. Caractérisation des paramètres physiques environnementaux

3.4.1. Conditions extérieures

Les « attentes thermiques » (ou le confort thermique attendu) des volontaires peuvent changer en fonction des températures extérieures et donc des saisons. La campagne de mesures s'est déroulée au cours d'un seul mois : en juin. Cependant, les mesures de températures extérieures ont permis d'identifier des journées très chaudes (surtout l'après-midi). Lors de ces journées, le flux sanguin mesuré, dans la première ambiance de l'après-midi, sur les volontaires n°1 et n°9 a été très élevé (par rapport aux autres sujets). Ces sujets sont probablement rentrés dans l'environnement E4 alors qu'ils étaient en état de vasodilatation à cause de la température ambiante extérieure supérieure à 25°C, la période d'acclimatation n'ayant probablement pas été suffisamment longue.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

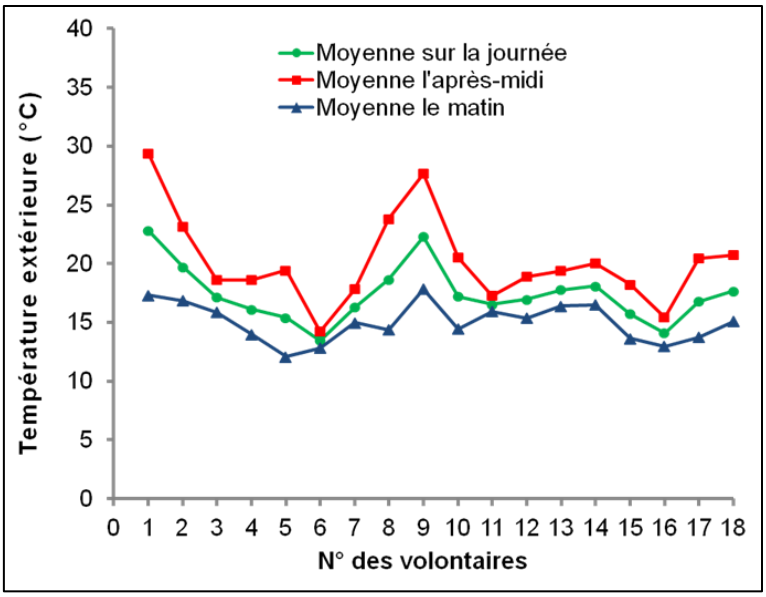


Figure 3.13 : Températures extérieures moyennes obtenues sur la journée entre 8h00 et 18h00, sur la matinée entre 8h00 et 13h00 et sur l'après-midi entre 14h00 et 18h00. Elles ont été récupérées grâce à une station météorologique sur le site du CSTB Nantes chaque jour de la campagne de mesures.

Il a donc été choisi de ne pas inclure les **sujets n°1 et 9** (pour lesquels la température extérieure moyenne de l'après-midi était supérieure à 25°C) dans l'analyse. Leurs ressentis et leurs variables physiologiques sont susceptibles d'avoir été influencés par les conditions extérieures. La comparaison avec les autres sujets n'est alors pas fiable.

3.4.2. Humidité relative ambiante des environnements thermiques

L'humidité relative des différents environnements thermiques a été régulée de façon à rester relativement constante (autour d'environ 40-45%) tout au long de l'expérimentation. La régulation n'a évidemment pas été parfaite et l'humidité relative a légèrement changé suivant l'environnement et suivant le jour de l'expérimentation (c'est-à-dire suivant le volontaire). D'après la Figure 3.14, l'humidité relative a globalement été comprise entre 37 et 47% et quelques valeurs ont dépassé 50%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

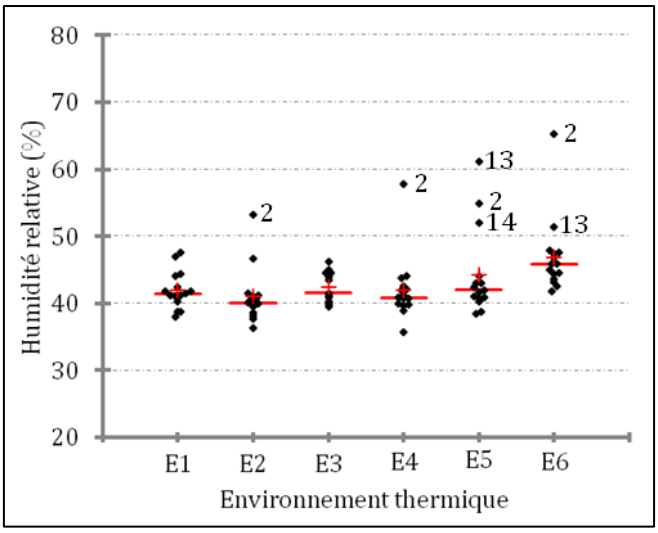


Figure 3.14 : valeurs des humidités relatives ambiantes moyennes des différents environnements de l'expérimentation pour chacun des volontaires. Les numéros indiqués sur la figure sont des numéros de sujet. Le trait horizontal représente la médiane et la croix représente la moyenne pour chaque environnement thermique.

Les environnements du volontaire **n°2** ont souvent eu un taux d'humidité élevé par rapport aux autres sujets (cf. Figure 3.14). Il a donc été décidé de ne pas inclure ce sujet dans l'analyse car un fort taux d'humidité peut impacter les mesures de perte en eau, par exemple. Il serait difficile de comparer les valeurs de perte en eau de ce sujet avec celles des autres sujets puisqu'on ne pourrait pas savoir si les différences observées sont associées à des particularités de l'individu ou au taux d'humidité ambiant. Par contre, les sujets n°13 et 14, pour lesquels les environnements E5 ont eu un taux d'humidité élevé, ont été conservés dans l'analyse car l'humidité relative n'a pas dépassée 50% dans les autres environnements. Cependant, il faudra être prudent lors de l'analyse des données de ces deux sujets (surtout du sujet n°13) obtenues dans l'environnement E5.

3.4.3. Températures ambiantes des environnements thermiques

Les climatiseurs ont régulé la température ambiante de chacun des environnements mais, dans certains cas, la consigne de température n'a pas toujours été respectée et la température moyenne rayonnante ressentie n'a pas été exactement la même pour tous les sujets. Les sujets qui ont ressenti une température particulièrement différente des autres ont été représentés par leur numéro sur la Figure 3.15. On ne peut pas considérer que tous les sujets ont été confrontés aux mêmes environnements thermiques (les environnements thermiques E1 et E6 ont bien été différents des autres environnements, mais, d'après la Figure 3.15, les environnements thermiques E2 et E5 ont été similaires pour certains sujets). Cependant, il n'est pas envisageable d'éliminer les sujets qui n'ont pas vécu la même température dans E1, E2, etc. Nous avons considéré que tous les sujets ont bien été confrontés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

à des transitions chaudes et froides durant l'expérimentation et que les variations des variables physiologiques liées aux transitions thermiques sont donc comparables entre les individus.

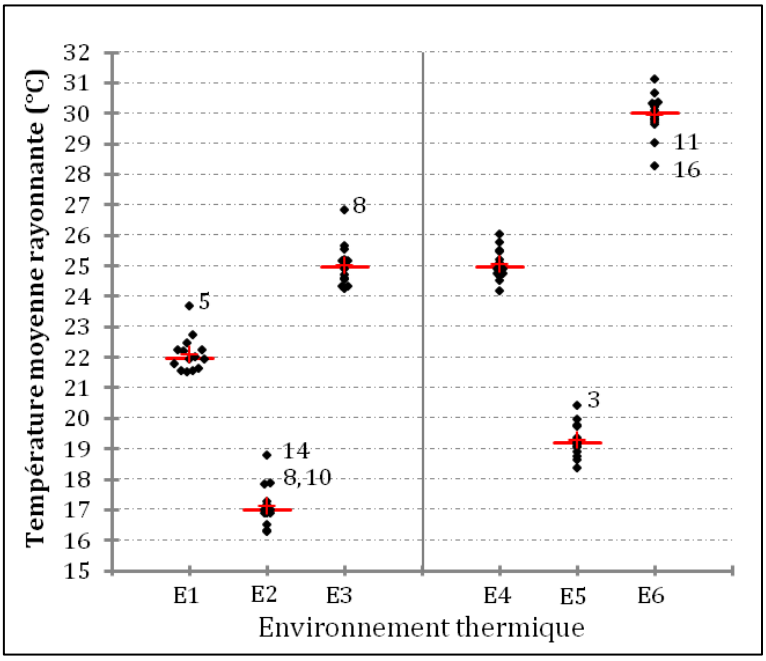


Figure 3.15 : Valeurs moyennes des températures moyennes rayonnantes (TMRT) pour les différents environnements thermiques et pour chacun des volontaires. Les numéros correspondent aux numéros des sujets qui ont des valeurs extrêmes. Le trait horizontal représente la médiane et la croix représente la moyenne pour chaque environnement thermique.

Au sein même d'un environnement thermique l'écart-type de la température ambiante était de l'ordre de 0,2 à 0,8°C. La température ambiante a donc peu variée au cours de chaque phase de mesure.

3.4.4. Impact du contexte

D'après les réponses à la question sur les gênes engendrées par certains éléments de l'ambiance, les volontaires n'ont pas été perturbés par la lumière, l'odeur et la couleur des environnements. Un seul sujet a été gêné par la taille des espaces qu'il estimait trop petite et deux sujets ont été gênés par le bruit des climatiseurs surtout dans les environnements froids E2 et E5 où la ventilation était maximale. Globalement, le contexte a eu peu d'impact sur les sujets et les environnements de cette campagne de mesures semblent donc plus adaptés à l'analyse sensorielle que les environnements du protocole B dans le chapitre précédent.

3.5. Caractérisation des groupes présentant des ressentis distincts

3.5.1. Choix du critère de construction des groupes

Contrairement au chapitre précédent, les groupes présentant des ressentis distincts n'ont pas été construits à partir des sensations thermiques déclarées mais à partir **du degré de**

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

frilosité déclaré par les sujets avant de réaliser l'expérimentation. De cette façon, la construction des groupes ne risque pas d'être influencée par les imprécisions de la régulation des températures ambiantes. En effet, tous les sujets n'ont pas tous été confrontés exactement aux mêmes températures ambiantes pour chacun des environnements (E1, E2, *etc.*), et dans ce cas, il est difficile d'identifier si une différence interindividuelle de sensation thermique est liée à la sensibilité thermique des individus ou aux températures ambiantes qui sont légèrement différentes. D'autre part, le critère de « frilosité » est facilement identifiable par chacun d'entre nous. Il représente une notion connue de sensibilité au froid et il pourrait donc être utilisé facilement comme critère de classes d'individus, tout comme l'âge ou le sexe, dans des modèles de prédiction de la sensation ou du confort thermique.

Cependant, la construction des groupes ne s'est pas faite à partir de la réponse à une seule question car les volontaires peuvent se tromper en cochant une réponse ou avoir des difficultés à évaluer leur sensibilité. Elle a été effectuée à partir des étapes suivantes :

- Etape 1 : la réponse à la question sur le degré de frilosité

Vous considérez-vous frileuse ? …Oui très / Oui / Non / Je ne sais vraiment pas

- Etape 2 : les réponses à 9 questions sur des habitudes de vie

Elles sont regroupées dans l'annexe 3. Un score a été attribué à chaque réponse.

- Etape 3 : les gênes déclarées face à la température ambiante d'E2 et E5

Ces gênes ont été déclarées pendant l'expérimentation lors des questions posées oralement. La gêne a été associée au score de 1 et l'absence de gêne a été associée au score de 0.

Puis, le score total des étapes 2 et 3 a été calculé. Lorsque ce score était inférieur ou égal à 10, les sujets étaient considérés comme « non frileux » et les autres étaient considérés comme « frileux ». L'adéquation entre ce résultat et la réponse à la question de l'étape 1 a été vérifiée. Ainsi, il a été établi que le **sujet n°7** avait des réponses non cohérentes. Il a été éliminé de l'analyse car ses réponses ne nous permettaient pas de l'associer à un groupe de sensibilité au froid. Puis, les trois sujets qui avaient répondu « je ne sais pas » ont été associés à l'un des deux groupes grâce à leur score total calculé à partir des étapes 2 et 3. De plus, pour confirmer la pertinence des groupes, l'adéquation entre l'appartenance aux groupes et les commentaires des sujets (obtenus dans le questionnaire complété en ligne et lors des expérimentations) a été vérifiée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Ainsi, deux groupes ont pu être construits :

- Un **groupe « frileux » (G2)** ou sensible au froid constitué de 6 sujets
- Un **groupe « non frileux » (G1)** constitué de 7 sujets

3.5.2. Caractérisation non sensorielle des groupes

Les principales caractéristiques des deux groupes sont réunies dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Caractérisation anthropométrique et caractérisation des peaux des sujets des deux groupes.

	Groupe G1 « Non frileux »	**Groupe G2 « Frileux »**
Nombre de sujets (n)	n = 7	n = 6
Age (ans)	22 ± 4	21 ± 2
IMC (kg m^{-2})	20,4 ± 1,3	19,3 ± 1,3
Nombre de sujets avec une peau sensible (n)	n = 2	n = 5
Nombre de sujets par phototype (n)	Phototype 2 : n = 1 Phototype 3 : n = 6	Phototype 2 : n = 3 Phototype 3 : n = 3
Nombre de sujets par type de peau déclaré (n)	Normale : n = 4 Sèche : n = 1 Ne sait pas : n = 1	Normale : n = 3 Mixte : n = 3 Ne sait pas : n = 1

Le groupe G2 est constitué par des sujets qui ont tendance à avoir des peaux sensibles. Cette observation est confirmée par la corrélation qui existe entre la sensibilité au froid et la sensibilité cutanée des sujets (cf. Figure 3.16). Cependant, la corrélation reste faible (r = 0,5).

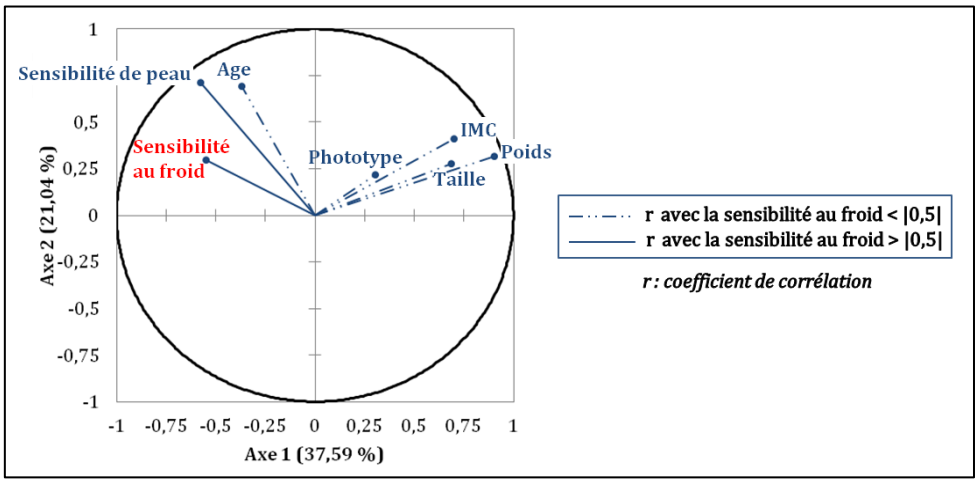


Figure 3.16 : Cercle de corrélation de l'ACP de Spearman représentant le lien entre la sensibilité au froid des volontaires et d'autres caractéristiques des volontaires telles que l'âge, la taille, le poids, l'indice de masse corporelle (IMC), le phototype, la sensibilité de peau.

D'autre part, d'après cette même figure, les autres paramètres ne sont pas corrélés avec la sensibilité au froid. Donc, les différences qui seront mises en évidence entre les groupes pourront être associées principalement à la sensibilité thermique des groupes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.5.3. Caractérisation du ressenti des groupes

3.5.3.1. Sensations thermiques globales et locales

Les scores de sensation thermique déclarée par les deux groupes ont diminué significativement après les transitions froides et ont augmenté significativement après les transitions chaudes. Tous les environnements thermiques de températures ambiantes différentes ont été discriminés en termes de sensation thermique. Même dans les deux environnements où la température de consigne était identique, la sensation thermique des extrémités et en particulier la sensation thermique locale des mains a été différente entre les deux environnements et pour les deux groupes. En effet, les volontaires ont eu tendance à ressentir une sensation thermique sur les mains plus faible dans E3 (~25°C) que dans E4 (~25°C). En effet, l'environnement E3 succède à un environnement froid E2 (~17°C), alors que l'environnement E4 est le premier environnement de l'après-midi et ne succède pas à une forte transition thermique. Même après 30 minutes d'acclimatation, les extrémités n'étaient probablement pas encore complètement réchauffées dans l'environnement E3 et les sensations thermiques déclarées au niveau des mains ont donc été plus faibles.

Tableau 3.4 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des ressentis déclarés entre « avant » et « après » chaque transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Tests des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		22°C → 17°C		25°C →19°C	
Groupe	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2
Sth globale	**↓ 0,018**	**↓ 0,028**	**↓ 0,018**	**↓ 0,027**	**↑ 0,018**	**↑ 0,027**	**↑ 0,017**	**↑ 0,028**	↑ 0,173	↓ 0,715
Sth visage	**↓ 0,017**	**↓ 0,026**	**↓ 0,018**	**↓ 0,027**	**↑ 0,018**	**↑ 0,027**	**↑ 0,017**	**↑ 0,027**	↑ 0,141	↑ 0,680
Sth avant-bras	**↓ 0,017**	**↓ 0,024**	**↓ 0,018**	**↓ 0,042**	**↑ 0,018**	**↑ 0,027**	**↑ 0,018**	**↑ 0,026**	**↑ 0,042**	↑ 0,340
Sth main	**↓ 0,017**	**↓ 0,027**	**↓ 0,018**	**↓ 0,042**	**↑ 0,017**	**↑ 0,028**	**↑ 0,017**	**↑ 0,028**	**↑ 0,043**	**↑ 0,027**
Pref th	**↑ 0,017**	**↑ 0,027**	↑ 0,066	**↑ 0,027**	**↓ 0,028**	**↓ 0,028**	**↓0,018**	**↓ 0,028**	↑ 0,144	**↓ 0,042**
Cth global	**↓ 0,018**	**↓ 0,028**	**↓ 0,018**	**↓ 0,043**	**↑ 0,018**	**↑ 0,028**	↑ 0,063	↑ 0,345	↑ 0,581	↑ 0,115
Note	**↓ 0,017**	**↓ 0,027**	**↓ 0,018**	**↓ 0,027**	**↑ 0,017**	**↑ 0,027**	**↑ 0,028**	↑ 0,223	↓ 0,680	↑ 0,197

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; Sth : sensation thermique ; Pref th : préférence thermique ; Cth : Confort thermique ; Note : note d'appréciation hédonique

Cependant, des différences sont, tout de même, présentes entre les deux groupes :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– Au niveau de l'évolution des **sensations thermiques des avant-bras entre E3 et E4**

D'après le test des rangs signés de Wilcoxon, les sensations thermiques sur les avant-bras ont été significativement plus élevées dans E4 que dans E3 pour le groupe G1 mais pas pour le groupe G2 (cf. Tableau 3.4). L'évolution de la sensation thermique des avant-bras du groupe G1 est similaire à celle des mains. Pour le groupe G2, il est possible que l'absence d'évolution significative soit liée au fait que certains sujets particulièrement sensibles au froid ont eu tendance à coller leurs avant-bras le long de leur corps pour conserver leur chaleur dans l'environnement E2. Donc, cette différence entre les deux groupes est peut-être davantage associée à une différence de comportement.

– Au niveau de l'évolution de la **préférence thermique entre E3 (25°C) et E4 (25°C)**

D'après le test des rangs signés de Wilcoxon, les individus du groupe G2 préféraient avoir plus chaud dans E3 (pour se réchauffer plus vite) que dans E4 où ils ont souvent déclaré ne pas vouloir de changement. Par contre, les individus du groupe G1 n'ont pas tous réagi de la même façon : certains ne souhaitaient aucun changement dans les deux environnements, d'autres souhaitaient avoir un peu plus chaud dans E3 ou E4. L'impact du froid de l'environnement E2 est encore bien présent dans E3 (après 30 minutes d'acclimatation) pour tous les individus du groupe G2 « frileux » mais pas pour tous les individus du groupe G1.

– Au niveau de la **sensation thermique moyenne dans E1 (~22°C) et E4 (~25°C)**

D'après de test de Mann-Whitney sur les rangs, le groupe G2 a exprimé des sensations thermiques moyennes significativement plus faibles (risque de 6 et 7%) que le groupe G1 (cf. Figure 3.17). Cette observation témoigne bien du degré de frilosité plus élevé du groupe G2.

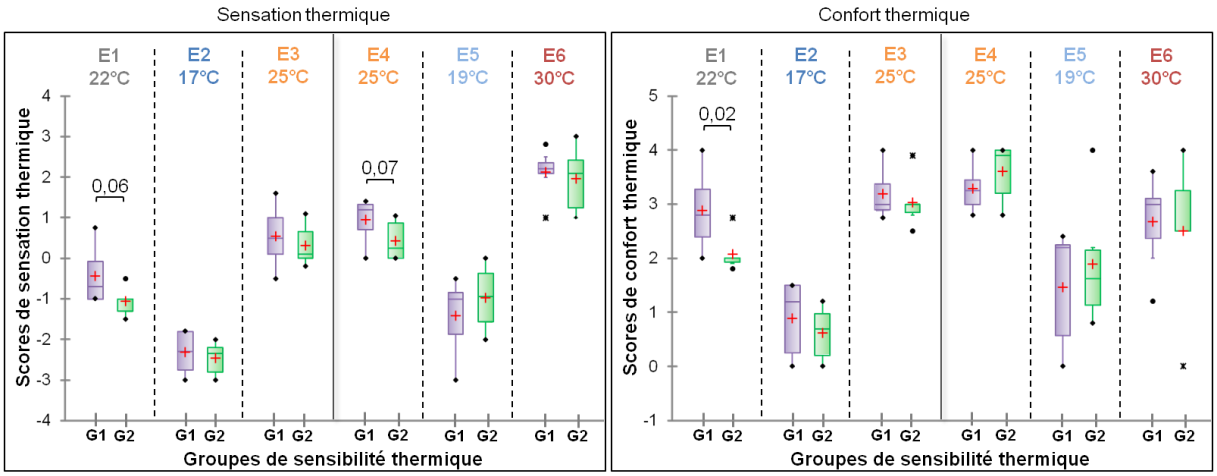


Figure 3.17 : Boîtes de Tukey représentant les scores de sensation thermique et de confort thermique du groupe G1 et du groupe G2 déclarés dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– Au niveau de **l'évolution générale de la sensation thermique avec la TMRT**

D'après le test de l'ANCOVA, la distribution des sensations thermiques dépend de la température moyenne rayonnante (TMRT) ($p < 0{,}0001$) et des groupes de sensibilité thermique ($p = 0{,}07$). Les deux droites de la Figure 3.18 montrent que les sensations thermiques du groupe G2 « frileux » ont tendance à être inférieures à celles du groupe G1 surtout lorsque les environnements sont modérément chauds et chauds.

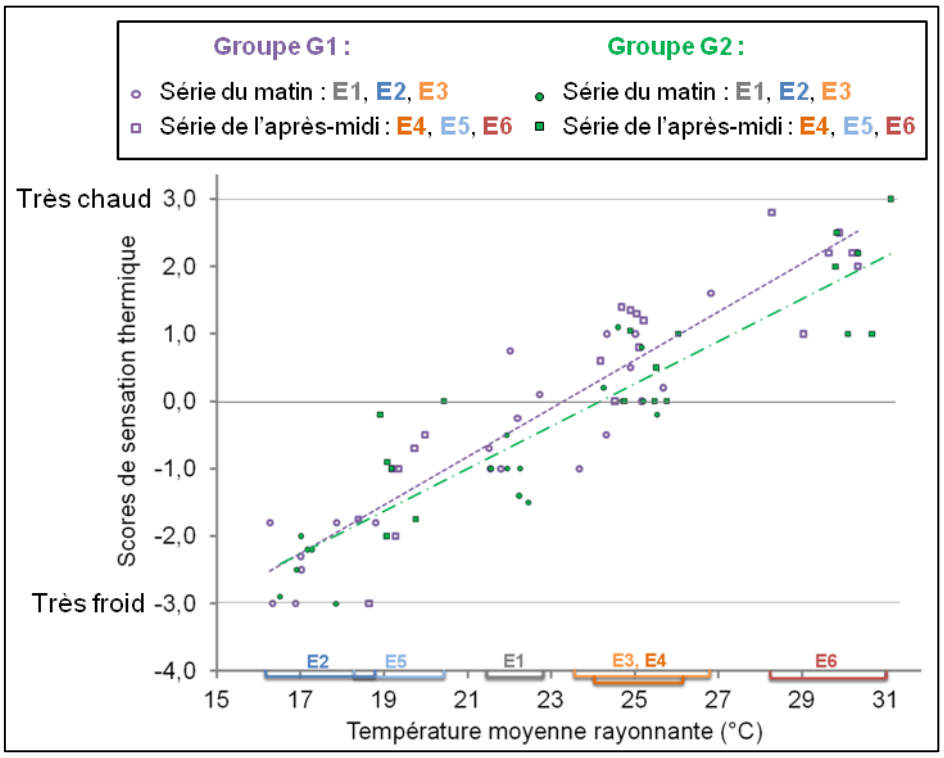


Figure 3.18 : Représentation de l'évolution des scores de sensation thermique en fonction de la température moyenne rayonnante pour chacun des deux groupes de sensibilité au froid (formes vertes pleines : groupe G2 et formes violettes sur fond blanc : groupe G1). Les scores obtenus avant et après les transitions thermiques du matin sont représentés par des ronds et les scores de l'après-midi par des carrés. E1, E2, (etc.) correspondent aux environnements thermiques.

Contrairement à ce qu'on aurait pu imaginer, la sensation thermique du groupe G2 « frileux » n'a pas été significativement plus faible que celle du groupe G1 dans les environnements froids E2 et E5 après les fortes transitions froides. Cette observation signifie-t-elle que les individus des deux groupes ressentent la même sensation après de fortes transitions thermiques froides ? L'absence de différences significatives entre les deux groupes après les transitions thermiques pourrait être expliquée par les deux raisons suivantes :

– La difficulté du jugement du ressenti thermique en situation transitoire :

Lorsque la température ambiante diminue de 22°C à 17°C, toutes les catégories d'individus exprime une sensation beaucoup plus faible. Le jugement plus précis de l'intensité de cette faible sensation thermique est soumis à une forte variabilité individuelle (à l'intérieur même

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

des groupes) qui est susceptible de masquer l'influence de la « sensibilité thermique » des groupes (G1 et G2) sur la sensation thermique éprouvée. L'aspect transitoire rend le jugement plus flou. Cette remarque a déjà été évoquée par Chen *et al.* lorsqu'ils ont évalué l'effet du genre sur la sensation thermique [Chen, Hwang *et al.* 2011]. Ils ont constaté que les relations entre les variables physiologiques et la sensation thermique étaient différentes pour les hommes et les femmes mais, par contre, les sensations thermiques déclarées par les hommes et les femmes étaient similaires après les transitions thermiques.

– L'écart-type des températures moyennes rayonnantes (TMRT) d'E2 et E5.

Par exemple, dans l'environnement E5, un sujet du groupe frileux a vécu une TMRT plus élevée que les autres et deux sujets du groupe G1 ont vécu des TMRT plus faibles que les autres. Ces différences pourraient expliquer que la sensation thermique du groupe G1 « non frileux » en E5 (~ 19°C) a eu tendance à être plus faible que celle du groupe G2 (cf. Figure 3.17).

3.5.3.2. Confort thermique et notes hédoniques d'appréciation

Pour les deux groupes, les scores de confort thermique et les notes d'appréciation des volontaires ont diminué significativement après les transitions froides et ils ont augmenté significativement après la première transition chaude (17°C → 25°C) (cf. Figure 3.17).

Des différences d'évolution sont apparues, entre les deux groupes, après la deuxième transition chaude. Le confort thermique ainsi que les notes de satisfaction ont augmenté significativement ($p = 0,06$ et $p = 0,03$ respectivement) après la deuxième transition chaude pour le groupe G1 mais pas pour le groupe G2. Un sujet du groupe G2 n'a particulièrement pas apprécié l'environnement chaud à 30°C (il a déclaré être dans un état « très inconfortable ») ce qui a rendu le test statistique non significatif. La sensibilité au chaud des individus semble avoir eu un impact sur les jugements thermo-sensoriels déclarés.

D'autre part, en accord avec le degré de frilosité du groupe G2, le score moyen de confort thermique du groupe G1 est significativement plus élevé que celui du groupe G2 dans l'environnement E1 (22°C) d'après le test de Mann-Whitney (cf. Figure 3.17).

Par contre, comme pour la sensation thermique, les scores de confort thermique moyens et les notes de satisfaction moyennes n'ont pas été significativement différentes pour le groupe G1 et G2 après les transitions thermiques, alors que les deux groupes présentent des sensibilités au froid différentes. Les raisons probables de cette absence de différence sont les mêmes que celles mentionnées dans la partie précédente sur la sensation thermique déclarée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La Figure 3.19 montre que l'évolution du score de confort thermique en fonction de la température moyenne rayonnante est non linéaire pour les deux groupes. Cette observation est en accord avec la littérature. La température (TMRT) associée à un confort optimal semble légèrement plus élevée pour le groupe G2 que pour le groupe G1. Cette observation est plutôt en accord avec la sensibilité au froid du groupe G2. Le groupe G2 a plutôt tendance à éprouver un confort maximum pour des TMRT proche de 27°C et le groupe G1 pour des TMRT proches de 26°C. D'autre part, la parabole du groupe G2 a tendance à être plus resserrée : la gamme de TMRT associée à un état confortable est plus limitée que pour le groupe G1 mais l'état de confort optimal se situe au-delà de l'état confortable (associé au score de 3).

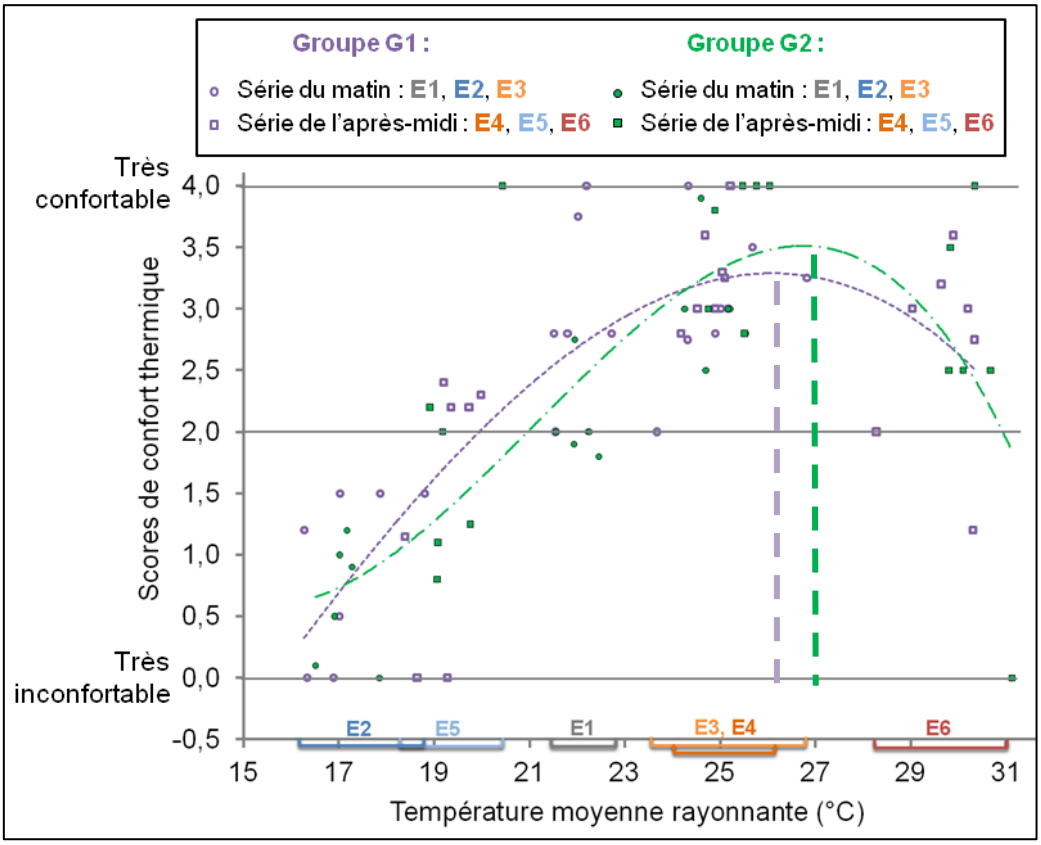


Figure 3.19 : Représentation de l'évolution des scores de confort thermique en fonction de la température moyenne rayonnante pour chacun des deux groupes de sensibilité au froid (formes pleines : groupe G2 et formes sur fond blanc : groupe G1). Les scores obtenus avant et après les transitions thermiques du matin sont représentés par des ronds et les scores de l'après-midi par des carrés. E1, E2, (etc.) correspondent aux environnements thermiques.

D'autre part, en analysant plus en détail la répartition des notes d'appréciation à partir d'une cartographie interne des préférences[26], on peut constater que tous les volontaires ont

[26] La cartographie interne de préférence correspond à une ACP des données de préférences (ici : des notes de satisfaction). Les individus sont les environnements thermiques et les variables sont les sujets. On obtient une carte des environnements où on peut identifier les préférences thermiques des sujets.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

mieux noté les environnements modérément chauds (E3, E4) que les environnements froids (E2) représentés en grande partie par l'axe 1 de la Figure 3.20. Les appréciations des volontaires se distinguent surtout par rapport à l'axe 2 c'est-à-dire par rapport aux notes attribuées aux environnements E6 (30°C), E1 (22°C) et E4 (25°C). Deux groupes peuvent être identifiés : l'un d'entre eux a tendance à donner des notes élevées pour E4 et E1 et l'autre a plutôt tendance à donner des notes élevées à E6. Les individus sensibles au froid sont équitablement répartis dans ces deux groupes.

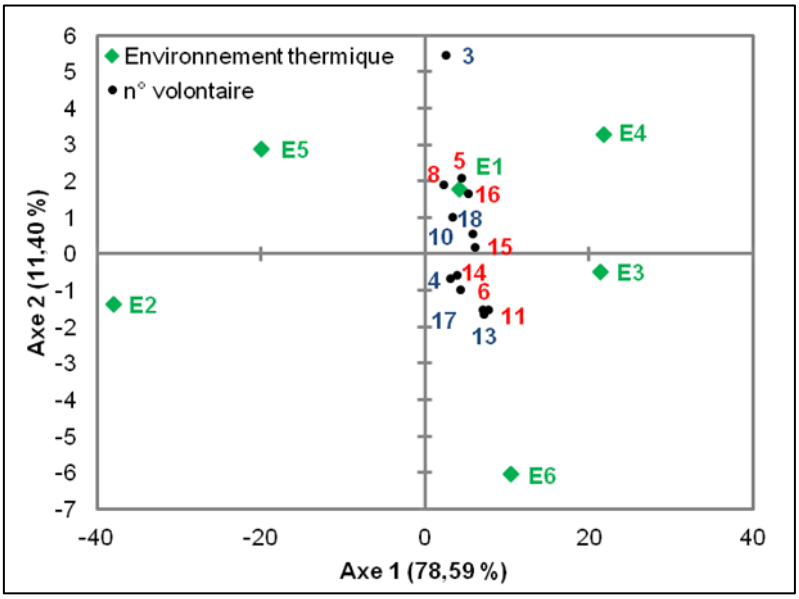


Figure 3.20 : cartographie interne des péférences établie à partir des notes d'appréciation des volontaires dans chacun des environnements thermiques.

La sensibilité au froid n'a pas d'impact sur la sensibilité au chaud et elle ne permet pas à elle seule d'expliquer les préférences des individus pour un environnement thermique donné. L'analyse exploratoire des différences physiologiques entre les groupes G1 et G2 effectuée dans la suite ne consistera donc pas à expliciter toutes les différences interindividuelles de ressenti au sein du panel mais elle consistera à déterminer si certaines différences interindividuelles de sensation thermique ou de confort thermique, présentes dans certaines situations, peuvent être reliées à des différences physiologiques cutanées. Elle nous aidera probablement à mieux comprendre pourquoi les individus se sont déclarés sensibles au froid.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.6. Résultats et discussion

L'exploitation des résultats se divisent en deux parties. La première est consacrée à l'analyse des différences physiologiques cutanées des deux groupes de sensibilité au froid et la deuxième est dédiée à l'évaluation de l'apport d'une approche multiparamétrique et de la prise en compte des groupes de sensibilité thermique pour la prédiction de la sensation thermique et du confort thermique déclarés.

3.6.1. Comparaisons des différences physiologiques des deux groupes

Dans cette partie, chaque variable cutanée est analysée de la façon suivante :

- La première phase consiste à évaluer la pertinence des données en confrontant, avec la littérature, les données « brutes » et/ou les variations des variables avec les transitions thermiques ;
- La deuxième phase consiste à déterminer si des différences sont présentes entre les deux groupes au niveau des données brutes et/ou des variations de ces données avec les transitions thermiques.

Puis les corrélations entre les variables cutanées de chacun des deux groupes de sensibilité au froid sont comparées et les différences physiologiques cutanées identifiées entre les deux groupes sont discutées.

3.6.1.1. Etude des propriétés vasculaires

Cette partie analyse en détail l'activité vasomotrice des deux groupes G1 et G2 à l'aide de la mesure de perfusion sanguine représentant le flux sanguin et effectuée à l'aide d'un imageur laser Doppler sur les joues et sur la face interne des avant-bras.

Fiabilité des données

L'ordre de grandeur des perfusions sanguines sont en accord avec la littérature [Martineaud et Seroussi 1977; Marrakchi et Maibach 2007] : les perfusions sanguines mesurées sur les avant-bras sont bien inférieures à celles mesurées sur les joues (par exemple, à 22°C : 34,0 ± 6,4 u.a. sur les avant-bras *vs.* 64,5 ± 10,5 u.a. sur les joues).

De plus, toutes les perfusions sanguines des joues (PUJ) et des avant-bras (PUAB) diminuent significativement après les deux transitions froides et augmentent significativement après les deux transitions chaudes (cf. Tableau 3.5).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 3.5 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des perfusions sanguines entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Tests des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
PUJ et Δ PUJ	**↓0,018**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	↑0,176	**↑0,028**
PUAB et Δ PUAB	**↓0,018**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; PUJ : perfusion sanguine mesurée sur la joue ; PUAB : perfusion sanguine mesurée sur l'avant-bras ; Δ : variation individuelle.

Ces observations sont bien en accord avec les évolutions du flux sanguin cutané en fonction des températures ambiantes, mentionnées dans la littérature [Charkoudian 2003]. Elles reflètent bien le mécanisme de vasoconstriction nécessaire à la conservation de la chaleur dans les environnements froids et le mécanisme de vasodilatation ou l'expansion du noyau corporel (cf. Figure 1.7 page 30) nécessaire à l'évacuation de la chaleur interne dans les environnements chauds.

Comparaisons des deux groupes

Pour comparer de façon fiable les perfusions sanguines du groupe G1 et du groupe G2 nous avons choisi d'analyser les « variations individuelles » (ou les valeurs centrées) plutôt que les « valeurs brutes » de perfusions sanguines car la mesure de la perfusion sanguine avec l'imageur laser Doppler n'est pas absolue mais relative.

D'après le test de Mann-Whitney (cf. Figure 3.21), les variations individuelles des perfusions sanguines des avant-bras ne sont pas différentes pour les deux groupes dans chaque environnement thermique alors que celles des joues présentent les différences significatives suivantes :

- celles du groupe G2 sont plus faibles que celles du groupe G1 dans l'environnement frais E1, dans l'environnement froid E2 et dans l'environnement E3 (qui succède à l'environnement froid),
- celles du groupe G2 sont plus élevées que celles du groupe G1 dans l'environnement le plus chaud E6.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

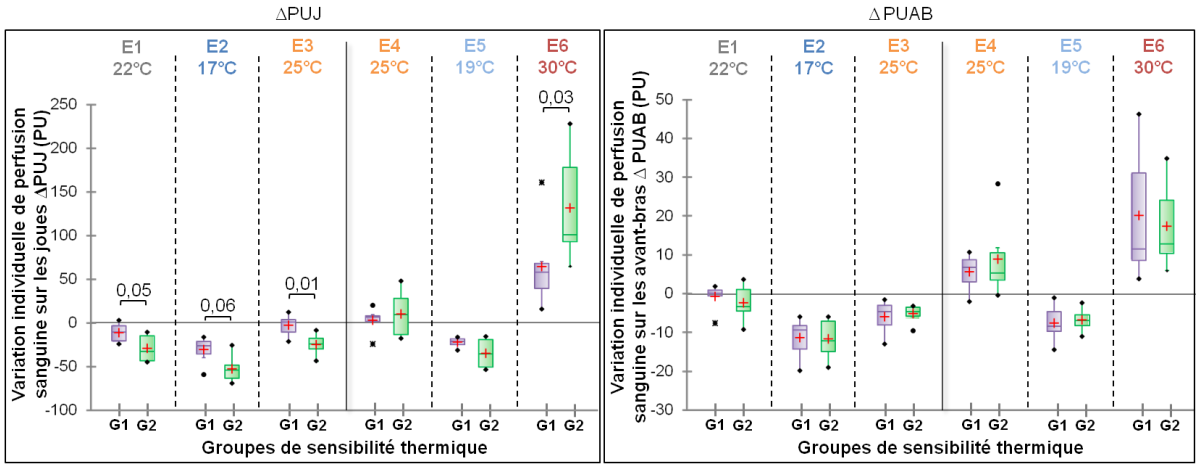


Figure 3.21 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles de perfusions sanguines des joues et des avant-bras des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées.

Dans E5 (19°C), la différence entre les deux groupes repérée sur la variation individuelle de la perfusion sanguine des joues est non significative mais en accord avec les observations précédentes : les flux sanguins des joues du groupe G2 ont tendance à être plus faibles que ceux du groupe G1. L'absence de significativité est peut-être associée aux variations interindividuelles de la température ambiante de l'environnement E5 (19°C). Une autre tendance a été relevée dans E1 (22°C) sur les variations individuelles de perfusions sanguines des avant-bras : elles sont plus élevées pour le groupe G1 que pour le groupe G2 (cf. Figure 3.21). Ce résultat semble également en accord avec les observations précédentes réalisées sur les avant-bras.

Une autre différence entre les deux groupes a été mise en évidence avec le test des rangs signés de Wilcoxon entre E3 et E4 (cf. Tableau 3.5). Les flux sanguins du groupe G1 augmentent significativement entre E3 (à 25°C et précédé par un environnement froid à 17°C) et E4 (à 25°C et précédé par un environnement extérieur au mois de juin d'environ 22°C) sur les avant-bras mais pas sur les joues alors que les flux sanguins du groupe G2 augmentent significativement entre E3 et E4 à la fois sur les joues et les avant-bras (cf. Tableau 3.5). Les avant-bras étant des zones plus éloignées du « noyau corporel » que les joues, l'augmentation du débit sanguin, après une transition chaude, au niveau des avant-bras est plus lente que l'augmentation du débit sanguin au niveau des joues. Que ce soit sur les joues ou sur les avant-bras, le débit sanguin du groupe G2 n'a pas le temps d'atteindre un niveau stable (équivalent à celui obtenu dans E4 sans transition chaude importante) dans E3, alors que, pour le groupe G1, seul le débit sanguin des avant-bras n'a pas le temps d'atteindre un niveau stable. La vasoconstriction du groupe G2 est probablement plus forte que celle du groupe G1

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

dans E3. Cependant, cette différence n'est visible que sur les joues. Il semblerait que, pour les deux groupes, les 30 minutes d'acclimatation après une transition chaude ne suffisent pas à stabiliser le flux sanguin des zones qui sont éloignées du noyau corporel.

Le test de l'ANCOVA appliqué aux variations individuelles de la perfusion sanguine des joues renforce cette constatation. Il met en évidence que la température moyenne rayonnante ($p < 0,001$) mais aussi les groupes de sensibilité au froid ($p = 0,002$) ont un effet sur les valeurs du flux sanguin des joues. L'interaction « température ambiante * groupes de sensibilité au froid » a également un impact significatif ($p = 0,002$). Ceci signifie que l'effet du groupe est différent suivant l'environnement thermique. La Figure 3.22 illustre ces résultats et montre bien que l'impact du « groupe » s'inverse pour une température moyenne rayonnante aux alentours de 23°C. Le groupe G2 « frileux » a des réponses vasomotrices plus prononcées que celles du groupe G1 c'est-à-dire une vasoconstriction plus intense dans les environnements froids/frais (environ < 23°C) et une vasodilatation plus forte dans les environnements moyennement chauds (~ 24-30°C).

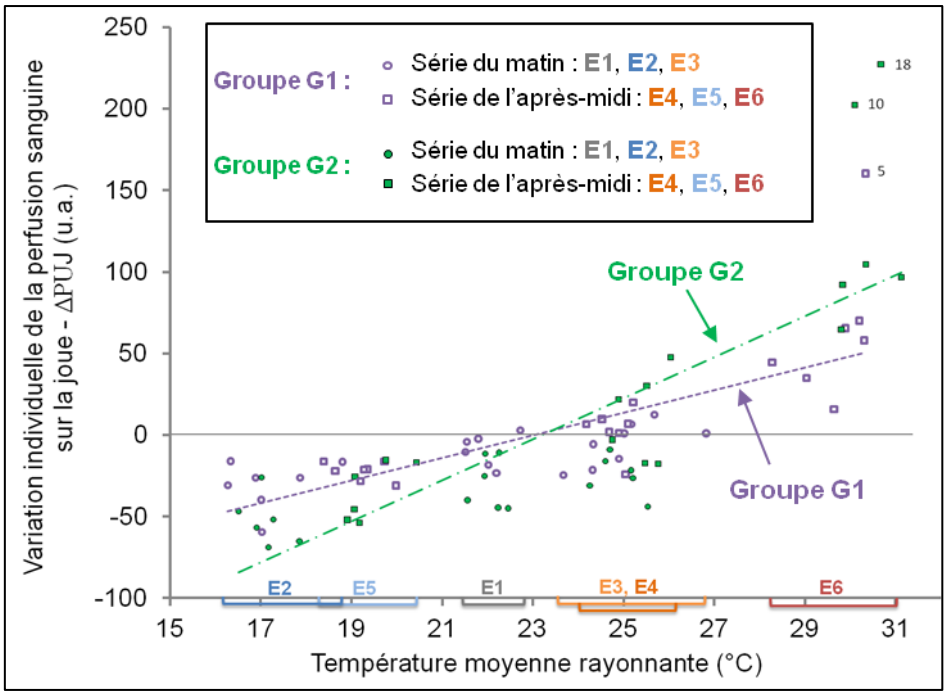


Figure 3.22 : Evolution de la variation individuelle de la perfusion sanguine sur les joues en fonction de la température moyenne rayonnante pour le groupe G1 et G2. Les numéros correspondent aux codes des sujets.

Finalement, le groupe G2 frileux semble être caractérisé par des seuils de déclenchement des réponses vasomotrices plus faibles et/ou des gains de réponses vasomotrices plus élevés que ceux du groupe G1 au niveau des zones très vascularisées telles que les joues. Les réponses vasculaires plus importantes du groupe G2 (nécessitant probablement plus d'énergie) pourraient être reliées à la frilosité de ce groupe.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.6.1.2. Etude des propriétés colorimétriques

Comme le débit sanguin des joues du groupe G2 a été significativement différent de celui du groupe G1 dans certains environnements thermiques, on peut supposer que la concentration volumique de l'hémoglobine qui est l'un des principaux chromophores de la peau est différente entre les deux groupes. Mais cette différence sera-t-elle visible au niveau de la couleur de la peau et des spectres de réflectance qui sont la résultante des mécanismes d'absorption et de diffusion de la lumière à travers la peau ? Les coordonnées L*, a*, b* ainsi que certains critères issus de l'analyse des spectres de réflectance et mentionnés dans la partie 3.2.3. page 212 seront analysés dans cette partie afin de répondre à la question précédente.

3.6.1.2.1. Analyse des coordonnées L*, a*, b*

Fiabilité des données

Tout d'abord, les valeurs des coordonnées L*, a* et b* semblent être cohérentes puisque les observations suivantes sur les différences entre les zones anatomiques sont en accord avec la littérature [Le Fur, Lopez *et al.* 1999] :

- les valeurs de a* associées à l'absorption du vert par l'hémoglobine sont plus faibles sur les avant-bras que sur les joues. Or, les joues sont bien connues pour être des zones plus richement vascularisées que les avant-bras, ce que les données de la partie précédente confirment.
- Les valeurs de b* souvent associées à l'absorption du bleu par la mélanine sont plus élevées sur les joues que sur les avant-bras et les valeurs de la clarté L* souvent associée à la mélanine lorsque la quantité d'hémoglobine reste constante sont plus faibles sur les joues que sur les avant-bras. Or, les joues étant plus souvent exposées au soleil que les avant-bras, elles sont connues pour être des zones où la quantité en mélanine est plus élevée.
-

D'autre part, les coordonnées **L*a*b* des joues** changent significativement après les deux **transitions chaudes** (cf. Tableau 3.6) de la même façon que dans le chapitre précédent après la transition (20°C → 30°C) :

- a* augmente significativement en accord avec l'augmentation du débit sanguin et, par là même, de la concentration volumique en hémoglobine.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– L* et b* diminuent significativement en accord avec l'article de Takiwaki qui montre que, lorsque la quantité d'hémoglobine augmente et que la concentration des autres chromophores tels que la mélanine reste constante, la clarté de la peau (L*) a tendance à diminuer [Takiwaki 1998].

Après les **transitions froides**, les variations des coordonnées **L*a*b* sur les joues** sont beaucoup moins significatives. Cependant, en accord avec les évolutions du débit sanguin, a* a tout de même tendance à diminuer et L* à augmenter. Les absences de significativité sont probablement associées à la plus faible variation du débit sanguin lors des transitions froides que lors des transitions chaudes. Lorsque les variations sont relativement faibles, elles sont probablement moins visibles sur les données colorimétriques.

Tableau 3.6 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des coordonnées colorimétriques L*, a*, b* mesurées sur les joues et l'avant-bras entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Tests des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
a*J	↓0,128	**↓0,028**	**↓0,018**	↓0,173	**↑0,028**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	↑0,063	↑0,116
a*AB	↑0,735	↑0,249	↓0,075	↓0,600	↓0,176	↓0,345	↑0,063	↑0,463	**↑0,028**	↑0,173
b*J	↓0,352	↑0,075	↑0,236	↑0,463	**↓0,018**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	↓0,398	↓0,600
b*AB	↑0,672	↓0,116	↓0,933	↓0,917	↓0,866	**↑0,046**	↓0,674	↓0,753	**↓0,028**	↓0,345
L*J	↑0,237	↑0,173	↑0,063	↑0,345	**↓0,018**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	↓0,091	↓0,345
L*AB	**↓0,043**	**↓0,046**	↓0,866	↓0,463	↑0,128	**↑0,046**	↑0,310	↑0,600	↓0,063	↓0,917

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

Entre E3 et E4 (tous les deux à 25°C), a*J n'augmente pas significativement contrairement aux débits sanguins sur les joues. Les informations colorimétriques obtenues sur les joues reflètent bien l'évolution du débit sanguin mais elles sont moins précises que celles obtenues avec l'imageur laser Doppler.

Sur les **avant-bras**, les coordonnées L*a*b* semblent ne pas évoluer en fonction de l'évolution du débit sanguin. On pourrait alors supposer que les variations des débits sur les avant-bras sont trop faibles pour se répercuter significativement sur les données colorimétriques et surtout sur a*. Cependant, a*AB a bien tendance à augmenter significativement entre les deux environnements à 25°C (E3 et E4). Ceci est en accord avec l'augmentation du débit sanguin entre E3 et E4 évoqué précédemment. La faible variation du

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

débit sanguin sur les avant-bras ne semble donc pas être la seule cause de l'absence d'évolution significative de a*AB après les transitions thermiques. Il est possible que la quantité d'un chromophore ou d'un centre diffuseur autre que l'hémoglobine change sur les avant-bras après les transitions froides et chaudes et masque les variations de L*a*b* liées à la concentration d'hémoglobine. D'ailleurs, la clarté des avant-bras (L*AB) a même tendance à évoluer dans le sens inverse de la clarté des joues (L*J) : elle diminue significativement après la plus forte transition froide : 22°C → 17°C. Est-ce lié à une augmentation de la quantité de mélanine ? Cette hypothèse ne semble pas fiable par rapport aux informations de la littérature. En effet, l'étude de Kim et al. montre que la production de mélanine a tendance à diminuer lorsque la température est plus faible [Kim, Park *et al.* 2003] et la concentration volumique de mélanine est connue pour augmenter grâce à l'action des UV qui, dans cette expérimentation ne varie pas. Il est possible que l'évolution des propriétés colorimétriques des avant-bras ait été perturbée par le positionnement des avant-bras qui n'a pas toujours été le même pour tous les sujets. Les données colorimétriques des avant-bras sont donc difficiles à interpréter et devront donc être analysées avec prudence.

Une étude complémentaire sur l'évolution de la mélanine ou d'une autre composant cutané susceptible de modifier les propriétés optiques de la peau lors des transitions froides serait nécessaire pour mieux comprendre les observations faites sur les coordonnées L*a*b* des avant-bras.

Comparaisons des deux groupes

Analyse des données brutes L*a*b* dans des environnements « neutres »

D'après les tests de Mann-Whitney appliqués aux données de L*a*b* des avant-bras et des joues dans les environnements « neutres » (E1 et E4 non précédés par une forte transition thermique), la clarté (L*) est significativement plus faible pour le groupe G1 ($p = 0{,}008$ pour les joues et $p < 0{,}006$ pour les avant-bras) et la coordonnée de chromaticité b* (associée à l'absorption du bleu par la mélanine et l'hémoglobine) est significativement plus élevée pour le groupe G1 que pour le groupe G2 ($p = 0{,}004$ pour les joues et les avant-bras). Ces observations sont cohérentes avec les phototypes des sujets du groupe G1. En effet, le groupe G1 est composé de 6 sujets avec un phototype 3 et d'un seul sujet avec un phototype 2 alors que le groupe G2 est constitué de 3 sujets de phototype 2 et de 3 autres sujets de phototype 3. Il y a donc 2 fois plus de sujets avec un phototype 3 dans le groupe G1. Or, les individus avec un phototype 3 ont une peau plus mate (avec une quantité de mélanine plus élevée) que ceux avec un phototype 2. Il n'est donc pas étonnant que le groupe G1 ait une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

clarté moyenne plus faible et une coordonnée b* plus élevée. Les tests de Mann-Whitney indiquent également que les coordonnées de chromaticité a* des avant-bras sont significativement plus élevées pour le groupe G1 ($p = 0,03$). Il est cette fois beaucoup plus compliqué d'expliquer cette différence puisque le flux sanguin moyen de l'avant-bras n'est pas apparu significativement différent entre les deux groupes (cf. les résultats de la partie précédente) et la coordonnée a* a plutôt tendance à diminuer lorsque la concentration volumique de mélanine augmente et que la concentration volumique d'hémoglobine est constante. Il semblerait donc, comme le mentionne Rees dans son article, qu'il ne soit pas toujours possible d'associer la variation d'un paramètre du système L*a*b* à la variation d'un constituant biologique spécifique tel que la mélanine et l'hémoglobine [Rees 2003]. En effet, la couleur est issue de mécanismes multiples d'absorption et de diffusion qui rendent parfois l'interprétation des données L*, a*, b* très complexe. Les données obtenues sur les avant-bras semblent plus difficile à décrypter.

Les premières différences entre les deux groupes au niveau des coordonnées L*, a*, b* semblent associées aux phototypes des individus (c'est-à-dire à une couleur initiale de peau). Mais, il est difficile d'établir un lien avec la sensibilité au froid : la répartition des phototypes des individus dans chacun des groupes est probablement aléatoire. Toutefois, il pourrait être intéressant de déterminer, avec un questionnaire adressé à un grand nombre d'individus, si le phototype des individus pourrait avoir un lien avec la sensibilité thermique des individus.

Analyses des variations de L*a*b* avec les transitions thermiques

Dans la suite, il a été choisi de comparer les variations des variables L*, a*, b* des deux groupes en fonction des transitions thermiques et les « variations individuelles » de L*, a*, b* (notées ΔL^*, Δa^*, Δb^*) dans chaque environnement plutôt que les variables brutes qui sont grandement influencées par les couleurs initiales des sujets.

Les tests de Mann-Whitney montrent qu'il n'y a pas de différence entre les deux groupes pour Δa^*J dans chacun des environnements thermiques, alors que ΔL^*J est significativement plus élevé pour le groupe G2 que pour le groupe G1 dans l'environnement E3 à 25°C (qui précède l'environnement à 17°C) (cf. Figure 3.23). Les joues du groupe G2 ont donc tendance à être plus claires (par rapport à leur niveau moyen) que les joues du groupe G1 dans E3. Cette observation est peut-être liée à l'impact de l'environnement froid E2 qui est probablement encore fort dans E3 pour le groupe G2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

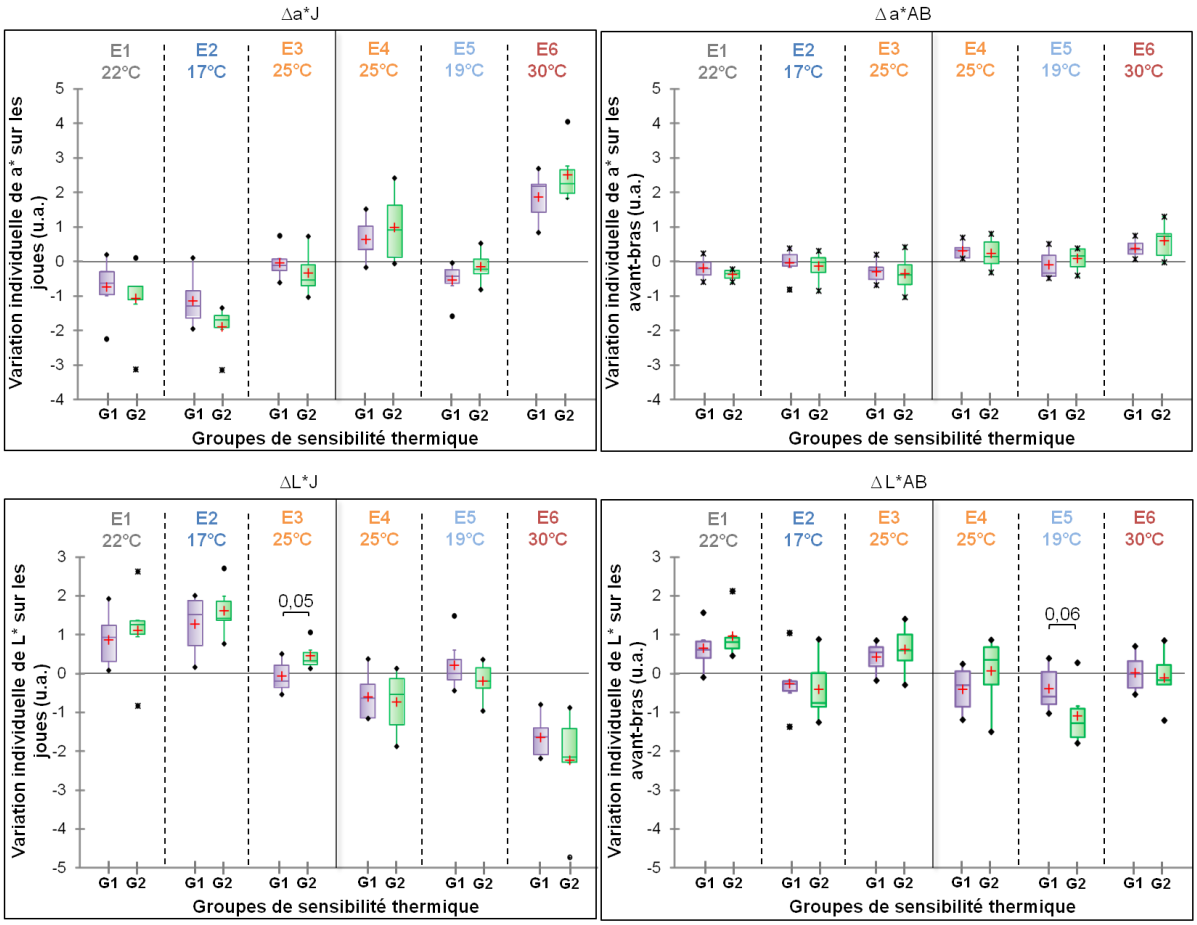


Figure 3.23 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles des coordonnées de chromaticité a* et de la clarté L* du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées.

Les différences suivantes entre les deux groupes ont été relevées grâce au test des rangs signé de Wilcoxon (cf. Tableau 3.6) :

– **Sur les joues**, la diminution de **Δa*J** du groupe G1 n'est pas significative après la **première transition froide** (22°C→17°C) alors que la diminution de Δa*J du groupe G2 n'est pas significative après la **deuxième transition froide** (25°C→19°C).

Lors des transitions froides, les variations des débits sont relativement faibles, il est donc possible que la moindre modification des propriétés cutanées (autre que la concentration en hémoglobine) se répercute sur les propriétés optiques de la peau et masque l'effet de l'hémoglobine sur les coordonnées L*a*b*. Ces différences entre les deux groupes ne semblent pas refléter des différences physiologiques notables entre les deux groupes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– **Sur les avant-bras**, contrairement au groupe G2, **a*AB** du groupe G1 augmente significativement **entre E3 et E4** et b*AB diminue significativement.

Ce résultat reste difficile à interpréter puisqu'il n'est pas en accord avec les observations faites avec les débits sanguins. Cependant, il semblerait que l'impact de l'environnement froid sur les propriétés optiques cutanées ne soit pas identique pour les deux groupes.

– **Sur les avant-bras**, contrairement au groupe G1, **L*AB et b*AB** du groupe G2 augmente significativement après la **première transition chaude** : 17°C→25°C.

Encore une fois, ce résultat est difficile à interpréter puisqu'il ne semble pas relié à la concentration en hémoglobine. Cependant, les propriétés optiques et plus précisément la clarté L* et la teinte b* du groupe G2 semblent davantage influencées par la transition chaude et le retour à un état de confort que celles du groupe G1.

D'autre part, le test de l'ANCOVA montre que l'effet des groupes de sensibilité au froid n'est pas significatif à 5% mais plutôt à 15% (p = 0,14). La Figure 3.24 montre les mêmes tendances qu'avec le débit sanguin sur les joues mais, cette fois, les différences entre le groupe G1 et G2 sont beaucoup plus atténuées et non significatives à 5%.

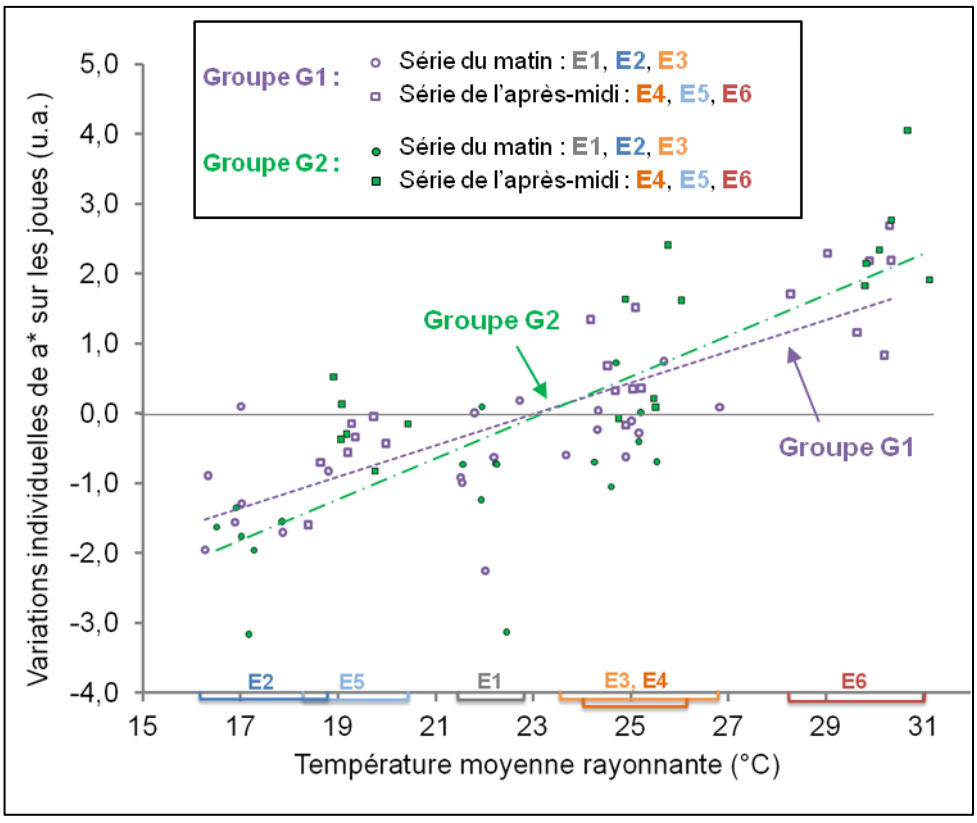


Figure 3.24 : Evolution de la variation individuelle de la coordonnée de chromaticité a* sur les joues en fonction de la température moyenne rayonnante pour le groupe G1 et G2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Il est plus difficile de différencier les deux groupes avec les données colorimétriques L*a*b*. Les observations faites sur les joues semblent tout de même être en accord avec celles faites grâce aux mesures de perfusions sanguines. Cependant, les données colorimétriques des avant-bras sont particulièrement complexes à interpréter. Elles évoluent probablement en fonction d'un composant cutané autre que l'hémoglobine que nous n'avons pas pu identifier dans cette expérimentation. L'exploration des propriétés cutanées non thermiques et vasculaires sur les avant-bras semble pertinente puisqu'il semble bien que des propriétés non thermo-vasculaires ont varié différemment pour les deux groupes sur les avant-bras.

Avant d'explorer les propriétés cutanées non vasculaires, les spectres de réflectance obtenus sur les joues et sur les avant-bras sont analysés.

3.6.1.2.2. Analyse des critères issus des spectres de réflectance

L'objectif de cette partie est non seulement de déterminer si les deux groupes peuvent être caractérisés par des différences au niveau de leur spectre de réflectance mais aussi d'évaluer si les informations fournies par les spectres sont similaires et/ou complémentaires avec celles fournies par les mesures de perfusions sanguines.

Pertinence des critères sur les spectres de réflectance des joues

La forme des **spectres de réflectance des joues** change avec la température ambiante au niveau de deux zones (cf. Figure 3.25) :

– entre **520 et 590 nm**, au niveau de la **zone du « W »** (cf. partie 3.2.3. page 212)

La saillie du « W » correspondant à la signature de l'hémoglobine (associée au **critère de saturation en oxygène « crit_O2 »** décrit dans la partie 3.2.3. page 212) semble plus prononcée dans l'environnement le plus chaud que dans l'environnement le plus froid. D'ailleurs, le test des rangs signés de Wilcoxon montre bien que, globalement, le critère de saturation en oxygène augmente après les transitions chaudes et diminue après les transitions froides (cf. Tableau 3.7). Dans un environnement chaud, le débit sanguin au niveau des capillaires est beaucoup plus élevé pour permettre une évacuation rapide de la chaleur et le pourcentage d'oxyhémoglobine dans le sang est connu pour être plus élevé au niveau des capillaires et des artères (~95%) qu'au niveau des veines (~45%). Il est donc plutôt logique d'obtenir une saturation en oxygène de l'hémoglobine plus élevée et par là même une saillie plus marquée, lorsque la température ambiante augmente.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

– l'**amplitude entre la zone 520 – 580 nm et la zone après 660 nm**

Cette amplitude c'est-à-dire la variation du facteur de réflectance entre la zone 520 – 580 nm et la zone après 660 nm (associée au **critère de concentration volumique en hémoglobine « crit_conc »** décrit dans la partie 3.2.3. page 212) semble être plus élevée pour l'environnement le plus chaud. D'ailleurs, le test des rangs signés de Wilcoxon montre bien que, globalement, le critère de concentration en hémoglobine augmente après les transitions chaudes et diminue après les transitions froides. Ceci est en accord avec l'augmentation du débit sanguin liée au mécanisme de vasodilatation dans un environnement chaud.

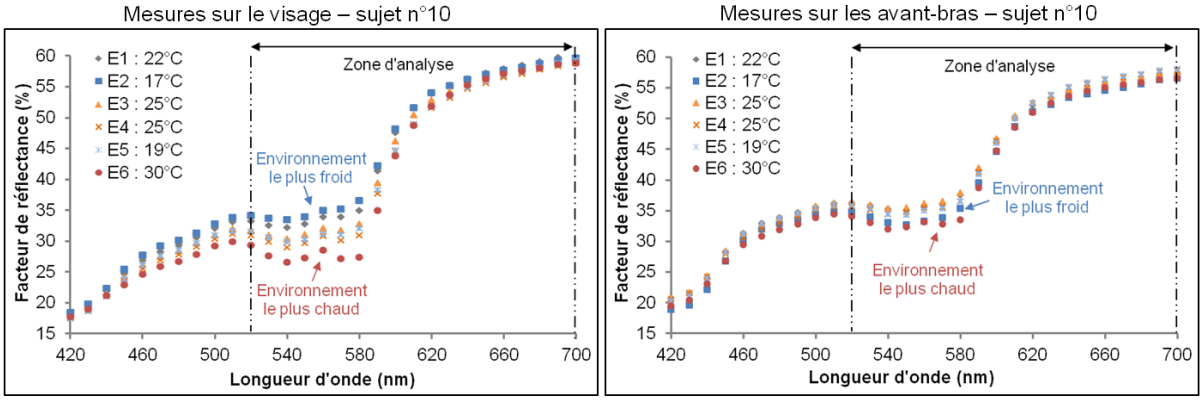


Figure 3.25 : Spectres de réflectance du sujet n°10 obtenues dans les 6 environnements thermiques sur le visage (à gauche) et sur les avant-bras (à droite)

Cependant, la forme des spectres de réflectance sur les avant-bras change beaucoup moins avec les températures ambiantes (cf. Figure 3.25). L'amplitude entre la zone 520 – 580 nm et la zone après 660 nm (le critère de concentration en hémoglobine) est similaire pour l'environnement le plus froid et l'environnement le plus chaud. D'ailleurs, globalement, selon le test des rangs signés de Wilcoxon, le critère de concentration en hémoglobine ne change pas significativement après les transitions thermiques. Cette observation semble plutôt en désaccord avec les activités vasomotrices. Tout comme les coordonnées L*a*b* sur les avant-bras, le critère de concentration en hémoglobine est probablement biaisé par la faible évolution du débit sanguin sur les avant-bras, par le positionnement aléatoire des avant-bras, ou par l'évolution d'un autre paramètre que l'hémoglobine lors des transitions thermiques. Par exemple, une augmentation de la concentration en mélanine est susceptible de faire diminuer le spectre de réflectance et la variation du facteur de réflectance entre la zone du W et la région après 660 nm [Jolivot 2011]. Le critère de concentration en hémoglobine semble donc difficile à interpréter sur les spectres de l'avant-bras. Pour le critère de saturation en oxygène, il semble que son évolution soit un peu plus logique puisque le « W » semble un peu plus marqué pour l'environnement le plus chaud que pour l'environnement le plus froid sur la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure 3.25. D'ailleurs, les tests des rangs signés de Wilcoxon montrent que le critère de saturation en oxygène diminue bien significativement après les transitions froides et augmente significativement après les transitions chaudes.

Tableau 3.7 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des critères des spectres de réflectance entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Tests des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
ΔCrit_conc_J	↓0,499	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↑0,028**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,043**	↑0,075
ΔCrit_02_J	**↓0,028**	↓0,075	**↓0,018**	**↓0,028**	**↑0,018**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,046**	↑0,150	↑0,116
ΔCrit_conc_AB	↑0,310	↑0,116	↓0,398	**↑0,028**	↓0,176	↓0,116	↓0,735	↓0,753	**↑0,028**	↑0,075
ΔCrit_02_AB	**↓0,028**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↑0,043**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	↑0,310	↑0,116

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

Les deux critères (crit_O2 et crit_conc) des spectres de réflectance des joues ainsi que le critère de saturation en oxygène « crit_O2 » des avant-bras semblent fiables. Cependant, le critère de concentration en hémoglobine « crit_conc » sur les spectres de réflectance des avant-bras ne semble pas fiable et ne sera donc pas analysé dans la suite.

Comparaisons des critères des spectres des deux groupes

Analyse des données brutes dans les environnements « neutres »

Les tests de Mann-Whitney appliqués aux données brutes dans les 2 environnements « neutres » (non précédés par des transitions thermiques fortes : E1 et E4) montrent que les critères de saturation en oxygène de l'hémoglobine obtenus sur les joues et sur les avant-bras sont significativement plus élevés pour le groupe G1 que pour le groupe G2 ($p = 0,03$ et $p = 0,0004$ respectivement). Ceci signifie que le groupe G1 « non frileux » a tendance à avoir une saillie au niveau du « W » sur le spectre de réflectance qui est plus prononcée. Est-ce lié à une différence entre les deux groupes de la saturation en oxygène du sang ou de la quantité de mélanine (susceptible de modifier les saillies des spectres à cause de l'absorption de la lumière par la mélanine) ? Difficile de répondre à cette question avec les données de cette expérimentation. Si on suppose que la mélanine n'a pas d'impact sur la saillie « W » des spectres, le groupe G1 a probablement une saturation en oxygène plus élevée que celle du groupe G2 dans les environnements neutres. Or, comme la proportion d'oxyhémoglobine est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

plus forte dans les capillaires ou les artères que dans les veines, il est possible que la proportion du sang dans les capillaires ou les artères soit plus importante pour le groupe G1 que pour groupe G2. Dans une situation « neutre » (22°C), le groupe G2 a probablement un débit sanguin plus faible que celui du groupe G1 dans les capillaires. Ceci est en accord avec la conclusion issues des données de perfusions sanguines qui consiste à supposer que le groupe G2 a un seuil de déclenchement de la vasoconstriction plus faible que celui du groupe G1.

Analyses des variations des critères des spectres avec les transitions thermiques

Aucune différence de « rang » des variations individuelles des deux critères n'a été repérée entre les deux groupes avec le test de Mann-Whitney (cf. Figure 3.26).

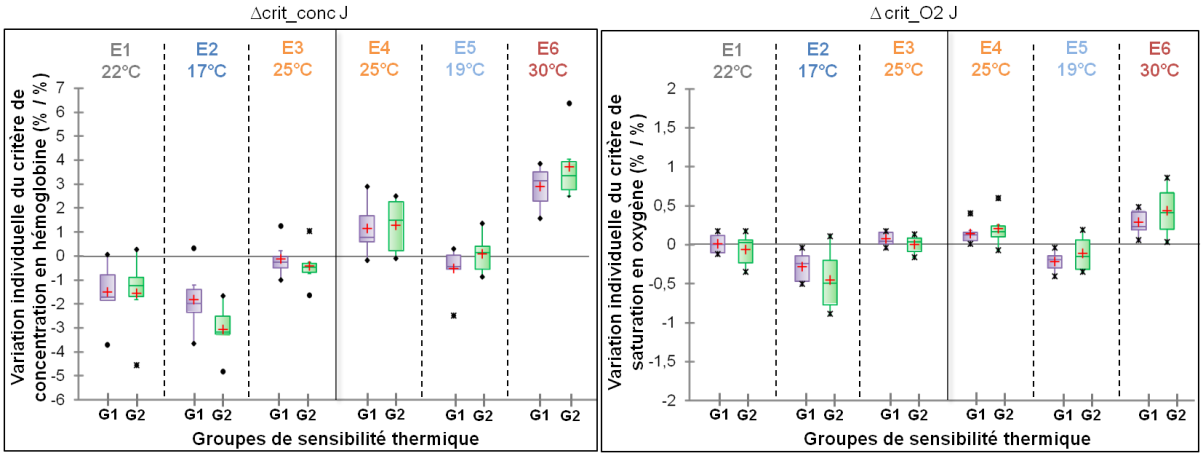


Figure 3.26 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles des critères de concentration en hémoglobine (à gauche) et de la saturation en oxygène de l'hémoglobine (à droite) issus des spectres de réflectance des joues du groupe G1 et du groupe G2 obtenus dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées.

Cependant, des différences entre les deux groupes ont pu être mises en évidence avec le test des rangs signés de Wilcoxon (cf. Tableau 3.7). La différence la plus flagrante se trouve au niveau de la variation individuelle du critère de concentration en hémoglobine des joues. Celle-ci diminue significativement pour le groupe G2 après la transition froide 22°C→ 17°C mais pas pour le groupe G1. Il est possible que la variation de la concentration en hémoglobine soit très faible (et non visible sur les spectres de réflectance) pour certains sujets du groupe G1 entre l'avant et l'après transition froide (22°C → 17°C) puisque le débit sanguin du groupe G1 varie moins (vasoconstriction moins forte) que celui du groupe G2 entre E1 et E2. Deux autres différences sont présentes, dans le Tableau 3.7, sur les critères des joues : Δcrit_conc_J entre E3 et E4 et crit_O2_J entre E1 et E2. Les sens de variation de ces deux critères sont similaires pour les deux groupes mais pas toujours significatifs. En effet, le

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

niveau de significativité du groupe G2 est de l'ordre de 0,075 alors que celui du groupe G1 est inférieur à 0,05 pour les deux critères. Cependant, comme les significativités associées au groupe G2 sont proches de 0,075, il n'est pas possible d'identifier de réelles différences entre les deux groupes sur ces deux critères. Aucune différence n'a été repérée sur le critère de saturation en oxygène des avant-bras.

Les différences entre les groupes au niveau des variations individuelles de débit sanguin des joues mis en évidence dans E1, E2 et E3 n'ont pas été visibles sur les variations individuelles des 2 critères des spectres de réflectance des joues. L'information fournie par le critère de concentration en hémoglobine est probablement moins précise que celle fournie par le débit sanguin car la forme des spectres peut être influencée par d'autres facteurs biologiques que l'hémoglobine. Le critère de saturation en oxygène a l'avantage de cibler le type d'hémoglobine (contrairement à la mesure réalisée avec l'imageur laser doppler) mais cette caractéristique est tout de même une information très indirecte qui manque donc de précision. Il pourrait être intéressant d'ajouter, dans une future expérimentation, des mesures de capillaroscopie qui ciblent uniquement les capillaires.

3.6.1.3. Etude des propriétés thermiques

Les propriétés thermiques dépendent à la fois de l'activité de la microcirculation, du métabolisme et de la température moyenne rayonnante. Il est donc légitime de se poser les questions suivantes : les différences de débit sanguin sur les joues entre les deux groupes sont-elles visibles sur les températures de peau ? Les deux groupes présentent-ils des propriétés thermiques spécifiques ? Cette partie tente de répondre à ces questions en analysant les températures locales mesurées sur les joues et sur les avant-bras ainsi que les gradients de température entre deux zones du corps.

3.6.1.3.1. Les températures cutanées locales

Fiabilité des données

Les valeurs des températures cutanées locales du front et des joues ne sont pas exactement les mêmes que celles obtenues dans le protocole A et B des expérimentations préliminaires puisque les environnements thermiques et les transitions thermiques n'ont pas été identiques dans cette expérimentation et dans les expérimentations préliminaires. Mais, les valeurs sont cohérentes. Toutes les températures cutanées locales (front, joue, avant-bras, doigts, nez) ainsi que les variations individuelles de ces températures suivent l'évolution de la température ambiante (cf. Figure 3.27 et Tableau 3.8).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

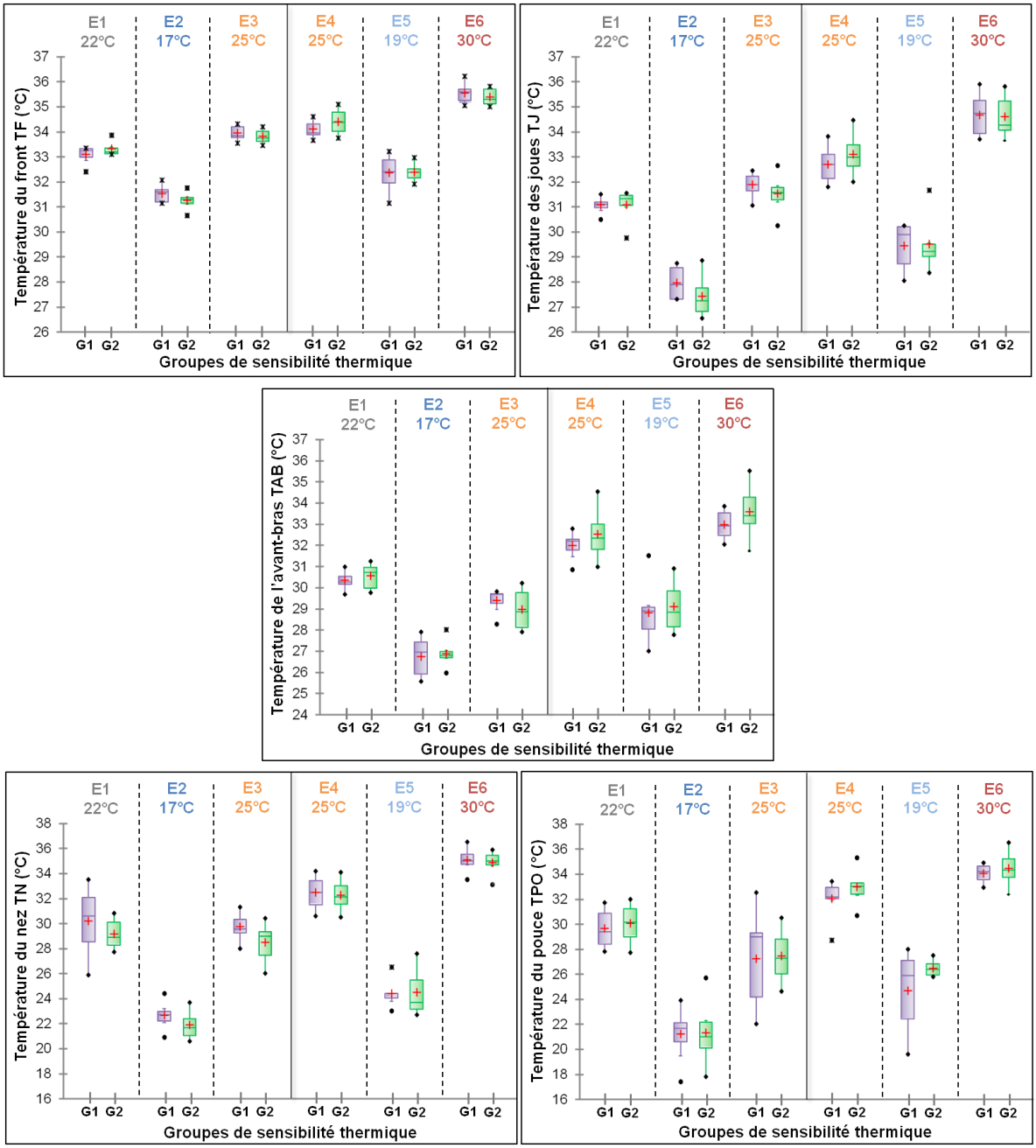


Figure 3.27 : Boîtes de Tukey représentant les températures du front, des joues, de l'avant-bras, du nez et du pouce des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

Les températures cutanées ne sont pas identiques dans les deux environnements E3 et E4 pour lesquels la température de consigne est identique mais qui ne sont pas précédés par le même environnement thermique. En effet, les températures sont significativement plus élevées dans E4 à cause du « passé thermique » des individus dans E3. Ce résultat est en accord avec les résultats de perfusion sanguine. Même après 30 minutes d'acclimatation dans E3 (25°C), l'état thermique des individus est encore influencé par l'environnement précédent à 17°C. En accord avec les mécanismes de thermorégulation (dans un environnement froid :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

vasoconstriction plus forte pour les zones éloignées du noyau), la variation des températures locales entre E3 et E4 est plus forte sur les zones éloignées du « noyau » c'est-à-dire au niveau des avant-bras, du nez et des doigts (cf. Figure 3.27).

Comparaisons des groupes

Tout comme le test des rangs signés de Wilcoxon (cf. Tableau 3.8), le test de Mann-Whitney n'a montré aucune différence significative entre les températures cutanées locales du groupe G1 et du groupe G2.

Tableau 3.8 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des températures cutanées entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
TF, TJ, TAB, TN, TPO	**↓ 0,018**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

Cependant, d'après la Figure 3.27, les tendances suivantes ont pu être relevées :

- dans l'environnement le plus froid E2 à 17°C, les températures des joues et du nez du groupe G2 (frileux) ont tendance à être plus faibles que celles du groupe G1.
- dans l'environnement E3 à 25°C qui succède l'environnement froid, les températures des joues et du nez ainsi que celles des avant-bras et des pouces du groupe G2 ont également tendance à être plus faibles que celles du groupe G1. Les extrémités du groupe G2 se réchauffent probablement moins rapidement que celles du groupe G1. D'ailleurs les différences de températures entre E3 et E4 (25°C) ont tendance à être plus élevées pour le groupe G2 que pour le groupe G1 sur les joues, les avant-bras et le nez.
- dans l'environnement E4 à 25°C, les températures de joues du groupe G1 ont tendance à être plus faibles que celles du groupe G2.
- dans l'environnement le plus chaud E6 à 30°C, les températures des avant-bras du groupe G1 ont tendance à être plus faibles que celles du groupe G2.

Globalement, le groupe frileux G2 a une légère tendance à avoir certaines températures locales plus faibles dans les environnements froids et plus élevées dans les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

environnements chauds que celles du groupe G1. Ces tendances semblent directement en accord avec les conclusions issues de l'analyse des propriétés vasculaires.

Cependant, contrairement aux données de débits sanguins sur les joues, les températures locales très superficielles reflètent de façon très indirecte l'activité microcirculatoire et ne permettent pas de distinguer significativement les deux groupes. Toutefois, des différences de propriétés thermiques seront peut-être perceptibles à travers l'étude des gradients de température entre différentes parties du corps.

3.6.1.3.2. Les gradients de température entre différentes zones du corps

Fiabilité des données

Les écarts de températures cutanées locales entre deux zones du corps permettent de se rendre compte de l'évolution de l'uniformité thermique du corps. Globalement, la majorité des gradients tels que front-joue (TFJ), front-nez (TFN), front-pouce (TFPO), joue-nez (TJN), av.bras-nez (TABN) augmentent significativement après des transitions froides et diminuent significativement après les transitions chaudes et entre E3 et E4 et inversement pour le gradient pouce-av. bras (TPOAB) (cf. Tableau 3.9). Ces évolutions sont en accord avec la littérature [Arens et Zhang 2006] puisque les températures cutanées varient beaucoup plus d'une zone à une autre (surtout entre une zone proche du noyau thermique et une zone éloignée)dans un environnement froid que dans un environnement chaud, à cause de l'activité vasomotrice.

Tableau 3.9 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des écarts de températures entre différentes zones du corps entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
TFJ, TFPO, TFN, TJN, TABN	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**
TJAB	↑0,176	↓0,753	↓0,866	↓0,600	**↑0,028**	**↑0,028**	**↑0,043**	↑0,173	**↓0,018**	**↓0,028**
TPOAB	**↓0,018**	**↓0,046**	**↓0,018**	**↓0,046**	**↑0,028**	**↑0,028**	**↑0,028**	**↑0,028**	↑0,123	**↑0,028**

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

Les écarts de température entre le front et les joues **TFJ** sont toujours positifs (cf. Figure 3.28) contrairement à certains écarts obtenus dans les expérimentations préliminaires

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

qui étaient négatifs et en désaccord avec la littérature. L'hypothèse selon laquelle les gradients TFJ négatifs des expérimentations préliminaires sont associés au tabagisme ou à une réactivité émotionnelle est donc confortée. Toujours en accord avec la littérature, certains sujets ont des écarts de température entre le front et le pouce ou entre le front et le nez, entre les joues et le nez ou encore entre les avant-bras et le nez qui sont négatifs dans E6 (et parfois E4) car la température des extrémités peut dépasser la température du front et des joues lorsque les environnements sont chauds.

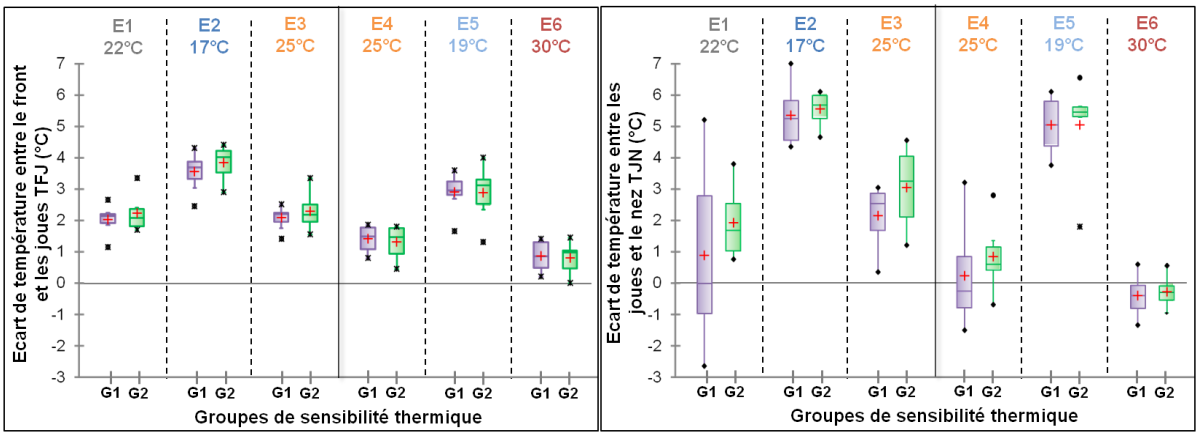


Figure 3.28 : Boîtes de Tukey représentant les écarts de températures entre le front et les joues (à gauche) et les écarts de températures entre les joues et le nez (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

Cependant, le gradient joue-avant-bras **TJAB** n'évolue pas significativement après les transitions froides alors qu'il augmente significativement après les transitions chaudes (cf. Tableau 3.9). L'augmentation du gradient après les transitions chaudes est liée au fait que, dans un environnement chaud qui succède à un environnement froid, les températures des joues (zones proches du noyau corporel) augmentent relativement rapidement par rapport aux températures des avant-bras qui sont des zones plus éloignées du noyau thermique .

Pour les gradients pouce-avant-bras **TPOAB** (cf. Figure 3.29), les gammes de valeurs obtenues dans notre étude sont équivalentes à celles mentionnées dans l'article de Wang et al. (de -8,6°C dans l'environnement froid à ~17°C à 2,2°C dans l'environnement chaud à ~30°C) [Wang, Zhang *et al.* 2007].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

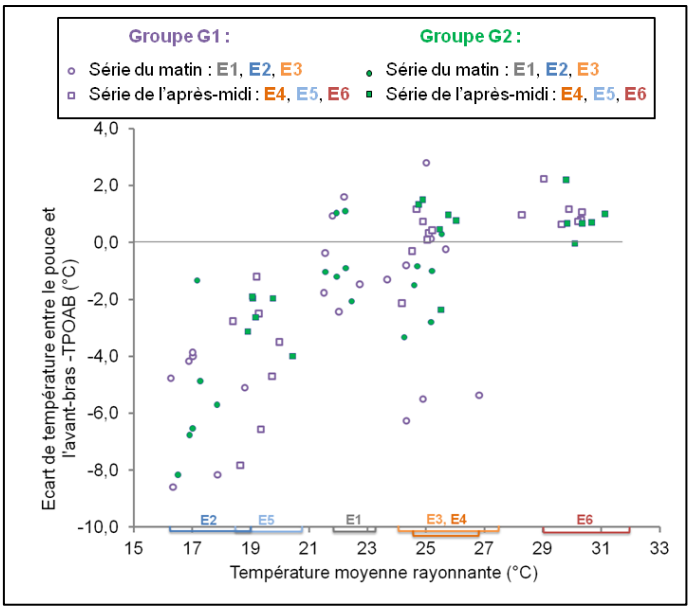


Figure 3.29 : Evolution des gradients de température entre le pouce et l'avant-bras en fonction de la température moyenne rayonnante pour le groupe G1 et G2.

Tous les gradients de températures semblent fiables.

Comparaisons des groupes

Peu de différences sont visibles entre les deux groupes. Les faibles différences observées sont les suivantes :

- Les écarts négatifs de **TJN** (TN>TJ) sont davantage associés au groupe G1 : 8 du groupe G1 et 1 du groupe G2 (cf. Figure 3.28).
- **TJAB** augmente significativement après la forte transition chaude 19°C→30°C pour le groupe G1 mais pas pour le groupe G2 (cf. Tableau 3.8). Est-ce lié à une augmentation plus rapide de la température des avant-bras et/ou à une augmentation moins rapide de la température des joues pour l'un des deux groupes ?
- **TPOAB** est significativement plus élevé dans E4 que dans E3 pour le groupe G2 mais pas pour le groupe G1. Les températures des extrémités du groupe G2 semblent davantage influencées par le « passé thermique » (E2 à 17°C).
- **TPOAB** : la conclusion de l'article de Wang [Wang, Zhang *et al.* 2007] selon laquelle « lorsque le gradient de température entre les doigts et l'avant-bras est positif, les individus ne déclarent pas d'inconfort froid » se vérifie pour le groupe G1 mais pas pour le groupe G2 dans lequel deux individus ont déclaré être dans un état thermique légèrement inconfortable dans E1-22°C (et une sensation thermique < 0) alors qu'ils avaient un TPOAB > 0. Il est probablement important de réaliser des études sur le confort thermique en établissant des classes d'individus pour être plus rigoureux.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les différences qui peuvent être interprétées sont en accord avec les conclusions précédentes qui mentionnent que l'état vasculaire du groupe frileux G2 est influencé plus longtemps par un environnement froid même après avoir été acclimaté dans un environnement plus chaud pendant 30 minutes. Cependant, on constate que les températures de peau ne permettent pas réellement de différencier les deux groupes de sensibilité au froid. Les informations fournies par le débit sanguin sont plus riches. La mesure de température est probablement trop superficielle et trop influencée par la température extérieure pour refléter précisément l'état intérieur des individus.

3.6.1.4. Etude des propriétés hydriques cutanées : perte en eau et contenu en eau

Les propriétés non thermo-vasculaires telles que les propriétés hydriques comprenant la perte en eau et le contenu en eau permettent-elles d'expliquer, en partie, les différences de sensibilité au froid des groupes G1 et G2 ?

3.6.1.4.1. Les mesures de perte en eau

Fiabilité des données

Tout d'abord, les valeurs moyennes de perte insensible en eau obtenues sur les joues dans un environnement neutre (E1 à 22°C) sont en accord avec celles obtenues dans les expérimentations préliminaires du chapitre précédent (aux alentours de 16-17 g m^{-2} h^{-1}). Les dispersions sont également similaires. De plus, les valeurs obtenues sur les avant-bras sont bien plus faibles que celles obtenues sur les joues (cf. Figure 3.30 et Figure 3.31).

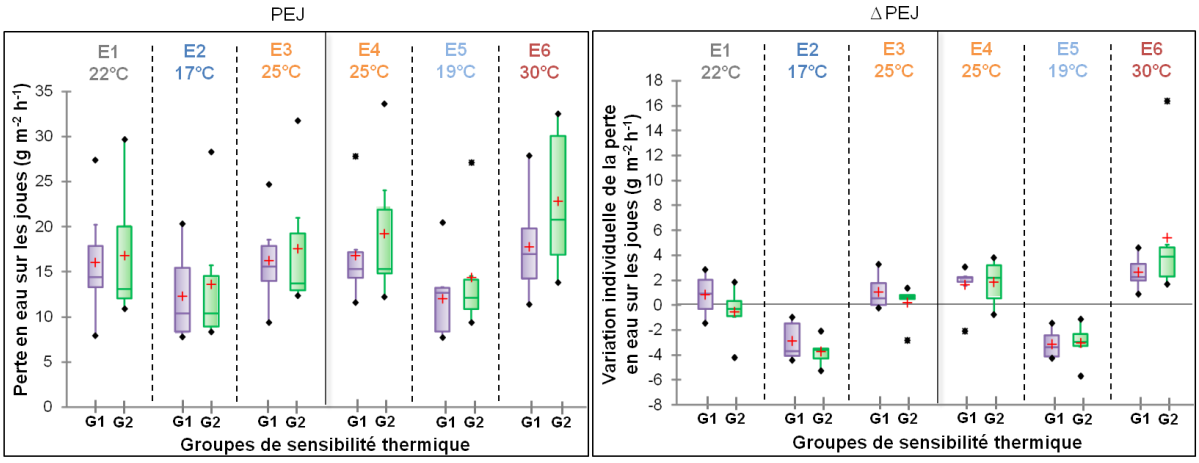


Figure 3.30 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau sur les joues (à gauche) et les variations individuelles des pertes en eau sur les joues (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cependant, des valeurs particulièrement élevées (> 25 g m^{-2} h^{-1}) ont été mesurées sur les joues d'un sujet dans chacun des deux groupes (cf. Figure 3.30). Ces deux sujets (n°5 et 10) ont des valeurs élevées dans tous les environnements thermiques. Il est donc fort probable que ces valeurs reflètent plutôt un comportement physiologique spécifique, qu'une réactivité émotionnelle ponctuelle comme cela a pu être le cas dans les expérimentations préliminaires. Toutes les valeurs seront donc analysées. Le contrôle de la réactivité émotionnelle semble avoir été efficace. Les valeurs élevées sont peut-être liées au cycle menstruel : la perte insensible en eau a tendance à être plus élevée au début des règles (cf. partie 1.3.6.5. page 101). A l'avenir, il sera nécessaire de sélectionner les individus du panel par rapport au cycle menstruel ou au moins de connaître la période du cycle associé au jour des mesures.

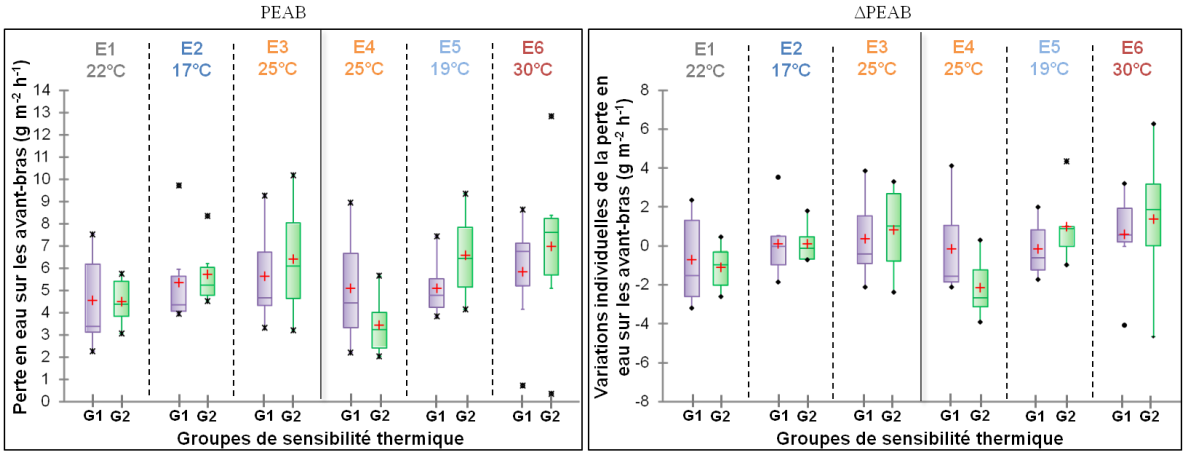


Figure 3.31 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau sur les avant-bras (à gauche) et les variations individuelles des pertes en eau sur les avant-bras (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

Contrairement aux pertes en eau sur les avant-bras, les valeurs de perte en eau sur les joues diminuent significativement après les deux transitions froides et augmentent significativement après les deux transitions chaudes pour les deux groupes G1 et G2 (cf. Tableau 3.10). La relation entre les pertes en eau et les températures ambiantes ou les températures de peau a déjà été observée et commentée dans le chapitre 2 (au niveau de la transition 20°C→30°C). En effet, la perte en eau varie avec la température ambiante probablement parce que la diffusion de l'eau dans la peau augmente avec la température des tissus ainsi que l'évaporation à la surface. De plus, l'activité vasomotrice semble liée à la perte en eau selon des études telles que celles de Thiele *et al.* [Thiele et van Senden 1966]. Il est également probable que la structure de la peau (lipides ou autres) change avec les températures ambiantes et permettent à l'eau de s'échapper plus ou moins facilement. L'augmentation de la perte en eau sur les joues après la plus forte transition chaude

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

(19°C→30C) peut également être liée au mécanisme de sudation pour certains sujets. L'évolution des pertes en eau sur les joues semblent donc cohérente contrairement à celle des avant-bras. Seule la perte en eau de l'un des deux groupes change significativement après la transition froide 25°C → 19°C et elle augmente alors que le débit sanguin et la température de peau diminuent significativement. Ces observations sont en désaccord avec la littérature. Ne pourraient-elles pas être associées au positionnement de la face interne de l'avant-bras au cours des expérimentations ? En effet, certains sujets ont eu tendance, malgré nos recommandations, à coller leurs avant-bras le long de leur corps pour perdre moins de chaleur. Ce réflexe a pu engendrer un phénomène de faible occlusion qui s'est répercuté sur la mesure de certaines pertes en eau. Ceci pourrait expliquer le manque d'évolution de la perte en eau des avant-bras avec les mécanismes de thermorégulation. D'autre part, l'étude de Chen *et al.* montre que la perte en eau de la face externe des avant-bras n'est pas différente entre avant les transitions et 20 minutes après les transitions (28°C→24°C et 20°C→24°C) pour les femmes [Chen, Hwang *et al.* 2011]. Même après la plus forte transition (32°C→24°C), la différence est très faible. Il ne serait donc pas si étonnant que les variations de la perte en eau sur les avant-bras ne soient pas significatives dans la majorité des transitions thermiques.

Comparaisons des groupes

Aucune différence de « rangs » entre les deux groupes n'a été repérée avec le test de Mann-Whitney. Mais, les tests des rangs signés de Wilcoxon (cf. Tableau 3.10) ont permis de mettre en évidence les différences suivantes :

- Contrairement au groupe G1, **la perte en eau des avant-bras** du groupe G2 augmente significativement après la deuxième transition froide **25°C→19°C** et diminue significativement **entre E3 et E4 (tous les deux à 25°C)**.

Ces évolutions significatives sont inverses à ce qui est mentionné habituellement dans la littérature. Il est fort probable que les différences entre les deux groupes soient davantage liées à des différences de posture ou de positionnement de l'avant-bras le long du corps qu'à une véritable différence physiologique. Les individus frileux (groupe G2) ont probablement eu plus tendance à coller leurs avant-bras le long du corps que les autres individus du groupe G1.

- Contrairement au groupe G1, **la perte en eau des joues** du groupe G2 augmente significativement entre **E3 et E4 (tous les deux à 25°C)**.

Il semblerait que l'impact de l'environnement froid (dans E3) soit plus long pour le groupe G2 frileux que pour le groupe G1 non frileux. Ceci est probablement directement associé aux

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

différences repérées précédemment (sur le débit sanguin par exemple), entre les deux groupes, au niveau des mécanismes de thermorégulation.

Tableau 3.10 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des pertes en eau entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
PEJ	**↓0,028**	**↓0,028**	**↓0,018**	**↓0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	**↑0,018**	**↑0,028**	↑0,310	**↑0,046**
PEAB	↑0,735	↑0,116	↑0,866	**↑0,046**	↑0,866	↑0,753	↓0,310	↑0,600	↓0,735	**↓0,028**

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

D'autres différences peuvent également être relevées sur les pertes en eau des joues mais elles ne sont pas significatives (cf. Figure 3.30) :

- Dans E6 (30°C), les variations individuelles de perte en eau sur les joues et les avant-bras du groupe G2 ont tendance à être plus élevées que celles du groupe G1.
- Dans E2 (17°C) et E1 (22°C), les variations individuelles de perte en eau sur les joues du groupe G2 ont tendance à être plus faibles (négatives) que celles du groupe G1.

Ces deux tendances semblent être reliées aux différences de perfusions sanguines entre les deux groupes et/ou à des différences du taux de sudation (surtout pour E6).

Le test de l'ANCOVA n'a pas permis de démontrer l'effet des groupes sur les valeurs de perte en eau.

3.6.1.4.2. Les mesures de contenu en eau

Fiabilité des données

Les gammes de valeurs des contenus en eau sur les joues sont en accord avec le chapitre précédent (cf. partie 2.8.2.1.2. page 176). D'après les valeurs de contenu en eau et les valeurs de référence mentionnées dans l'article de Khazaka [Khazaka 2004], le groupe G1 est composé de quatre individus avec une peau normale, de deux sujets avec une peau sèche et d'un seul sujet avec une peau très sèche alors que le groupe G2 est composé de trois individus avec une peau normale et de trois individus avec une peau sèche. Cette constatation est proche de ce qui a été déclaré par les volontaires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

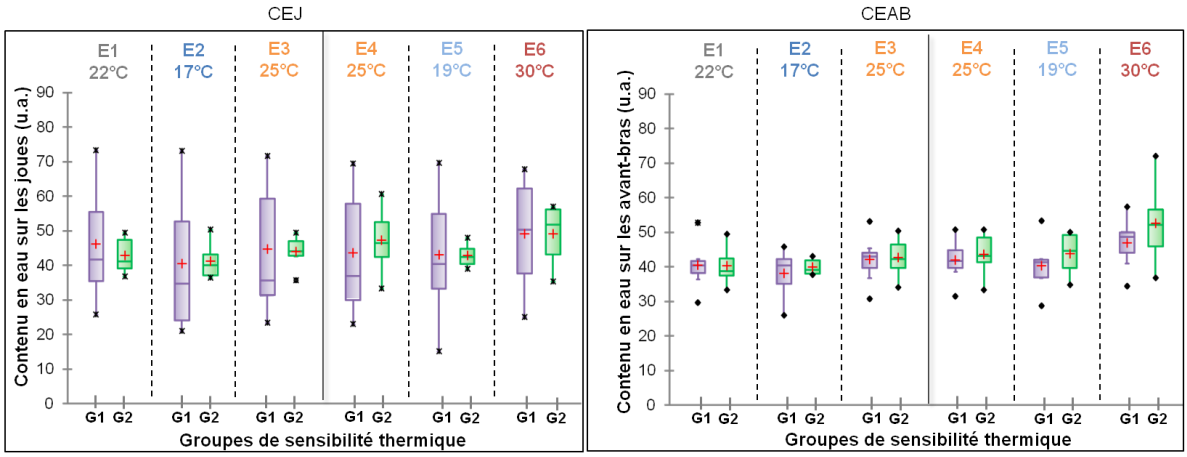


Figure 3.32 : Boîtes de Tukey représentant le contenu en eau sur les joues (à gauche) et sur les avant-bras (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

Les contenus en eau sur les joues et les avant-bras ont plutôt tendance à augmenter après les transitions chaudes et à ne pas être modifiés après les transitions froides (cf. Tableau 3.11). Il est difficile de comparer directement ces tendances avec la littérature car il n'existe que peu d'études sur l'évolution du contenu en eau avec la température ambiante et les transitions thermiques ou les gammes de températures ambiantes étudiées dans certains articles ne sont pas les mêmes que celles étudiées dans cette expérimentation. De plus, les tendances observées ne sont pas significatives pour les deux groupes. Toutefois, globalement, l'augmentation des contenus en eau avec la température ambiante est plutôt en accord avec l'étude de Cravello et Ferri qui montre que le contenu en eau de la face interne des avant-bras augmente avec la température ambiante (20°C, 25°C, 30°C) [Cravello et Ferri 2008].

Tableau 3.11 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des contenus en eau entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
CEJ	↓**0,018**	↓0,500	↓0,499	↓0,345	↑**0,043**	↑0,249	↑**0,042**	↑0,116	↓0,091	↓0,463
CEAB	↓0,128	↑0,891	↓0,249	↓0,752	↑**0,018**	↑0,173	↑**0,018**	↑**0,046**	↑0,670	↑0,093

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

L'absence de diminution du contenu en eau après la transition 25°C → 19°C semble également concorder avec les conclusions de l'article de Chen *et al.* qui montre que le contenu en eau ne diminue pas significativement, sur la face externe de l'avant-bras, après la transition 28°C→24°C mais après 32°C→24°C (entre avant la transition et 20 min après)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Chen, Hwang *et al.* 2011]. Il semblerait, selon cet article, que la variation du contenu en eau est apparente et significative lorsque l'activité vasomotrice ne suffit pas à elle seule à assurer les transferts de chaleur nécessaires. Il est donc cohérent que le contenu en eau varie moins que la perfusion sanguine avec la température ambiante.

Comparaisons des groupes

Selon le test de Mann-Whitney, les variations individuelles de contenu en eau sur les joues et les avant-bras du groupe G2 sont significativement plus faibles pour le groupe G1 dans E1 (22°C) et il en est de même pour les variations individuelles du contenu en eau des avant-bras du groupe G2 dans l'environnement E3 (25°) (cf. Figure 3.33). Le groupe G2 semble avoir un contenu en eau déjà bien faible dans E1 à 22°C.

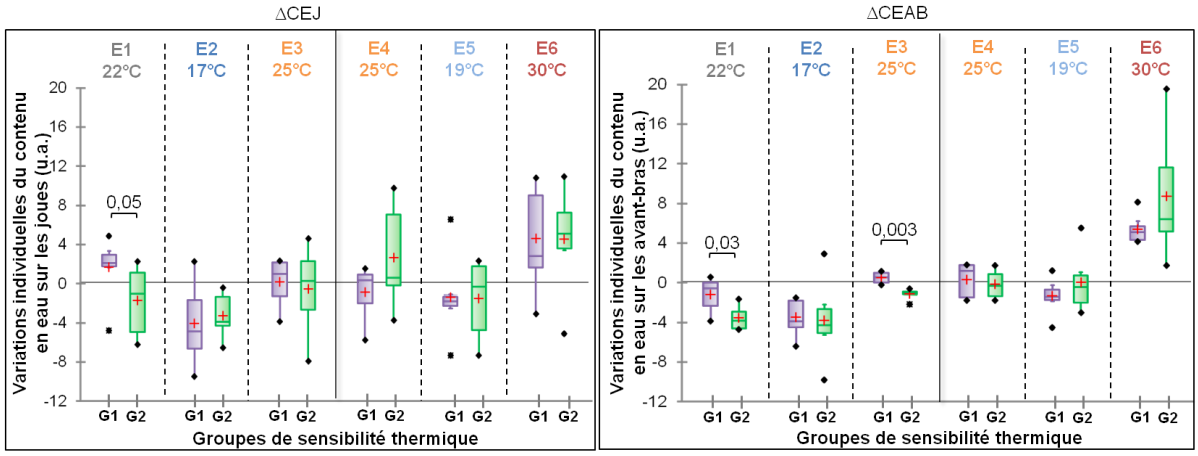


Figure 3.33 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles du contenu en eau sur les joues (à gauche) et sur les avant-bras (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

D'autre part, les tests des rangs signés de Wilcoxon (cf. Tableau 3.11) montrent les différences suivantes entre les deux groupes :

– Contrairement au groupe G2, le contenu en eau des joues et des avant-bras du groupe G1 augmente significativement après la transition chaude : 17°C→25°C.

L'absence de significativité de l'augmentation du contenu en eau du groupe G2 est peut-être associée à l'impact du « passé thermique » (E2 à 17°C) des individus de ce groupe.

– Contrairement au groupe G2, le contenu en eau des joues du groupe G1 augmente significativement après la transition chaude : 19°C→30°C.

L'absence de significativité de l'augmentation du contenu en eau du groupe G2 est peut-être associée à un taux de sudation plus faible pour le groupe G2 dans E6 à 30°C.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Contrairement au groupe G2, le contenu en eau des joues du groupe G1 diminue significativement après la transition froide la plus forte : 22°C → 17°C.

Le niveau du contenu en eau des joues du groupe G1 étant déjà faible (par rapport à son niveau moyen) dans E1, il ne diminue pas (ou peu) dans E2. Le seuil de déclenchement de la diminution du contenu eau est peut-être plus précoce pour le groupe G2.

Les contenus en eau du groupe G1 semblent dépendre davantage des variations des températures ambiantes que ceux du groupe G2. D'après l'article de Chen et al. [Chen, Hwang *et al.* 2011], l'activité de la microcirculation cutanée du groupe G2 (qui est apparue plus active que celle du groupe G1) est probablement suffisante pour assurer les transferts de chaleur après les transitions thermiques exceptées pour la transition la plus forte sur les avant-bras. En effet, après la transition chaude la plus forte 19→30°C, la quantité de sueur à la surface des avant-bras a peut-être engendrée une augmentation significative du contenu en eau. Dans le cas du groupe G1, le contenu en eau a varié significativement probablement parce que l'activité vasomotrice n'a pas été suffisante pour assurer les transferts de chaleur nécessaires lors de la première transition froide sur les joues et des transitions chaudes sur les joues et les avant-bras.

Les évolutions de la teneur en eau du stratum corneum sont-elles liées à des différences de structures, de la quantité des FNH ou de la quantité des lipides surfaciques ?

3.6.1.5. Etude de la quantité de lipides surfaciques sur les joues

Fiabilité des données

La quantité de lipides prélevée à la surface du stratum corneum est légèrement plus faible que celle prélevée dans l'expérimentation du chapitre 2 car la mesure n'est pas réalisée au centre du front mais davantage sur les côtés. Or, d'après l'étude de Lopez et al., la quantité de lipides surfaciques est plus faible aux extrémités qu'au centre du front [Lopez, Le Fur *et al.* 2000]. Les valeurs semblent donc cohérentes.

De plus, les quantités de lipides surfaciques n'évoluent pas (ou peu) en fonction des transitions thermiques sauf après la transition 17°C→25°C où la quantité de lipides surfaciques a tendance à augmenter (cf. Tableau 3.12). Cette observation est en accord avec le chapitre 2 où la quantité de lipides surfaciques a eu tendance à augmenter entre 20°C et 25°C mais pas entre 20°C et 30°C.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 3.12 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences de la cohésion (ou de la quantité de protéines prélevées), de la quantité de lipides surfaciques (QLS).entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
QLS	↓ 0,892	↓0,752	↑0,310	↓0,753	↑0,176	↑**0,046**	↑0,463	↑0,600	↑0,248	↑0,463

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

Comme pour le chapitre 2, avec les éléments des expérimentations, il est difficile de déterminer si l'absence d'augmentation significative de la quantité lipidique surfacique après la deuxième transition chaude est une réelle évolution physiologique ou si elle est liée :

- à l'impact du rythme circadien (qui masque les évolutions en fonction de la température ambiante),
- à une diminution du pouvoir absorbant de la bande du sébumètre quand la température de peau est élevée ou quand la quantité de sueur en surface est non négligeable,
- à un changement de viscosité du sébum avec la température de peau.

Comparaisons des groupes

De façon générale, la quantité de lipides surfaciques est plus élevée pour le groupe G2 (cf. Figure 3.34).

Des différences significatives entre les deux groupes ont pu être mises en évidence grâce au test de Mann-Whitney (cf. Figure 3.34) :

- Dans E5 (19°C), la quantité de lipides surfaciques est significativement plus élevée pour le groupe G2 que pour le groupe G1.
- Dans E6 (30°C), la variation individuelle de la quantité de lipides surfaciques du groupe G2 est significativement plus élevée que celle du groupe G1.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

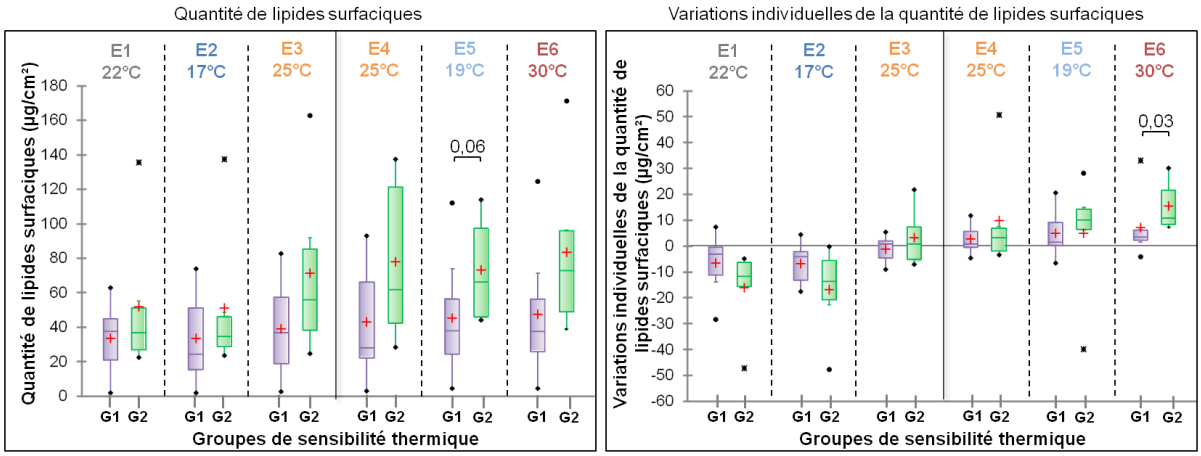


Figure 3.34 : Boîtes de Tukey représentant la quantité de lipides surfaciques (à gauche) et les variations individuelles de la quantité de lipides surfaciques (à droite) sur les avant-bras des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

Une autre différence est visible sur le Tableau 3.12 : la quantité de lipides surfaciques augmente significativement pour le groupe G2 après la première transition chaude 17°C→25°C mais pas pour le groupe G1. Cette différence entre les deux groupes témoigne probablement d'un comportement différent de la barrière lipidique après un stress thermique important. Il est difficile d'établir si les différences observées peuvent être liées à des différences de sensibilité thermique ou juste à des différences de sensibilité cutanée. En effet, les individus du groupe G2 ont majoritairement déclaré avoir des peaux sensibles contrairement au groupe G1. Cependant, les peaux sensibles ont tendance à avoir des quantités de sébum en surface du stratum corneum plus faible selon l'étude de Seidenari et al. [Seidenari, Francomano *et al.* 1998]. Or, dans notre expérimentation, le groupe G2, qui est composé de sujets avec des peaux majoritairement plus sensibles, a une quantité de lipides surfaciques qui a tendance à être plus élevée que celle du groupe G1. Les différences observées au niveau de la quantité des lipides surfaciques ne sont probablement pas associées à la sensibilité cutanée.

3.6.1.6. Etude des composants du FNH sur la face interne des avant-bras

Les quantités normalisées (cf. partie 3.2.4. page 214) de lactates, d'acides aminés libres (AAL), d'acides urocaniques (UCA) et d'acides pyroglutamiques (PCA), prélevés sur les avant-bras, sont analysés dans cette partie.

Fiabilité des données

A notre connaissance, aucune étude de la littérature ne permet d'évaluer directement la pertinence des données obtenues. Le lactate est connu pour faire partie des constituants de la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

sueur (cf. partie 1.3.1.5.1. page 78) mais il y est présent en très faible quantité. D'ailleurs, l'étude de Nakagawa *et al.* fait l'hypothèse que le lactate ne proviendrait pas uniquement de la sueur mais aussi et surtout des glandes sébacées et de la différenciation de l'épiderme [Nakagawa, Sakai *et al.* 2004]. De plus, la production de lactate est connue pour augmenter significativement lors d'un exercice physique lorsque les muscles ne reçoivent pas assez d'oxygène [Karagiannis, Reniker *et al.* 2006; Schreurs et Schaafsma 2010]. Le lactate reflète donc souvent l'état d'oxygénation des tissus. Les volontaires étant dans une situation de repos, la quantité de lactate n'a probablement pas ou peu varié après la forte transition chaude (19°C →30°C). C'est pourquoi la variation de la quantité de lactate n'est pas significative entre E5 (19°C) et E6 (30°C) (cf. Tableau 3.13).

Tableau 3.13 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des quantités de lactate, d'acide aminé libre (AAL), d'acide pyroglutamique (PCA) et d'acide urocanique (UCA) entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
Lactate norm.	↓0,237	↓0,345	**↓0,028**	↓0,463	↑0,612	↓0,600	↑0,128	↑0,249	↓0,310	↑0,463
AAL norm.	↑0,237	↓0,917	↓0,612	↓0,753	↓0,499	↑0,249	↓0,612	↓0,173	↑0,237	↓0,249
PCA norm.	↑0,398	↑0,600	↓0,499	↑0,116	↑0,612	↓0,600	↓0,866	↓0,249	↑0,128	↓0,173
UCA norm.	↑0,499	↑0,249	↓0,398	↑0,173	↓0,499	↓0,753	↑0,612	↓0,753	↑0,063	↓0,463

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

D'autre part, les autres constituants du FNH ne varient pas significativement après chacune des transitions thermiques (cf. Tableau 3.13). Cette observation est probablement liée au fait que les processus de différenciation de l'épiderme d'où sont issus ces constituants sont des processus longs qui ne permettent pas d'observer des différences après 30 minutes dans un environnement thermique.

Comparaisons des groupes

Aucune différence entre les deux groupes n'a été mise en évidence avec les tests de Mann-Whitney (cf. Figure 3.35). La seule différence observée entre les groupes a été révélée grâce au test des rangs signés de Wilcoxon (cf. Tableau 3.13).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

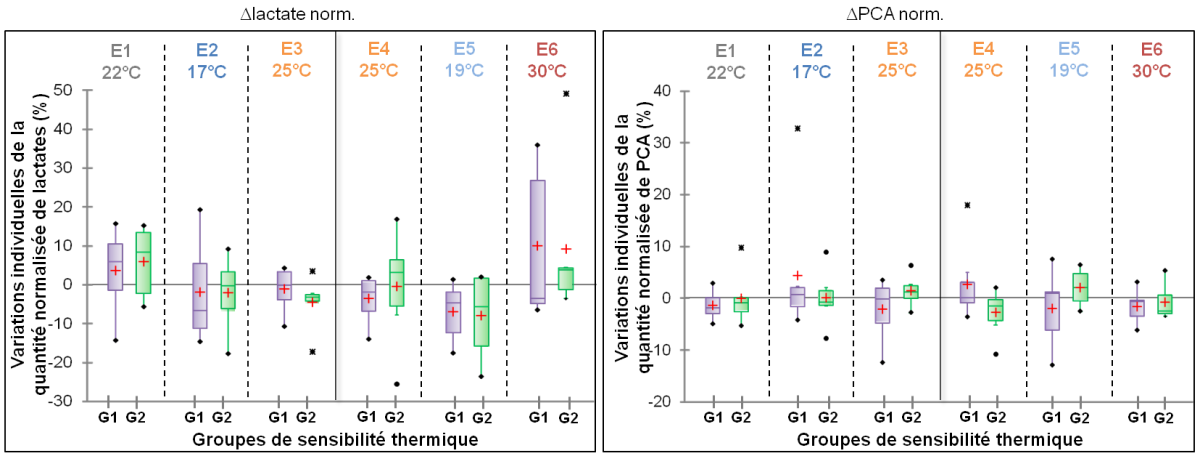


Figure 3.35 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles des quantités de lactate (à gauche) et d'acide pyroglutamique (PCA) (à droite) sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées

En effet, la quantité de lactate du groupe G1 diminue significativement entre E4 (25°C) et E5 (19°C) alors qu'elle ne change pas pour le groupe G2. Cette observation est difficile à expliquer avec les éléments de cette expérimentation. Est-ce lié à une différence du mécanisme de sudation, du mécanisme de la différenciation de l'épiderme ou à un autre mécanisme après cette transition froide pour le groupe G1 ?

3.6.1.7. Etude de la cohésion et de l'intégrité du stratum corneum de l'avant-bras

Même si la quantité de certains constituants du FNH ne semble pas changer en fonction des transitions thermiques, il est tout à fait possible que la « fonction barrière » cutanée soit modifiée par les transitions thermiques et que des différences entre les groupes soient visibles au niveau de cette barrière.

3.6.1.7.1. La cohésion du stratum corneum

Fiabilité des données

La Figure 3.36 montre que la quantité de protéines prélevée sur les avant-bras avec les 6 patchs adhésifs est très variable suivant les individus. Elle s'étend entre 10 mg L^{-1} et 145 mg L^{-1}. Cette dispersion reflète probablement des différences interindividuelles de particularités cutanées (type de peau, sensibilité de peau ou autre). Aucune étude de la littérature ne peut nous permettre de vérifier la pertinence des données obtenues.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

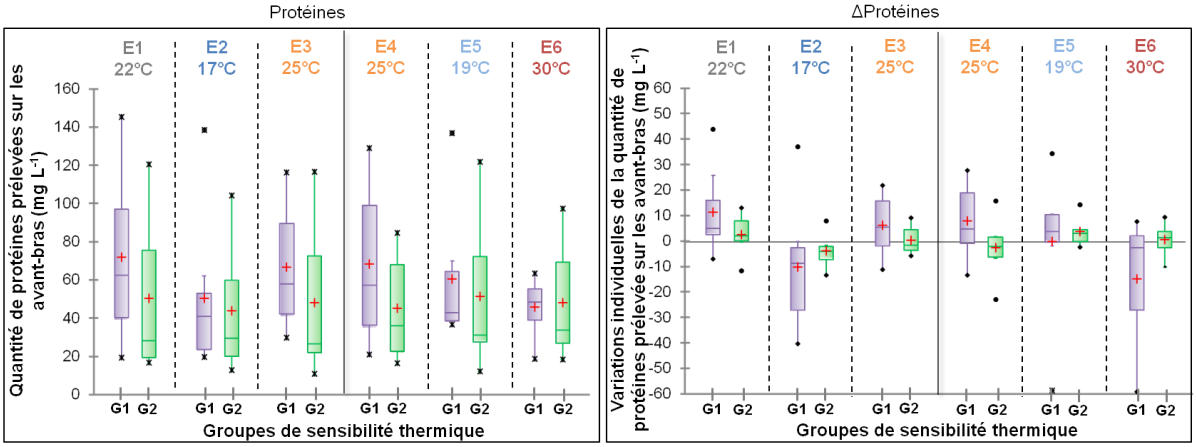


Figure 3.36 : Boîtes de Tukey représentant la quantité de protéines prélevées c'est-à-dire la perte de cohésion du stratum corneum (à gauche) et les variations individuelles de la quantité de protéines prélevées (à droite) sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

Comparaisons des données

Globalement, la quantité de protéines prélevées sur les individus du groupe G1 a tendance à être plus élevée que celle prélevée sur les sujets du groupe G2 et les variations individuelles ont tendance à être plus faibles pour le groupe G2 dans E1 (22°C), E3 (25°C), E4 (25°C) et plus élevées dans E2 (17°C) et E6 (30°C). Mais, ces tendances ne sont pas significatives selon les tests de Mann-Whitney. Les quantités de protéines prélevées sur le groupe G2 semblent varier beaucoup moins avec les températures ambiantes que celles du groupe G1.

Les tests des rangs signés de Wilcoxon ont permis de mettre en évidence une différence entre les deux groupes (cf. Tableau 3.14) : contrairement au groupe G2, la quantité de protéines prélevées sur les avant-bras des individus du groupe G1 (cf. partie 3.2.4. page 214) est significativement plus faible après la transition la plus froide (22°C → 17°C).

Tableau 3.14 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences de la cohésion (ou de la quantité de protéines prélevées), de la perte d'intégrité de la barrière cutanée après une perturbation mécanique, entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
Protéines	↓ **0,028**	↓0,249	↑0,735	↑0,463	↑0,237	↑0,249	↓0,398	↓0,600	↑0,735	↑0,917
Perte d'intégrité	↑0,612	↓**0,046**	↑0,735	↓0,463	↓0,866	↑0,249	↑0,735	↑0,075	↑0,735	↑0,734

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Comme nous avons supposé que le pouvoir d'adhésion des patchs n'a pas été modifié par les températures de peau obtenues dans cette expérimentation, il est fort probable que les liens entre les cornéocytes (les cornéodesmosomes) du stratum corneum du groupe G1 se soient renforcés dans l'environnement froid et que la cohésion ait augmenté puisqu'il est plus difficile d'arracher les cellules superficielles de la peau. Cette augmentation de la cohésion entre les cellules du stratum corneum pourrait être liée à une modification des propriétés mécaniques de la peau puisque la température est susceptible d'affecter les propriétés mécaniques cutanées [Wu, van Osdol *et al.* 2006]. Cette modification est peut-être un mécanisme de défense contre le froid. On pourrait alors déduire que le groupe G2 ne met pas en place ce mécanisme de défense. Cependant, le groupe G2 a tendance à avoir un niveau de protéines prélevées qui est déjà plus faible dans l'environnement E1 (à 22°C) que celui du groupe G1, la diminution dans E2 est donc moins importante voir inexistante. Il est probablement plus judicieux de supposer que dès le premier environnement la cohésion du groupe G2 est élevée et comme la protection est déjà mise en place dans E1, elle ne change pas ou peu entre E1 et E2 pour ce groupe.

L'absence d'augmentation de la cohésion au froid est peut-être reliée à la sensibilité cutanée des deux groupes : les individus du groupe G2 ont majoritairement déclaré avoir des peaux sensibles contrairement au groupe G1.

3.6.1.7.2. L'intégrité du stratum corneum

L'intégrité du stratum corneum ou la perte d'intégrité du stratum corneum correspond, ici, au degré de perturbation ou d'altération de la fonction barrière hydrique du stratum corneum provoquée par les 6 « tape stripping ». Elle est associée à l'écart entre la perte en eau mesurée avant la perturbation mécanique des 6 patchs adhésifs et celle mesurée après la perturbation mécanique.

Les pertes en eau mesurées sur les avant-bras avant les « tape-stripping » sont similaires pour les individus des deux groupes et elles n'évoluent pas significativement en fonction des transitions thermiques. Toutefois, il est tout à fait possible que des différences apparaissent entre les deux groupes et/ou entre les transitions thermiques au niveau de l'impact des « stripping » sur la perméabilité de la peau.

Fiabilité des données

D'après la Figure 3.37, la perte en eau mesurée après l'arrachage des cellules superficielles avec les patchs adhésifs est toujours plus élevée que celle mesurée avant la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

perturbation. Cette observation est en accord avec la littérature qui démontre que le stratum corneum a un rôle majeur de « barrière hydrique» ou de « barrière de perméabilité » (empêchant la perte de l'eau transcutanée) dépendant de sa structure et de toutes les couches qui le composent (cf. partie 1.3.3. page 88). Or, si certaines cellules du stratum corneum sont enlevées, sa fonction de perméabilité est altérée et la quantité d'eau retenue est plus faible. Aucune valeur ne semble aberrante puisqu'elles sont toutes positives.

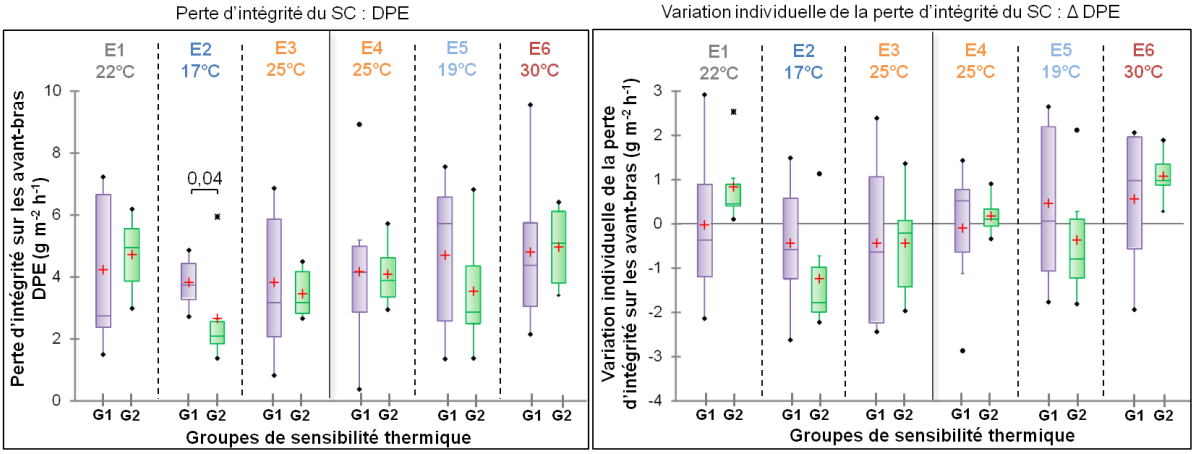


Figure 3.37 : Boîtes de Tukey représentant la perte d'intégrité du stratum corneum (à gauche) et les variations individuelles de la perte d'intégrité du stratum corneum (à droite) sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées

Les valeurs sont relativement dispersées surtout pour le groupe G1 : elles s'étendent entre 0,5 et 9,5 g m^{-2} h^{-1}. Elles témoignent probablement encore une fois des différences interindividuelles des particularités cutanées au sein même des deux groupes. Il est difficile de comparer directement nos résultats avec des valeurs de la littérature car les conditions expérimentales ne sont pas identiques (pression appliquée, type de patchs adhésifs, expérimentateur *etc.*). Cependant, les valeurs obtenues dans l'environnement à 22°C sont plus faibles mais du même ordre de grandeur que celles obtenues dans l'étude de Bréternitz *et al.* (valeurs aux alentours de 10 g m^{-2} h^{-1} sur les avant-bras). Ces observations nous confortent dans la pertinence des données mesurées.

Comparaisons des groupes

D'après la Figure 3.37, les différentes transitions thermiques et les différents environnements ne semblent pas avoir d'impact (par les 6 « tape stripping ») sur le degré de perturbation de la perméabilité du stratum corneum des individus du groupe G1 alors qu'elles semblent avoir un impact plus important sur le stratum corneum du G2. La fonction barrière du stratum corneum du groupe G2 apparaît plus ou moins affectée par les 6 strips suivant les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

différents environnements : elle semble moins affectée dans les environnements froids surtout après la plus forte transition froide, et plus affectée dans l'environnement chaud E6 (30°C) après la transition la plus chaude (puisque les variations individuelles de la perte d'intégrité a tendance à augmenter entre E5 et E6). Toutefois, seule la diminution de la perte d'intégrité du stratum corneum des individus du groupe G2 dans l'environnement E2 après la forte transition froide est significative (cf. Tableau 3.14). De plus, la perte de l'intégrité du stratum corneum du groupe G2 est significativement plus faible que celle du groupe G1, dans l'environnement E2 (17°C, ambiance la plus froide), d'après le test de Mann-Whitney (cf. Figure 3.37). **L'environnement froid agit donc différemment sur l'altération de la « fonction barrière » du stratum corneum des deux groupes.**

Il est étonnant que la quantité de protéines prélevée chez les individus du groupe G1 diminue significativement entre E1 et E2 alors que le degré d'altération de la fonction de perméabilité du stratum corneum ne change pas significativement entre E1 et E2. En effet, en général, quand la quantité de cellules enlevées par les « stripping » augmente, la « fonction barrière » est davantage perturbée et la perte en eau augmente davantage. La différence de quantité prélevée entre E1 et E2 devait probablement être trop faible pour se répercuter sur la perméabilité de la barrière ou les cellules prélevées en plus grande quantité dans E1 devaient être des cellules « desquamantes » qui avaient un rôle mineur dans la fonction barrière.

La fonction barrière des couches profondes du stratum corneum du groupe G2 semble renforcée par le froid, puisque la perte en eau augmente moins après les 6 strips à 17°C qu'après les 6 strips à 22°C, alors qu'une quantité similaire de protéines a été prélevée dans E2 et E1. De plus, cette différence d'intégrité entre les deux groupes semble bien associée à une différence de « barrière » et non à une différence de propriétés thermiques puisque les températures de peau des deux groupes ne sont pas significativement différentes dans E1 et E2. Dans l'environnement le plus froid, la fonction barrière du groupe G1 semble être forte au niveau des couches superficielles du stratum corneum (enlevées par les strips), alors que celle du groupe G2 semble être forte au niveau des couches profondes du stratum corneum. Le renforcement de la barrière des couches profondes du stratum corneum du groupe frileux G2 face à une agression physique dans un environnement froid est-elle liée à un renforcement de l'adhésion des cornéocytes adjacents ? Il est difficile de comprendre davantage les mécanismes intimes cutanés et d'établir, dans l'état de nos connaissances et avec ces données, s'il peut y avoir un lien avec la très forte vasoconstriction du groupe G2 dans E2 (17°C) et avec les différences de débit sanguin observées entre les deux groupes. Cependant, il semble

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

bien y avoir une différence entre les deux groupes au niveau de la fonction barrière du stratum corneum dans l'environnement le plus froid (17°C).

3.6.1.8. Etude du taux de récupération de la barrière cutanée du stratum corneum

Suite à la perturbation du stratum corneum par les 6 « tape stripping », une réponse homéostatique de réparation se met en place afin que l'épiderme retrouve le niveau initial de sa « fonction barrière ». La réparation de la barrière implique la sécrétion de corps lamellaires, l'augmentation de la synthèse des lipides épidermiques, *etc*. [Fuchs, Fluhr *et al.* 2005]. Cependant, cette capacité de réparation pourrait être différente suivant la température des environnements thermiques et suivant le groupe de sensibilité thermique et pourrait alors témoigner d'une différence cutanée entre les deux groupes.

Fiabilité des données

Les pourcentages de récupération de la barrière de perméabilité du stratum corneum 20 minutes après la perturbation mécanique sont représentés sur la Figure 3.38. Dans de très rares cas, la fonction barrière est encore plus altérée 20 minutes après la perturbation que juste après la perturbation. A 30°C (et peut-être à 25°C), cette observation peut être liée à l'évaporation de la sueur qui est susceptible d'augmenter chez certains individus avec le temps de séjour dans l'environnement chaud.

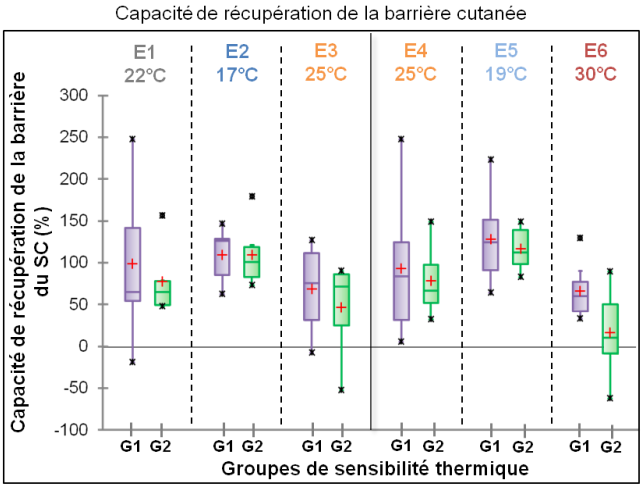


Figure 3.38 : Boîtes de Tukey représentant le pourcentage de récupération de la barrière cutanée 20 minutes après les 6 « tape-stripping » sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées.

D'autre part, le pourcentage de récupération de la barrière cutanée semble augmenter après les transitions froides et diminuer après les transitions chaudes pour les deux groupes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Seules les diminutions après les transitions chaudes sont significatives selon les tests des rangs signés de Wilcoxon (cf. Tableau 3.15).

Tableau 3.15 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences du pourcentage de récupération de la barrière cutanée des avant-bras après une perturbation mécanique, entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution.

Test des rangs signés de Wilcoxon	Transitions froides				Transitions chaudes				25°C	
	22°C → 17°C		25°C →19°C		17°C → 25°C		19°C → 30°C		E3 – E4	
Groupe →	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**	**G1**	**G2**
% récupération de la barrière	↑0,499	↑0,173	↑0,237	↑0,173	↓0,063	**↓0,046**	**↓0,028**	**↓0,028**	↑0,499	↑0,173

En gras : p-valeur < 0,05 (différence significative) ; se reporter à la liste des abréviations

Ces observations peuvent être liées au mécanisme de sudation mais également à une particularité de la barrière cutanée. Toujours pour des raisons de conservation de l'homéostasie (et plus particulièrement de l'homéothermie), la barrière se renforce peut-être davantage dans les environnements froids modérés pour éviter toute perte de chaleur par évaporation de l'eau alors que dans un environnement plus chaud la barrière peut être moins « forte » car la répercussion d'une perte en eau est moins problématique (voir parfois nécessaire). La réparation de la barrière cutanée est donc plus rapide dans un environnement froid que dans un environnement chaud ou neutre.

Cependant toutes ces hypothèses ne peuvent être confrontées à des données de la littérature puisque, à notre connaissance, il n'existe aucune étude sur ce sujet. Il est donc difficile d'évaluer la pertinence des données obtenues.

Comparaisons des groupes

La capacité des stratum corneum à récupérer leur fonction barrière est statistiquement similaire pour les deux groupes même si le groupe G1 a tendance à récupérer davantage sa fonction barrière 20 minutes après la perturbation mécanique (surtout dans E6 à 30°C). Cette particularité pourrait être associée :

- à l'intensité des mécanismes de thermorégulation qui semble plus faible pour le groupe G1 et qui se répercute probablement moins sur la barrière cutanée ;
- ou à la sensibilité de peau qui est moins forte pour le groupe G1.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.6.1.9. Etude des relations entre les variables mesurées pour chacun des groupes

Les relations entre les variables cutanées ont été analysées afin d'établir si ces relations sont différentes entre les deux groupes. Les variables sont dites corrélées entre elles lorsque le coefficient de corrélation de Spearman est au moins égal à 0,4 et que la significativité du test est inférieur à 0,05. Le cercle de corrélation nous a permis de représenter les relations entre les variables cutanées (cf. Figure 3.39).

Pour les deux groupes, les températures de peau, les perfusions sanguines mesurées sur les joues et sur les avant-bras ainsi que les critères de concentration en hémoglobine et de saturation en oxygène dans le sang sur les spectres de réflectance des joues et les coordonnées de chromaticité a* (surtout la variation individuelle) sur les joues sont fortement corrélées (cf. le cercle associées aux « propriétés <-> thermorégulation » sur la Figure 3.39).

Les propriétés hydriques (contenu en eau sur les joues et avant-bras, perte en eau sur les joues) sont légèrement corrélées, pour les deux groupes, avec l'activité microcirculatoire (r compris entre 0,4 – 0,6).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

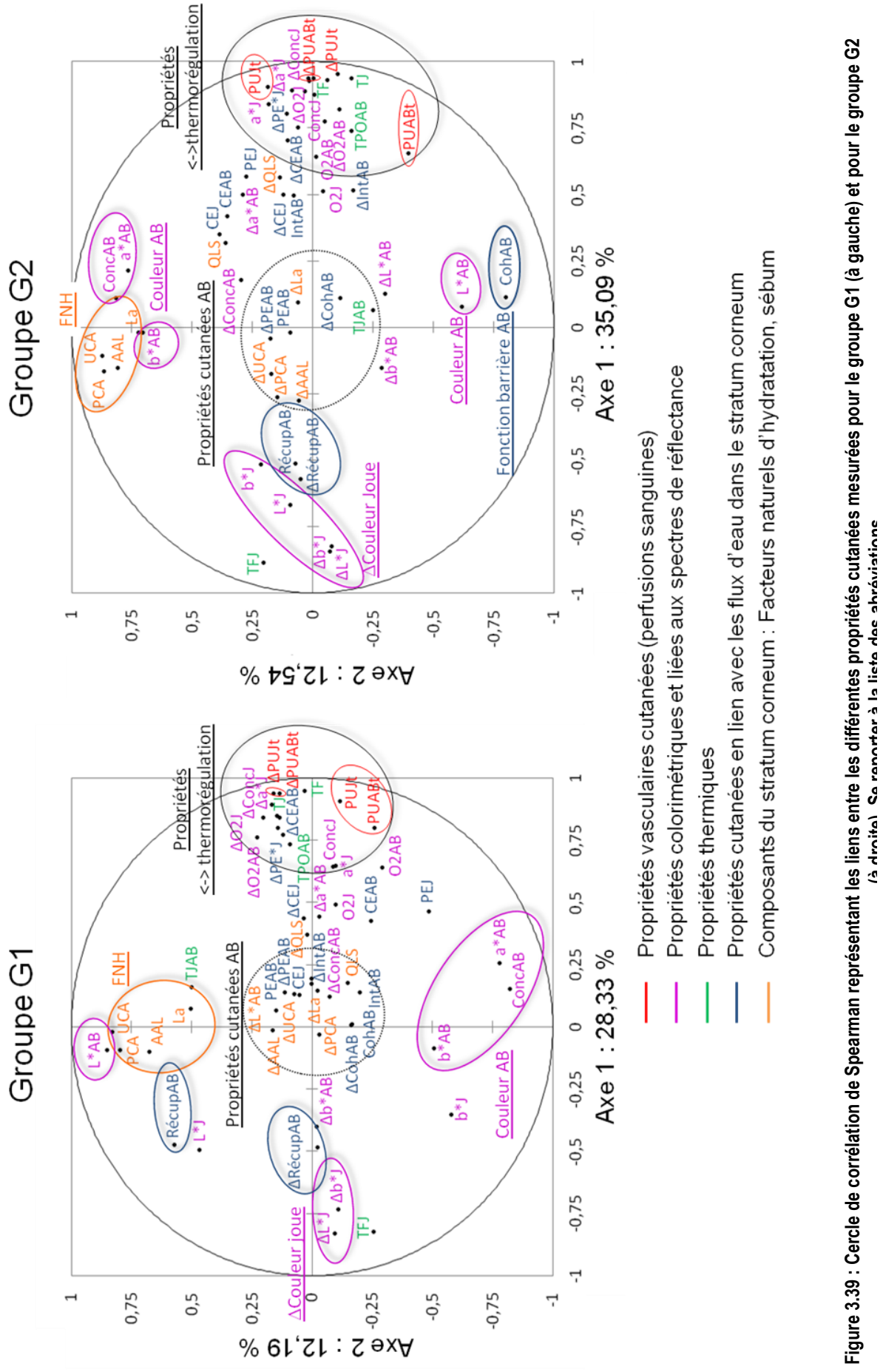


Figure 3.39 : Cercle de corrélation de Spearman représentant les liens entre les différentes propriétés cutanées mesurées pour le groupe G1 (à gauche) et pour le groupe G2 (à droite). Se reporter à la liste des abréviations

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Des différences sont présentes entre les deux groupes :

- le contenu en eau sur les joues est fortement corrélé avec la quantité de lipides surfaciques prélevés sur le front (r = 0,7) pour le groupe G2 et beaucoup plus faiblement pour le groupe G1 (r = 0,4) ;
- la variation individuelle de contenu en eau sur les joues est moyennement corrélée négativement à la variation individuelle de la coordonnée de chromaticité b* sur les joues pour le groupe G2 (r = -0,56 pour G2, r = -0,038 pour G1) ;
- la variation individuelle de contenu en eau sur les avant-bras est beaucoup plus corrélée avec la température des avant-bras pour le groupe G1 que pour le groupe G2 ;
- la variation individuelle de perte en eau sur les joues est moyennement corrélée négativement avec la variation individuelle de la coordonnées b* sur les joues pour le groupe G2 (r = -0,6 pour G2 et r = -0,3 pour le groupe G1).

Contrairement au groupe G1, l'évolution des propriétés hydriques des joues du groupe G2 semble se répercuter sur les propriétés colorimétriques des joues et la teneur en eau du stratum corneum des joues de ce groupe semble dépendre, en partie, de la quantité des lipides surfaciques.

Des différences sont également visibles au niveau de l'intégrité du stratum corneum et de la capacité de récupération du stratum corneum (obtenues sur les avant-bras). En effet, pour le groupe G2, les variations individuelles de ces deux variables sont corrélées avec la variation individuelle de la perfusion sanguine des avant-bras, de la température des avant-bras et du critère des spectres de réflectance des avant-bras sur la saturation en oxygène du sang ($|r|>0,5$ pour le groupe G2 et $|r|<0,3$ pour le groupe G1). La fonction « barrière » du groupe G2 semble davantage être influencée par les mécanismes de thermorégulation que celle du groupe G1.

Les variations individuelles de la cohésion ne sont pas corrélées aux autres paramètres cutanés pour les deux groupes. Cependant, la cohésion (brute) est corrélée à la coordonnée b* et au critère de saturation en oxygène pour le groupe G1, alors qu'elle est corrélée beaucoup plus fortement aux différents constituants du FNH et aux coordonnées a* et b* de l'avant-bras pour le groupe G2. Globalement, pour le groupe G2, plus la quantité des constituants des FNH est faible plus la quantité de protéines prélevées est importante. Ceci signifie que la cohésion des individus du groupe G2 a tendance à augmenter lorsque la quantité des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

constituants du FNH augmente. La barrière cutanée des deux groupes semble bien se comporter différemment.

Concernant les propriétés lipidiques du stratum corneum du front, elles sont reliées au contenu en eau, mais aussi à la perte en eau, au débit sanguin et à la température du front pour le groupe G2 mais pas pour le groupe G1 ($r = 0,5$ pour G2 et $r<0,3$ pour G1). Encore une fois, contrairement au groupe G1, la barrière lipidique du groupe G2 semble évoluer en fonction des mécanismes de thermorégulation.

Les propriétés colorimétriques de l'avant-bras et le critère de concentration en hémoglobine du spectre de réflectance sur les avant-bras (qui ont posé des problèmes au niveau de l'interprétation) semblent davantage corrélés aux quantités des facteurs naturels d'hydratation qu'à la perfusion sanguine des avant-bras. D'ailleurs, la coordonnées a* du groupe G2 n'est pas du tout corrélée au débit sanguin sur les avant-bras. Les corrélations entre les coordonnées L*a*b* et les quantités de FNH sont parfois opposées pour le groupe G1 et G2 (cf. l'axe 2 de chaque cercle sur la Figure 3.39). Par exemple, la clarté des avant-bras du groupe G1 est positivement corrélée à la quantité d'acide urocanique ($r = 0,57$) alors que pour le groupe G2, elle est négativement corrélée à la quantité d'acide urocanique ($r = -0,45$). De plus, contrairement au groupe G1, la coordonnée b* sur les avant-bras du groupe G2 est fortement corrélée à la quantité d'acides aminés libres, d'acide urocanique, d'acide pyroglutamique et de lactates ($r = 0,6$ - $0,7$ pour le groupe G2 vs. $r<0,4$ pour le groupe G1). Sur les avant-bras, les paramètres obtenus avec le spectrocolorimètre et, par là même, les propriétés optiques du stratum corneum des avant-bras semblent particulièrement influencées par la quantité des constituants du FNH et les deux groupes semblent avoir des propriétés cutanées sur les avant-bras bien différentes. A notre connaissance, aucune étude ne mentionne de liens directs entre les FNH et les propriétés colorimétriques de la peau. Ce lien est peut-être différent entre les groupes car la répartition des phototypes dans chacun des deux groupes n'est pas homogène. Il faudrait effectuer une étude complémentaire avec des groupes présentant chacun des phototypes différents (et une même sensibilité thermique) pour vérifier :

- s'il existe une relation significativement différente entre les FNH et la couleur de peau suivant les phototypes des individus
- si ces différences de relations sont associées à une sensibilité thermique particulière.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

D'autre part, des différences entre les deux groupes peuvent être directement repérées en observant attentivement la Figure 3.39. En effet, le pourcentage d'inertie expliqué par les deux premiers axes factoriels (appelés axe 1 et axe 2 sur la figure) mais également par les trois premiers axes factoriels est plus élevé pour le groupe G2 que pour le groupe G1 (G1 : 48,8% et G2 : 57,7%). De plus, beaucoup plus de variables cutanées sont concentrées au centre du cercle de corrélation pour le groupe G1 que pour le groupe G2. Ceci signifie qu'un plus grand nombre de variables n'est pas bien représenté par les deux premiers axes factoriels pour le groupe G1. Les paramètres biophysiques cutanés du groupe G2 sont plus corrélés entre eux que ceux du groupe G1 et ils semblent particulièrement bien représentés par le premier axe factoriel. En d'autres termes, les évolutions d'une grande partie des variables « non thermiques » du groupe G2 sont corrélées aux variations des variables thermo-vasculaires reflétant les mécanismes de thermorégulation et représentées sur le premier axe factoriel. Ceci est probablement associé au fait que les mécanismes de thermorégulation du groupe G2 ont été plus actifs et intenses et qu'ils se sont donc répercutés plus fortement sur certaines propriétés cutanées non thermiques.

Les relations entre les variables cutanées ne sont donc pas tout à fait identiques pour les deux groupes. En résumé, contrairement au groupe G1, le groupe G2 qui est frileux a une couleur de peau qui varie davantage en fonction des variations des propriétés hydriques, une coordonnée b* sur les avant-bras qui varie fortement avec la quantité de FNH, une hydratation cutanée qui semble reliée à la quantité de lipides surfaciques, une fonction barrière ainsi qu'une barrière lipidique qui est influencée par les mécanismes de thermorégulation. De façon générale, les évolutions des variables cutanées du groupe G2 semblent davantage reliées aux évolutions des mécanismes de thermorégulation.

3.6.1.10. Synthèse et discussion sur les différences physiologiques des deux groupes

Des différences physiologiques entre les deux groupes d'individus, présentant chacun une sensibilité au froid distincte, ont pu être mises en évidence dans cette expérimentation. Les différences observées sur les joues et celles observées sur les avant-bras seront discutées séparément.

<u>Au niveau des joues</u> :

Les mesures effectuées sur les joues sont apparues particulièrement fiables et cohérentes. Le Tableau 3.16 regroupe les différences observées entre les deux groupes sur les joues.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 3.16 : Synthèse des observations significatives faites sur les mesures des joues du groupe frileux G2 mais pas sur celles du groupe G1 non frileux. Les résultats obtenus avec le test de Mann-Whitney sont indiqués en italique. Se reporter à la table des abréviations.

Variables	**Transitions froides (22→17°C ; 25→19°C)** ***Environnements froids et frais : 17°C, 19°C, 22°C***	**Transitions chaudes (17→25°C ; 19→30°C)** ***Environnement chaud : 30°C***	**Différences entre E3 et E4 à 25°C Impact du « passé thermique »**
ΔPUJ	Diminution plus forte que pour G1	Augmentation plus forte que pour G1	Augmentation significative
L*a*b* J	*b*J plus faible que pour G1 dans E1, E2, E3, E5, E6*		
	*Dans E2 (17°C) : a*J plus faible* Diminution non significative de Δa*J après 25→19°C Diminution de Δa*J après 22→17°C	-	*Dans E3 : ΔL*J plus élevée*
crit_conc_J	Diminution après 22→17°C	-	-
Gradient T		Augmentation non significative de TJAB après 19→30°C	
PEJ	-	-	Augmentation
CEJ	Diminution non significative après 22→17°C *Dans E1 (22°C) : ΔCEJ plus faible*	Augmentation non significative après les deux transitions chaudes	-
QLS	-	Augmentation après 17→25°C *Dans E6 : ΔQLS plus élevée*	-
Relations entre les variables	G2 : QLS corrélée à CEJ, PEJ, PUJ, TF ΔCEJ et ΔPEJ corrélées à Δb*J		

La différence la plus flagrante se situe au niveau de la perfusion sanguine des joues. En effet, le groupe frileux G2 présente une vasoconstriction plus forte au froid et une vasodilatation plus forte au chaud que le groupe G1. Les mécanismes de thermorégulation semblent plus intenses (en termes de niveaux de perfusion) pour le groupe G2 frileux. Pour ce

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

groupe, **le seuil de déclenchement des mécanismes de thermorégulation est probablement plus précoce ou le gain des réponses thermorégulatrices plus élevé**. Ces faibles seuils de déclenchement traduisent-ils un réel besoin physiologique du groupe G2 ou un disfonctionnement de son activité vasomotrice ? Dans une même situation, le groupe frileux G2 semble avoir besoin de plus d'énergie pour faire face à un environnement thermique « modéré » que le groupe G1 puisque son activité vasomotrice est plus forte. Comme mentionné dans l'introduction générale : « *l'équilibre du bilan thermique mais aussi l'atteinte de cet équilibre avec une mise en œuvre minimale des mécanismes physiologiques de thermorégulation (sudation modérée, circulation sanguine stable, variations négligeables de la fréquence cardiaque, faibles différences de températures cutanées locales, etc.) sont nécessaires pour l'établissement d'un état de confort thermique* » [Galeou, Grivel *et al.* 1989]. Le groupe frileux G2 est donc probablement plus souvent en état d'inconfort que le groupe G1 dans des environnements frais et froids car la mise en œuvre de son activité microcirculatoire nécessaire pour l'établissement d'un état de confort n'est pas minimale contrairement au groupe G1.

Ces différences ne sont pas visibles significativement sur les températures cutanées du visage qui sont un reflet probablement trop indirect de l'activité microcirculatoire puisqu'elles sont à la fois influencées par le débit sanguin, le métabolisme et surtout par la température extérieure puisque la mesure est très superficielle. D'ailleurs, l'étude de Yasuoka *et al.* et de Nagashima *et al.* qui étudient l'évolution de différents paramètres physiologiques de deux groupes (construits respectivement à partir de leur température ambiante préférée : $< 29°C$ et $\geq 29°C$ et de leurs réponses à un questionnaire sur la sensibilité au froid) au cours d'une transition thermique (respectivement : $33°C \rightarrow 25°C$ et $29{,}5°C \rightarrow 23{,}5°C$) ne montrent aucune différence significative entre les deux groupes au niveau des températures cutanées moyennes. Cependant, aucune étude à notre connaissance ne s'est concentrée uniquement sur les températures du visage. Les résultats du chapitre 2 (protocole B) montraient davantage de différences au niveau des températures du visage mais il est probable que les différences aient été accentuées par le tabagisme. Il sera donc difficile de confronter directement les résultats du chapitre 2 avec ceux de ce chapitre. Cependant, la conclusion du chapitre précédent selon laquelle les mécanismes de thermorégulation du groupe sensible au froid étaient plus prononcés que pour l'autre groupe non sensible au froid semble être plutôt en accord avec les observations effectuées sur la perfusion sanguine des joues dans cette expérimentation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les différences, entre les deux groupes, obtenues au niveau des perfusions sanguines des joues sont un peu plus visibles au niveau des variations individuelles des variables colorimétriques des joues qu'au niveau des températures cutanées. Mais, les différences restent encore beaucoup moins marquées que sur la mesure du flux sanguin. La variation individuelle de la coordonnée a* (souvent associée à la concentration volumique en hémoglobine) diminue bien significativement après la première transition froide pour le groupe G2 contrairement au groupe G1. Ceci témoigne probablement d'une vasoconstriction plus forte pour le groupe G2 dans l'environnement froid à 17°C.

Les deux critères identifiés sur les spectres de réflectance des joues fournissent également des informations sur l'activité microcirculatoire et en particulier sur la concentration volumique en hémoglobine et sur la saturation en oxygène de l'hémoglobine. Ces deux informations semblent particulièrement fiables sur les joues même si elles ne sont pas aussi précises que les perfusions sanguines. Le critère de « concentration en hémoglobine » du groupe G2 diminue bien significativement après la première transition froide contrairement au groupe G1. Ceci est probablement associé à une vasoconstriction plus forte du groupe G2 dans l'environnement E2 à 17°C. Les différences entre les deux groupes de sensibilité au froid sont donc visibles sur les paramètres colorimétriques des joues et plus particulièrement après la plus forte transition froide.

Au niveau des variables hydriques cutanées, la perte en eau semble montrer une différence entre les deux groupes. En effet, contrairement au groupe G1, la perte en eau du groupe G2 est influencée par le « passé thermique » des individus puisque cette variable augmente significativement entre E3 (25°C précédée par 17°C) et E4 (25°C précédée par ~22°C). La barrière cutanée du groupe G2 semble davantage être renforcée dans E3 que dans E4. Est-ce lié directement au débit sanguin qui nécessite plus de temps pour retrouver un niveau stable dans E3 suite à l'ambiance E2 (car le débit sanguin du groupe G2 est très faible dans E2) ? Ou est-ce lié à un mécanisme cutané spécifique de protection contre la perte de chaleur qui est nécessaire pour les individus groupe G2 afin qu'ils parviennent à assurer efficacement les transferts de chaleur dans E3 ? L'article de Thiele *et al.* explique que la vasoconstriction réduit le mouvement des fluides au niveau des capillaires et que la perméabilité des capillaires est donc réduite et se répercute sur la perte en eau à la surface de la peau [Thiele et van Senden 1966]. Mais, il est difficile d'établir si la perfusion sanguine est la seule cause de la différence de la perte en eau entre les deux groupes entre E3 et E4.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

L'évolution du contenu en eau au niveau des joues en fonction des transitions thermiques présente aussi des différences entre les deux groupes. Le contenu en eau des joues du groupe G1 varie significativement avec les transitions froides alors que celui du groupe G2 ne change pas. Selon l'article Chen et al., le changement de contenu en eau devient apparent lorsque l'activité vasomotrice n'assure pas tous les transferts de chaleur [Chen, Hwang *et al.* 2011]. Il est donc probable que les mécanismes vasculaires du groupe G2 suffisent à assurer les transferts de chaleur puisqu'ils sont plutôt très actifs alors que ceux du groupe G1 ne suffisent pas. Le contenu en eau varie alors pour assurer des transferts de chaleur. En effet, une peau plus hydratée dissipe plus facilement la chaleur qu'une peau très sèche [McLellan, Petrofsky *et al.* 2009]. Il est possible que la régulation de la température ne soit pas assurée de la même façon et par les mêmes mécanismes pour les deux groupes.

Au niveau de la quantité de lipides surfaciques, il semblerait que celle-ci augmente significativement après le retour à un état de confort après la transition chaude 17°C→25°C pour le groupe frileux G2 mais pas pour le groupe G1. Ce résultat est en accord avec le chapitre précédent. De plus, la quantité lipidique du stratum corneum du groupe G2 est corrélée au contenu en eau, à la perte en eau et à la perfusion sanguine des joues. Donc, le contenu lipidique du groupe frileux semble relié aux mécanismes de thermorégulation (particulièrement actifs pour ce groupe) contrairement au groupe G1. Cependant, l'absence de variation de la quantité de lipides surfaciques après la transition chaude la plus forte nous encourage à être prudents quant à la pertinence de la mesure lorsque la quantité de sueur en surface est susceptible d'être non négligeable. Des études complémentaires sur le pouvoir absorbant de la bande du sébumètre seraient nécessaires pour évaluer davantage les limites de la mesure. D'autre part, comme il semble y avoir une différence entre les deux groupes au niveau de la quantité de lipides à la surface du stratum corneum, il serait intéressant d'inclure une mesure plus quantitative telle que celle décrite dans le brevet de Sisalli et Sandra [Sisalli et Sandra 2007]. Cette mesure consiste à utiliser des bandes absorbantes de polydiméthylsiloxane pour prélever des lipides à la surface de la peau. Après une analyse chimique complexe de ces bandes, il est alors possible de déterminer la quantité des composants du sébum tels que le squalène, les acides gras, les esters cireux et les triglycérides [Sisalli, Adao *et al.* 2006]. Ainsi, les évolutions de la composition lipidique du stratum corneum des deux groupes pourront être comparées. Les lipides ont des rôles importants au niveau de la barrière cutanée et des propriétés mécaniques de la peau. Une analyse précise de ces lipides permettrait de mieux comprendre certaines particularités cutanées observées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Globalement, d'après les données obtenues sur les joues, le groupe frileux G2 semble avoir des mécanismes vasculaires plus actifs (surtout dans les environnements froids) et, par là même, une **activation du système nerveux sympathique plus élevée** que le groupe non frileux G1 pour maintenir sa température interne constante. Ceci est en accord avec les travaux de Nagashima *et al.* et Yasuoka *et al.* [Nagashima, Yoda *et al.* 2002; Yasuoka, Kubo *et al.* 2012] qui concluent, à partir du suivi de certaines variables physiologiques (différentes de celles analysées ici), que le groupe respectivement sensible au froid (atteint du syndrome de « coldness ») et préférant des températures élevées (> 29°C) a une activation plus élevée du système sympathique. D'autre part, la plus forte activation du système sympathique du groupe G2 est davantage visible au niveau des propriétés vasculaires qu'au niveau des propriétés thermiques de ce groupe et elle semble se répercuter significativement sur l'état de la barrière cutanée des joues de ce groupe. De son côté, contrairement au groupe G2, le groupe G1 semble réguler, en partie, sa température à l'aide de la variation du contenu en eau de sa peau.

<u>Au niveau des avant-bras</u> :

Les mesures effectuées sur les avant-bras sont apparues beaucoup moins fiables que celles mesurées sur les joues. Elles sont souvent complexes à analyser. Ce manque de fiabilité pourrait s'expliquer par la réaction comportementale de certains individus qui a consisté à coller leurs avant-bras le long de leur corps, malgré nos recommandations. Cette réaction a probablement engendré un léger phénomène d'occlusion qui s'est répercuté sur certaines mesures. Les mesures cutanées qui semblent avoir été les plus influencées par les différents positionnements de l'avant-bras semblent être la perte en eau et la couleur de peau. En effet, les évolutions de ces deux paramètres sont parfois inverses à ce qui est mentionné dans la littérature. L'évaluation de la perte d'intégrité basée sur la mesure de perte en eau est donc probablement également perturbée. Les conclusions effectuées à partir des mesures des avant-bras devront donc être vérifiées par d'autres expérimentations.

Le Tableau 3.17 regroupe les différences observées entre les deux groupes sur les avant-bras

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 3.17 : Synthèse des observations significatives faites sur les mesures des avant-bras du groupe frileux G2 mais pas sur celles du groupe G1 non frileux. Les résultats obtenus avec le test de Mann-Whitney sont indiqués en italique. Se reporter à la table des abréviations.

Variables	Transitions froides (22→17°C ; 25→19°C) *Environnements froids et frais : 17°C, 19°C, 22°C*	Transitions chaudes (17→25°C ; 19→30°C) *Environnement chaud : 30°C*	Différences entre E3 et E4 à 25°C Impact du « passé thermique »
L*a*b* AB	*b*AB plus faible que pour G1 dans E1, E2, E3, E5, E6*		
	*Dans E2 (17°C) : a*AB plus faible*	Augmentation de ΔL*AB + Δb*AB après 17→25°C	Augmentation non significative de Δa*AB Diminution non significative de Δb*AB
Δcrit_conc_AB	Paramètre non fiable		
crit_O2_AB	*plus faible*		
Gradient T		Augmentation non significative de TJAB après 19→30°C	Augmentation de TPOAB
PEAB	Augmentation après 25→19°C		Diminution
CEAB	*Dans E1 (22°C) : ΔCEAB plus faible*	Augmentation non significative après 17→25°C	*Dans E3 : ΔCEAB plus faible*
Lactate	Diminution non significative après 25→19°C	-	-
Perte de cohésion	Diminution non significative après 22→17°C	-	-
Perte d'intégrité	Diminution après 22→17°C	-	-
Relations entre les variables	ΔCEAB moins corrélé à TAB ΔIntégrité et Δrécup corrélés à ΔPUAB, ΔcritO2AB, TAB Perte de cohésion corrélée négativement à la quantité des constituants du FNH + a*AB + b*AB b*AB corrélé à la quantité des constituants du FNH		

La perfusion sanguine des avant-bras ne permet pas d'identifier de différences physiologiques entre les deux groupes. De la même façon, dans l'étude de Nagashima *et al.*, aucune différence de perfusion sanguine sur la face interne des avant-bras n'a été obtenue entre le groupe sensible au froid (avec le syndrome de « coldness ») et le groupe non sensible au froid lors de la transition 29,5°C → 23,5°C [Nagashima, Yoda *et al.* 2002].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cependant la variable colorimétrique a* du groupe G2 est significativement plus faible que celle du groupe G1 dans l'environnement le plus froid à 17°C. Le groupe frileux G2 pourrait donc avoir tendance à avoir une vasoconstriction plus forte sur les avant-bras que le groupe G1 dans l'environnement froid E2. Cependant, c'est la seule observation sur les propriétés colorimétriques qui permette de faire cette hypothèse. En effet, ce sont les variations individuelles a* et b* du groupe G1 et non celles du groupe G2 qui changent significativement entre E3 et E4 et qui semblent donc influencer par les transitions thermiques. Comme les avant-bras sont des zones plus distales que les joues, il n'est pas surprenant que le « passé thermique » des individus du groupe G1 ait un impact pus important sur les propriétés colorimétriques des avant-bras que sur celles des joues. Cependant, le groupe G2 devrait également présenté une différence entre E3 et E4 comme pour les joues. Cette absence de différence est-elle une conséquence d'une faible occlusion ou une réelle différence de comportement physiologique des zones du corps du groupe G2 ? Les évolutions des variations individuelles de L* et de b* du groupe G2 ne sont pas en accord avec les évolutions de la concentration volumique en hémoglobine mises en évidence avec les mesures de perfusion sanguine. Les propriétés colorimétriques du groupe G2 sont probablement fortement influencées par les différents positionnements des avant-bras. Les sujets du groupe frileux G2 ont probablement davantage collé leurs avant-bras contre leur corps pour perdre le moins de chaleur possible dans les environnements froids et pour supporter davantage les faibles températures ambiantes. La comparaison des deux groupes ne pourra donc pas être faite correctement sur es propriétés colorimétriques des avant-bras.

Concernant les propriétés hydriques, on constate que des différences apparaissent particulièrement après les transitions froides ou entre E3 et E4. Pour les mêmes raisons que les propriétés colorimétriques, il n'est pas possible d'exploiter efficacement les pertes en eau des avant-bras. D'autre part, les différences observées sur les autres variables cutanées restent difficiles à comprendre explicitement. Toutefois, il semblerait que la barrière cutanée des deux groupes soit perturbée différemment par les environnements plutôt froids. Les variations individuelles de contenu en eau semblent davantage corrélées aux températures des avant-bras pour le groupe G1 que pour le groupe G2. Cependant, contrairement au groupe G1, les variations individuelles de perte d'intégrité et du taux de récupération de la couche cornée du groupe G2 sont corrélées aux températures des avant-bras, aux perfusions sanguines des avant-bras et aux critères de saturation en oxygène de l'hémoglobine. Cette dernière observation permet de supposer que les mécanismes de thermorégulation du groupe G2 se

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

répercutent davantage sur la barrière cutanée des avant-bras de ce groupe lorsque les mesures sont effectuées en dynamique. Ceci est peut-être associé au fait que les mécanismes de thermorégulation du groupe G2 ont tendance à être plus « actifs » (au moins sur les joues) que ceux du groupe G1. Cependant, cette remarque devrait être vérifiée sur les avant-bras avec un protocole qui impose une même position pour les avant-bras de tous les sujets.

D'autre part, les différences physiologiques entre les deux groupes de frilosité pourraient probablement être plus prononcées avec une construction de groupes plus fine. L'affinement de la construction des groupes consisterait à prendre en compte à la fois un critère de sensibilité au froid mais aussi un critère de sensibilité au chaud et de tolérance face à des températures ambiantes plus ou moins modérées. Ainsi les profils sensoriels seraient plus complets et devraient permettre de mieux comprendre les différences à la fois après les transitions froides et après les transitions chaudes. Cette démarche nécessite un grand nombre de sujets puisqu'au moins 4 classes d'individus (sensible au froid et sensible au chaud | sensible au froid et non sensible au chaud | non sensible au froid et sensible au chaud | non sensible au froid et non sensible au chaud) peuvent être identifiées. D'autre part, la définition de la sensibilité au froid pourrait être améliorée grâce à l'introduction de nouvelles questions (qui sont mentionnées dans l'article de Nagashima *et al.* [Nagashima, Yoda *et al.* 2002]) telles que :

- Etes-vous sensibles à la diminution de la température ambiante ?
- Avez-vous tendance à avoir plus froid que les autres dans un environnement froid ?
- Avez-vous tendance à avoir froid même en été ?
- Vous n'aimez pas vous mettre pieds nus même en été parce que vous avez froid : Vrai ou Faux ?
- Avez-vous tendance à avoir froid dans les espaces climatisés l'été alors que les personnes autour de vous se sentent bien ?
- Avez-vous besoin de mettre plus de vêtements que les autres ?
- Avez-vous besoin d'une bouillotte ou d'une couverture chauffante pour mieux dormir l'hiver ?
- Portez-vous des chaussettes la nuit en hiver ?
- Vous réveillez-vous souvent l'hiver parce que vous avez froid ?

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.6.2. Apports pour la prédiction du ressenti thermique

D'après le chapitre 1, la majorité des modèles de sensation thermique est construite presque exclusivement sur un seul type de variables cutanées : les variables thermiques telles que la température de peau. Or, nous avons mis en évidence dans le chapitre 2 ainsi que dans la première phase de ce chapitre, que la température de peau n'était pas le seul paramètre physiologique cutané qui variait en fonction des environnements thermiques et, par là même, en fonction du ressenti thermique déclaré. Des variables non thermiques (c'est-à-dire les variables cutanées qui ne sont pas des températures cutanées ou des gradients de températures) ne pourraient-elles pas apporter des informations complémentaires à celles de la température locale de peau qui permettraient d'affiner les modèles de prédiction de la sensation thermique et du confort thermique ? **Une approche multiparamétrique ne serait-elle pas bénéfique pour la prédiction du ressenti thermique ?**

D'autre part, dans l'introduction générale, nous avons évoqué un certain nombre de limites dans la prédiction de la sensation thermique et du confort thermique. L'une d'entre elles correspond au **manque d'individualisation des modèles**. En effet, les modèles ne prennent pas en compte les différences interindividuelles de sensibilité thermique. Ils sont établis pour des « individus moyens ». **Les modèles ne pourraient-ils pas être plus performants s'ils étaient établis pour des classes d'individus avec des sensibilités thermiques spécifiques et non pour un large groupe d'individus non caractérisés précisément ?**

Dans cette partie, nous tentons de répondre à ces deux questions à partir des données sensorielles et physiologiques obtenues dans la campagne de mesures. La régression PLS des moindres carrés partiels, décrite dans la partie 3.3.2. page 221, est utilisée pour identifier des relations entre les variables sensorielles (sensation thermique et confort thermique) et les variables cutanées ainsi que pour évaluer la qualité de prédiction de chacune des relations établies. Ainsi, nous pourrons discuter des apports de l'approche multiparamétrique et de la prise en compte des groupes de sensibilité au froid dans la prédiction de la sensation thermique et du confort thermique.

Comme la régression PLS est une régression linéaire, la variable perfusion sanguine qui augmente exponentiellement avec la température ambiante a été transformée grâce à la méthode de transformation Box & Cox (cf. partie 2.2.1.3. page 119). La transformation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

$y = -\frac{1}{\sqrt{x}}$ a été appliquée aux données de perfusions sanguines et les variations individuelles des perfusions sanguines ont été calculées à partir des nouvelles variables.

3.6.2.1. Résultats sur la prédiction de la sensation thermique

Les résultats des régressions PLS pour la prédiction de la sensation thermique à partir de variables cutanées sont présentés sur le Tableau 3.18.

Tableau 3.18 : Résultats des régressions PLS1 pour la prédiction de la sensation thermique déclarée (Y) dans les 6 environnements thermiques. La première colonne indique l'échantillon des individus (G1 : groupe non sensible au froid et/ou G2 : groupe sensible au froid) utilisé pour la prédiction, la deuxième colonne répertorie les variables X utilisées à la base pour la prédiction, la troisième colonne mentionne les variables cutanées (X) retenues pour la prédiction (après élimination des variables dont le VIP>0,8) dans l'ordre décroissant des coefficients de régression (en valeur absolue) et la quatrième colonne indique la qualité de prédiction du modèle.

Groupe analysé	Variables cutanées explicatives	Variables retenues dans le modèle de prédiction de la sensation thermique	Qualité du modèle
G1+G2	Températures	TF, TJ, TN, TAB, TPO	76,5 %
G1+G2	Températures + Variables « non thermiques »	TF, TJ, ΔPUJ_t, TN, $\Delta PUAB_t$, TPO, ΔPEJ, Δa*J, Δcrit_O2_J, Δcrit_conc_J, Δcrit_O2_AB, ΔCEAB	77,4 %
G1	Températures + Variables « non thermiques »	TJ, TF, ΔPUJ_t, TN, TAB, $\Delta PUAB_t$, Δcrit_O2_J, TPO, ΔCEAB, ΔPEJ, Δa*J, Δcrit_O2_AB	80,6 %
G2	Températures + Variables « non thermiques »	ΔPUJ_t, TF, TJ, TN, TPO, Δcrit_conc_J, Δa*J, TAB, ΔPEJ, $\Delta PUAB_t$, Δcrit_O2_J, Δb*J, Δcrit_O2_AB, ΔLJ, ΔCEAB	77,0 %

La qualité du modèle PLS de prédiction de la sensation thermique de tous les individus (G1+G2) à partir des températures cutanées locales est satisfaisante et de l'ordre de 76,5%. Les températures cutanées et en particulier les températures du visage semblent être de bonnes variables prédictives de la sensation thermique déclarée.

Dans le cas où toutes les variables (thermiques et non thermiques) sont utilisées pour prédire la sensation thermique, il a pu être constaté que certaines n'étaient pas pertinentes pour la prédiction de la sensation thermique puisque leur « VIP » était inférieur à 0,8 (méthode décrite dans la partie 3.3.2. page 221). Les variables pertinentes (avec un VIP > 0,8) conservées dans le modèle final sont les suivantes :

- les variables thermiques du visage et des doigts ;
- les variables vasculaires des joues et des avant-bras ;
- deux variables hydriques cutanées : la perte en eau sur les joues et le contenu en eau sur les avant-bras ;
- la variable colorimétrique a* des joues;

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- le critère de saturation en oxygène de l'hémoglobine sur les spectres de réflectance des joues et avant-bras ;
- le critère de concentration en hémoglobine sur les spectres de réflectance des joues.

D'après la première partie des résultats de ce chapitre, toutes ces variables ont évolué relativement significativement avec les températures ambiantes. D'autre part, ce sont uniquement les variations individuelles (dont la variabilité interindividuelle est réduite par rapport aux variables brutes) des variables cutanées non thermiques et non les variables brutes qui ont une importance suffisante pour la prédiction (VIP > 0,8) pour être conservées dans le modèle final. Comme indiqué dans le Tableau 3.18, l'apport de l'introduction des variables non thermiques pour la prédiction de la sensation thermique est faible mais positif : de l'ordre de + 0,9%. Globalement, les variations individuelles des perfusions sanguines des joues et des avant-bras et des pertes en eau des joues semblent améliorer légèrement la prédiction de la sensation thermique.

D'autre part, la prise en compte des groupes de sensibilité au froid a permis d'améliorer la prédiction de la sensation thermique surtout pour le groupe G1 non sensible au froid (G1 : + 4,1% *vs.* G2 : + 0,5%). On peut également constater que les variables cutanées conservées dans le modèle PLS final pour la prédiction de la sensation thermique sont plus nombreuses pour le groupe G2 que pour le groupe G1 : les coordonnées L* et b* sur les joues et les critères de concentration en hémoglobine sur les joues ont été retenues pour le modèle finale du groupe G2 mais pas pour celui du groupe G1. De plus, le poids de chacune des différentes variables cutanées sur la prédiction de la sensation thermique déclarée est différent pour les deux groupes. Par exemple, d'après la Figure 3.40, la variation individuelle de la perfusion sanguine des joues du groupe G2 a un poids plus élevé que celle du groupe G1 alors que la variation individuelle du contenu en eau des avant-bras du groupe G1 a un poids plus élevé que celle du groupe G2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

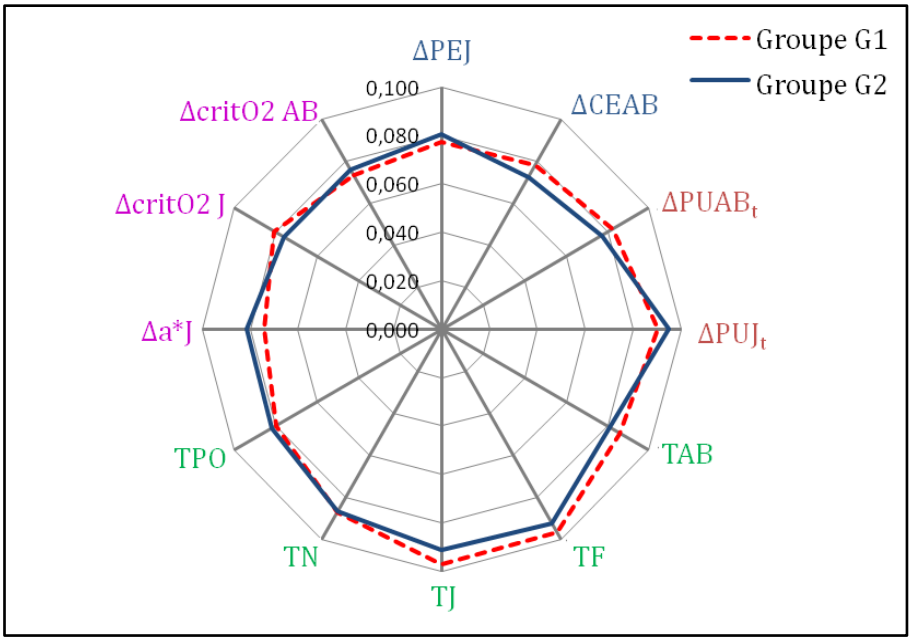


Figure 3.40 : Représentation des coefficients de régression normalisés obtenus avec la régression PLS1 utilisée pour prédire, à partir des 12 variables cutanées mentionnées sur le graphique, la sensation thermique du groupe G1 (tirets rouges) et du groupe G2 (trait bleu). Se reporter au glossaire pour les abréviations.

Ces observations semblent encore une fois être en lien avec les résultats de la partie précédente. Par exemple, la perfusion sanguine des joues du groupe G2 évolue plus fortement en fonction des transitions thermiques et il est donc plutôt logique que la variation de cette variable se répercute plus fortement sur la sensation thermique du groupe G2 que sur celle du groupe G1. Les relations entre la sensation thermique et les variables cutanées sont différentes pour les deux groupes probablement parce que chaque groupe présente des mécanismes de thermorégulation spécifiques.

3.6.2.2. Résultats sur la prédiction du confort thermique

Dans cette partie, la régression PLS a été utilisée pour la prédiction du confort thermique déclaré dans E1 (22°C), E2 (17°C) et E3 (25°C). En effet, dans cette gamme de température ambiante, le confort thermique a une évolution linéaire alors que si on inclut l'environnement E6 (30°C) l'évolution devient non linéaire (cf. Figure 3.19, page 232). Pour une première approche exploratoire, il nous a semblé plus pertinent de rester dans une zone où le confort thermique évolue linéairement puisque la régression PLS est une régression linéaire. Il faudrait utiliser d'autres outils statistiques ou transformer la variable « confort thermique » pour l'étudier dans les 6 environnements thermiques.

Les résultats des régressions PLS de prédiction du confort thermique à partir des variables cutanées sont exposés dans le Tableau 3.19.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 3.19 : Résultats des régressions PLS1 pour la prédiction du confort thermique déclaré (Y) dans 3 environnements thermiques (E1 : 22°C, E2 : 17°C, E3 : 25°C). La première colonne indique l'échantillon des individus (G1 : groupe non sensible au froid et/ou G2 : groupe sensible au froid) utilisé pour la prédiction, la deuxième colonne répertorie les variables X utilisées à la base pour la prédiction, la troisième colonne mentionne les variables X retenues pour la prédiction (après élimination des variables dont le VIP>0,8) dans l'ordre décroissant des coefficients de régression (en valeur absolue) et la quatrième colonne indique la qualité de prédiction du modèle.

Groupe analysé	Variables cutanées explicatives	Variables retenues dans le modèle de prédiction du confort thermique	Qualité du modèle
G1+G2	Températures	TJ, TF, TN, TAB, TPO	64,3 %
G1+G2	Températures + Variables « non thermiques »	TF, TJ, $\Delta PUAB_t$, TN, ΔPUJ_t, TAB, TPO, ΔPEJ, ΔCEAB	66,0 %
G1	Températures + Variables « non thermiques »	TJ, TF, $\Delta PUAB_t$, TAB, ΔCEAB, ΔPUJ_t, TN, TPO, Δcrit_O2_J	68,8 %
G2	Températures + Variables « non thermiques »	TF, ΔPUJ_t, TJ, TN, ΔPEJ, TPO, Δcrit_conc_J, Δb*J	70,7 %

La qualité du modèle de prédiction du confort thermique, pour tous les individus (G1+G2), en fonction des températures cutanées locales est de l'ordre de 64,4%. Les températures cutanées locales ont tendance à moins bien expliquer la variabilité du confort thermique que celle de la sensation thermique déclarée. Comme pour la sensation thermique, ce sont les températures du visage qui ont le plus de poids pour la prédiction du confort thermique (cf. Tableau 3.19).

L'utilisation de variables cutanées non thermiques, comme variables prédictives, améliore de 1,7% la prédiction du confort thermique (cf. Tableau 3.19). Les variations individuelles des perfusions sanguines (joues et avant-bras), des pertes en eau des joues et du contenu en eau des avant-bras ainsi que les températures cutanées locales expliquent 66% de la variabilité du confort thermique. L'introduction de certaines propriétés thermiques, vasculaires et hydriques dans les modèles permet donc d'améliorer légèrement la prédiction du confort thermique.

D'autre part, la prise en compte des groupes de sensibilité au froid a permis d'améliorer la prédiction du confort thermique des deux groupes et surtout celle du groupe G2 sensible au froid (G1 : + 2,8% *vs.* G2 : + 4,7%). Les variations des variables cutanées du groupe frileux G2 permettent d'expliquer 70,7% de la variabilité du confort de ce groupe. On peut constater que, pour les deux groupes, les températures cutanées locales TF, TJ, TN, TPO ainsi que la variation individuelle des perfusions sanguines des joues ont été conservées dans le modèle final de prédiction du confort thermique. Cependant, les autres variables non thermiques conservées pour la prédiction du confort thermique du groupe G1 et du groupe G2 sont différentes (cf. Tableau 3.19) :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Pour le groupe G1 : ce sont plutôt les variations individuelles de **variables cutanées mesurées sur les avant-bras** telles que la perfusion sanguine, la température et le contenu en eau qui ont été retenues.
- Pour le groupe G2 : ce sont plutôt des variations individuelles de **variables cutanées mesurées sur les joues** telles que la perte en eau, le critère de concentration en hémoglobine et la coordonnée b* qui ont été retenues. De plus, le poids de la perfusion sanguine des joues est particulièrement important pour la prédiction du confort de ce groupe.

Le confort thermique du groupe G2 semble donc être expliqué en partie par des variables cutanées mesurées sur le visage alors que celui du groupe G1 semble davantage être expliqué à partir de variables cutanées mesurées sur les avant-bras et les joues.

3.6.2.3. Discussion

Les apports d'une approche multiparamétrique et de la prise en compte des groupes de sensibilité au froid sur la prédiction de la sensation thermique et du confort thermique semblent plutôt pertinents.

Tout d'abord, il a pu être constaté que les températures cutanées locales prédisent à elles seules une grande variabilité de la sensation thermique. Cette observation est plutôt en accord avec de nombreuses études sur la caractérisation de la sensation thermique qui ont montré que les températures locales de peau étaient fortement corrélées à la sensation thermique globale (cf. Tableau 1.4 page 61). Cependant, elles prédisent beaucoup moins bien à elles seules le confort thermique déclaré (76,5% vs. 64,3%). D'ailleurs, dans la littérature, la prédiction du confort thermique global est souvent basée sur les sensations thermiques déclarées et non sur les températures locales cutanées.

L'analyse des données de cette expérimentation a pu mettre en évidence que l'approche multiparamétrique est plus bénéfique pour la prédiction du confort thermique que pour la prédiction de la sensation thermique (+0,9% vs. +2,3%). Dans les deux cas, ce sont principalement les variations individuelles des propriétés vasculaires cutanées (perfusions sanguines) et des propriétés hydriques cutanées (contenu en eau des avant-bras et perte en eau des joues) qui permettent d'affiner les prédictions. Ce sont des variables qui dépendent directement des mécanismes de thermorégulation et qui, contrairement aux températures cutanées, ont tendance à se réajuster en permanence lors d'une transition thermique pour faire face à la condition d'homéothermie [Chen, Hwang *et al.* 2011]. La sensation thermique

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

pourrait être considérée comme une variable sensorielle qui dépend plus fortement des variations de l'environnement thermique extérieur que des variations des mécanismes internes. Le confort thermique dépendrait, lui, davantage des mécanismes physiologiques internes. Or, la température cutanée reflète probablement très bien les changements de la température ambiante mais beaucoup moins bien certaines variations des mécanismes physiologiques internes. L'introduction de variables physiologiques reflétant précisément les mécanismes internes telles que la perfusion sanguine pourrait être une bonne stratégie pour améliorer la prédiction du confort thermique. Cependant, même si l'apport des variables cutanées non thermiques est intéressante pour la prédiction du confort thermique, la variabilité du confort expliquée par les différentes variables cutanées reste faible (64,3%). Il faudrait identifier d'autres paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque susceptibles d'améliorer la prédiction.

D'autre part, la prise en compte des groupes de sensibilité au froid est pertinente dans tous les cas mais dans des proportions différentes. La prise en compte des groupes est surtout bénéfique pour la prédiction de la sensation thermique du groupe G1 (+3,2%) et pour la prédiction du confort thermique du groupe G2 (+4,7%). La différence de prédiction entre les deux groupes est plus marquée pour le confort thermique. En effet, le confort thermique du groupe G2 semble être influencé presque exclusivement par les variations des paramètres mesurés sur les joues et plus particulièrement par la perfusion sanguine alors que le confort du groupe G1 semble être influencé aussi par les variations de paramètres mesurés sur les avant-bras (perfusion sanguine, température cutanée, contenu en eau). Cette constatation semble être reliée aux différences physiologiques identifiées entre les deux groupes de sensibilité au froid présentées dans la première partie des résultats.

Il semble donc pertinent de prendre en compte les sensibilités thermiques individuelles et d'adopter une approche multiparamétrique pour la prédiction du confort thermique et plus particulièrement pour les individus frileux (apport total : + 6,4%).

Toutefois, on aurait pu s'attendre à avoir une amélioration plus élevée de la prédiction de la sensation thermique grâce à la prise en compte des groupes de sensibilité au froid. Lors de l'analyse de la sensation thermique déclarée, il avait déjà été constaté que les jugements ne permettaient pas de distinguer clairement les deux groupes G1 et G2. Ceci signifie-t-il que les deux groupes ressentent la même sensation thermique ? Il est probable que ce soit la méthode d'évaluation du ressenti thermique qui ne permette pas de mettre en évidence les différences de ressenti des deux groupes de sensibilité au froid. En effet, la verbalisation du ressenti et la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

notation de l'intensité de la sensation thermique ressentie sont des informations particulièrement relatives qui dépendent du vécu et de l'échelle « interne » de chaque individu. Ces informations sont particulièrement peu fiables pour des données non hédoniques telles que la sensation thermique lorsque le panel est naïf. Elles ne sont donc probablement pas adaptées pour comparer précisément les ressentis de différents individus et pour exposer des différences interindividuelles de ressenti thermique. L'étude de Chen *et al.* souligne aussi les limites des questionnaires sur la sensation thermique pour mettre en évidence des différences de ressentis entre les hommes et les femmes qui présentent des différences significatives au niveau des mécanismes de thermorégulation mais pas au niveau de la sensation thermique déclarée [Chen, Hwang *et al.* 2011]. D'ailleurs, peu d'études sont parvenues à identifier des différences significatives de ressentis déclarés entre deux groupes. Est-ce lié à la fiabilité des données déclaratives ou à une réelle absence de différences au niveau du ressenti thermique ? Le ressenti déclaré semble permettre de distinguer globalement des différences de ressentis entre différents environnements thermiques mais pas entre différents individus. Il faudrait probablement utiliser d'autres méthodes pour mettre en évidence des différences interindividuelles de ressenti thermique et prédire le ressenti des individus. L'une des méthodes envisageables serait d'établir des modèles individuels en confrontant quelques sujets (caractérisés par des sensibilités thermiques très spécifiques) à au moins une quinzaine d'environnements thermiques différents sur plusieurs jours. Ainsi, il serait possible d'identifier des modèles communs à une même catégorie d'individus. L'autre possibilité serait d'effectuer des analyses comportementales de chaque individu pour relier des comportements spécifiques (associés à une sensibilité thermique) à des particularités physiologiques. D'autre part, les sujets inclus dans les expérimentations devraient être caractérisés à la fois par rapport à leur sensibilité au froid et à leur sensibilité au chaud.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CONCLUSION

L'importante campagne de mesures exposée dans ce chapitre a apporté des éléments nouveaux de caractérisation des différences interindividuelles de sensibilité au froid. En effet, il semblerait que les individus sensibles au froid sont dotés d'une microcirculation cutanée au niveau des joues plus active : avec une vasoconstriction plus forte dans les environnements froids et une vasodilatation plus élevée dans les environnements chauds. Cette particularité se répercute sur les autres propriétés cutanées. Ainsi, les propriétés cutanées des joues des individus frileux évoluent davantage en fonction des transitions thermiques que celles des individus non sensibles au froid. Le système sympathique des individus frileux semble donc davantage activé, que celui des individus non frileux, suite à une transition thermique et en particulier suite à une transition froide. Cependant, cette constatation n'est pas vérifiée sur les avant-bras probablement à cause d'un biais de protocole. Il serait donc nécessaire d'effectuer des expérimentations supplémentaires pour affiner la caractérisation.

D'autre part, la prise en compte des groupes de sensibilité au froid et l'utilisation d'une multitude de variables cutanées (thermiques et non thermiques) comme variables prédictives semblent améliorer la prédiction du confort thermique et en particulier pour les individus frileux. La prise en compte de classes d'individus construites sur la sensibilité thermique individuelle apparaît essentielle pour augmenter la performance des modèles.

Ce chapitre met aussi en évidence des éléments en lien avec les protocoles tels que :

- l'efficacité du suivi de l'état de détente des sujets juste avant la phase de mesures. Il serait, à présent, encore plus rigoureux d'utiliser une méthode de suivi qui pourrait être utilisée même pendant la phase de mesures.
- la nécessité de contrôler parfaitement tous les facteurs d'influence dont le positionnement des avant-bras pendant les expérimentations, sans toutefois « stresser » le sujet. La moindre perturbation non identique pour tous les sujets augmente la variabilité des paramètres cutanés et masque l'information recherchée.
- la nécessité de construire des groupes d'individus en prenant en compte à la fois la sensibilité au froid et au chaud.
- les limites de la méthode d'analyse du ressenti thermique à travers les questionnaires pour mettre en évidence des différences interindividuelles de ressenti. Des analyses comportementales individuelles pourraient être plus fastidieuses mais plus fiables.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Conclusions & Perspectives

« La vérité scientifique sera toujours plus belle que les créations de notre imagination et que les illusions de notre imaginaire. »

Claude Bernard

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dans le cadre du grenelle de l'environnement, l'un des principaux enjeux du secteur du bâtiment consiste à proposer des solutions de réduction des émissions de CO_2. Pour ce faire, ces solutions doivent être durables et, par là même, en adéquation avec les attentes et le bien-être des occupants. Caractériser, évaluer et optimiser la qualité des ambiances intérieures et en particulier le ressenti thermique constitue, donc, un axe stratégique de ce secteur. Or, les modèles actuels de prédiction du ressenti thermique ainsi que les solutions visant à améliorer le confort thermique des occupants d'un bâtiment sont souvent insuffisants. L'une des principales raisons de ces insuffisances est le manque d'individualisation, comme mentionné dans l'introduction générale. En effet, les différences interindividuelles de jugement thermo-sensoriel ne sont pas assez prises en compte. Pourtant, ces différences existent, elles font partie intégrante de notre quotidien surtout lorsque l'on partage un espace de vie avec plusieurs individus comme dans les transports, au bureau ou dans les centres commerciaux. Elles sont quotidiennement associées à la sensibilité thermique individuelle. D'ailleurs, le terme « frileux » est couramment utilisé pour définir un individu qui est sensible au froid et qui se plaint de son environnement thermique plus que la majorité des individus.

Ces travaux de thèse ont pour objectif de caractériser davantage ces différences interindividuelles de jugement thermo-sensoriel en identifiant leurs causes physiologiques à travers des expérimentations multiparamétriques. L'hypothèse de travail consiste à supposer que l'exploration des propriétés de la peau, qui constitue la première interface vivante entre l'homme et l'environnement, permettra de mieux comprendre ces différences interindividuelles. Il a été choisi de se focaliser sur l'impact physiologique et sensoriel d'une exposition d'au moins trente minutes à des environnements de températures modérées (minimum : 17°C et maximum : 30°C). Ainsi, dans chacune des expérimentations réalisées, les mesures cutanées et sensorielles ont été effectuées 30 minutes après une transition thermique (chaude ou froide).

Les 2 expérimentations préliminaires ainsi que l'importante campagne de mesures, menées chacune sur une douzaine de volontaires, ont apporté plusieurs contributions à l'étude des différences interindividuelles de jugement thermo-sensoriel. Ces contributions peuvent se diviser en 3 volets qui seront développés dans la suite :

- la méthodologie expérimentale,
- la caractérisation physiologique cutanée,
- l'intérêt prédictif.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Apports et perspectives d'amélioration pour la méthodologie expérimentale

Contrairement au domaine de l'agroalimentaire, il existe peu de recommandations et de normes pour l'analyse sensorielle ou pour les expérimentations psychophysiologiques dans le domaine du confort thermique. Pourtant, le goût et le ressenti thermique sont des notions sensorielles très délicates à évaluer qui nécessitent probablement le même degré de précautions dans l'analyse.

L'étude bibliographique détaillée dans le premier chapitre a mis en évidence l'importance de maîtriser un grand nombre de facteurs d'influence individuels (âge, ethnicité, santé, etc.) et environnementaux (humidité relative, vitesse d'air, bruit, etc.) pour caractériser des différences liées à la sensibilité thermique individuelle et non à un autre facteur. Toutefois, dans les expérimentations préliminaires (chapitre 2), des compromis ont dû être faits sur les critères de sélection des volontaires (tels que le tabagisme et le sexe) et sur le choix des espaces de mesures face aux contraintes de coûts et aux moyens mis à disposition. Les résultats ont alors prouvé qu'il n'était pas envisageable de caractériser finement les différences interindividuelles de ressenti thermique sans **prendre en compte le tabagisme** (qui modifient les propriétés thermiques) des volontaires et sans **maîtriser les facteurs « non thermiques » des environnements** tels que le bruit.

Malgré les nombreuses précautions prises dans la campagne de mesures exposée dans le chapitre 3, les résultats obtenus sur les avant-bras montrent que la moindre différence de comportement des sujets tels que **le positionnement des avant-bras** peut se répercuter sur les mesures cutanées et engendrer des évolutions difficiles à exploiter voire impossible à analyser. Le contrôle du comportement des sujets est donc apparu indispensable pour identifier des différences physiologiques cutanées entre deux groupes.

Les résultats du chapitre 2 ont également souligné la nécessité de **réduire la réactivité émotionnelle des sujets** car cette réactivité est susceptible d'augmenter ponctuellement le niveau de certaines variables physiologiques telles que la perte en eau et de fausser les interprétations. Or, il est admis que des individus détendus ont un niveau d'activation de leur système nerveux autonome beaucoup plus faible. Nous avons donc choisi de débuter la phase de mesures (dans la campagne de mesures du chapitre 3) uniquement lorsque les sujets apparaissaient objectivement relaxés. Les résultats ont alors démontré que le suivi objectif de l'état de détente des sujets avec la mesure en continu de la résistance électrodermale pendant les dix minutes qui précèdent la phase de mesures est efficace puisqu'aucune mesure extrême ponctuelle n'a été relevée sur les variables telles que la perte en eau.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

La **pertinence de l'évaluation de la sensation thermique et du confort thermique** effectuée à travers des questionnaires (inspirés de la norme ISO 10551) a été discutée à plusieurs reprises au cours de ces travaux de thèse. Il semblerait que les informations recueillies soient relatives à chaque individu. Elles permettent, globalement, d'identifier des différences significatives de ressenti suivant les environnements thermiques ; mais elles ne permettent pas d'identifier des différences interindividuelles de ressenti au sein d'un même environnement surtout après des transitions thermiques. Lors de la campagne de mesures, nous avons choisi de faciliter les déclarations de jugement thermo-sensoriel en permettant aux sujets de pouvoir **comparer leur ressenti par rapport aux environnements précédents** grâce à la confrontation, dans une même journée, à 6 environnements et grâce aux questionnaires qui permettaient de positionner chaque jugement par rapport aux jugements précédents. Nous supposons que cette méthode a amélioré la pertinence de l'évaluation et qu'elle a été suffisante pour une première approche exploratoire. Cependant, la comparaison des jugements entre les sujets reste limitée. Il pourrait alors être envisagé d'établir des **analyses sensorielles et physiologiques individuelles** sur une dizaine d'individus avec davantage d'environnements et avec des expérimentations qui se déroulent sur plusieurs jours pour un même sujet afin de dégager des profils physiologiques et sensoriels individuels. On comparerait alors les profils ou les modèles individuels. Il serait également envisageable de se détacher des jugements déclarés et de se baser sur des **analyses comportementales** pour identifier des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel qui ne soient pas biaisées par la verbalisation du ressenti. Cependant, cette démarche est beaucoup plus fastidieuse et nécessite un apprentissage important du comportement de chaque individu pour réussir à relier correctement des différences de comportement à des différences de ressenti.

D'autre part, le **choix du critère de construction des groupes d'individus** (présentant des ressentis thermiques spécifiques) a fait l'objet de plusieurs réflexions au cours de ce manuscrit et correspond à un élément clé de la méthodologie de caractérisation des différences interindividuelles du ressenti thermique. L'analyse bibliographique montre que la température préférée et la température de thermoneutralité (associée à la sensation de « ni chaud, ni froid ») des sujets ont déjà été utilisées dans la littérature pour analyser des différences interindividuelles de confort thermique. Cependant, ces deux critères ne permettent pas de construire des groupes de sensibilité thermique spécifique puisque deux individus peuvent avoir la même température de thermoneutralité et/ou préférer la même température ambiante alors qu'ils n'ont pas les mêmes sensibilités au chaud et/ou au froid. Or,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

les problèmes quotidiens associés au confort thermique sont souvent reliés à la sensibilité au froid ou au chaud des individus. Nous avons donc choisi de **créer des classes d'individus par rapport à la sensibilité thermique individuelle**. Les groupes du deuxième chapitre ont été construits à partir des sensations thermiques déclarées dans l'environnement frais à 20°C. Cependant, du fait des limites des jugements déclarés exposées dans le paragraphe précédent et de la régulation imparfaite des températures des environnements, cette méthode n'a pas été retenue dans le dernier chapitre. En effet, il est apparu plus judicieux de construire des groupes de sensibilité au froid à partir de **questionnaires basés sur des habitudes de vie** qui reflètent le degré de frilosité des individus. Cette méthode présente les avantages de ne pas nécessiter d'expérimentations supplémentaires et de visualiser immédiatement le type d'individus analysé. Une construction des groupes à la fois par rapport au degré de frilosité et au degré de résistance à la chaleur des individus permettrait d'affiner cette approche.

Le **traitement statistique des donnés** a également été une étape importante. Ces travaux de thèse ont permis de souligner l'importance d'analyser les **sens de variation** des variables cutanées en plus des niveaux de ces variables pour mettre en évidence des différences physiologiques entre les groupes. Il est aussi apparu pertinent d'étudier des **variations individuelles** (variations par rapport à un niveau moyen calculé pour chaque individu) lorsque les paramètres analysés présentent une forte variabilité interindividuelle. La puissance des traitements statistiques des expérimentations présentées dans ce manuscrit reste, cependant, critiquable à cause du faible nombre d'individus présents dans chacun des groupes de sensibilité au froid. Mais, pour une première approche exploratoire visant à mettre en évidence des premières tendances, elle s'est avérée suffisante. Il serait nécessaire, à l'avenir, d'effectuer une analyse statistique similaire avec davantage d'individus dans chaque groupe mais surtout avec des groupes construits et caractérisés encore plus finement. Ce n'est probablement pas seulement le nombre mais aussi la qualité de la sélection des individus qui améliorera la pertinence et la portée des résultats obtenus.

Apports et perspectives sur la caractérisation physiologique cutanée

Tout d'abord, l'analyse bibliographique du premier chapitre a permis de dégager 3 catégories de paramètres cutanés susceptibles d'être reliées aux différences interindividuelles de sensibilité au froid :

- Les **seuils locaux de perception du froid et du chaud** : les sensibilités thermiques locales et globales sont-elles liées ?

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Les **paramètres cutanés thermo-vasculaires** liés aux mécanismes de thermorégulation : les sensibilités thermiques individuelles peuvent-elles être expliquées par des différences au niveau des mécanismes de thermorégulation ?
- Les **paramètres du film hydrolipidique cutané et liés à la barrière du stratum corneum** : les sensibilités thermiques individuelles sont-elles associées à des propriétés spécifiques de la barrière cutanée? Ces propriétés cutanées varieront-elles suffisamment rapidement pour permettre d'identifier des différences entre les groupes ?

Les expérimentations préliminaires du chapitre 2 ont permis d'analyser ces trois catégories de paramètres. Elles ont montré que l'étude de l'activité neurosensorielle ne permet pas de caractériser les différences interindividuelles de jugement thermo-sensoriel. En effet, les seuils de perception au chaud et au froid ne sont pas apparus significativement différents entre les deux groupes présentant une sensibilité au froid spécifique. **L'hypothèse selon laquelle les différences interindividuelles de sensibilité thermique locale pourraient expliquer les différences de sensibilité globale au froid n'a donc pas été validée**. Cependant, l'étude des propriétés thermo-vasculaires et hydriques de la peau est apparue plus judicieuse pour caractériser les différences interindividuelles de ressenti thermique. Contrairement au groupe « non sensible au froid », certaines variables du groupe « sensible au froid », telles que les températures cutanées, les coordonnées colorimétriques L*a*b*, les contenus en eau et les pertes en eau, ont eu tendance à varier davantage avec les transitions thermiques et en particulier avec la forte transition (20°C→30°C). Les mécanismes de thermorégulation de ce groupe ont été probablement plus intenses que ceux du groupe non sensible au froid. Cependant comme la majorité des sujets du groupe « non sensible au froid » sont fumeurs, il n'a pas été possible d'attribuer cette particularité physiologique uniquement à la sensibilité thermique des individus.

Ces premières tendances nous ont encouragés à explorer plus en détails les propriétés cutanées en lien direct avec les mécanismes de thermorégulation à partir d'un panel de sujets rigoureusement sélectionné. Ainsi, la campagne de mesure exposée dans le chapitre 3 s'est concentrée sur l'analyse des propriétés thermo-vasculaires (perfusion sanguine, coordonnées L*a*b*, spectres de réflectance), des propriétés du film hydrolipidique cutané (perte en eau, contenu en eau, quantité des éléments du facteur naturel d'hydratation, quantité de lipides surfaciques) et de la barrière du stratum corneum (intégrité/cohésion du stratum corneum, capacité de récupération après une perturbation mécanique). Les premières tendances ont

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

alors été confirmées. Les individus « frileux » ont pu être caractérisés par les spécificités physiologiques suivantes :

- Une activité de la **microcirculation des joues significativement plus intense** que celles des individus qui ne sont pas sensibles au froid : avec une vasoconstriction plus forte (perfusion sanguine plus faible) dans les environnements froids ou frais et une vasodilatation plus forte (perfusion sanguine plus élevée) dans les environnements chauds.
- Des **propriétés colorimétriques** (a*), en relation avec le rendu visuel, et des particularités sur la forme des **spectres de réflectance des joues** (en particulier sur le critère qui représente la concentration en hémoglobine c'est-à-dire : l'amplitude du facteur de réflectance entre la zone 540-580 nm et la zone autour de 700 nm) qui **changent après la forte transition froide** (22°C→17°C), en accord avec le faible débit sanguin observé pour ce groupe à 17°C.
- Des **pertes en eau** qui sont significativement **différentes dans les deux environnements à 25°C**. Même après 30 minutes d'acclimatation, les pertes en eau de ce groupe sont influencées par la température de l'environnement précédent et en particulier par celui à 17°C, probablement à cause de la forte vasoconstriction à 17°C.
- Des contenus en eau qui ne changent pas après la transition la plus froide et des variations individuelles de contenu en eau significativement plus faible à 22°C et 25°C que celles du groupe non sensible au froid.
- Une quantité des lipides surfaciques au niveau du front qui a tendance à varier en fonction des mécanismes de thermorégulation.
- Des variations individuelles de perte d'intégrité du stratum corneum et du taux de récupération de la barrière cutanée des avant-bras qui ont tendance à varier avec les variables reliées directement aux mécanismes de thermorégulation.

Les résultats sur les autres mesures effectuées sur les avant-bras n'ont pas pu être analysés précisément à cause d'un biais de protocole sur le positionnement des avant-bras. Toutefois, tout ceci nous a permis de conclure que les individus frileux ont probablement une **activation plus forte de leur système nerveux sympathique** que les individus non frileux et que cette forte activation se répercute sur les propriétés de leur barrière cutanée. Globalement, **l'hypothèse selon laquelle l'analyse des propriétés cutanées nous permettrait de caractériser les différences interindividuelles de jugement thermo-sensoriel est donc validée** surtout quand l'analyse porte sur les propriétés des joues et que tous les facteurs

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

d'influence des expérimentations sont contrôlés. Le visage est apparue comme une zone stratégique pour ce type d'analyse.

Cependant, il serait intéressant d'affiner la caractérisation physiologique des différences interindividuelles de jugement thermo-sensoriel en construisant des **groupes de sensibilité thermique plus complets** et en effectuant des **mesures cutanées** (vasculaires et hydriques) **en continu,** c'est-à-dire au moment de la transition et jusqu'à 3 heures après. Ainsi, il serait possible d'établir si la dynamique des variables cutanées et si les seuils de déclenchement des réponses thermorégulatrices des groupes de sensibilité thermique sont différents. Pour cela, des dispositifs tels que l'Hématron[27], capables de mesurer l'activité microcirculatoire en continu et de façon ambulatoire, pourraient être utilisés. D'autres mesures qui ciblent l'activité du système nerveux autonome telles que la fréquence cardiaque pourraient aussi nous fournir des informations complémentaires.

La caractérisation physiologique cutanée a également permis d'enrichir notre connaissance sur les évolutions de certaines propriétés de la peau saine en fonction des températures ambiantes modérées :

- Certains paramètres du film hydrolipidique tels que le pH, la quantité de certains éléments du facteur naturel d'hydratation (acide aminé libre, acide urocanique, acide pyroglutamique) ne varient pas après les transitions thermiques (en moins d'une heure et avec des températures ambiantes modérées).
- Les pertes d'intégrité et de cohésion du stratum corneum varient très peu en fonction des environnements thermiques modérés. Elles semblent être modifiées pour certains individus uniquement après une forte transition froide.
- Les contenus en eau varient plus fréquemment après une transition chaude qu'après une transition froide.
- La quantité des lipides surfaciques ne semble pas être modifiée par les transitions froides mais plutôt par les transitions chaudes.

L'utilisation d'un grand nombre de mesures cutanées lors des expérimentations a également permis de souligner quelques points essentiels sur certaines mesures cutanées :

[27] Capteur développé par l'équipe Capteurs Biomédicaux de l'INSA de Lyon. Il mesure une conductivité thermique efficace. Se référer à la thèse de Dareen Toumi pour plus d'informations : *Toumi D. conception et réalisation d'un système électronique ambulatoire pour l'évaluation de la microcirculation cutanée. Thèse Ecole doctorale EEA. Lyon: INSA, 2012*

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Les coordonnées colorimétriques L*a*b* des joues et surtout la forme des spectres de réflectance des joues obtenues à l'aide d'un spectrocolorimètre nous donnent accès facilement à des informations pertinentes sur l'activité microcirculatoire cutanée. Toutefois, ces informations restent moins précises que celles obtenues avec un imageur laser Doppler.
- La pertinence de l'évaluation de la quantité de lipides à la surface du stratum corneum à l'aide du sébumètre dans les environnements chauds est discutable : la présence de sueur à la surface du stratum corneum ou la température de peau a pu modifier le pouvoir d'absorption de la bande de mesure et la mesure elle-même. Des évaluations complémentaires seraient nécessaires pour identifier clairement les limites de cette mesure.

Intérêts et perspectives pour la prédiction de la sensation et du confort thermique

Les régressions PLS des moindres carrés partiels, utilisées à partir des données de la campagne de mesures du chapitre 3, ont mis en évidence **l'intérêt de prendre en compte les sensibilités thermiques individuelles à travers une approche multiparamétrique pour prédire plus finement la sensation et le confort thermique.** L'introduction de variables cutanées pertinentes telles que les températures cutanées locales et les variations individuelles des perfusions sanguines, des pertes en eau, des variables colorimétriques ainsi que la prise en compte de la sensibilité thermique des individus améliorent la prédiction du confort thermique et surtout celui du groupe frileux. Il semble pertinent d'intégrer la sensibilité au froid des individus pour créer des modèles physiologiques puisque les mécanismes de thermorégulation semblent bien différents entre les individus frileux et non frileux. Mais, il semble aussi nécessaire de prendre en compte ce critère de « frilosité » pour créer des modèles de ressenti thermique puisque les relations entre les variables physiologiques et sensorielles sont différentes suivant le groupe de sensibilité au froid. Par exemple, le confort thermique des individus frileux semble pouvoir être prédit à partir des propriétés des joues alors que celui des non frileux semble pouvoir être prédit à partir de variables cutanées mesurées sur les joues et les avant-bras. De plus, la prédiction pourrait être encore plus performante en prenant en compte à la fois la sensibilité au froid et au chaud des individus.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Ces travaux de thèse mettent donc en évidence une **nouvelle stratégie pour répondre aux différentes problématiques en lien avec le ressenti thermique**. Elle consiste à placer « l'humain » au cœur de la démarche. En d'autres termes, elle vise à mieux comprendre les réactions physiologiques de l'Homme et à prendre en compte les différences interindividuelles telles que la sensibilité thermique. Les solutions d'optimisation du confort thermique dans les « open space » (sans zone individuelle et avec zones individuelles), par exemple, ne seraient-elles pas finalement **des solutions individuelles adaptées à la physiologie de chacun** ?

Des démarches d'individualisation commencent, d'ailleurs, à être mises en œuvre dans des bâtiments appelés « Green Buildings » [Rutgers 2011]. Les différents espaces de ces bâtiments sont divisés en zones individuelles et régulés thermiquement en fonction de chaque occupant par des modèles thermiques locaux, par un apprentissage de la température préférée individuelle, ou encore par un apprentissage comportemental (actions individuelles de régulation, détecteur de présence) [Maaijen, Zeiler *et al.* 2012]. Cependant, ces méthodes de régulation ne prennent pas en compte la physiologique humaine. Pourtant, d'après nos résultats, celle-ci pourrait apporter une information très riche pour l'individualisation des systèmes. L'introduction de mesures cutanées sur le visage (sans contact) permettrait d'affiner ce type de régulation individuelle.

D'autre part, lorsque les espaces de vie ne peuvent pas être divisés en fonction de chaque individu, il n'est évidemment pas possible d'ajuster les conditions ambiantes intérieures à chacun d'entre nous mais il faudrait essayer de concevoir des environnements qui conviennent à la majorité des individus tout en proposant des solutions individuelles (autres que la régulation de la température ambiante) aux occupants qui ne parviendraient pas à atteindre un état de confort dans ces environnements, malgré leur capacité d'adaptation. Ces solutions individuelles pourraient être de types **vestimentaires** et même **cosmétiques**. Des crèmes pourraient, par exemple, constituer un film protecteur qui modifierait les transferts de chaleurs et qui permettrait à chaque individu d'atteindre plus facilement un « bien-être thermique » dans des environnements frais ou froids. Tout comme il existe des gammes de produits destinées spécifiquement aux hommes et aux femmes, il pourrait être judicieux de **créer des gammes de produits spécialisés pour les individus frileux**. En effet, ces travaux de thèse ont montré que les individus frileux n'ont pas les mêmes réactions physiologiques et donc pas les mêmes besoins thermiques que les individus non sensibles au froid. Plus précisément, les individus frileux semblent avoir des mécanismes de thermorégulation plus

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

prononcés que les individus non frileux après les transitions thermiques. **Serait-il envisageable d'agir sur ces mécanismes de thermorégulation avec des produits spécifiques (tels qu'une crème qui agit sur la microcirculation) pour réduire leurs actions et ainsi réduire l'inconfort ?** Les mécanismes de thermorégulation plus actifs chez les frileux correspondent-ils à un besoin physiologique indispensable ou à un disfonctionnement physiologique ? L'inconfort ressenti par les frileux est-il provoqué par une activation trop importante des mécanismes de thermorégulation (et du système nerveux sympathique) ou par un autre phénomène connexe ? Un grand nombre de questions reste encore en suspens mais **plus nous maitriserons la physiologie des individus frileux et plus nous pourrons proposer des solutions adéquates qui respectent à la fois l'humain et l'environnement** et qui répondent réellement à la question du confort qui est une notion particulièrement subjective et individuelle. Le secteur du bâtiment a donc tout intérêt à développer des partenariats avec le secteur des cosmétiques et du textile ainsi qu'à persévérer dans une approche multidisciplinaire pour trouver des solutions adaptées à l'optimisation du confort thermique dans les bâtiments.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Références bibliographiques

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[ADEME 2012], ADEME. Chiffres clés du bâtiment. Disponible sur: http://www2.ademe.fr. (consulté le 04/05/2012)

[AFNOR 2001], AFNOR. Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs. NF EN ISO10551, 2001.

[AFNOR 2002], AFNOR. Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de mesure des grandeurs physiques. NF EN ISO 7726, 2002.

[AFNOR 2005a], AFNOR. Ergonomie de l'environnement thermique - Détermination du métabolisme énergétique. NF EN ISO 8996, 2005a.

[AFNOR 2005b], AFNOR. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique. NF EN ISO 7933, 2005b.

[AFNOR 2006], AFNOR. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. NF EN ISO 7730, 2006.

[AFNOR 2007], AFNOR. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire. NF EN ISO 9920, 2007.

[Agache P. 2000a], Agache P. Exploration fonctionnelle sébacée. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles de la peau: Editions médicales internationales, 2000a, pp. 273 - 282.

[Agache P. 2000b], Agache P. Fonction sébacée. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Ed. médicales internationales, 2000b, pp. 263 - 272.

[Agache P. 2000c], Agache P. Mesure de l'acidité de la surface cutanée. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions médicales internationales, 2000c, pp. 89 - 91.

[Agache P. 2000d], Agache P. Mesure de la couleur de la peau. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions Médicales Internationales, 2000d, pp. 33-40.

[Agache P. 2000e], Agache P. Photopléthysmographie. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions Médicales Internationales, 2000e, pp. 337 - 343.

[Agache P. 2000f], Agache P. Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions Médicales internationales, 2000f.

[Agache P. 2000g], Agache P. Pression d'oxygène transcutanée. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions Médicales Internationales, 2000g, pp. 365-372.

[Agache P. 2000h], Agache P. Thermométrie et thermographie cutanée. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées Editions Médicales internationales, 2000h, pp. 357 - 363.

[Agache P. 2003], Agache P. La peau sèche : essai de caractérisation. In: La peau sèche de l'atopique (hors eczéma atopique): Les entretiens du Carla, 2003.

[Agache P. 2004a], Agache P. Assessment of erythema and pallor. In: Measuring the skin: Springer, 2004a.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Agache P. et Candas V. 1999], Agache P. et Candas V. Physiologie de la sécrétion sudorale eccrine. In: Encyclopédie médico-chirurgicale Paris: Elsevier, 1999, p. 5.

[Agache P. et Candas V. 2000a], Agache P. et Candas V. Appareil sudoral eccrine. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Ed. médicales internationales, 2000a, pp. 299 - 307.

[Agache P. et Candas V. 2000b], Agache P. et Candas V. Exploration fonctionnelle sudorale. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées, 2000b, pp. 311 - 326.

[Agache P. G. 2004b], Agache P. G. Thermometry and remote thermography. In: Measuring the Skin: Springer, 2004b, p. 357.

[Agache P. G. et Dupond A. S. 1994], Agache P. G. et Dupond A. S. Recent advances in non-invasive assessment of human skin blood flow. *Acta Derm Venereol Suppl (Stockh)*, 1994, vol. 185, pp. 47-51.

[Altemus M., Rao B., *et al.* 2001], Altemus M., Rao B., *et al.* Stress-Induced Changes in Skin Barrier Function in Healthy Women. 2001, vol. 117, n° 2, pp. 309-317.

[Anderson G. S. 1999], Anderson G. S. Human morphology and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 1999, vol. 43, n° 3, pp. 99-109.

[Arens E., Zhang H., *et al.* 2006], Arens E., Zhang H., *et al.* Partial- and whole-body thermal sensation and comfort - Part I: Uniform environmental conditions. *Journal of Thermal Biology*, 2006, vol. 31, n° 1-2, pp. 53-59.

[Arens E. A. et Zhang H. 2006], Arens E. A. et Zhang H. The Skin's Role in Human Thermoregulation and Comfort. In: Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials Berkeley, USA: Woodhead publishing, 2006, pp. 560-602.

[Ashida Y., Ogo M., *et al.* 2001], Ashida Y., Ogo M., *et al.* Epidermal interleukin-1α generation is amplified at low humidity: implications for the pathogenesis of inflammatory dermatoses. *British Journal of Dermatology*, 2001, vol. 144, n° 2, pp. 238-243.

[Astner S. et Anderson R. R. 2004], Astner S. et Anderson R. R. Skin Phototypes 2003. *J Investig Dermatol*, 2004, vol. 122, n° 2.

[Attia M. et Engel P. 1982], Attia M. et Engel P. Thermal pleasantness sensation: an indicator of thermal stress. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1982, vol. 50, n° 1, pp. 55-70.

[Avery M. R., Voegeli D., *et al.* 2009], Avery M. R., Voegeli D., *et al.* Age and Cigarette Smoking are Independently Associated with the Cutaneous Vascular Response to Local Warming. *Microcirculation*, 2009, vol. 16, n° 8, pp. 725-734.

[Bagot J. D. 1999], Bagot J. D. Information, sensation et perception. Paris: Armand Colin, 1999.

[Baran R. et Maibach H. I. 2005], Baran R. et Maibach H. I. Textbook of cosmetic dermatology: Taylor & Francis, 2005.

[Barel A. O. 2003], Barel A. O. Intéret de l'ingénierie cutanée pour explorer la peau sèche, le point de vue cosmétique. In: Actualités en ingénierie cutanée: Ed. ESKA, 2003.

[Barel A. O. et Clarys P. 1997], Barel A. O. et Clarys P. In vitro calibration of the capacitance method (Corneometer CM 825) and conductance method (Skicon-200) for

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

the evaluation of the hydration state of the skin. *Skin Research and Technology*, 1997, vol. 3, n° 2, pp. 107-113.

[Bear M. F., Connors B. W., *et al.* 2006], Bear M. F., Connors B. W., *et al.* Neurosciences à la découverte du cerveau. 3ème édition: Editions Pradel, 2006.

[Benzinger T. H. 1969], Benzinger T. H. Heat regulation: homeostasis of central temperature in man. *Physiological Reviews*, 1969, vol. 49, n° 4, pp. 671-759.

[Berardesca E. et EEMCO 1997], Berardesca E. et EEMCO. EEMCO guidance for the assessment of stratum corneum hydration: electrical methods. *Skin Research and Technology*, 1997, vol. 3, n° 2, pp. 126-132.

[Berardesca E., Lévêque J. L., *et al.* 2002], Berardesca E., Lévêque J. L., *et al.* EEMCO Guidance for the Measurement of Skin Microcirculation. *Skin Pharmacology and Physiology*, 2002, vol. 15, n° 6, pp. 442-456.

[Berardesca E. et Maibach H. 2003], Berardesca E. et Maibach H. Ethnic skin: Overview of structure and function. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2003, vol. 48, n° 6, Supplement, pp. S139-S142.

[Bernard B. A. et Saint-Léger D. 2009], Bernard B. A. et Saint-Léger D. Sécrétion sébacée. In: Traité EMC : cosmétologie et dermatologie esthétique: Elsevier, 2009.

[Bernard C. 1966], Bernard C. Introduction à l'étude de la médecine expérimentale, 1966.

[Bernengo J.-C. et de Rigal J. 2000], Bernengo J.-C. et de Rigal J. Techniques physiques de mesure de l'hydratation du stratum corneum in vivo. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions médicales internationales, 2000, pp. 117 - 162.

[Besne I., Descombes C., *et al.* 2002], Besne I., Descombes C., *et al.* Effect of Age and Anatomical Site on Density of Sensory Innervation in Human Epidermis. *Arch Dermatol*, 2002, vol. 138, n° 11, pp. 1445-1450.

[Bicego K. C., Barros R. C., *et al.* 2007], Bicego K. C., Barros R. C., *et al.* Physiology of temperature regulation: comparative aspects. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 2007, vol. 147, n° 3, pp. 616-639.

[Binet L. 1952], Binet L. Esquisses et notes de travail inédites de Claude Bernard, recueillies et commentées par Léon Binet. Masson et Cie. Paris, 1952, 111 p.

[Bircher A., De Boer E. M., *et al.* 1994], Bircher A., De Boer E. M., *et al.* Guidelines for measurement of cutaneous blood flow by laser Doppler flowmetry : a report from the standardization group of the European Society of Contact Dermatitis. Oxford, Royaume-uni: Blackwell, 1994.

[Bittel J. et Henane R. 1975], Bittel J. et Henane R. Comparison of thermal exchanges in men and women under neutral and hot conditions. *The Journal of Physiology*, 1975, vol. 250, n° 3, pp. 475-489.

[Biver-Dalle C. et Humbert P. 2010], Biver-Dalle C. et Humbert P. Tabac et peau. Paris, FRANCE: Masson, 2010.

[Boucsein W. 1992], Boucsein W. Electrodermal activity. New York: Plenum Press, 1992.

[Boulais N. et Misery L. 2008], Boulais N. et Misery L. The epidermis: a sensory tissue. *Eur J Dermatol*, 2008, vol. 18, n° 2, pp. 119-127.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Breternitz M., Flach M., *et al.* 2007], Breternitz M., Flach M., *et al.* Acute barrier disruption by adhesive tapes is influenced by pressure, time and anatomical location: integrity and cohesion assessed by sequential tape stripping; a randomized, controlled study. *British Journal of Dermatology*, 2007, vol. 156, n° 2, pp. 231-240.

[Briers J. D. 2001], Briers J. D. Laser Doppler, speckle and related techniques for blood perfusion mapping and imaging. *Physiological Measurement*, 2001, vol. 22, n° 4, pp. R35-66.

[Butcher E. O. et Coonin A. 1949], Butcher E. O. et Coonin A. The Physical Properties of Human Sebum. *The Journal of investigative dermatology*, 1949, vol. 12, n° 4, pp. 249-254.

[Cabanac M. 1981], Cabanac M. physiological signals for thermal comfort. In: Bioengineering, thermal physiology and comfort: Elsevier scientific publishing company, 1981, pp. 181 - 192.

[Cabanac M. 1993], Cabanac M. Selective brain cooling in humans: "fancy" or fact? *The FASEB Journal*, 1993, vol. 7, n° 12, pp. 1143-1146.

[Cabanac M. 2003], Cabanac M. La cinquième influence ou la dialectique du plaisir. Saint-Nicolas (Québec): Presses de l'université de Laval, 2003, 287 p.

[Cabanac M. et Caputa M. 1979], Cabanac M. et Caputa M. Natural selective cooling of the human brain: evidence of its occurrence and magnitude. *The Journal of Physiology*, 1979, vol. 286, n° 1, pp. 255-264.

[Callister R., Suwarno N. O., *et al.* 1992], Callister R., Suwarno N. O., *et al.* Sympathetic activity is influenced by task difficulty and stress perception during mental challenge in humans. *The Journal of Physiology*, 1992, vol. 454, n° 1, pp. 373-387.

[Candas V. 2000], Candas V. Confort thermique. Paris, FRANCE: Techniques de l'ingénieur, 2000.

[Candas V. et Dufour A. 2005], Candas V. et Dufour A. Thermal comfort: multisensory interactions? *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 2005, vol. 24, n° 1, pp. 33-36.

[Candas V., Libert J., *et al.* 1983], Candas V., Libert J., *et al.* Sweating and sweat decline of resting men in hot humid environments. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1983, vol. 50, n° 2, pp. 223-234.

[Carpentier P. H. 2000], Carpentier P. H. Capillaroscopie cutanée. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions Médicales Internationales, 2000, pp. 373-381.

[Caspers P. J., Lucassen G. W., *et al.* 2001], Caspers P. J., Lucassen G. W., *et al.* In Vivo Confocal Raman Microspectroscopy of the Skin: Noninvasive Determination of Molecular Concentration Profiles. 2001, vol. 116, n° 3, pp. 434-442.

[Cena K. et de Dear R. 2001], Cena K. et de Dear R. Thermal comfort and behavioural strategies in office buildings located in a hot-arid climate. *Journal of Thermal Biology*, 2001, vol. 26, n° 4-5, pp. 409-414.

[Changizi M. A., Zhang Q., *et al.* 2006], Changizi M. A., Zhang Q., *et al.* Bare skin, blood and the evolution of primate colour vision. *Biology letters*, 2006, vol. 2, n° 2, p. 5.

[Charkoudian N. 2003], Charkoudian N. Skin Blood Flow in Adult Human Thermoregulation: How It Works, When It Does Not, and Why. *Mayo Clinic Proceedings*, 2003, vol. 78, n° 5, pp. 603-612.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Charles K. E. 2003], Charles K. E. Fanger's Thermal Comfort and Draught Models. 2003.

[Chen C.-P., Hwang R.-L., *et al.* 2011], Chen C.-P., Hwang R.-L., *et al.* Effects of temperature steps on human skin physiology and thermal sensation response. *Building and Environment*, 2011, vol. 46, n° 11, pp. 2387-2397.

[Cheng Y., Niu J., *et al.* 2011], Cheng Y., Niu J., *et al.* Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*, 2011, vol. In Press, Corrected Proof.

[Choi E. H., Man M.-Q., *et al.* 2005], Choi E. H., Man M.-Q., *et al.* Is Endogenous Glycerol a Determinant of Stratum Corneum Hydration in Humans? *J Investig Dermatol*, 2005, vol. 125, n° 2, pp. 288-293.

[Choi J., Aziz A., *et al.* 2010], Choi J., Aziz A., *et al.* Investigation on the impacts of different genders and ages on satisfaction with thermal environments in office buildings. *Building and Environment*, 2010, vol. 45, n° 6, pp. 1529-1535.

[Chong P. S. T. et Cros D. P. 2004], Chong P. S. T. et Cros D. P. Technology literature review: Quantitative sensory testing. *Muscle & Nerve*, 2004, vol. 29, n° 5, pp. 734-747.

[Chung M.-K., Lee H., *et al.* 2003], Chung M.-K., Lee H., *et al.* Warm Temperatures Activate TRPV4 in Mouse 308 Keratinocytes. *Journal of Biological Chemistry*, 2003, vol. 278, n° 34, pp. 32037-32046.

[Chung T. M. et Tong W. C. 1990], Chung T. M. et Tong W. C. Thermal comfort study of young Chinese people in Hong Kong. *Building and Environment*, 1990, vol. 25, n° 4, pp. 317-328.

[Clarion A., Ramon C., *et al.* 2009], Clarion A., Ramon C., *et al.* An integrated device to evaluate a driver's functional state. *Behavior Research Methods*, 2009, vol. 41, n° 3, pp. 882-888.

[Clark J. A., McArthur J. C., *et al.* 1981], Clark J. A., McArthur J. C., *et al.* The physics of the microclimate. In: Bioengineering, thermal physiology and comfort: Elsevier, 1981, pp. 13 - 27.

[Coudane F. 2009], Coudane F. Fonction et régulation des peptidyl-arginine désiminases dans l'épiderme et au cours de la cicatrisation cutanée. Thèse Biologie Santé Biotechnologies. Toulouse: Université Paul Sabatier, 2009.

[Cravello B. et Ferri A. 2008], Cravello B. et Ferri A. Relationships between skin properties and environmental parameters. *Skin Research and Technology*, 2008, vol. 14, n° 2, pp. 180-186.

[Crickx B. 2005], Crickx B. Comprendre la peau. *Annales de Dermatologie et de Venereologie*, 2005, vol. 132, n° 11, Part 2, p. 3.

[CSTB 2012], CSTB. L'essentiel 2011 - Rapport d'activité. Marne-la-vallée: CSTB, 2012, 72 p.

[Damann N., Voets T., *et al.* 2008], Damann N., Voets T., *et al.* TRPs in our senses. *Current Biology*, 2008, vol. 18, n° 18, pp. R880-889.

[Darlenski R., Sassning S., *et al.* 2009], Darlenski R., Sassning S., *et al.* Non-invasive in vivo methods for investigation of the skin barrier physical properties. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2009, vol. 72, n° 2, pp. 295-303.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Davey S., Reilly T., *et al.* 2007], Davey S., Reilly T., *et al.* The reproducibility and validity of visual analogue scales (VAS) that assess thermal perceptions in stable and dynamic, asymmetric environments. *In: International Conference on Environmental Ergonomics (ICEE)*, 2007, Piran Slovenia.

[de Boer A. G. E. M., van Lanschot J. J. B., *et al.* 2004], de Boer A. G. E. M., van Lanschot J. J. B., *et al.* Is a single-item visual analogue scale as valid, reliable and responsive as multi-item scales in measuring quality of life? *Quality of Life Research*, 2004, vol. 13, n° 2, pp. 311-320.

[de Dear R. J. et Brager G. S. 2002], de Dear R. J. et Brager G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, n° 6, pp. 549-561.

[de Dear R. J., Ring J. W., *et al.* 1993], de Dear R. J., Ring J. W., *et al.* Thermal Sensations Resulting From Sudden Ambient Temperature Changes. *indoor air*, 1993, vol. 3, n° 3, pp. 181-192.

[De Oliveira F. 2008], De Oliveira F. Thèse : Etude du confort thermique ressenti par l'homme dans son environnement climatique. Thèse Ecole doctorale EEA. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.

[De Paepe K., Houben E., *et al.* 2005], De Paepe K., Houben E., *et al.* Validation of the VapoMeter, a closed unventilated chamber system to assess transepidermal water loss vs. the open chamber Tewameter®. *Skin Research and Technology*, 2005, vol. 11, n° 1, pp. 61-69.

[Denda M. 2000], Denda M. Influence of dry environment on epidermal function. *Journal of dermatological science*, 2000, n° 24 Suppl.1, pp. S22-S28.

[Denda M. 2009], Denda M. Methodology to improve epidermal barrier homeostasis: How to accelerate the barrier recovery? *International Journal of Cosmetic Science*, 2009, vol. 31, n° 2, pp. 79-86.

[Denda M., Nakatani M., *et al.* 2007], Denda M., Nakatani M., *et al.* Epidermal keratinocytes as the forefront of the sensory system. *Experimental Dermatology*, 2007, vol. 16, n° 3, pp. 157-161.

[Denda M., Sato J., *et al.* 1998], Denda M., Sato J., *et al.* Exposure to a Dry Environment Enhances Epidermal Permeability Barrier Function. 1998, vol. 111, n° 5, p. 858.

[Dhaka A., Viswanath V., *et al.* 2006], Dhaka A., Viswanath V., *et al.* Trp ion channels and temperature sensation. *Annual Review of Neuroscience*, 2006, vol. 29, pp. 135-161.

[Dittmar A., Delhomme G., *et al.* 1996], Dittmar A., Delhomme G., *et al.* Le corps humain, un système thermique complexe. In: La thermique de l'Homme et de son proche environnement : actes du Congrès annuel de la Société française des thermiciens, 17-18-19 mai 1995, LET/ENSMA, Poitiers, France: Elsevier, 1996, pp. 3 - 41.

[Dittmar A., Gehin C., *et al.* 2009], Dittmar A., Gehin C., *et al.* Brain Temperature & Autonomic Nervous System for the study of relaxation. In: World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 816-819.

[Djongyang N., Tchinda R., *et al.* 2010], Djongyang N., Tchinda R., *et al.* Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, n° 9, pp. 2626-2640.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Edvinsson M. L., Andersson S. E., *et al.* 2008], Edvinsson M. L., Andersson S. E., *et al.* Cigarette smoking leads to reduced relaxant responses of the cutaneous microcirculation. *Vasc Health Risk Manag*, 2008, vol. 4, n° 3, pp. 699-704.

[Egawa M., Oguri M., *et al.* 2002], Egawa M., Oguri M., *et al.* Effect of exposure of human skin to a dry environment. *Skin Research and Technology*, 2002, vol. 8, n° 4, pp. 212-218.

[Egawa M. et Tagami H. 2008], Egawa M. et Tagami H. Comparison of the depth profiles of water and water-binding substances in the stratum corneum determined in vivo by Raman spectroscopy between the cheek and volar forearm skin: effects of age, seasonal changes and artificial forced hydration. *British Journal of Dermatology*, 2008, vol. 158, n° 2, pp. 251-260.

[Elias P. M. 1983], Elias P. M. Epidermal Lipids, Barrier Function, and Desquamation. *J Invest Dermatol*, 1983, vol. 80, n° 1s, pp. 44s-49s.

[Elias P. M. 2005], Elias P. M. Stratum Corneum Defensive Functions: An Integrated View. *J Investig Dermatol*, 2005, vol. 125, n° 2, pp. 183-200.

[Elias P. M., Feingold K. R., *et al.* 2003], Elias P. M., Feingold K. R., *et al.* Skin as an organ of protection. In: Fitzpatrick's dermatology in general medicine: McGraw-Hill, Medical Pub. Division, 2003, pp. 107 - 118.

[Elsner P. 2003], Elsner P. Quantification clinique et bio-métrologique de la peau sèche. In: La peau sèche de l'atopique: Les entretiens de Carla, 2003, pp. 38-47.

[Erlandson T., Cena K., *et al.* 2003], Erlandson T., Cena K., *et al.* Environmental and human factors influencing thermal comfort of office occupants in hot - humid and hot - arid climates. *Ergonomics*, 2003, vol. 46, n° 6, pp. 616-628.

[Essick G., Guest S., *et al.* 2004], Essick G., Guest S., *et al.* Site-dependent and subject-related variations in perioral thermal sensitivity. *Somatosensory & Motor Research*, 2004, vol. 21, n° 3-4, pp. 159-175.

[Estrade M.-N. 2006], Estrade M.-N. Conseil en cosmétologie: Groupe Liaisons, 2006.

[Ethel T. 1997], Ethel T. Physiology of the skin—Differences between women and men. *Clinics in Dermatology*, 1997, vol. 15, n° 1, pp. 5-16.

[Fanger P. O. 1970], Fanger P. O. Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering: McGraw-Hill Book Company, 1970, 244 p.

[Farage M. A., Miller K. W., *et al.* 2010], Farage M. A., Miller K. W., *et al.* Textbook of aging skin, 2010, 1220 p.

[Fiala D., Lomas K. J., *et al.* 1999], Fiala D., Lomas K. J., *et al.* A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *J Appl Physiol*, 1999, vol. 87, n° 5, pp. 1957-1972.

[Fitzpatrick T. B. et Freedberg I. M. 2003], Fitzpatrick T. B. et Freedberg I. M. Fitzpatrick's dermatology in general medicine: McGraw-Hill, Medical Pub. Division, 2003.

[FLIR 2005], FLIR. Thermovision SDK - user's manual: Flir systems, 2005.

[FLIR 2012], FLIR. the ultimate infrared handbook for R&D professionals: Flir AB, 2012.

[Fluhr J. W. 2009], Fluhr J. W. Le point sur la barrière épidermique. *Kératin*, 2009, n° 15, pp. 5-12.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Fluhr J. W., Bankova L., *et al.* 2005], Fluhr J. W., Bankova L., *et al.* Stratum corneum pH and ions - distribution and importance. In: Bioengineering of the skin - water and the stratum corneum, 2005, pp. 27 - 41.

[Fluhr J. W. et Darlenski R. 2009], Fluhr J. W. et Darlenski R. Skin Barrier. In: Life-Threatening Dermatoses and Emergencies in Dermatology: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 3-18.

[Fluhr J. W., Dickel H., *et al.* 2002], Fluhr J. W., Dickel H., *et al.* Impact of anatomical location on barrier recovery, surface pH and stratum corneum hydration after acute barrier disruption. *British Journal of Dermatology*, 2002, vol. 146, n° 5, pp. 770-776.

[Fluhr J. W., Mao-Qiang M., *et al.* 2003], Fluhr J. W., Mao-Qiang M., *et al.* Glycerol Regulates Stratum Corneum Hydration in Sebaceous Gland Deficient (Asebia) Mice. *J Investig Dermatol*, 2003, vol. 120, n° 5, pp. 728-737.

[Fotoh C., Elkhyat A., *et al.* 2008], Fotoh C., Elkhyat A., *et al.* Cutaneous differences between Black, African or Caribbean Mixed-race and Caucasian women: biometrological approach of the hydrolipidic film. *Skin Res Technol*, 2008, vol. 14, n° 3, pp. 327-335.

[Fowles D. C., Christie M. J., *et al.* 1981], Fowles D. C., Christie M. J., *et al.* Publication Recommendations for Electrodermal Measurements. *Psychophysiology*, 1981, vol. 18, n° 3, pp. 232-239.

[Frank S. M., Raja S. N., *et al.* 1999], Frank S. M., Raja S. N., *et al.* Relative contribution of core and cutaneous temperatures to thermal comfort and autonomic responses in humans. *Journal of Applied Physiology*, 1999, vol. 86, n° 5, pp. 1588-1593.

[Frontczak M. et Wargocki P. 2011], Frontczak M. et Wargocki P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 2011, vol. 46, n° 4, pp. 922-937.

[Fuchs S. M., Fluhr J. W., *et al.* 2005], Fuchs S. M., Fluhr J. W., *et al.* Barrier recovery. In: Bioengineering of the skin : water and the stratum corneum: CRC PRESS, 2005.

[Fullerton A., Fischer T., *et al.* 1996], Fullerton A., Fischer T., *et al.* Guidelines for measurement skin colour and erythema A report from the Standardization Group of the European Society of Contact Dermatitis*. *Contact Dermatitis*, 1996, vol. 35, n° 1, pp. 1-10.

[Fullerton A., Stücker M., *et al.* 2002], Fullerton A., Stücker M., *et al.* Guidelines for visualization of cutaneous blood flow by laser Doppler perfusion imaging: A report from the Standardization Group of the European Society of Contact Dermatitis based upon the HIRELADO European community project. Oxford, ROYAUME-UNI: Blackwell, 2002.

[Gabard B. et Barel A. 2009], Gabard B. et Barel A. Mesure de l'hydratation cutanée. In: Traité EMC : cosmétologie et dermatologie esthétique: Elsevier-Masson, 2009.

[Gabard B. et Treffel P. 2000], Gabard B. et Treffel P. Mesure de la perte insensible en eau (PIE). In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions médicales internationales, 2000, pp. 543 - 553.

[Gagge A. P., Stolwijk J. A. J., *et al.* 1967], Gagge A. P., Stolwijk J. A. J., *et al.* Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 1967, vol. 1, n° 1, pp. 1-20.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Gagge A. P., Stolwijk J. A. J., *et al.* 1972], Gagge A. P., Stolwijk J. A. J., *et al.* An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatiry Response. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University*, 1972, vol. 13, pp. 21-36.

[Galeou M., Grivel F., *et al.* 1989], Galeou M., Grivel F., *et al.* Le confort thermique : aspects physiologiques et psychosensoriels - étude bibliographique. Strasbourg, 1989.

[Gardinier S., Guéhenneux S., *et al.* 2009], Gardinier S., Guéhenneux S., *et al.* Variations of skin biophysical properties after recreational swimming. *Skin Research and Technology*, 2009, vol. 15, n° 4, pp. 427-432.

[Gerr F. et Letz R. 1994], Gerr F. et Letz R. Covariates of human peripheral nerve function: II. Vibrotactile and thermal thresholds. *Neurotoxicology and Teratology*, 1994, vol. 16, n° 1, pp. 105-112.

[Ghadially R., Brown B. E., *et al.* 1995], Ghadially R., Brown B. E., *et al.* The aged epidermal permeability barrier. Structural, functional, and lipid biochemical abnormalities in humans and a senescent murine model. *The Journal of clinical investigation*, 1995, vol. 95, n° 5, pp. 2281-2290.

[Giacomoni P. U., Mammone T., *et al.* 2009], Giacomoni P. U., Mammone T., *et al.* Gender-linked differences in human skin. *Journal of Dermatological Science*, 2009, vol. 55, n° 3, pp. 144-149.

[Glasbey C. A. 1993], Glasbey C. A. An Analysis of Histogram-Based Thresholding Algorithms. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1993, vol. 55, n° 6, pp. 532-537.

[Goetz P. et Busser C. 2007], Goetz P. et Busser C. La phytocosmétologie thérapeutique: Springer, 2007.

[Goldstein B. E. 2009], Goldstein B. E. Sensation and perception. 8 edition: Wadsworth Publishing, 2009.

[Golja P., Tipton M. J., *et al.* 2003], Golja P., Tipton M. J., *et al.* Cutaneous thermal thresholds—the reproducibility of their measurements and the effect of gender. *Journal of Thermal Biology*, 2003, vol. 28, n° 4, pp. 341-346.

[Gonçalo C. 2000], Gonçalo C. Occupational dry skin. In: Handbook of occupational dermatology: Springer, 2000, pp. 90 - 98.

[Green B. G. 2004], Green B. G. Temperature perception and nociception. *Journal of Neurobiology*, 2004, vol. 61, n° 1, pp. 13-29.

[Green B. G. et Akirav C. 2007], Green B. G. et Akirav C. Individual differences in temperature perception: evidence of common processing of sensation intensity of warmth and cold. *Somatosensory & Motor Research*, 2007, vol. 24, n° 1-2, pp. 71-84.

[Grice K., Sattar H., *et al.* 1975], Grice K., Sattar H., *et al.* The relationship of transepidermal water loss to skin temperature in psoriasis and eczema. *J Investig Dermatol*, 1975, vol. 64, n° 5, pp. 313-315.

[Grice K., Sattar H., *et al.* 1971], Grice K., Sattar H., *et al.* Skin temperature and transepidermal water loss. *J Investig Dermatol*, 1971, vol. 57, n° 2, pp. 108-110.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Guyton A. C. et Hall J. E. 2002], Guyton A. C. et Hall J. E. Régulation de la température corporelle et fièvre. In: Précis de physiologie médicale. 2ème édition. 2002, pp. 875 - 886.

[Haftek M. 2003], Haftek M. Données structurales et ultrastructurales sur les lipides cutanés humains. *Pathologie Biologie*, 2003, vol. 51, n° 5, pp. 264-266.

[Hagander L. G., Midani H. A., *et al.* 2000], Hagander L. G., Midani H. A., *et al.* Quantitative sensory testing: effect of site and skin temperature on thermal thresholds. *Clinical Neurophysiology*, 2000, vol. 111, n° 1, pp. 17-22.

[Hassan M., Chernomordik V., *et al.* 2006], Hassan M., Chernomordik V., *et al.* Infrared imaging for tissue characterization and function. In: Medical devices and systems USA: CRC Press, 2006, pp. 30-31; 30-25.

[Havenith G. 1997], Havenith G. Individual heat stress response. Thèse: Katholieke Universiteit Nijmegen, 1997.

[Havenith G. 2001], Havenith G. Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response. *Journal of applied physiology*, 2001, vol. 90, pp. 1943-1954.

[Havenith G. 2005], Havenith G. Temperature Regulation, Heat Balance and Climatic Stress. In: Extreme Weather Events and Public Health Responses: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 69-80.

[Heft M. W., Cooper B. Y., *et al.* 1996], Heft M. W., Cooper B. Y., *et al.* Aging effects on ther perception of noxious and non-noxious thermal stimuli applied to the face. *Aging Clin. Res.*, 1996, vol. 8, pp. 35-41.

[Held U. 2010], Held U. Pièges des corrélations : les coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman. *Forum Med Suisse*, 2010, vol. 10, n° 38, pp. 652-653.

[Henry F., Arrese J. E., *et al.* 2002], Henry F., Arrese J. E., *et al.* La peau et son horloge chronobiologique au quotidien. Liège, BELGIQUE: Université de Liège, 2002.

[Hensel H. 1981], Hensel H. Thermoreception and temperature regulation. London: Academic Press, 1981, 321 p.

[Hensen J. L. M. 1990], Hensen J. L. M. Literature review on thermal comfort in transient conditions. *Building and Environment*, 1990, vol. 25, n° 4, pp. 309-316.

[Hervé P. 2005], Hervé P. Mesure de l'émissivité thermique. *Techniques de l'ingénieur*, 2005, pp. 1-13.

[Houdas Y. et Guieu J. D. 1977], Houdas Y. et Guieu J. D. La fonction thermique. simep-Editions. Villeurbanne, 1977.

[Huizenga C., Hui Z., *et al.* 2001], Huizenga C., Hui Z., *et al.* A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment*, 2001, vol. 36, n° 6, pp. 691-699.

[Humbert P. 2009], Humbert P. La peau, forteresse ou vitrine ? *In: XXVIème journées européennes de dermocosmétologie*, 2009, Lyon, Centre européen de dermocosmétologie (CED).

[Humbert P., Sainthillier J. M., *et al.* 2005], Humbert P., Sainthillier J. M., *et al.* Capillaroscopy and videocapillaroscopy assessment of skin microcirculation:

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

dermatologic and cosmetic approaches. *J Cosmet Dermatol*, 2005, vol. 4, n° 3, pp. 153-162.

[Humphreys M. A. et Nicol F. J. 2002], Humphreys M. A. et Nicol F. J. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, n° 6, pp. 667-684.

[Imhof R. E., De Jesus M. E. P., *et al.* 2009], Imhof R. E., De Jesus M. E. P., *et al.* Closed-chamber transepidermal water loss measurement: microclimate, calibration and performance. *International Journal of Cosmetic Science*, 2009, vol. 31, n° 2, pp. 97-118.

[Inoue Y., Havenith G., *et al.* 1999], Inoue Y., Havenith G., *et al.* Exercise- and methylcholine-induced sweating responses in older and younger men: effect of heat acclimation and aerobic fitness. *International Journal of Biometeorology*, 1999, vol. 42, n° 4, pp. 210-216.

[Ionescu-Tirgoviste C. et Pruna S. 1993], Ionescu-Tirgoviste C. et Pruna S. The pattern of the electrodermal activity as indicator of stress related reaction. *Rom J Physiol*, 1993, vol. 30, n° 3-4, pp. 207-218.

[IUPS, commission, *et al.* 2001], IUPS, commission, *et al.* Glossary of terms for thermal physiology. *The Japanese Journal of Physiology*, 2001, vol. 51, n° 2, pp. 245-280.

[Jablonski N. G. et Chaplin G. 2000], Jablonski N. G. et Chaplin G. The evolution of human skin coloration. *Journal of Human Evolution*, 2000, vol. 39, n° 1, pp. 57-106.

[Johnson A. T. 1991], Johnson A. T. Thermal responses. In: Biomechanics and exercice physiology New York: Wiley, 1991.

[Jolivot R. 2011], Jolivot R. Développement d'un outil d'imagerie dédié à l'acquisition, à l'analyse et à la carctérisation multispectrale des lésions dermatologiques. Thèse Instrumentation et informatique de l'image. Bourgogne: Université de bourgogne, 2011, 178 p.

[Jovanov E., O'Donnall Lords A., *et al.* 2003], Jovanov E., O'Donnall Lords A., *et al.* Stress monitoring using a distributed wireless intelligent sensor system. *IEEE Engineering in medicine and biology magazine*, 2003, vol. 22, n° 3, pp. 49-55.

[Just-Sarobé M. 2008], Just-Sarobé M. Smoking and the Skin. *Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition)*, 2008, vol. 99, n° 3, pp. 173-184.

[Karagiannis M. H., Reniker A. N., *et al.* 2006], Karagiannis M. H., Reniker A. N., *et al.* Lactate measurement as an indicator of perfusion. *Compendium*, 2006, pp. 287-300.

[Karjalainen S. 2007], Karjalainen S. Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments. *Building and Environment*, 2007, vol. 42, n° 4, pp. 1594-1603.

[Katagiri C., Sato J., *et al.* 2003], Katagiri C., Sato J., *et al.* Changes in environmental humidity affect the water-holding property of the stratum corneum and its free amino acid content, and the expression of fillagrin in the epidermis of hairless mice. *Journal of dermatological science*, 2003, n° 31, pp. 29-35.

[Katims J. J. 1998], Katims J. J. Electrodiagnostic functional sensory evaluation of the patient with pain : a review of the neuroselective current perception threshold and pain tolerance threshold. *Pain Digest*, 1998, n° 8, pp. 219-230.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Katsuura T., Tabuchi R., *et al.* 1998], Katsuura T., Tabuchi R., *et al.* Estimation of thermal sensation during varied air temperature conditions. *Appl Human Sci*, 1998, vol. 17, n° 2, pp. 73-78.

[Kenney W. L. et Munce T. A. 2003], Kenney W. L. et Munce T. A. Invited Review: Aging and human temperature regulation. *Journal of Applied Physiology*, 2003, vol. 95, n° 6, pp. 2598-2603.

[Kenshalo D., Holmes C., *et al.* 1968], Kenshalo D., Holmes C., *et al.* Warm and cool thresholds as a function of rate of stimulus temperature change. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 1968, vol. 3, n° 2, pp. 81-84.

[Kenshalo D. R. 1966], Kenshalo D. R. Changes in the cool threshold associated with phases of the menstrual cycle. *Journal of Applied Physiology*, 1966, vol. 21, n° 3, pp. 1031-1039.

[Khalili N., Wendelschafer-Crabb G., *et al.* 2001], Khalili N., Wendelschafer-Crabb G., *et al.* Influence of thermode size for detecting heat pain dysfunction in a capsaicin model of epidermal nerve fiber loss. *Pain*, 2001, vol. 91, n° 3, p. 241.

[Khazaka G. 2004], Khazaka G. Assessment of stratum corneum hydration : corneometer CM 825. In: Bioengineering of the skin - water and the stratum corneum: CRC Press, 2004, pp. 249 - 261.

[Kierszenbaum A. L., Validire-Charpy P., *et al.* 2006], Kierszenbaum A. L., Validire-Charpy P., *et al.* Histologie et biologie cellulaire: Une introduction à l'anatomie pathologique: De Boeck, 2006.

[Kim D.-S., Park S.-H., *et al.* 2003], Kim D.-S., Park S.-H., *et al.* Temperature regulates melanin synthesis in melanocytes. *Archives of Pharmacal Research*, 2003, vol. 26, n° 10, pp. 840-845.

[Kim H. E. et Tokura H. 1997], Kim H. E. et Tokura H. Preferred Room Temperature Self-selected by Women Under the Influence of the Menstrual Cycle and Time of Day. *Biological Rhythm Research*, 1997, vol. 28, n° 4, pp. 417-421.

[Kistler A., Mariauzouls C., *et al.* 1998], Kistler A., Mariauzouls C., *et al.* Fingertip temperature as an indicator for sympathetic responses. *Internationnal Journal of Psychophysiology*, 1998, vol. 29, pp. 35-41.

[Kojo I. et Pertovaara A. 1987], Kojo I. et Pertovaara A. The Effects of Stimulus Area and Adaptation Temperature on Warm and Heat Pain Thresholds in Man. *International Journal of Neuroscience*, 1987, vol. 32, n° 3-4, pp. 875-880.

[Konica-Minolta 2007], Konica-Minolta. Spectrocolorimètre CM-2600d. La simplicité d'utilisation alliée aux exigences du contrôle de la couleur, 2007, 8 p.

[Koran A., Powers J. M., *et al.* 1981], Koran A., Powers J. M., *et al.* Reflection spectrophotometry of facial skin. *Journal of Dental Research*, 1981, vol. 60, n° 6, pp. 979-982.

[Kurazumi Y., Tsuchikawa T., *et al.* 2008a], Kurazumi Y., Tsuchikawa T., *et al.* Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection. *Building and Environment*, 2008a, vol. 43, n° 12, pp. 2142-2153.

[Kurazumi Y., Tsuchikawa T., *et al.* 2008b], Kurazumi Y., Tsuchikawa T., *et al.* Effect of posture on the heat transfer areas of the human body. *Building and Environment*, 2008b, vol. 43, n° 10, pp. 1555-1565.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[L'Oréal 2011], L'Oréal. Disponible sur: http://www.skin-science.fr. (consulté le 20/09/2011)

[La Gennusa M., Nucara A., *et al.* 2005], La Gennusa M., Nucara A., *et al.* The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation--a generalised algorithm. *Building and Environment*, 2005, vol. 40, n° 3, pp. 367-375.

[Lademann J., Jacobi U., *et al.* 2009], Lademann J., Jacobi U., *et al.* The tape stripping procedure – evaluation of some critical parameters. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2009, vol. 72, n° 2, pp. 317-323.

[Laden K. et Spitzer R. 1966], Laden K. et Spitzer R. Identification of a natural moisturizing agent in skin. *J. Soc. Cosmetic Chemists*, 1966, vol. 18, pp. 351-360.

[Lafforgue C. 2008], Lafforgue C. Lipides épidermiques et stratum corneum. *Réalités Thérapeutiques en Dermato-Vénérologie*, 2008, n° 179, pp. 6-8.

[Lan L., Lian Z., *et al.* 2008], Lan L., Lian Z., *et al.* Investigation of gender difference in thermal comfort for Chinese people. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, vol. 102, n° 4, pp. 471-480.

[Launay J. C. 2008], Launay J. C. Climatic cross-adaptations in humans : characterization, mechanisms and thermophysiological risks, 2008.

[Launay J. C. et Savourey G. 2009], Launay J. C. et Savourey G. Cold adaptations. *Industrial Health*, 2009, vol. 47, n° 3, pp. 221-227.

[Le Fur I., Lopez S., *et al.* 1999], Le Fur I., Lopez S., *et al.* Comparison of cheek and forehead regions by bioengineering methods in women with different self-reported "cosmetic skin types". *Skin Research and Technology*, 1999, vol. 5, pp. 182-188.

[Le Fur I., Numagami K., *et al.* 2000], Le Fur I., Numagami K., *et al.* (2000). Skin colour in caucasian and asian healthy women : age-related reference ranges according to skin site. Proceedings - XXIth Congress of the International Federation of the Societies of Cosmetic Chemists. Berlin**:** p. 9.

[Le Fur I., Reinberg A. E., *et al.* 2001], Le Fur I., Reinberg A. E., *et al.* Analysis of circardian and ultradian rhythms of skin surface properties of face and forearm of healthy women. *The Journal of investigative dermatology*, 2001, vol. 117, n° 3, pp. 718-724.

[Leahy M. J., Enfield J. G., *et al.* 2007], Leahy M. J., Enfield J. G., *et al.* Biophotonic methods in microcirculation imaging. *Medical Laser Application*, 2007, vol. 22, n° 2, p. 105.

[Lee J.-Y., Nakao K., *et al.* 2011], Lee J.-Y., Nakao K., *et al.* Validity of perceived skin wettedness mapping to evaluate heat strain. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, pp. 1-11.

[Lee J.-Y., Saat M., *et al.* 2010], Lee J.-Y., Saat M., *et al.* Cutaneous Warm and Cool Sensation Thresholds and the Inter-threshold Zone in Malaysian and Japanese Males. *Journal of Thermal Biology*, 2010, vol. 35, n° 2, pp. 70-76.

[Lee J.-Y., Stone E. A., *et al.* 2010], Lee J.-Y., Stone E. A., *et al.* Issues in combining the categorical and visual analog scale for the assessment of perceived thermal sensation: Methodological and conceptual considerations. *Applied Ergonomics*, 2010, vol. 41, n° 2, pp. 282-290.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Lee M. H., Yang G., *et al.* 2004], Lee M. H., Yang G., *et al.* Development stress monitoring system based on personal digital assistant (PDA). *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2004, vol. 4, pp. 2364-2367.

[Lee S. H., Jeong S. K., *et al.* 2006], Lee S. H., Jeong S. K., *et al.* An update of the defensive barrier function of skin. *Yonsei Med J*, 2006, vol. 47, n° 3, pp. 293-306.

[Lehmuskallio E., Hassi J., *et al.* 2002], Lehmuskallio E., Hassi J., *et al.* The skin in the cold. *Int J Circumpolar Health*, 2002, vol. 61, n° 3, pp. 277-286.

[Leon G. R., Koscheyev V. S., *et al.* 2008], Leon G. R., Koscheyev V. S., *et al.* Visual analog scales for assessment of thermal perception in different environments. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 2008, vol. 79, n° 8, pp. 784-786.

[Leow Y.-H. et Maibach H. I. 1998], Leow Y.-H. et Maibach H. I. Cigarette smoking, cutaneous vasculature, and tissue oxygen. *Clinics in Dermatology*, 1998, vol. 16, n° 5, pp. 579-584.

[Leppäluoto J., Korhonen I., *et al.* 2001], Leppäluoto J., Korhonen I., *et al.* Habituation of thermal sensations, skin temperatures, and norepinephrine in men exposed to cold air. *Journal of Applied Physiology*, 2001, vol. 90, n° 4, pp. 1211-1218.

[Lévêque J.-L. 2005], Lévêque J.-L. Water-Keratin interactions. In: Bioengineering of the skin - Water and the stratum corneum, 2005, pp. 15 - 26.

[Liu H., Tan Q., *et al.* 2011], Liu H., Tan Q., *et al.* Impact of cold indoor thermal environmental conditions on human thermal response. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, vol. 18, n° 4, pp. 1285-1292.

[Liu W., Lian Z., *et al.* 2011], Liu W., Lian Z., *et al.* Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study. *Building and Environment*, 2011, vol. 46, n° 2, pp. 478-488.

[Liu W., Lian Z., *et al.* 2008], Liu W., Lian Z., *et al.* Heart rate variability at different thermal comfort levels. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, vol. 103, n° 3, pp. 361-366.

[Loden M. 2005], Loden M. Transepidermal water loss and dry skin. In: Bioengineering of the skin - Water and the stratum corneum, 2005, pp. 171 - 185.

[Lopez S., Le Fur I., *et al.* 2000], Lopez S., Le Fur I., *et al.* Transepidermal water loss, temperature and sebum levels on women's facial skin follow characteristic pattern. *Skin Research and Technology*, 2000, vol. 6, pp. 31-36.

[Maaijen R., Zeiler W., *et al.* 2012], Maaijen R., Zeiler W., *et al.* Human centered energy control : taking the occupancy in the control loop of building systems. *REHVA Journal*, 2012, pp. 34-36.

[Mac Leod P., Sauvageot F., *et al.* 1996], Mac Leod P., Sauvageot F., *et al.* Les caractéristiques d'une réponse sensorielle. In: Evaluation sensorielle - manuel méthodologique. 2ème édition. Tech.& Doc. Lavoisier, 1996, pp. 4-30.

[Maddook W. G. et Coller F. A. 1932], Maddook W. G. et Coller F. A. Peripheral Vaso-Constriction by Tobacco Demonstrated by Skin Temperature Changes. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N.Y.)*, 1932, vol. 29, n° 4, pp. 487-488.

[Madison K. C. 2003], Madison K. C. Barrier function of the skin : "la raison d'être" of the epidermis. *The Journal of investigative dermatology*, 2003, vol. 121, n° 2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Maillet L. 2011], Maillet L. Flaveurs et odeurs dans les réseaux intérieurs d'eau potable - Impact des matériaux et des conditions d'utilisation. Thèse Ecole doctorale Science de la Matière. Rennes: Université de Rennes 1, 2011, 362 p.

[Malliani A., Pagani M., *et al.* 1991], Malliani A., Pagani M., *et al.* Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation*, 1991, vol. 84, n° 2, pp. 482-492.

[Marotte H. et Timbal J. 1982], Marotte H. et Timbal J. Circadian rhythm of thermoregulating responses in man exposed to thermal stimuli. *Chronobiologia*, 1982, vol. 9, n° 4, pp. 375-387.

[Marrakchi S. et Maibach H. I. 2007], Marrakchi S. et Maibach H. I. Biophysical parameters of skin : map of human face, regional, and age-related differences. *Contact dermatitis*, 2007, n° 57, pp. 28-34.

[Martineaud J. P. et Seroussi S. 1977], Martineaud J. P. et Seroussi S. Physiologie de la circulation cutanée: Masson, 1977.

[Massot B., Baltenneck N., *et al.* 2010], Massot B., Baltenneck N., *et al.* Objective evaluation of stress with the blind by the monitoring of autonomic nervous system activity. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2010, vol. 2010, pp. 1429-1432.

[Massot B., Gehin C., *et al.* 2009], Massot B., Gehin C., *et al.* A wearable, low-power, health-monitoring instrumentation based on a Programmable System-on-Chip. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2009, vol. 2009, pp. 4852-4855.

[Mathias T., Wilson D. M., *et al.* 1981], Mathias T., Wilson D. M., *et al.* Transepidermal Water Loss as a Function of Skin Surface Temperature. *J Investig Dermatol*, 1981, vol. 77, n° 2, pp. 219-220.

[McArthur J. C., Stocks E. A., *et al.* 1998], McArthur J. C., Stocks E. A., *et al.* Epidermal Nerve Fiber Density: Normative Reference Range and Diagnostic Efficiency. *Arch Neurol*, 1998, vol. 55, n° 12, pp. 1513-1520.

[McCallion R. et Li Wan Po A. 1993], McCallion R. et Li Wan Po A. Dry and photo-aged skin: manifestations and management. *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*, 1993, vol. 18, n° 1, pp. 15-32.

[McLellan K., Petrofsky J. S., *et al.* 2009], McLellan K., Petrofsky J. S., *et al.* The effects of skin moisture and subcutaneous fat thickness on the ability of the skin to dissipate heat in young and old subjects, with and without diabetes, at three environmental room temperatures. *Medical Engineering & Physics*, 2009, vol. 31, n° 2, p. 165.

[Medoc 2003], Medoc (2003). TSA-2001 Neurosensory Analyzer Model TSA-II - User and service guide.

[Medoc 2007], Medoc. TSA-II - NeuroSensory Analyzer. Disponible sur: http://www.medoc-web.com/medoc_en_tsaII_analyzer.aspx. (consulté le 14/05/2012)

[Mekjavic I. B. et Eiken O. 2006], Mekjavic I. B. et Eiken O. Contribution of thermal and nonthermal factors to the regulation of body temperature in humans. *Journal of Applied Physiology*, 2006, vol. 100, n° 6, pp. 2065-2072.

[Mélissopoulos A. et Levacher C. 1998], Mélissopoulos A. et Levacher C. La peau - Structure et physiologie. Paris: Tec & Doc Lavoisier, 1998.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Meynadier J. 1980], Meynadier J. Glandes sébacées. In: Précis de physiologie cutanée: EPV, 1980, pp. 85 - 100.

[Millet C., Roustit M., *et al.* 2011], Millet C., Roustit M., *et al.* Comparison between laser speckle contrast imaging and laser Doppler imaging to assess skin blood flow in humans. *Microvascular Research*, 2011, vol. 82, n° 2, pp. 147-151.

[Ministère 2012], Ministère. Les objectifs du Plan Bâtiment Grenelle. Disponible sur: http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr. (consulté le 04/05/2012)

[Misery L. 2000], Misery L. La peau neuronale - les nerfs à fleur de peau. Paris: ellipses, 2000.

[Misery L. 2006], Misery L. Innervation cutanée. In: Traité EMC : cosmétologie et dermatologie esthétique: Elsevier, 2006.

[Misri R. et Pande S. 2005], Misri R. et Pande S. Sebumeter, 2005.

[Morel P. 2001], Morel P. La dermatologie du généraliste: Springer, 2001.

[Moussard C. 2003], Moussard C. Lipides épidermiques : peau saine et peau sèche. In: La peau sèche de l'atopique: Les entretiens du Carla, 2003, pp. 22-33.

[Mozaffarieh M., Fontana Gasio P., *et al.* 2010], Mozaffarieh M., Fontana Gasio P., *et al.* (2010). Thermal discomfort with cold extremities in relation to age, gender, and body mass index in a random sample of a Swiss urban population, BioMed Central.

[Myrsten A., Elgerot A., *et al.* 1977], Myrsten A., Elgerot A., *et al.* Effects of abstinence from tobacco smoking on physiological and psychological arousal levels in habitual smokers. *Psychosomatic Medicine*, 1977, vol. 39, n° 1, pp. 25-38.

[Nadel E. R. 1977], Nadel E. R. Sensitivity to central and peripheral stimulation in humans. In: Thermal comfort : physiological and psychological bases: INSERM, 1977, pp. 57 - 66.

[Nagashima K., Yoda T., *et al.* 2002], Nagashima K., Yoda T., *et al.* Thermal regulation and comfort during a mild-cold exposure in young Japanese women complaining of unusual coldness. *Journal of Applied Physiology*, 2002, vol. 92, n° 3, pp. 1029-1035.

[Nakagawa N., Sakai S., *et al.* 2004], Nakagawa N., Sakai S., *et al.* Relationship Between NMF (Lactate and Potassium) Content and the Physical Properties of the Stratum Corneum in Healthy Subjects. *J Investig Dermatol*, 2004, vol. 122, n° 3, pp. 755-763.

[Narçon S. 2001], Narçon S. Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort. Thèse Neurosciences et comportement Massy: Ecole pratique des hautes études, 2001, 208 p.

[Neurotron 2010], Neurotron. Normative neuroselective current perception threshold (CPT) values. Disponible sur: http://neurotron.com/Normative__Current_Perception_Threshold_CPT_Values.html. (consulté le 16/06/2012)

[Nikkari T., Schreibman P. H., *et al.* 1974], Nikkari T., Schreibman P. H., *et al.* In vivo studies of sterol and squalene secretion by human skin. *Journal of Lipid Research*, 1974, vol. 15, n° 6, pp. 563-573.

[Nilsson G. 1977], Nilsson G. Measurement of water exchange through skin. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 1977, vol. 15, n° 3, pp. 209-218.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Nocua R. 2010], Nocua R. Conception et développement d'un système ambulatoire pour la mesure de l'activité du système nerveux autonome pour la surveillance de personnes âgées à domicile. Thèse Ecole doctorale EDISCE Ingénierie pour la santé, la cognition et l'environnement Grenoble: Université Joseph Fourier, 2010, 176 p.

[Norval M. 2008], Norval M. The Photobiology of Human Skin. In: Springer New York, 2008, pp. 553-576.

[Olesen B. W. 1982], Olesen B. W. confort thermique. *Technical review*, 1982, n° 2.

[Oseland N. A. 1995], Oseland N. A. Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes. *Energy and Buildings*, 1995, vol. 23, n° 2, pp. 105-115.

[Pajani D. et Audaire L. 2001], Pajani D. et Audaire L. Thermographie : Technologies et applications. Paris, FRANCE: Techniques de l'ingénieur, 2001.

[Parra J. L. et Paye M. 2003], Parra J. L. et Paye M. EEMCO guidance for the in vivo assessment of skin surface pH. *Skin Pharmacology and Applied Skin Physiology*, 2003, vol. 16, n° 3, pp. 188-202.

[Parsons K. 2002a], Parsons K. Human thermal environment. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. Second edition. London: Taylor & Francis, 2002a, 527 p.

[Parsons K. C. 2002b], Parsons K. C. The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort. *Energy and Buildings*, 2002b, vol. 34, n° 6, pp. 593-599.

[Patapoutian A. 2005], Patapoutian A. TRP Channels and Thermosensation. *Chemical Senses*, 2005, vol. 30, n° suppl 1, pp. i193-i194.

[Pavlidis I., Dowdall J., *et al.* 2007], Pavlidis I., Dowdall J., *et al.* Interacting with human physiology. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007, vol. 108, n° 1-2, p. 150.

[Pellerin N. et Candas V. 2003], Pellerin N. et Candas V. Combined effects of temperature and noise on human discomfort. *Physiology & Behavior*, 2003, vol. 78, n° 1, pp. 99-106.

[Perimed 2011], Perimed. PeriScan PIM3 System Technical Specifications. Disponible sur: http://www.perimed-instruments.com. (consulté le 28/04/2011)

[Perimed 2012], Perimed. PeriScan PIM 3 System measuring principle. Disponible sur: http://www.perimed-instruments.com/products/pim3-imaging-principle. (consulté le 24/05/2012)

[Perrin L. 2008], Perrin L. Contribution méthodologique à l'analyse sensorielle du vin. Thèse Agrocampus Rennes. Rennes: ENSAR, 2008, 238 p.

[Petitjean A., Mac-Mary S., *et al.* 2006], Petitjean A., Mac-Mary S., *et al.* Effects of cigarette smoking on the skin of women. *Journal of Dermatological Science*, 2006, vol. 42, n° 3, pp. 259-261.

[Picard R. W. 2007], Picard R. W. Toward Machines with Emotional Intelligence. In: The Science of Emotional Intelligence: Knowns and Unknowns Oxford: Oxford University Press., 2007.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Piérard G. E. 1998], Piérard G. E. EEMCO guidance for the assessment of skin colour. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 1998, vol. 10, n° 1, pp. 1-11.

[Piérard G. E., Piérard-Franchimont C., *et al.* 2000], Piérard G. E., Piérard-Franchimont C., *et al.* EEMCO guidance for the in vivo assessment of skin greasiness. *Skin Pharmacology and Applied Skin Physiology*, 2000, vol. 13, n° 6.

[Pierard G. E. et Uhoda E. 2005], Pierard G. E. et Uhoda E. Photophysique et couleur cutanée. Liège, BELGIQUE: Université de Liège, 2005.

[Pochi P. E., Downing D. T., *et al.* 1970], Pochi P. E., Downing D. T., *et al.* Sebaceous gland response in man to prolonged total caloric deprivation. *J Invest Dermatol*, 1970, vol. 55, n° 5, pp. 303-309.

[Posnick J. C., Zimbler A. G., *et al.* 1990], Posnick J. C., Zimbler A. G., *et al.* Normal Cutaneous Sensibility of the Face. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 1990, vol. 86, n° 3, pp. 434-435.

[Potts R. O. et Francoeur M. L. 1991], Potts R. O. et Francoeur M. L. The Influence of Stratum Corneum Morphology on Water Permeability. *J Investig Dermatol*, 1991, vol. 96, n° 4, pp. 495-499.

[Primavera G., Fluhr J. W., *et al.* 2005], Primavera G., Fluhr J. W., *et al.* Standardization of measurements and guidelines. In: Bioengineering of the skin - Water and the stratum corneum, 2005, pp. 83 - 95.

[Proksch E., Brandner J. M., *et al.* 2008], Proksch E., Brandner J. M., *et al.* The skin: an indispensable barrier. *Experimental Dermatology*, 2008, vol. 17, n° 12, pp. 1063-1072.

[Purves D., Augustine G. J., *et al.* 1999], Purves D., Augustine G. J., *et al.* Neurosciences: De Boeck, 1999.

[Rajan V., Varghese B., *et al.* 2009], Rajan V., Varghese B., *et al.* Review of methodological developments in laser Doppler flowmetry. *Lasers in Medical Science*, 2009, vol. 24, n° 2, pp. 269-283.

[Rakotomalala R. 2008], Rakotomalala R. Analyse de corrélation : Etude des dépendances - variables quantitatives. Disponible sur: http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/Analyse_de_Correlation.pdf. (consulté le 22/09/2008)

[Rambaud L. 2000], Rambaud L. Exploration neurosensorielle quantitative. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelle cutanées: Editions Médicales Internationales, 2000, pp. 649-652.

[Rambaud L. et Kocher L. 2000], Rambaud L. et Kocher L. Récepteurs sensoriels cutanés. In: Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées: Editions Médicales internationales, 2000, pp. 641 - 648.

[Ramon C. 2009], Ramon C. Monitoring continu en conditions réelles pour l'objectivation du comportement du conducteur automobile. Thèse Instrumentation, Systèmes, Signal et Images. Lyon: INSA, 2009, 204 p.

[Rawlings A. V. 2006], Rawlings A. V. Ethnic skin types: are there differences in skin structure and function? *International Journal of Cosmetic Science*, 2006, vol. 28, n° 2, pp. 79-93.

[Rawlings A. V. 2010], Rawlings A. V. Recent advances in skin 'barrier' research. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2010, vol. 62, n° 6, pp. 671-677.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Rawlings A. V. et Matts P. J. 2005], Rawlings A. V. et Matts P. J. Stratum Corneum Moisturization at the Molecular Level : An Update in Relation to the Dry Skin Cycle. *J Investig Dermatol*, 2005, vol. 124, n° 6, pp. 1099-1110.

[Rawlings A. V., Scott I. R., *et al.* 1994], Rawlings A. V., Scott I. R., *et al.* Stratum Corneum Moisturization at the Molecular Level. *J Investig Dermatol*, 1994, vol. 103, n° 5, pp. 731-740.

[Rees J. L. 2003], Rees J. L. Genetics of hair and skin color. *Annual Review of Genetics*, 2003, vol. 37, pp. 67-90.

[Reinberg A. E. 2003], Reinberg A. E. Chronobiologie médicale, chronothérapeutique. Flammarion Médecine-Sciences: Flammarion, 2003.

[Reulen J. P. H., Lansbergen M. D. I., *et al.* 2003], Reulen J. P. H., Lansbergen M. D. I., *et al.* Comparison of thermal threshold tests to assess small nerve fiber function: limits vs. levels. *Clinical Neurophysiology*, 2003, vol. 114, n° 3, pp. 556-563.

[Revuz J. É. R., Surlève-Bazeille J. E., *et al.* 2009], Revuz J. É. R., Surlève-Bazeille J. E., *et al.* Traité EMC : cosmétologie et dermatologie esthétique: Elsevier, 2009.

[Richalet J.-P. et Regnard J. 2009], Richalet J.-P. et Regnard J. Réponses physiologiques aux facteurs d'environnement. In: Physiologie humaine sous la coordination de Hervé Guénard France: Société de physiologie de langue française, 2009, pp. 45 - 67.

[Robinson M. 2009], Robinson M. The natural moisturizing factor of the skin: effects of barrier perturbation and anatomical location and relation to biophysical measurements. Thesis Pharmaceutical Sciences. University of Cincinnati, 2009.

[Rutgers 2011], Rutgers. Green Buildings manual. Disponible sur: http://greenmanual.rutgers.edu/. (consulté le 01/11/2012)

[Sakura S., Imamachi N., *et al.* 2001], Sakura S., Imamachi N., *et al.* Effect of ambient temperature on current perception thresholds in healthy volunteers. *In: American Society of anesthesiology (ASA) Annual Meeting*, 2001.

[Sauvageot F. 2001], Sauvageot F. Les caractéristiques d'une réponse sensorielle. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2001, vol. 5, n° 3, pp. 171-179.

[Savourey G., Launay J. C., *et al.* 2003], Savourey G., Launay J. C., *et al.* Physiopathologie et prévention des troubles liés à l'exposition à la chaleur ou au froid,. *Actualité et dossier en santé publique (ADSP)*, 2003, pp. 4-9.

[Schaefer H., Redelmeier T. E., *et al.* 2011], Schaefer H., Redelmeier T. E., *et al.* Skin Penetration. In: Contact Dermatitis: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 215-227.

[Schaffo A. 2011], Schaffo A. Création d'un modèle de rupture aigüe de la barrière cutanée chez le chien et essai de quantification par la mesure de la perte insensible en eau. Thèse vétérinaire Vetagro sup. Lyon: Université Claude-Bernard Lyon 1, 2011.

[Schreurs V. et Schaafsma G. 2010], Schreurs V. et Schaafsma G. Lactic acid and lactates. *Nutrafoods*, 2010, vol. 9, n° 1, pp. 7-16.

[Segre J. A. 2006], Segre J. A. Epidermal barrier formation and recovery in skin disorders. *J Clin Invest*, 2006, vol. 116, n° 5, pp. 1150-1158.

[Seidenari S., Francomano M., *et al.* 1998], Seidenari S., Francomano M., *et al.* Baseline biophysical parameters in subjects with sensitive skin. *Contact Dermatitis*, 1998, vol. 38, n° 6, pp. 311-315.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Sequeira H., Hot P., *et al.* 2009], Sequeira H., Hot P., *et al.* Electrical autonomic correlates of emotion. *International Journal of Psychophysiology*, 2009, vol. 71, n° 1, pp. 50-56.

[Sessler D. I. 2009], Sessler D. I. Thermoregulatory defense mechanisms. *Critical Care Medicine*, 2009, vol. 37, n° 7, pp. S203-S210.

[Setz C., Arnrich B., *et al.* 2010], Setz C., Arnrich B., *et al.* Discriminating stress from cognitive load using a wearable EDA device. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, 2010, vol. 14, n° 2, pp. 410-417.

[Shah J. H., Zhai H., *et al.* 2005], Shah J. H., Zhai H., *et al.* Comparative evaporimetry in man. *Skin Research and Technology*, 2005, vol. 11, pp. 205-208.

[Shoemaker J. A. et Refinetti R. 1996], Shoemaker J. A. et Refinetti R. Day-night difference in the preferred ambient temperature of human subjects. *Physiology & Behavior*, 1996, vol. 59, n° 4–5, pp. 1001-1003.

[Simon E. 2006], Simon E. Deep-body thermosensitivity: Another look.: A tribute to Harold Theodore (Ted) Hammel (1921-2005). *Journal of Thermal Biology*, 2006, vol. 31, n° 1-2, pp. 4-18.

[Sisalli S., Adao A., *et al.* 2006], Sisalli S., Adao A., *et al.* Sorptive tape extraction - a novel sampling methode for the in vivo study of skin. *LCGC Europe*, 2006, vol. 19, n° 1.

[Sisalli S. et Sandra P. 2007], Sisalli S. et Sandra P. Procédé de détermination qualitatif et/ou quantitatif d'au moins une molécule présente sur une surface solide. WO 2007/057556 A1, 2007.

[Sivamani R. K., Goodman J., *et al.* 2003], Sivamani R. K., Goodman J., *et al.* Coefficient of friction: tribological studies in man – an overview. *Skin Research and Technology*, 2003, vol. 9, n° 3, pp. 227-234.

[Smith C. et Havenith G. 2011], Smith C. et Havenith G. Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, vol. 111, n° 7, pp. 1391-1404.

[Sørensen L. T., Jørgensen S., *et al.* 2009], Sørensen L. T., Jørgensen S., *et al.* Acute Effects of Nicotine and Smoking on Blood Flow, Tissue Oxygen, and Aerobe Metabolism of the Skin and Subcutis. *Journal of Surgical Research*, 2009, vol. 152, n° 2, pp. 224-230.

[Sowa M. G., Matas A., *et al.* 2002], Sowa M. G., Matas A., *et al.* Spectroscopic assessment of cutaneous hemodynamics in the presence of high epidermal melanin concentration. *Clinica Chimica Acta*, 2002, vol. 317, n° 1–2, pp. 203-212.

[Spencer T. S., Linamen C. E., *et al.* 1975], Spencer T. S., Linamen C. E., *et al.* Temperature dependence of water content of stratum corneum. *British Journal of Dermatology*, 1975, vol. 93, n° 2, pp. 159-164.

[Stevens J. C. C. K. K. 1998], Stevens J. C. C. K. K. Temperature sensitivity of the body surface over the life span. *Somatosensory & Motor Research*, 1998, vol. 15, n° 1, pp. 13-28.

[Stewart M. I., Bernhard J. D., *et al.* 2003], Stewart M. I., Bernhard J. D., *et al.* The structure of skin lesions and fundamentals of diagnosis. In: Fitzpatrick's dermatology in general medicine. Sixième édition. McGraw-Hill, Medical Pub. Division, 2003, pp. 11-30.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Stolwijk J. A. J. et Hardy J. D. 1966], Stolwijk J. A. J. et Hardy J. D. Temperature regulation in man — A theoretical study. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, 1966, vol. 291, n° 2, pp. 129-162.

[Sugawara T., Kikuchi K., *et al.* 2012], Sugawara T., Kikuchi K., *et al.* Decreased lactate and potassium levels in natural moisturizing factor from the stratum corneum of mild atopic dermatitis patients are involved with the reduced hydration state. *Journal of Dermatological Science*, 2012, n° 0.

[Sunwoo Y., Chou C., *et al.* 2006], Sunwoo Y., Chou C., *et al.* Physiological and Subjective Responses to Low Relative Humidity. *Journal of physiological anthropology*, 2006, vol. 25, n° 1, pp. 7-14.

[Tagami H. 2008], Tagami H. Location-related differences in structure and function of the stratum corneum with special emphasis on those of the facial skin. *International Journal of Cosmetic Science*, 2008, vol. 30, n° 6, pp. 413-434.

[Takiwaki H. 1998], Takiwaki H. Measurement of skin color: practical application and theoretical considerations. *The journal of medical investigation : JMI*, 1998, vol. 44, n° 3-4, pp. 121-126.

[Takiwaki H., Miyaoka Y., *et al.* 2002], Takiwaki H., Miyaoka Y., *et al.* Graphic analysis of the relationship between skin colour change and variations in the amounts of melanin and haemoglobin. *Skin Research and Technology*, 2002, vol. 8, n° 2, pp. 78-83.

[Tenenhaus M. 1998], Tenenhaus M. La régression PLS: Théorie et pratique: Éd. Technip, 1998.

[Tenenhaus M., Gauchi J. P., *et al.* 1995], Tenenhaus M., Gauchi J. P., *et al.* Régression PLS et applications. Paris, FRANCE: Société de statistique de France, 1995.

[Thellier F., Monchoux F., *et al.* 2007], Thellier F., Monchoux F., *et al.* Prise en compte du comportement adaptatif de l'être humain dans la simulation thermique de l'habitat. *In: Société Française de Thermique (SFT)*, 2007, Île des Embiez.

[Thiele F. A. J. et van Senden K. G. 1966], Thiele F. A. J. et van Senden K. G. Relationship Between Skin Temperature and the Insensible Perspiration of the Human Skin. *The Journal of investigative dermatology*, 1966, vol. 47, n° 4, pp. 307-312.

[Tochihara Y., Kumamoto T., *et al.* 2011], Tochihara Y., Kumamoto T., *et al.* Age-related differences in cutaneous warm sensation thresholds of human males in thermoneutral and cool environments. *Journal of Thermal Biology*, 2011, vol. 36, n° 2, pp. 105-111.

[Tran H.-V. 2007], Tran H.-V. Caractérisation des propriétés mécaniques de la peau humaine in vivo via l'IRM. Thèse Biomécanique et Génie Biomédical. Compiègne: Université de Technologie de Compiègne, 2007, 173 p.

[Tschachler E., Reinisch C. M., *et al.* 2004], Tschachler E., Reinisch C. M., *et al.* Sheet Preparations Expose the Dermal Nerve Plexus of Human Skin and Render the Dermal Nerve End Organ Accessible to Extensive Analysis. *J Investig Dermatol*, 2004, vol. 122, n° 1, pp. 177-182.

[Van der Valk P. G. M., Kucharekova M., *et al.* 2005], Van der Valk P. G. M., Kucharekova M., *et al.* Transepidermal water loss and its relation to barrier function and skin irritation. In: bioengineering of the skin - water and the stratum corneum. second édition. 2005, pp. 97 - 104.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Van Hoof J. 2008], Van Hoof J. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *indoor air*, 2008, vol. 18, n° 3, pp. 182-201.

[Van Hoof J., Mazej M., *et al.* 2010], Van Hoof J., Mazej M., *et al.* Thermal comfort : research and practice. *Frontiers in Bioscience*, 2010, n° 15, pp. 765-788.

[Van Someren E. J., Raymann R. J., *et al.* 2002], Van Someren E. J., Raymann R. J., *et al.* Circadian and age-related modulation of thermoreception and temperature regulation: mechanisms and functional implications. *Ageing Res Rev*, 2002, vol. 1, n° 4, pp. 721-778.

[Vassort G. et Fauconnier J. 2008], Vassort G. et Fauconnier J. Les canaux TRP (transient receptor potential). *Med Sci (Paris)*, 2008, vol. 24, n° 2, pp. 163-168.

[Verheyen J., Theys N., *et al.* 2011], Verheyen J., Theys N., *et al.* Thermal comfort of patients: Objective and subjective measurements in patient rooms of a Belgian healthcare facility. *Building and Environment*, 2011, vol. 46, n° 5, pp. 1195-1204.

[Visscher M., Hoath S. B., *et al.* 2001], Visscher M., Hoath S. B., *et al.* Effect of semipermeable membranes on skin barrier repair following tape stripping. *Arch Dermarol Res*, 2001, vol. 293, pp. 491-489.

[Vogt J.-J. 1985], Vogt J.-J. Confort physiologique. *Technique de l'ingénieur*, 1985, vol. B-2180, pp. 1-10.

[Wa C. V. et Maibach H. I. 2010], Wa C. V. et Maibach H. I. Mapping the human face: biophysical properties. *Skin Research and Technology*, 2010, vol. 16, n° 1, pp. 38-54.

[Walgama C., Fackrell S., *et al.* 2006], Walgama C., Fackrell S., *et al.* Passenger Thermal Comfort in Vehicles - A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2006, vol. 220, n° 5, pp. 543-562.

[Waller J. M. et Maibach H. I. 2005], Waller J. M. et Maibach H. I. Age and skin structure and function, a quantitative approach (I): blood flow, pH, thickness, and ultrasound echogenicity. *Skin Research and Technology*, 2005, vol. 11, n° 4, pp. 221-235.

[Wang D., Zhang H., *et al.* 2007], Wang D., Zhang H., *et al.* Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort. *Building and Environment*, 2007, vol. 42, n° 12, pp. 3933-3943.

[Watts B. M., Ylimaki G. L., *et al.* 1991], Watts B. M., Ylimaki G. L., *et al.* Méthodes de base pour l'évaluation sensorielle des aliments. Ottawa: CRDI, 1991.

[Weatherall I. L. et Coombs B. D. 1992], Weatherall I. L. et Coombs B. D. Skin color measurements in terms of CIELAB color space values. *The Journal of investigative dermatology*, 1992, vol. 99, n° 4, pp. 468-473.

[Weinert D. 2010], Weinert D. Circadian temperature variation and ageing. *Ageing Research Reviews*, 2010, vol. 9, n° 1, pp. 51-60.

[Weinert D. et Waterhouse J. 2007], Weinert D. et Waterhouse J. The circadian rhythm of core temperature: Effects of physical activity and aging. *Physiology & Behavior*, 2007, vol. 90, n° 2–3, pp. 246-256.

[Wenger B. C. 2003], Wenger B. C. Thermoregulation. In: Dermatology in generam medicine: McGraw - Hill Medical Publishing Division, 2003, pp. 119-127.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Widmaier E. P., Raff H., *et al.* 2009], Widmaier E. P., Raff H., *et al.* Homéostasie : une base pour la physiologie humaine. In: Physiologie humaine. Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme. 5ème édition. Montréal - Canada: Maloine, 2009.

[Wilhelm K.-P., Brandt M., *et al.* 2005], Wilhelm K.-P., Brandt M., *et al.* Transepidermal water loss and barrier function of aging human skin. In: Bioengineering of the skin - Water and the stratum corneum, 2005, pp. 143 - 155.

[Wilson D. R. et Maibach H. 1989], Wilson D. R. et Maibach H. Transepidermal water loss : a review. In: cutaneous investigation in health and disease - Non-invasive methods and instrumentation, 1989, pp. 113-133.

[Wolf R., Wolf D., *et al.* 1998], Wolf R., Wolf D., *et al.* Smoking and the skin, radically speaking. *Clinics in Dermatology*, 1998, vol. 16, n° 5, pp. 633-639.

[Wright C. I., Kroner C. I., *et al.* 2006], Wright C. I., Kroner C. I., *et al.* Non-invasive methods and stimuli for evaluating the skin's microcirculation. *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods*, 2006, vol. 54, n° 1, pp. 1-25.

[Wu K. S., van Osdol W. W., *et al.* 2006], Wu K. S., van Osdol W. W., *et al.* Mechanical properties of human stratum corneum: Effects of temperature, hydration, and chemical treatment. *Biomaterials*, 2006, vol. 27, n° 5, pp. 785-795.

[Yao Y., Lian Z., *et al.* 2008], Yao Y., Lian Z., *et al.* Experimental study on physiological responses and thermal comfort under various ambient temperatures. *Physiology & Behavior*, 2008, vol. 93, n° 1-2, pp. 310-321.

[Yasuhara S., Iwama A., *et al.* 2007], Yasuhara S., Iwama A., *et al.* Menstrual cycle affects thermal regulation and comfort. *Neuroscience Research*, 2007, vol. 58, Supplement 1, p. S166.

[Yasuoka A., Kubo H., *et al.* 2012], Yasuoka A., Kubo H., *et al.* Interindividual differences in thermal comfort and the responses to skin cooling in young women. *Journal of Thermal Biology*, 2012, vol. 37, n° 1, pp. 65-71.

[Yosipovitch G., Sackett-Lundeen L., *et al.* 2004], Yosipovitch G., Sackett-Lundeen L., *et al.* Circadian and Ultradian (12 h) Variations of Skin Blood Flow and Barrier Function in Non-Irritated and Irritated Skin[mdash]Effect of Topical Corticosteroids. *J Investig Dermatol*, 2004, vol. 122, n° 3, pp. 824-829.

[Yosipovitch G., Tang M., *et al.* 2007], Yosipovitch G., Tang M., *et al.* Study of Psychological Stress, Sebum Production and Acne Vulgaris in Adolescents. *Acta Dermato-Venereologica*, 2007, vol. 87, n° 2, pp. 135-139.

[Zani M.-L. 2001], Zani M.-L. Thermographie IR : la qualité des images ne suffit pas toujours. *Mesures*, 2001, pp. 45-47.

[Zhai J. et Barreto A. 2006], Zhai J. et Barreto A. Stress recognition using non-invasive technology. *Proceedings of the 19th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference FLAIRS*, 2006, pp. 395-400.

[Zhang H. 2003], Zhang H. (2003). Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments.

[Zhang H., Arens E., *et al.* 2010a], Zhang H., Arens E., *et al.* Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *Building and Environment*, 2010a, vol. 45, n° 2, pp. 389-398.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

[Zhang H., Arens E., *et al.* 2010b], Zhang H., Arens E., *et al.* Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. *Building and Environment*, 2010b, vol. 45, n° 2, pp. 399-410.

[Zhang H., Arens E., *et al.* 2010c], Zhang H., Arens E., *et al.* Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment*, 2010c, vol. 45, n° 2, pp. 380-388.

[Zhang H., Huizenga C., *et al.* 2001], Zhang H., Huizenga C., *et al.* Considering individual physiological differences in a human thermal model. *Journal of Thermal Biology*, 2001, vol. 26, n° 4-5, pp. 401-408.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Liste des publications & communications

Bigouret A, De Oliveira F, Gehin C. L'imagerie Infrarouge : méthode d'évaluation de la perception. Poster, 7ème Colloque OPTDIAG, 2009, Paris

Bigouret A., De Oliveira F., Gehin C. Objectivation of the individual sensory state by the assessment of specific biophysical properties of the skin in different climatic conditions. In: Abstracts of the International Meeting of the International Society for Biophysics and Imaging of the Skin (ISBS), 2009, Besançon, France: *Skin Research and Technology*, 2010, pp. 450-451.

Bigouret A., De Oliveira F., Gehin C. Characterization of thermal sensation clusters with physiological indicators in various ambient temperatures during rest. *In: Proceedings of the XIV International Conference on Environmental Ergonomics (ICEE)*, 2011, Nafplio, Grèce.

Bigouret A, De Oliveira F, Gehin C. Analyse de l'impact de la température ambiante sur les propriétés biophysiques de la peau. Communication orale. Congrès de la Société Francophone d'Ingénierie et d'Imagerie Cutanée (SF2IC), 3-5 octobre 2012, Reims

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

ANNEXE 1 : Etude sur les seuils de perception à un courant électrique

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

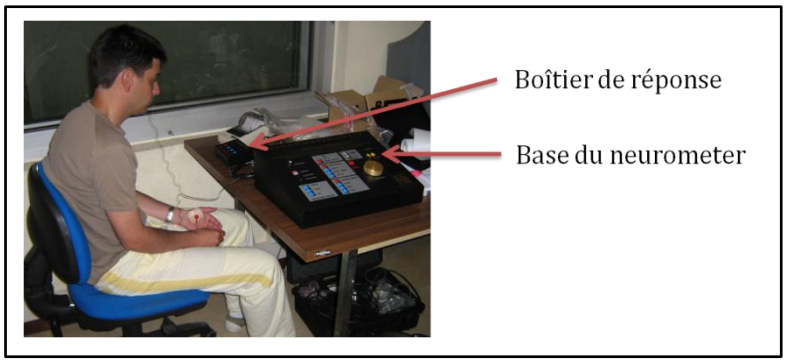
Contexte

Cette étude permet de compléter l'étude des seuils de perception thermique grâce à une mesure des seuils de perception à un courant électrique. L'évaluation des seuils de perception thermique et des seuils à un courant électrique transcutané neurosélectif (d'une fréquence de 5Hz et 250Hz) stimule les mêmes fibres nerveuses (Aδ et C) mais le mécanisme de transduction est différent. En effet, la stimulation thermique active les récepteurs thermiques ou plus précisément les canaux cationiques TRP, alors que la stimulation électrique transcutanée a un effet direct sur les canaux ioniques de la membrane nerveuse électro-sensitive et n'a pas d'effet sur les terminaisons des organes spécialisés [Katims 1998]. Cette étude permettra donc d'établir si les résultats sur les différences des deux groupes de sensibilité au froid sont identiques avec les deux méthodes de mesure des seuils de perception.

La mesure des seuils de perception à un courant électrique

Le Neuromètre

Le neuromètre est un stimulateur électrique transcutané neurosélectif capable de déterminer quantitativement le seuil de perception d'un individu (pour trois catégories de fibres nerveuses), c'est-à-dire l'intensité minimum d'un courant alternatif sinusoïdal qui va déclencher une sensation reproductible. Il est neurosélectif car il peut générer des trains d'ondes sinusoïdaux à des fréquences différentes (5 Hz, 250 Hz et 2000 Hz), d'amplitudes différentes et de durées constantes (3s, 2s, 1s respectivement). Or, il est connu que chacune de ces fréquences activent spécifiquement une catégorie de fibres sensorielles. A 5 Hz, les fibres C sont activées, à 250 Hz, les fibres Aδ et à 2000 Hz, les fibres Aβ.



Le Neuromètre de Neurotron

Une paire d'électrodes jetables d'un diamètre de 1 cm (Goldtrode® Disposable Electrodes) est connectée sur des électrodes puis fixées sur la peau par un scotch particulier (SofTape® Tape Strips) après avoir été recouvertes d'un gel conducteur (Goldtrode® electrode

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

gel). Le logiciel est ensuite paramétré : la méthode de détection automatique du seuil est sélectionnée ainsi que la zone de mesure (identique à celle choisie pour le TSA-II : la zone maxillaire sur le visage), puis le test débute.

Le test de détection du seuil à un courant

Le test automatique de détection des seuils dure environ 12 minutes pour 1 zone avec les 3 fréquences. Il comprend deux étapes :

- l'alignement de l'intensité pour une fréquence donnée

L'intensité du stimulus augmente jusqu'à ce que le sujet déclare ressentir la stimulation autour du site sur lequel les électrodes sont positionnées. Cette étape sera répétée trois fois afin d'obtenir une première approximation du seuil.

- Le protocole des choix forcés

Une série de stimuli est présentée au sujet. Les stimuli sont appliqués de façon aléatoire : test A, test B ou rien (placebo). Le sujet doit appuyer, après un signal sonore particulier, sur le bouton associé au test où il a ressenti quelque chose ou sur le bouton "none" s'il n'a rien ressenti. Le niveau en sortie du stimulus est ajusté suivant les réponses. Le seuil de perception correspond alors à la moyenne entre l'intensité minimum détectée et le stimulus le plus faible qui n'a pas été détecté. Il faut au moins 20 choix forcés pour que la mesure soit valide. Si les réponses du sujet sont incohérentes, l'appareil ne donnera pas de seuil. Cette séquence de test est répétée pour chaque fréquence.

Les caractéristiques de la stimulation électrique délivrée par le neuromètre

La stimulation électrique transcutanée du neuromètre présente trois grandes particularités :

- ***Un circuit à courant constant***

Il est connu que l'impédance électrique de la peau (ou la résistance) est affectée par les variations de l'épaisseur de la peau, par la transpiration, par la température de peau et par bien d'autres facteurs physiologiques. Or, l'utilisation d'un courant constant permet de standardiser le stimulus électrique (en compensant les variations d'impédance des tissus) et de rendre la mesure du seuil indépendante de ces variables (telles que l'épaisseur et la température de peau). La mesure est donc davantage reproductible [Katims 1998].

- ***Le mécanisme d'excitation des fibres nerveuses***

La stimulation électrique transcutanée passe à travers les récepteurs sensoriels et excite directement les fibres nerveuses. Ceci s'explique par le fait que les organes sensoriels ont une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

résistance électrique plus élevée que les fibres nerveuses et que la stimulation emprunte le chemin avec la plus faible résistance.

- ***La neurosélectivité de la stimulation électrique***

Les différentes catégories de fibres nerveuses possèdent des différences au niveau de leur période réfractaire (durée pendant laquelle la fibre est totalement inexcitable). Ces différences sont en lien avec la quantité de canaux ioniques disponibles par surface de fibre. Les fibres les plus petites ont les périodes réfractaires les plus longues et nécessitent une durée de stimulation importante (par rapport aux autres fibres) pour déclencher un potentiel d'action. Les fibres avec un large diamètre pourront répondre à un stimulus rapide de 2000Hz alors que les petites fibres non myélinisées ne répondront qu'à une période de dépolarisation continue de quelques millisecondes [Katims 1998]. Ceci permet donc une sélectivité des types de fibres par la fréquence de la stimulation électrique sinusoïdale.

Le tableau suivant répertorie les points communs et les différences entre la mesure des seuils de perception thermique effectuée avec le TSA-II et la mesure des seuils à un courant électrique effectuée avec le neuromètre.

Confrontation des caractéristiques de l'information testée par le TSA-II et par le neuromètre

	TSA-II	**Neuromètre**
Nature du stimulus	Thermique : chaud ou froid	Electrique : courant électrique sinusoïdal avec 3 fréquences (F) différentes
Récepteurs (origine de la transduction)	Les canaux ioniques sur les terminaisons libres correspondant aux thermorécepteurs Pour le chaud : TRPV1-4 Pour le froid : TRPM8 et TRPA1	Les canaux ioniques de la membrane nerveuse électrosensitive : F=5Hz : membrane de la fibre C F=250Hz : membrane de la fibre Aδ
Transport du potentiel d'action	Pour le chaud : fibres C Pour le froid : fibres Aδ	F=5Hz : fibres C F=250Hz : fibres Aδ
Traitement de l'information	Au niveau de l'aire sensitive spécifique du cortex cérébral : aire somato-sensitive + traitement par la zone du cortex d'association	Au niveau de l'aire sensitive spécifique du cortex cérébral : aire somato-sensitive + traitement par la zone du cortex d'association
Sensation ressentie	Pour le chaud => chaud Pour le froid => froid	F=5Hz => picotements ou fourmillements F=250Hz => picotements ou fourmillements

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les résultats

Seule l'activité des fibres nerveuses véhiculant l'information de froid (Aδ) et de chaud (C) sera analysée afin de compléter l'analyse des seuils de perception thermique. Les seuils de perception à un courant électrique avec une fréquence de 2000Hz, stimulant les fibres Aβ connues pour véhiculer une information mécanique et non thermique, ne seront donc pas analysés ici.

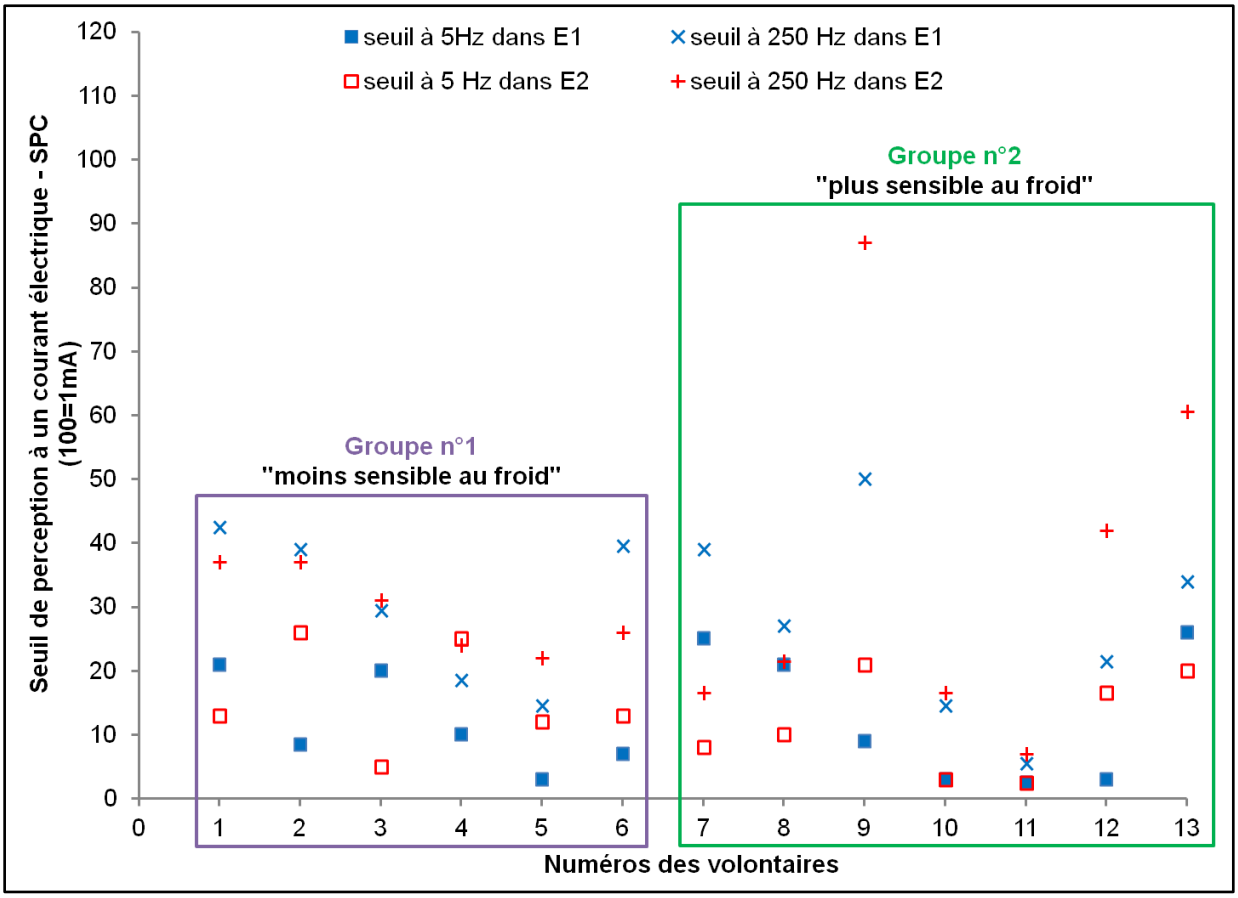
La validité des seuils de perception à un courant électrique

Les valeurs moyennes

En comparaison avec les valeurs des seuils de perception à un courant électrique publiées dans le rapport de la société Neurotron [Neurotron 2010] pour le nerf trijumeau (sur des sujets sains), la valeur moyenne obtenue, dans notre étude dans des conditions standards (~ 20°C), pour le seuil de perception à un courant d'une fréquence de 5 Hz (12,2 ± 9 vs. 10,0 ± 10 mA/100) est similaire. Par contre, la valeur moyenne obtenue pour le seuil à un courant d'une fréquence de 250 Hz est légèrement plus élevée (28,9 ± 13 vs. 19 ± 14 mA/100) mais avec un écart type similaire. En accord avec la littérature, tous les seuils obtenus avec un courant à 250 Hz sont plus élevés que ceux obtenus avec un courant à 5Hz dans une situation donnée.

Les différences obtenues avec la littérature peuvent être liées au positionnement des électrodes de mesures. En effet, le nerf trijumeau présente trois branches - le nerf ophtalmique, le nerf maxillaire et le nerf mandibulaire qui ont des sensibilités différentes [Posnick, Zimbler *et al.* 1990]. Or, le rapport de la société Neurotron ne précise pas sur quelle branche du nerf trijumeau les mesures ont été faites. Les différences peuvent également s'expliquer par des variations, entre les études, de la quantité de gel électro-conducteur déposée sur les électrodes ou encore du contexte de l'étude (se répercutant sur la concentration des sujets). Globalement, les valeurs de seuil de perception à un courant électrique semblent donc fiables.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés



Valeurs moyennes des seuils de perception à un courant alternatif d'une fréquence de 5Hz et de 250 Hz obtenues dans l'environnement E1 à ~ 20°C et dans l'environnement E2 à ~ 30°C pour chacun des volontaires

Les valeurs atypiques

Des valeurs extrêmes apparaissent, tout de même, dans la figure précédente pour les seuils de perception à 250 Hz. Ainsi, le sujet n°9, 13 et 12 présentent des valeurs supérieures à 30 dans l'environnement E2 à 30°C. Ce manque de sensibilité à 30°C est probablement lié à une gêne. En effet, les trois sujets ont utilisé les expressions suivantes pour décrire l'environnement E2 à 30°C ou pour décrire leur état dans cet environnement :

- "ambiance trop chaude" pour le sujet n°9
- "chaleur étouffante" pour le sujet n°12
- "pièce trop chaude" et "envie de dormir" pour le sujet n°13

Les valeurs extrêmes ne paraissent donc pas aberrantes. Elles semblent bien refléter une sensibilité particulière associée à un état thermique particulier et, par là même, à un état de concentration particulier des volontaires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

L'effet de la température ambiante

La température ambiante semble avoir un impact sur peu de volontaires. Globalement, elle n'a pas eu d'influence significative sur les seuils de perception à un courant électrique à 5Hz et à 250 Hz, puisque la significativité du test des rangs signés de Wilcoxon, comparant les données obtenues dans E1 et celles obtenues dans E2, est de l'ordre de 0,7 pour les seuils à 5 Hz et de l'ordre de 0,5 pour les seuils à 250 Hz. Cette observation est en accord avec une étude réalisée sur des sujets sains dans un environnement à 25°C et dans un environnement à 8°C qui montre que les seuils à 5Hz et à 250Hz restent identiques dans les deux environnements [Sakura, Imamachi *et al.* 2001]. Les seuils mesurés semblent donc fiables.

Lien entre la sensibilité thermique globale et la sensibilité "électrique" locale

Cette partie vise à déterminer si le groupe G2 sensible "globalement" au froid présente une activité neurosensorielle (activité des fibres Aδ et C) ou des seuils de perception à un courant électrique d'une fréquence de 5Hz et de 250 Hz significativement différents du groupe G1.

Après transformation des valeurs des seuils de perception à 5Hz avec la méthode de Box&Cox, la distribution des données ne suit pas une loi normale. Ces données ont donc été analysées avec le test non paramétrique de Mann Whitney. Par contre, les seuils obtenus avec un courant à 250 Hz suivent une loi normale et ont été traitées avec le test paramétrique de l'ANOVA à deux facteurs (facteur 1 : environnement thermique ; facteur 2 : groupe de sensibilité thermique) avec interaction. Les résultats de ces analyses sont répertoriés dans le tableau suivant.

Significativités p des tests de Mann Whitney appliqués aux valeurs des seuils de perception à un courant électrique de 5Hz et du test de l'ANOVA à 2 Facteurs avec interaction appliqué aux valeurs des seuils de perception à un courant électrique de 250Hz

	Facteurs	Seuil à 5 Hz	Seuil à 250 Hz
Données brutes	Environnement thermique	0,640	0,575
	Groupe de sensibilité au froid	0,501	0,829
	Interaction	0,9 dans E1 0,3 dans E2	0,512

Ce tableau montre que, quelque soit l'environnement thermique, la sensibilité locale électrique du groupe G1 et G2 n'est pas différente.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

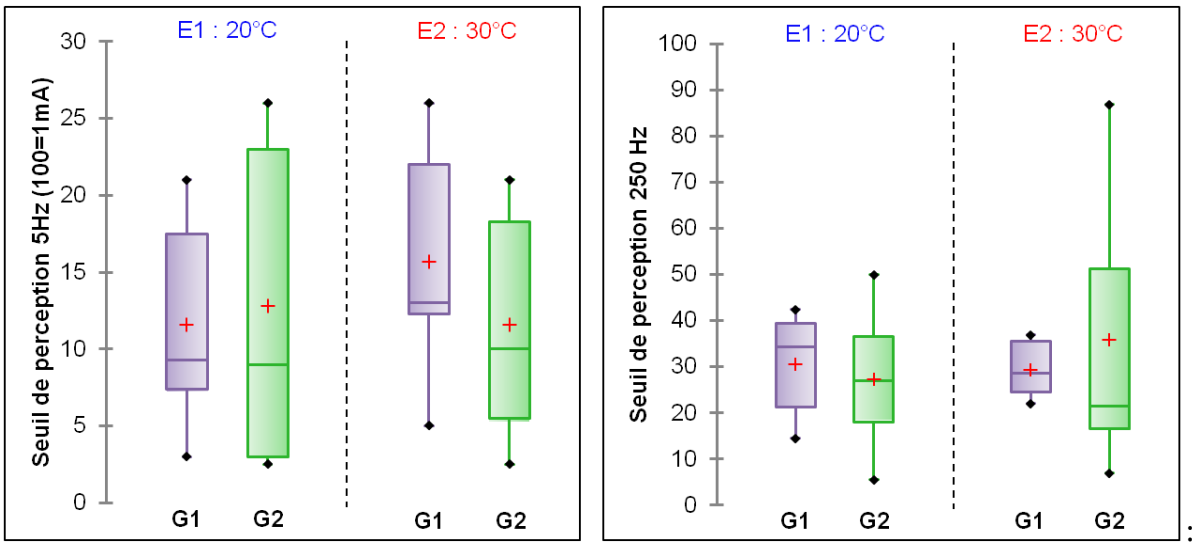


Diagramme "box and whisker" ou diagramme en boîte à moustaches comparant : les seuils de perception à un courant électrique à 5Hz (à gauche) et les seuils de perception à un courant électrique à 250Hz (à droite) du groupe G1 non sensible "globalement" au froid et du groupe G2 sensible "globalement" au froid dans l'environnement frais E1 (~ 20°C) et dans l'environnement chaud E2 (~ 30°C). La croix rouge représente la valeur moyenne.

La figure précédente montre que le groupe G2, sensible "globalement" au froid, a tendance à être plus sensible aux stimulations électriques à 5Hz (associés aux fibres C véhiculant l'information de chaud) que le groupe G1. Mais cette tendance n'est pas significative et ne permet pas de démontrer que la sensibilité thermique "globale" peut être liée à une activité particulière des fibres nerveuses.

Les conclusions sont donc similaires à celles faites avec les seuils de perception thermiques. Les seuils de perception à un courant électrique ne permettent pas de distinguer les deux groupes de sensibilité au froid. Ces deux groupes ne semblent pas avoir une activité neurosensorielle différente.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

ANNEXE 2 : Questionnaires des expérimentations préliminaires

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CSTB
le futur en construction

Questionnaire Q1 - Protocole A et B (1/2)

Cadre de l'étude : Thèse Armelle Bigouret – Fiche recherche Qualité des ambiances : perception sensorielle - RE-151-094QAU-740

Investigateurs : CSTB Nantes - CAPE
Armelle Bigouret, Fabrice De Oliveira

Code du sujet : 000

Informations personnelles

Nom	
Prénom	
Sexe	1. Femme 2. Homme
Âge	*A reporter dans le tableau*
Taille (m)	*A reporter dans le tableau*
Poids (kg)	*A reporter dans le tableau*

Question 1 : Etes-vous **fumeur/se** ?
1. OUI 2. NON

Question 2: Si oui, combien de cigarettes fumez-vous par jour ? …*A reporter dans le tableau .*

Activité sportive

Question 3 : Pratiquez-vous une **activité sportive** ?
1. OUI 2. NON

Question 4 : Si oui, quel type d'activité ? …*A reporter dans le tableau*
Question 5 : à quelle fréquence ? …*A reporter dans le tableau*
Question 6 : pendant combien de temps ? …*A reporter dans le tableau*

Peau

Question 7 : Selon vous, quel **type de peau** avez-vous ?
1. Très sèche 2. sèche 3. normale 4. mixte 5. grasse 6. Très grasse

Question 8 : Sans protection solaire, comment votre peau réagit ?
1. Brûle toujours, bronze jamais
2. Brûle toujours, bronze parfois
3. Brûle parfois, bronze toujours
4. Ne brûle jamais, bronze toujours

Question 9 : Avez-vous déjà eu des **problèmes de peau** ?
1. OUI 2. NON
Question 10: Si oui, quel type de problème ? …*A reporter dans le tableau*

Question 11 : Avez-vous l'habitude d'entretenir ou de soigner votre peau ?
1. OUI 2. NON
Question 12: Si oui, quels produits utilisez-vous ? …*A reporter dans le tableau*

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CSTB le futur en construction

Questionnaire Q1 - Protocole A et B (2/2)

Cadre de l'étude : Thèse Armelle Bigouret – Fiche recherche Qualité des ambiances : perception sensorielle - RE-151-094QAU-740

Investigateurs : CSTB Nantes - CAPE
Armelle Bigouret, Fabrice De Oliveira

Code du sujet : 000

Etat thermique habituel

Question 13 : Habituellement, **transpirez-vous** de façon excessive (en dehors d'un effort sportif) au niveau …
...du **visage** ? **5.** très souvent **4.** souvent **3.** parfois **2.** rarement **1.** jamais

Question 14 : Vous considérez-vous **frileux/se** ?
4. Oui très **3.** Oui modérément **2.** Oui un peu **1.** pas du tout

Question 15 : Vous considérez-vous **résistant/te à la chaleur** ?
4. Oui très **3.** Oui modérément **2.** Oui un peu **1.** pas du tout

Etat de stress habituel

Question 16 : Habituellement, êtes-vous sujet au **stress** ?
4. la plupart du temps **3.** souvent **2.** de temps en temps **1.** jamais

Question 17 : Vous pouvez rester tranquillement assis à ne rien faire et vous sentir décontracté ?
1. Oui quoiqu'il arrive **2.** Oui en général **3.** rarement **4.** jamais

Etat de santé

Question 18 : Quel est votre **état de santé** ?
5. Excellent **4.** Bon **3.** passable **2.** mauvais **1.** très mauvais

Question 19 : Quels **médicaments** prenez-vous en ce moment (contraceptif et autres) ?
...*A reporter dans le tableau*

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CSTB
le futur en construction

Questionnaire Q2 et Q3 - Protocole A

Cadre de l'étude : Thèse Armelle Bigouret – Fiche recherche Qualité des ambiances : perception sensorielle - RE-151-094QAU-740

Titre du projet : Etude des seuils de perception

Code du sujet ☐

Investigateurs : CSTB Nantes - CAPE
Armelle Bigouret, Fabrice De Oliveira

Question 1 : Décrivez votre **tenue vestimentaire** :……*A reporter dans le tableau* ……
……
……

Question 2 : Avez-vous ….

	OUI	NON
…fumé pendant les 3h qui précèdent l'expérimentation ?	1	2
…bu de l'alcool pendant les 12h qui précèdent l'expérimentation ?	1	2
…bu des boissons excitantes pendant l'heure qui précède l'expérimentation ?	1	2
…eu une activité sportive pendant les 24h qui précèdent l'expérimentation ?	1	2
…appliqué un produit sur votre visage 12h avant l'expérimentation ?	1	2

Veuillez donner des précisions lorsque vous avez coché OUI : ……
……
A reporter dans le tableau dans la case où la consigne n'a pas été respectée

Question 3 : Vous sentez-vous **fatigué/ée** ?

pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	énormément
1	2	3	4	5

Question 4 : Dans quel état de **stress** êtes-vous ?

Très détendu	détendu	peu stressé	stressé	très stressé
1	2	3	4	5

Question 5 : Ressentez-vous un **mal-être ou appréhension** par rapport à l'expérimentation ?

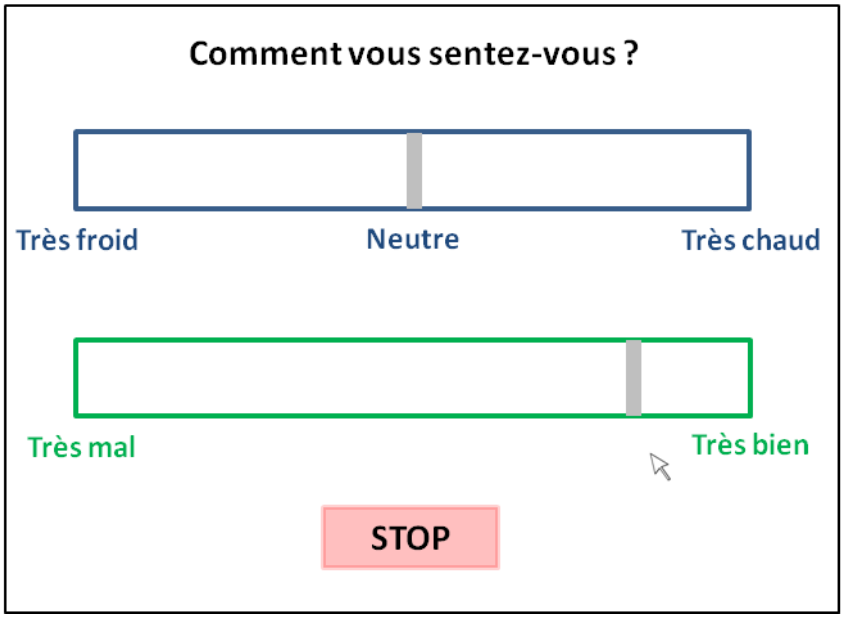
pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	énormément
1	2	3	4	5

Question 6 : Quels mots utiliseriez-vous pour définir l'**ambiance** dans laquelle vous vous trouvez ?
Essayez de donner une définition à chacun des termes que vous utilisez.
A reporter dans le tableau
……
……
……
……
……

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Questionnaire interactif (QI) - Protocole A

Les volontaires expriment ce qu'ils ressentent en déplaçant la barre grise avec la souris de l'ordinateur et en validant leurs choix avec le bouton "STOP". L'horaire et la graduation du clic sont alors enregistrés.



Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CSTB le futur en construction

Questionnaire Q2 et Q3 - Protocole B (1/3)

Cadre de l'étude : Thèse Armelle Bigouret – Fiche recherche Qualité des ambiances : perception sensorielle - RE-151-094QAU-740

Titre du projet : Etude des proptiétés du film hydrolipidique cutané

Code du sujet ☐

Investigateurs : CSTB Nantes - CAPE
Armelle Bigouret, Fabrice De Oliveira

Question 1 : Décrivez votre **tenue vestimentaire** :……..*A reporter dans le tableau ……..……..*
……
……

Question 2 : Avez-vous ….

	OUI	NON
…fumé pendant les 3h qui précèdent l'expérimentation ?	1	2
…bu de l'alcool pendant les 12h qui précèdent l'expérimentation ?	1	2
…bu des boissons excitantes pendant l'heure qui précède l'expérimentation ?	1	2
…eu une activité sportive pendant les 24h qui précèdent l'expérimentation ?	1	2
…appliqué un produit sur votre visage 12h avant l'expérimentation ?	1	2

Veuillez donner des précisions lorsque vous avez coché OUI : ……..
……
A reporter dans le tableau dans la case où la consigne n'a pas été respectée

Question 3 : Vous sentez-vous **fatigué/ée** ?

pas du tout (1) — un peu (2) — modérément (3) — beaucoup (4) — énormément (5)

Question 4 : Dans quel état de **stress** êtes-vous ?

Très détendu (1) — détendu (2) — peu stressé (3) — stressé (4) — très stressé (5)

Question 5 : Ressentez-vous un **mal-être ou appréhension** par rapport à l'expérimentation ?

pas du tout (1) — un peu (2) — modérément (3) — beaucoup (4) — énormément (5)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CSTB le futur en construction

Questionnaire Q2 et Q3 - Protocole B (2/3)

Cadre de l'étude : Thèse Armelle Bigouret – Fiche recherche Qualité des ambiances : perception sensorielle - RE-151-094QAU-740

Titre du projet : Etude des proptiétés du film hydrolipidique cutané

Code du sujet ☐

Investigateurs : CSTB Nantes - CAPE
Armelle Bigouret, Fabrice De Oliveira

Question 6 : Y'a-t-il un **élément de l'ambiance** qui vous dérange ... ?

	OUI	NON	Explication
…la lumière	1	2	
… la couleur	1	2	
…l'odeur	1	2	
…le bruit	1	2	
…l'espace	1	2	
…l'humidité	1	2	
...la température	1	2	

Question 7 : Comment vous sentez-vous ? Avez-vous…

Très froid	froid	légèrement froid	ni chaud, ni froid	légèrement chaud	chaud	Très chaud
-3	-2	-1	0	1	2	3

Question 8 : Trouvez-vous cela… ?

Très désagréable	désagréable	un peu désagréable	neutre	peu agréable	agréable	Très agréable
1	2	3	4	5	6	7

Question 9 : Transpirez-vous ?

pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	énormément
1	2	3	4	5

Question 10 : Avez-vous des frissons ?

pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	énormément
1	2	3	4	5

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CSTB
le futur en construction

Questionnaire Q2 et Q3 - Protocole B (3/3)

Cadre de l'étude : Thèse Armelle Bigouret – Fiche recherche Qualité des ambiances : perception sensorielle - RE-151-094QAU-740

Titre du projet : Etude des proptiétés du film hydrolipidique cutané

Code du sujet :

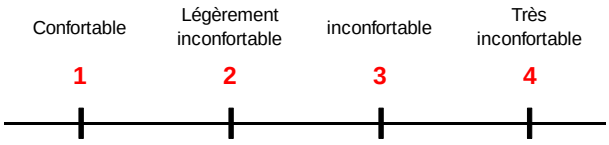
Investigateurs : CSTB Nantes - CAPE
Armelle Bigouret, Fabrice De Oliveira

Question 11 : Selon vous, avez-vous des zones du corps [visage/partie du visage : front, joue (…)/pied/main/bras/jambe…] plus froides ou plus chaudes que d'autres (température de peau non uniforme) ?

1. OUI 2. NON

Si oui, lesquelles : ……
……

Question 12 : Comment définiriez-vous votre **confort** dans l'ambiance dans laquelle vous vous trouvez ?



Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

ANNEXE 3 : Questionnaires de la campagne finale de mesures

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Questions destinées à la construction des groupes de sensibilité au froid.

Les questions répertoriées dans le tableau suivant sont issues du questionnaire en ligne de sélection et elles ont permis d'établir un score de « frilosité » qui a été utilisé pour construire les groupes d'individus présentant des sensibilités au froid distinctes.

Questions sur des habitudes de vie permettant d'établir un score de « frilosité ». Le score attribué à chaque réponse est indiqué entre parenthèse.

Questions	Réponses possibles (score)
Comment vous sentez-vous dans le froid … au niveau du corps ?	**Bien (0) / Pas trop mal (1) / Mal (2) / Très mal (3)**
Comment vous sentez-vous dans le froid … au niveau des mains ?	**Bien (0) / Pas trop mal (1) / Mal (2) / Très mal (3)**
Comment vous sentez-vous dans le froid … au niveau des pieds ?	**Bien (0) / Pas trop mal (1) / Mal (2) / Très mal (3)**
En hiver, avez-vous tendance à être plus couvert que les personnes de votre entourage ?	**Oui (1) / Non (0)**
En hiver, adaptez-vous votre tenue vestimentaire à la température extérieure?	**Oui (1) / Non (0)**
En hiver, mettez-vous plusieurs épaisseurs de vêtements ?	**Oui (1) / Non (0)**
En hiver, avez-vous tendance à avoir les mains froides ?	**Oui (1) / Non (0)**
En hiver, avez-vous tendance à avoir les pieds froids ?	**Oui (1) / Non (0)**
En hiver, avez-vous tendance à avoir le nez froid ?	**Oui avec sensation de douleur (2)** **Oui sans sensation de douleur (1)** **Non (0)**

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

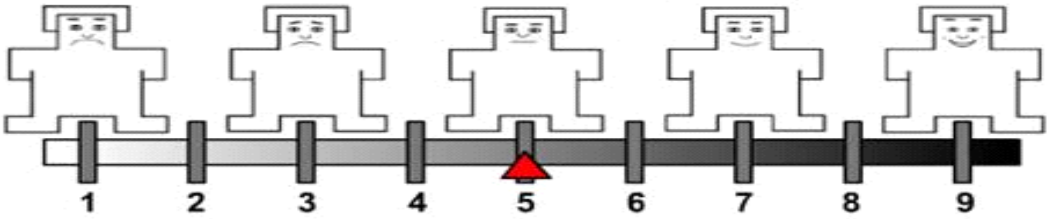
Questionnaire écrit destiné à évaluer le ressenti thermique des sujets

Chaque sujet a rempli ce questionnaire à la fin de la phase de mesures dans chacun des 6 environnements thermiques. Les sujets avaient la possibilité de positionner leur jugement par rapport aux jugements précédents. Ce questionnaire évalue le ressenti thermique des sujets et leur état général.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

CSTB le futur en construction	**Questionnaire**
	Cadre de l'étude : Thèse Armelle Bigouret **Titre du projet** : Etude de l'influence de différentes ambiances climatiques sur le ressenti déclaré
Code du sujet :	**Investigateurs** : CSTB Nantes - CAPE Armelle Bigouret

Quelle est votre humeur du jour ?



Consigne :

Pour toutes les questions, faites un trait vertical à l'endroit désiré sur l'échelle.
Vous avez, pour chaque question, **une seule réponse à noter par ambiance.**

Question 1 : Vous sentez-vous **fatiguée** ?

	pas du tout	un peu	modérément	beaucoup	énormément
ambiance 1					
ambiance 2					
ambiance 3					
ambiance 4					
ambiance 5					
ambiance 6					

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

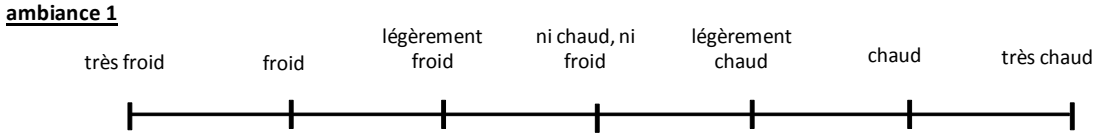
Question 2 : Dans quel état de **stress** êtes-vous ?

	Très détendu	détendu	peu stressé	stressé	très stressé
ambiance 1					
ambiance 2					
ambiance 3					
ambiance 4					
ambiance 5					
ambiance 6					

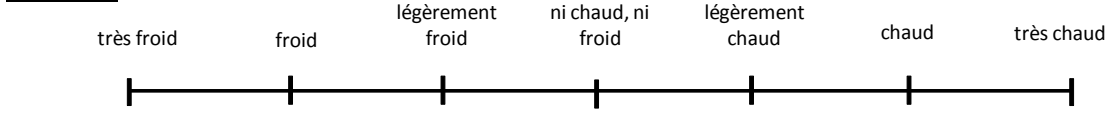
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Question 3 : Comment vous sentez-vous ? Avez-vous…

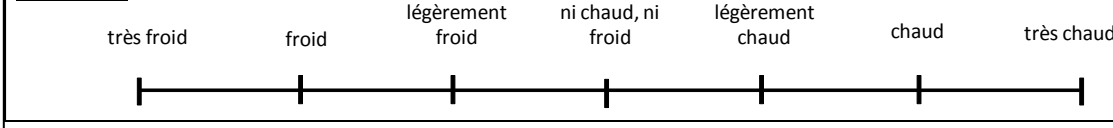
ambiance 1



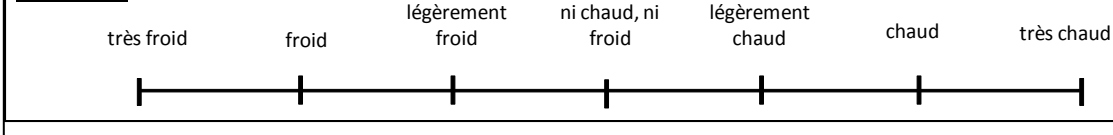
ambiance 2



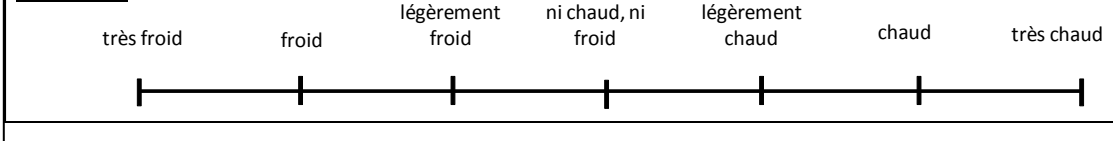
ambiance 3



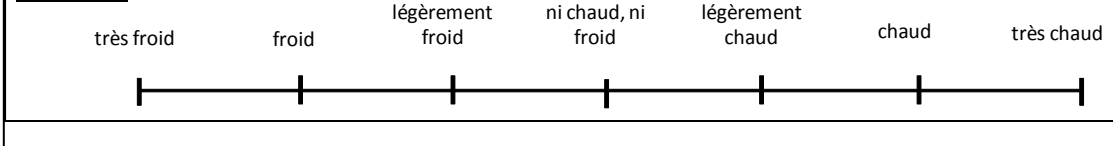
ambiance 4



ambiance 5



ambiance 6



Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

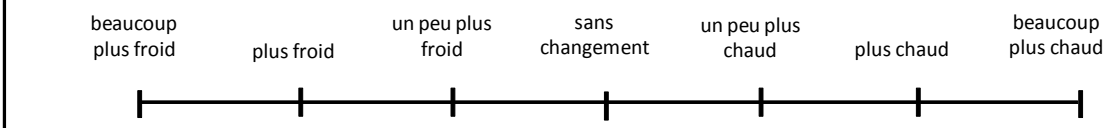
Question 4 : Trouvez-vous cela… ?

ambiance 1	très inconfortable — inconfortable — légèrement inconfortable — confortable — très confortable
ambiance 2	très inconfortable — inconfortable — légèrement inconfortable — confortable — très confortable
ambiance 3	très inconfortable — inconfortable — légèrement inconfortable — confortable — très confortable
ambiance 4	très inconfortable — inconfortable — légèrement inconfortable — confortable — très confortable
ambiance 5	très inconfortable — inconfortable — légèrement inconfortable — confortable — très confortable
ambiance 6	très inconfortable — inconfortable — légèrement inconfortable — confortable — très confortable

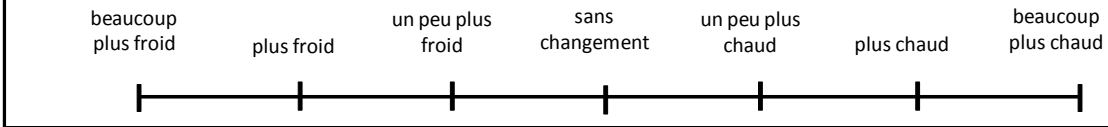
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Question 5 : En ce moment, préfèreriez vous avoir… ?

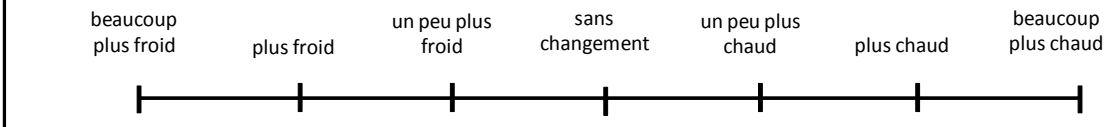
ambiance 1



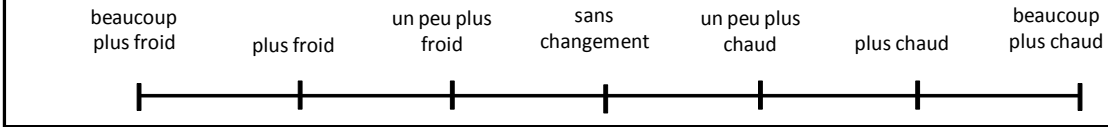
ambiance 2



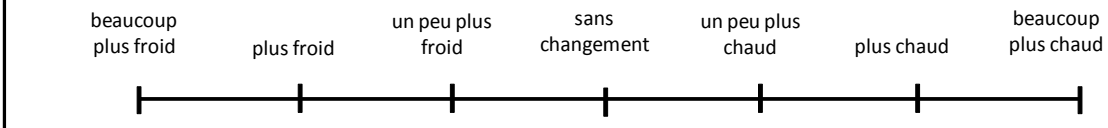
ambiance 3



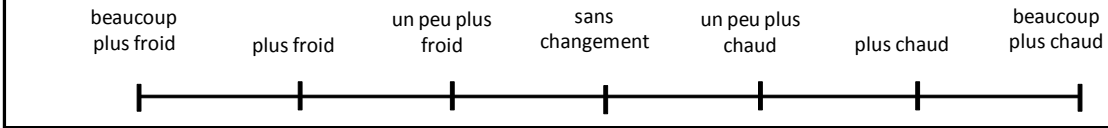
ambiance 4



ambiance 5



ambiance 6



Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Question 6 : En prenant compte de vos préférences personelles uniquement, acceptez-vous cet environnement climatique plutôt que de le rejeter ?

ambiance 1		OUI		NON	
ambiance 2		OUI		NON	
ambiance 3		OUI		NON	
ambiance 4		OUI		NON	
ambiance 5		OUI		NON	
ambiance 6		OUI		NON	

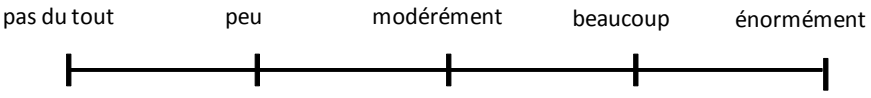
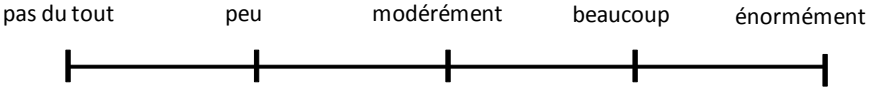
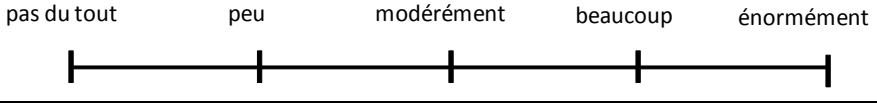
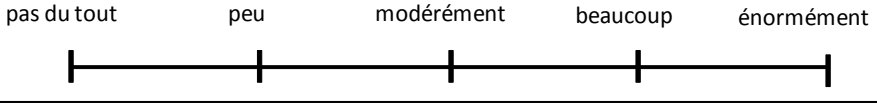
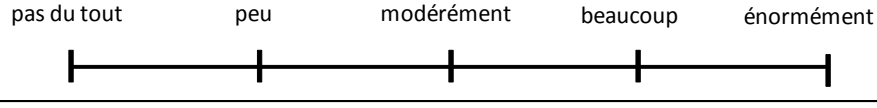
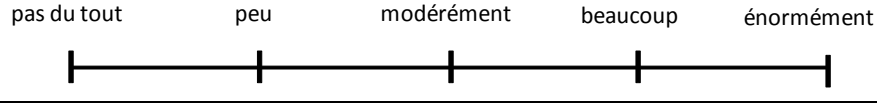
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Question 7 : A votre avis, cet environnement est-il… ?

ambiance 1	tout à fait supportable — un peu difficile à supporter — assez difficile à supporter — très difficile à supporter — insupportable
ambiance 2	tout à fait supportable — un peu difficile à supporter — assez difficile à supporter — très difficile à supporter — insupportable
ambiance 3	tout à fait supportable — un peu difficile à supporter — assez difficile à supporter — très difficile à supporter — insupportable
ambiance 4	tout à fait supportable — un peu difficile à supporter — assez difficile à supporter — très difficile à supporter — insupportable
ambiance 5	tout à fait supportable — un peu difficile à supporter — assez difficile à supporter — très difficile à supporter — insupportable
ambiance 6	tout à fait supportable — un peu difficile à supporter — assez difficile à supporter — très difficile à supporter — insupportable

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Question 8 : Transpirez-vous ?

ambiance 1	
ambiance 2	
ambiance 3	
ambiance 4	
ambiance 5	
ambiance 6	

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Question 9 : Avez-vous des frissons ?

ambiance 1	pas du tout — peu — modérément — beaucoup — énormément
ambiance 2	pas du tout — peu — modérément — beaucoup — énormément
ambiance 3	pas du tout — peu — modérément — beaucoup — énormément
ambiance 4	pas du tout — peu — modérément — beaucoup — énormément
ambiance 5	pas du tout — peu — modérément — beaucoup — énormément
ambiance 6	pas du tout — peu — modérément — beaucoup — énormément

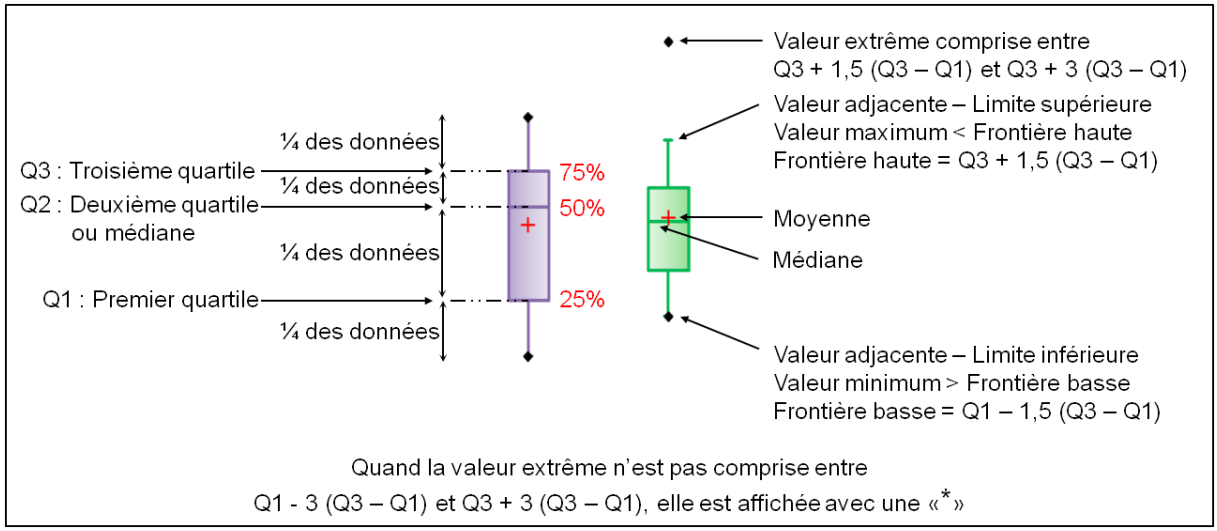
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

ANNEXE 4 : Supplément statistique – les boîtes de Tukey

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Description des boîtes de Tukey

Il a été choisi de visualiser les données à l'aide des diagrammes « boîtes à moustaches » (appelés aussi diagrammes « box & Whiskers Plot » en anglais). Ces graphiques ont l'avantage de représenter simultanément la moyenne, la médiane (ou le deuxième quartile), le premier et le troisième quartile ainsi que les valeurs extrêmes. Ainsi, ils aident à la visualisation des tendances et de la dispersion des données.



Décryptage des diagrammes « boîte à moustaches »

Ils ont été réalisés avec le logiciel XLStat 2010 et ils ont été particulièrement utilisés pour visualiser les différences entre les deux groupes. Puis, des tests statistiques spécifiques ont permis d'établir si les différences observées sont significatives.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Table des figures

Figure 1.1 : Principe de la thermorégulation [système contrôlé + système contrôleur] avec la boucle de régulation autonome, comportementale et technologique. Modifié à partir de [Hensel 1981]. 16

Figure 1.2 : Les principaux transferts thermiques « passifs » entre l'Homme et son environnement. Les pourcentages (issus de [Guyton et Hall 2002]) expriment la proportion des pertes de chaleur par chacune des voies de dissipation thermique pour un homme nu dans un environnement confortable et sans mouvement d'air important. 19

Figure 1.3 : Les principales zones du cerveau avec un zoom sur le centre intégrateur majeur de la thermorégulation autonome : l'hypothalamus (modifiée à partir de http://www.servier.fr et http://lecerveau.mcgill.ca et [Zhang 2003]) 24

Figure 1.4 : Illustration de la zone « inter-seuil ». Cette zone est délimitée par le seuil de température interne de la sudation et par celui du déclenchement des frissons. La réponse des effecteurs est caractérisée à la fois par leur seuil et leur gain qui peuvent être modifiés par des facteurs non-thermiques. Réalisée à partir de [Mekjavic et Eiken 2006]. 26

Figure 1.5 : Représentation des composantes principales du système nerveux central et périphérique et de leurs relations fonctionnelles, à partir de [Purves, Augustine *et al.* 1999]. 27

Figure 1.6 : Le système nerveux sympathique et parasympathique [Purves, Augustine *et al.* 1999]. 28

Figure 1.7 : Distribution de la température à travers le corps dans un environnement froid (A) et dans un environnement chaud (B) [Wenger 2003]. 30

Figure 1.8 : La vascularisation cutanée. Réalisée à partir de [Leahy, Enfield *et al.* 2007]. 30

Figure 1.9 : Le système capillaire de la papille épidermique. 31

Figure 1.10 : Représentation d'une glande sudorale eccrine et apocrine. Les flèches entourées en rouge représentent le point de transition entre le tube sécréteur et le canal excréteur [Agache et Candas 1999]. 34

Figure 1.11 : Rythme circadien de la température centrale [Houdas et Guieu 1977] 36

Figure 1.12 : Schéma du réseau nerveux cutané. 1. Terminaisons nerveuses libres ; 2. Corpuscule de Merkel ; 3. Corpuscule de Meissner ; 4. Corpuscule de Pacini ; 5. Corpuscule de Ruffini ; 6. Corpuscule de Golgi-Mazzoni ; 7. Fibres nerveuses du muscle arrecteur ; 8. Fibres lancéolées périfolliculaires ; 9. Fibres nerveuses périvasculaires ; 10. Fibres nerveuses des glandes sudoripares [Misery 2006] 40

Figure 1.13 : Etapes physiologiques de la perception [Mac Leod, Sauvageot *et al.* 1996]. 41

Figure 1.14 : Représentation schématique des thermo TRP fonctionnant dans une gamme de température allant du froid nocif au chaud nocif. Divers composés botaniques peuvent activer les thermo TRP. TRPV1 est activé par la capsaïcine, l'ingrédient piquant dans les piments, TRPM8 est activé par le menthol, le composé de refroidissement de la menthe, TRPA1 est activé par des composés piquants comme l'allicine, l'ingrédient actif de l'ail, le cinnamaldéhyde, le composant piquant de la cannelle, *etc.* [Dhaka, Viswanath *et al.* 2006]. 43

Figure 1.15 : Représentation des rôles des canaux TRP situés dans la peau pour la détection des stimuli du monde extérieur. A gauche : les terminaisons nerveuses libres sont localisées dans la peau et sont couplées par le ganglion rachidien sensitif à la moelle épinière. A droite : En zoomant sur la couche superficielle de la peau, on constate que les stimuli physiques et chimiques peuvent directement activés les canaux TRP situés sur les fibres nerveuses causant une dépolarisation de ces fibres générant ainsi un potentiel d'action. Mais certains canaux TRPV sont aussi exprimés dans les kératinocytes (cellules de l'épiderme) à partir desquels la transduction du signal vers les neurones se fait par un mécanisme encore non clairement élucidé [Damann, Voets *et al.* 2008]. 43

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure 1.16 : Fréquences des décharges d'une fibre nociceptive stimulée par le froid, d'une fibre sensible au froid, d'une fibre sensible à la chaleur et d'une fibre nociceptive stimulée par la chaleur pour différentes températures de peau [Guyton et Hall 2002]. 44

Figure 1.17 : Propriétés statiques et dynamiques des récepteurs au chaud et au froid face à une température constante et à un changement brutal de température [Hensel 1981]. 45

Figure 1.18 : Aires sensitives primaires et aires corticales d'association du cerveau. 46

Figure 1.19 : Le système limbique comprend principalement l'hypothalamus et plus précisément les corps mamillaires, l'hippocampe impliqué dans la formation des souvenirs et de la mémoire, l'amygdale impliqué dans les émotions. Ce système intervient dans le comportement, dans l'expression des émotions telles que l'agressivité, la peur et le plaisir, et dans la formation de la mémoire [Purves, Augustine *et al.* 1999]. 47

Figure 1.20 : Processus dynamique de la perception. Réalisé à partir de [Perrin 2008; Goldstein 2009]. 47

Figure 1.21 : Evolution de l'intensité de la sensation en fonction de la grandeur du stimulus. Chacune des zones représentées est associée à un niveau de perception. Modifiée à partir de [Mac Leod, Sauvageot *et al.* 1996] 50

Figure 1.22 : Exemple d'échelle pour l'évaluation de la sensation thermique. Elle peut être étendue avec -4 : extrêmement froid et +4 extrêmement chaud. [AFNOR 2001] 51

Figure 1.23 : Exemples d'échelle d'évaluation du confort thermique. a. l'échelle d'inconfort thermique de la norme ISO 10551 [AFNOR 2001] et b. l'échelle de confort thermique proposé par Zhang : elle est particulièrement pertinente pour des situations transitoires [Zhang 2003]. 52

Figure 1.24 : Représentation du phénomène d'adaptation pour une surface de 14,4 cm^2 de l'avant-bras. Dans la zone du zéro physiologique, la sensation disparait après un certain temps d'application de la stimulation. Pour une température cutanée inférieure à 30°C, la sensation de froid persiste. Pour une température cutanée supérieure à 45°C, la sensation de chaud persiste [Narçon 2001]. 54

Figure 1.25 : Seuils au chaud et au froid en fonction de la zone anatomique moyennés sur 34 sujets et obtenus pour une surface de 8,8x11,0 mm^2 et pour une température d'adaptation de l'ordre de 32°C. Les différentes zones anatomiques sont représentées à gauche par un numéro. Réalisé à partir de : [Essick, Guest *et al.* 2004] 55

Figure 1.26 : Evolution de la sensation thermique globale au cours du temps pour 4 conditions ambiantes différentes : a. les données sont obtenues à partir de 3 sujets nus [Gagge, Stolwijk *et al.* 1967]. b. les données sont obtenues à partir de 10 jeunes hommes et 10 jeunes femmes avec une isolation vestimentaire de l'ordre de 1,32 Clo. Les ronds rouges illustrent à partir de quel moment la sensation thermique n'est plus influencée significativement par le temps d'exposition [Liu, Tan *et al.* 2011] 58

Figure 1.27 : Evolution de la sensation thermique lors d'une transition thermique. A gauche : la transition est brusque et les données ont été obtenues sur 12 jeunes hommes avec une isolation vestimentaire de 1 Clo. [de Dear, Ring *et al.* 1993]. A droite : la transition est progressive. Les points rouges représentent un groupe de 6 japonaises qui ont une température préférée de l'ordre de 30,2°C et les points blancs un groupe de 7 japonaises qui ont une température préférée de l'ordre de 27,6°C [Yasuoka, Kubo *et al.* 2012] 59

Figure 1.28 : Evolution du confort thermique en fonction de la sensation thermique globale dans des environnements stables et uniformes. A gauche : graphique réalisé à partir des données de Gagge et al. [Gagge, Stolwijk et al. 1967], à droite : graphique réalisé à partir des données de Zhang et al. [Zhang, Arens *et al.* 2010a]. Echelle de sensation thermique s'étendant de -4 : extrêmement froid à 4 : extrêmement chaud. Echelle de confort pour le graphique de droite : -4 : très inconfortable, -2 : inconfortable, 2 : confortable, 4 : très confortable. 63

Figure 1.29 : La structure de la peau. (Issue de http://www.skin-science.fr) 74

Figure 1.30 : structure de l'épiderme et représentation des principales étapes de différentiation des kératinocytes, de formation du stratum corneum et de la desquamation. Réalisée à partir de : [Rawlings et Matts 2005; Segre 2006; Proksch, Brandner *et al.* 2008] 75

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure 1.31 : Représentation schématique du modèle « briques et ciment » de l'organisation de la couche cornée. FNH : Facteur Naturel d'Hydratation [Rawlings 2010] 76

Figure 1.32 : Follicule pilo-sébacé 80

Figure 1.33 : Profils de concentration de différents composants du FNH en fonction de la profondeur du SC de l'éminence thénar (épaisseur ~100µm). La glycine (Gly), l'acide pyrrolidone carboxylique (PCA) et l'acide urocanique (UCA) apparaissent dans les couches profondes du SC et leurs concentrations augmentent entre 70 et 40 µm probablement lors de la protéolyse de la filaggrine. Mais, le lactate apparaît dans les couches superficielles du SC où l'urée est présente en forte concentration, probablement à cause de la sécrétion de la sueur [Caspers, Lucassen *et al.* 2001] 84

Figure 1.34 : Les composants de l'enveloppe cornée qui constitue une barrière aux fluides. Réalisé à partir des informations de [Kierszenbaum, Validire-Charpy *et al.* 2006] 86

Figure 1.35 : Les trois voies d'absorption percutanée. Elles sont similaires aux voies d'élimination mais inversées. La voie transannexielle ne représente qu'une faible partie de l'absorption percutanée puisque les annexes cutanées représentent 0,1 à 1% de la surface cutanée. La voie intercellulaire au niveau des lipides intercellulaires est davantage empruntée, mais certains composants sont capables de pénétrer les cornéocytes et d'utiliser la voie transcellulaire [Schaefer, Redelmeier et al. 2011] 87

Figure 1.36 : Les différents mécanismes de restauration de la barrière cutanée. ↑ : augmentation, ↓ : diminution. Réalisé à partir de [Elias, Feingold *et al.* 2003] 90

Figure 1.37 : Les fonctions de protection exercées par le stratum corneum [Lee, Jeong *et al.* 2006] 91

Figure 1.38 : Schéma regroupant les propriétés cutanées modifiées ou susceptibles d'être modifiées par un changement de température ambiante. Les flèches en pointillés représentent des hypothèses. Se reporter au texte pour plus d'informations et au glossaire pour les abréviations. Fr. : au froid, Ch. : au chaud. 92

Figure 2.1 : Représentation du déroulement des deux protocoles A et B. Se reporter au texte pour plus d'explications. 110

Figure 2.2 : Exemples de situations expérimentales. a. la phase d'acclimatation. b. la phase de mesure 111

Figure 2.3 : Diagramme psychométrique représentant la teneur en eau des différents environnements thermiques E1, E2 et E3 du protocole A et du protocole B. L'humidité relative est représentée par les lignes obliques bleues, la température ambiante par les lignes verticales rouges et la teneur en eau par les lignes horizontales noires. 122

Figure 2.4 : Cercle de corrélation de l'ACP de Spearman représentant le lien entre la sensibilité thermique des volontaires et d'autres caractéristiques des volontaires telles que l'âge, le genre (modalité "femme" codée 1 et modalité "homme" codée 2), etc. Le panel du protocole A est représenté à gauche et celui du protocole B à droite. 126

Figure 2.5 : a. L'analyseur neurosensoriel TSA-II (Médoc). b. La thermode (5x5mm) [Medoc 2007] 130

Figure 2.6 : récapitulatif des principales méthodes de détection des seuils de sensation thermique avec leurs avantages et inconvénients. Réalisé à partir de [Rambaud 2000; Medoc 2003] 130

Figure 2.7 : Ecran de paramétrage de la méthode des niveaux : la température d'adaptation vaut 32°C, la vitesse de changement de la température (température d'adaptation → température du stimulus) : 1°C s^{-1}, la vitesse de retour : 0,8°C s^{-1}, le temps minimum et le temps maximum entre deux stimuli : 4 et 6 secondes respectivement, le premier échelon de température : 3°C, l'échelon le plus petit : 0,1°C, le nombre de séquence : 3. 131

Figure 2.8 : Représentation des branches du nerf trijumeau et en particulier de la branche maxillaire qui innerve la zone de mesure des seuils de perception. Modifié à partir de [Maillet 2011] 132

Figure 2.9 : Valeurs moyennes et écarts types des seuils de perception du chaud (valeurs > 0°C) et du froid (valeurs < 0°C) mesurés sur la zone maxillaire droite et gauche du visage, dans l'environnement à ~20°C (ronds bleus) et dans l'environnement à ~30°C (carrés rouges) pour chacun des volontaires. 134

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure 2.10 : Boîte de Tukey comparant les seuils de perception au chaud et au froid du groupe G1 non sensible « globalement » au froid et du groupe G2 sensible « globalement » au froid dans l'environnement frais E1 (20°C) et dans l'environnement chaud E2 (30°C). 136

Figure 2.11 : Exemples de différents détecteurs utilisés dans les caméras IR associés à leur bande spectrale de détection. Sur fond gris : détecteur thermique, sinon détecteur quantique. MWIR : Moyennes longueurs d'onde IR et LWIR : Longues longueurs d'onde IR [FLIR 2012] 139

Figure 2.12 : Représentation schématique de la situation de mesure thermographique. 1 : environnement, 2 : objet ou zone du corps, 3 : atmosphère, 4 : caméra, ε : l'émissivité de l'objet, τ : facteur moyen de transmission atmosphérique, W_{obj} : rayonnement perçu provenant de l'objet, W_{refl} : rayonnement perçu provenant de la réflexion sur l'objet des sources ambiantes, W_{atm} : rayonnement perçu provenant de l'atmosphère. [FLIR 2005] 141

Figure 2.13 : Traitement des images infrarouges : a. positionnement manuel des zones d'intérêts qui sont entourées en noir, b. exemple d'affichage de la température moyennée sur la zone d'intérêt – image IR faite dans une ambiance froide, c. image IR réalisée dans une ambiance chaude 142

Figure 2.14 : A gauche : Mesure avec le spectrocolorimètre CM-2006d de Minolta. A droite : Principe de mesure du spectrocolorimètre [Konica-Minolta 2007]. Cet appareil est doté d'un contrôle numérique des UV (utile pour mesurer la couleur d'échantillons traités par des azurants optiques qui absorbent dans les UV et réémettent par fluorescence dans le visible, utilisés pour créer une certaine blancheur) et d'un contrôle numérique de la brillance en incluant ou excluant la composante spéculaire. Ces particularités ne seront pas exploitées pour la mesure sur la peau. 144

Figure 2.15 : Le système L*a*b* de classification des couleurs. L* : luminance ou clarté. [Agache 2000d] 145

Figure 2.16 : Interaction de la lumière avec la peau. Modifiée à partir de [Fitzpatrick et Freedberg 2003] 146

Figure 2.17 : Boîtes de Tukey représentant les températures du front du groupe G1 non sensible au froid et du groupe G2 sensible au froid mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). A gauche : données obtenues à partir du protocole A. A droite : données obtenues à partir du protocole B. Seules les significativité "p" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, ont été représentées. 151

Figure 2.18 : Boîte de Tukey représentant les températures des joues du groupe G1 non sensible au froid et du groupe G2 sensible au froid mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). A gauche : données obtenues à partir du protocole A. A droite : données obtenues à partir du protocole B. Seules les significativités "p" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, ont été représentées. 152

Figure 2.19 : Boîte de Tukey représentant les écarts de températures entre les joues et le front du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) obtenus dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). A gauche : données obtenues à partir du protocole A. A droite : données obtenues à partir du protocole B. Seules les significativités "p" proches ou inférieures à 0,05 qui témoignent d'une différence entre les groupes, ont été représentées. 153

Figure 2.20 : Boîte de Tukey représentant les coordonnées L*, a*, b* de la couleur de peau du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées. 154

Figure 2.21 : Cercles de corrélation de l'ACP de Spearman représentant les liens entre les différentes variables thermo-vasculaires et le ressenti thermique déclaré à travers le protocole B. A gauche, le cercle est associé au groupe de sensibilité G1 et à droite, au groupe de sensibilité G2. 156

Figure 2.22 : A gauche – Mesure réalisée avec la sonde du corneometer CM 825. A droite – Zoom sur la sonde de mesure 163

Figure 2.23 : La sonde du pH-mètre cutané (skin pH-meter PH 905) 164

Figure 2.24 : A gauche : l'unité principale du sébumètre SM-810 accompagnée de la cassette de mesure. A droite : description du chemin pris par le faisceau lumineux dans la cassette du sébumètre SM-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

810 pour la mesure de la transparence de la bande qui a été appliquée sur la peau [Misri et Pande 2005]. 166

Figure 2.25 : A gauche : schéma de la sonde du Téwamètre TM300 [Gabard et Treffel 2000]. A droite : zoom sur la chambre de mesure [Imhof, De Jesus et al. 2009] 170

Figure 2.26 : Représentation de la couche limite où se situent les mesures effectuées avec le Téwamètre TM300 et de la convection naturelle juste au-dessus de la peau. Figure réalisée à partir de [Imhof, De Jesus et al. 2009] 171

Figure 2.27 : les zones de mesures du protocole B 173

Figure 2.28 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées. 179

Figure 2.29 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées.. 181

Figure 2.30 : Boîtes de Tukey représentant le contenu en eau du SC du groupe G1 (non sensible au froid) et du groupe G2 (sensible au froid) mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées. 182

Figure 2.31 : Diagrammes boîte à moustaches représentant le pH cutané du groupe G1 non sensible au froid et du groupe G2 sensible au froid mesurées dans des environnements thermiques différents (~20°C, ~25°C, ~30°C). Seules les "p-valeurs" proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes, dans chaque environnement ont été représentées. La croix rouge représente la valeur moyenne. 183

Figure 2.32 : Cercles de corrélation de l'ACP de Spearman représentant les liens entre les différentes variables du film hydrolipidique et le ressenti thermique déclaré. A gauche, le cercle est associé au groupe de sensibilité G1 et à droite, au groupe de sensibilité G2 184

Figure 3.1 : Représentation du déroulement du protocole 195

Figure 3.2 : photographie du local dédié aux expérimentations 196

Figure 3.3 : plan du local d'expérimentation composé de deux espaces de mesures identiques (la salle n°1 et la salle n°2) et d'une zone « tampon » permettant le transfert du matériel et du volontaire lors de la transition thermique. Pour une meilleure lisibilité, les appareils de régulation de la température et de l'humidité relative sont représentés dans la salle n°2 et le mobilier « mobile » nécessaire aux mesures est représenté dans la salle n°1. 198

Figure 3.4 : Echelles mises à disposition des sujets afin qu'ils puissent répondre aux questions posées oralement en donnant le chiffre associé à leur réponse. L'échelle du haut permet d'évaluer leur sensation thermique et l'échelle du bas leur appréciation de l'environnement dans lequel il se trouve. 202

Figure 3.5 : Les zones de mesures 206

Figure 3.6 : Dispositif de mesure de la température de peau par thermographie IR, adapté aux conditions expérimentales. Se référer au texte pour plus de détails. 207

Figure 3.7 : La mesure avec le PeriScan PIM3. Réalisé à partir de photographies prises durant les expérimentations et d'images obtenues sur : [Perimed 2012]. 210

Figure 3.8 : Traitement des images LDF obtenues sur les avant-bras. a. Image initiale LDF effectuée sur l'avant-bras. b. histogramme de l'image initiale et seuil calculé par un programme développé sous Matlab. c. images regroupant les pixels associés à la perfusion sanguine des capillaires. d. images regroupant les pixels associés à la perfusion sanguine des veines. 211

Figure 3.9 : Mesures de l'activité microcirculatoire cutanée au niveau de l'avant-bras (à gauche) et de la joue (à droite) réalisées avec l'imageur Laser Doppler (PeriScan PIM 3, Perimed) 211

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure 3.10 : a. Spectre moyen de rétrodiffusion de peaux caucasiennes (ou blanches) et de peaux noires. C1 : creux à 540nm, C2 : creux à 580nm et P : pic à 560nm. Modifié à partir de [Koran, Powers *et al.* 1981]. b. Spectres d'absorption de l'oxyhémoglobine (HbO2), de la désoxyhémoglobine (Hb) et de la mélanine pour des peaux plutôt pigmentées [Sowa, Matas *et al.* 2002]. c. Représentation des différentes modulations possibles du spectre cutané ou du "W" : l'axe x correspond à la saturation en oxygène de l'hémoglobine et l'axe y à la concentration en hémoglobine [Changizi, Zhang *et al.* 2006]..... 213

Figure 3.11 : Représentation des différentes étapes de mesure de la capacité de récupération de la barrière cutanée. Les étapes n°2 et n°3 (correspondant à la méthode de "tape stripping") sont répétées 6 fois avant les mesures de PIE réalisées avec le Téwamètre TM 300. 216

Figure 3.12 : a. Dispositif de mesure de la RED. b. Signal de la RED obtenu en temps réel sur un écran pendant la phase de détente qui précède les mesures. 218

Figure 3.13 : Températures extérieures moyennes obtenues sur la journée entre 8h00 et 18h00, sur la matinée entre 8h00 et 13h00 et sur l'après-midi entre 14h00 et 18h00. Elles ont été récupérées grâce à une station météorologique sur le site du CSTB Nantes chaque jour de la campagne de mesures. 223

Figure 3.14 : valeurs des humidités relatives ambiantes moyennes des différents environnements de l'expérimentation pour chacun des volontaires. Les numéros indiqués sur la figure sont des numéros de sujet. Le trait horizontal représente la médiane et la croix représente la moyenne pour chaque environnement thermique..... 224

Figure 3.15 : Valeurs moyennes des températures moyennes rayonnantes (TMRT) pour les différents environnements thermiques et pour chacun des volontaires. Les numéros correspondent aux numéros des sujets qui ont des valeurs extrêmes. Le trait horizontal représente la médiane et la croix représente la moyenne pour chaque environnement thermique..... 225

Figure 3.16 : Cercle de corrélation de l'ACP de Spearman représentant le lien entre la sensibilité au froid des volontaires et d'autres caractéristiques des volontaires telles que l'âge, la taille, le poids, l'indice de masse corporelle (IMC), le phototype, la sensibilité de peau..... 227

Figure 3.17 : Boîtes de Tukey représentant les scores de sensation thermique et de confort thermique du groupe G1 et du groupe G2 déclarés dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées. 229

Figure 3.18 : Représentation de l'évolution des scores de sensation thermique en fonction de la température moyenne rayonnante pour chacun des deux groupes de sensibilité au froid (formes vertes pleines : groupe G2 et formes violettes sur fond blanc : groupe G1). Les scores obtenus avant et après les transitions thermiques du matin sont représentés par des ronds et les scores de l'après-midi par des carrés. E1, E2, (etc.) correspondent aux environnements thermiques. 230

Figure 3.19 : Représentation de l'évolution des scores de confort thermique en fonction de la température moyenne rayonnante pour chacun des deux groupes de sensibilité au froid (formes pleines : groupe G2 et formes sur fond blanc : groupe G1). Les scores obtenus avant et après les transitions thermiques du matin sont représentés par des ronds et les scores de l'après-midi par des carrés. E1, E2, (etc.) correspondent aux environnements thermiques. 232

Figure 3.20 : cartographie interne des péférences établie à partir des notes d'appréciation des volontaires dans chacun des environnements thermiques. 233

Figure 3.21 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles de perfusions sanguines des joues et des avant-bras des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées. 236

Figure 3.22 : Evolution de la variation individuelle de la perfusion sanguine sur les joues en fonction de la température moyenne rayonnante pour le groupe G1 et G2. Les numéros correspondent aux codes des sujets..... 237

Figure 3.23 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles des coordonnées de chromaticité a* et de la clarté L* du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées. 242

Figure 3.24 : Evolution de la variation individuelle de la coordonnée de chromaticité a* sur les joues en fonction de la température moyenne rayonnante pour le groupe G1 et G2. 243

Figure 3.25 : Spectres de réflectance du sujet n°10 obtenues dans les 6 environnements thermiques sur le visage (à gauche) et sur les avant-bras (à droite) 245

Figure 3.26 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles des critères de concentration en hémoglobine (à gauche) et de la saturation en oxygène de l'hémoglobine (à droite) issus des spectres de réflectance des joues du groupe G1 et du groupe G2 obtenus dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été indiquées. 247

Figure 3.27 : Boîtes de Tukey représentant les températures du front, des joues, de l'avant-bras, du nez et du pouce des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 249

Figure 3.28 : Boîtes de Tukey représentant les écarts de températures entre le front et les joues (à gauche) et les écarts de températures entre les joues et le nez (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 252

Figure 3.29 : Evolution des gradients de température entre le pouce et l'avant-bras en fonction de la température moyenne rayonnante pour le groupe G1 et G2. 253

Figure 3.30 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau sur les joues (à gauche) et les variations individuelles des pertes en eau sur les joues (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 254

Figure 3.31 : Boîtes de Tukey représentant la perte en eau sur les avant-bras (à gauche) et les variations individuelles des pertes en eau sur les avant-bras (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 255

Figure 3.32 : Boîtes de Tukey représentant le contenu en eau sur les joues (à gauche) et sur les avant-bras (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 258

Figure 3.33 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles du contenu en eau sur les joues (à gauche) et sur les avant-bras (à droite) des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 259

Figure 3.34 : Boîtes de Tukey représentant la quantité de lipides surfaciques (à gauche) et les variations individuelles de la quantité de lipides surfaciques (à droite) sur les avant-bras des groupes G1 et G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 262

Figure 3.35 : Boîtes de Tukey représentant les variations individuelles des quantités de lactate (à gauche) et d'acide pyroglutamique (PCA) (à droite) sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées 264

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure 3.36 : Boîtes de Tukey représentant la quantité de protéines prélevées c'est-à-dire la perte de cohésion du stratum corneum (à gauche) et les variations individuelles de la quantité de protéines prélevées (à droite) sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 265

Figure 3.37 : Boîtes de Tukey représentant la perte d'intégrité du stratum corneum (à gauche) et les variations individuelles de la perte d'intégrité du stratum corneum (à droite) sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées 267

Figure 3.38 : Boîtes de Tukey représentant le pourcentage de récupération de la barrière cutanée 20 minutes après les 6 « tape-stripping » sur les avant-bras du groupe G1 et du groupe G2 mesurées dans 6 environnements thermiques différents. Seules les "p-valeurs" du test de Mann-Whitney proches ou inférieures à 0,05, qui témoignent d'une différence entre les groupes dans chaque environnement ont été représentées. 269

Figure 3.39 : Cercle de corrélation de Spearman représentant les liens entre les différentes propriétés cutanées mesurées pour le groupe G1 (à gauche) et pour le groupe G2 (à droite). Se reporter à la liste des abréviations 272

Figure 3.40 : Représentation des coefficients de régression normalisés obtenus avec la régression PLS1 utilisée pour prédire, à partir des 12 variables cutanées mentionnées sur le graphique, la sensation thermique du groupe G1 (tirets rouges) et du groupe G2 (trait bleu). Se reporter au glossaire pour les abréviations. 287

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Table des tableaux

Tableau 1.1 : Exemple de classification des récepteurs sensoriels cutanés [Purves, Augustine *et al.* 1999]. 41

Tableau 1.2 : Nombre de récepteurs au froid et au chaud par cm^2 présents dans certaines zones de la peau humaine. Tableau réalisé à partir de [Arens et Zhang 2006]. 42

Tableau 1.3 : Les variables physiologiques liées à la sensation thermique en régime stationnaire 60

Tableau 1.4 : Les variables physiologiques liées à la sensation thermique en régime transitoire 61

Tableau 1.5 : Les variables physiologiques reliées au confort thermique en régime stationnaire 62

Tableau 1.6 : Première sélection des variables physiologiques à mesurer 65

Tableau 1.7 : Composition standard de la sueur [Agache et Candas 2000a] 79

Tableau 1.8 : Composition du Facteur Naturel d'Hydratation (FNH) [McCallion et Li Wan Po 1993] 85

Tableau 1.9 : Les principales fonctions du stratum corneum [Elias 2005] 90

Tableau 1.10 : Deuxième sélection des variables cutanées à mesurer 96

Tableau 1.11 : Classification des variations anatomiques pour différentes variables cutanées (en situation stable de repos sauf pour le taux de sudation) 98

Tableau 1.12 : L'effet de l'âge sur certaines variables cutanées 99

Tableau 1.13 : Les différentes classes de phototypes cutanés associées à leurs différentes réactions face au soleil [Astner et Anderson 2004; Norval 2008] 100

Tableau 1.14 : Caractéristiques des rythmes biologiques de certains paramètres cutanés. A partir de [Le Fur, Reinberg et al. 2001] 102

Tableau 2.1 : Caractéristiques des régulations thermiques et hygrométriques des environnements des protocoles 112

Tableau 2.2 : Caractérisation des panels du protocole A et B. * signifie que la moyenne des valeurs est significativement différente ($p < 0,05$) entre les hommes et les femmes d'après le test de l'ANOVA. 113

Tableau 2.3 : Tests statistiques de comparaison des moyennes d'échantillons indépendants utilisés dans l'analyse de données des expérimentations de ce chapitre 117

Tableau 2.4 : Valeurs des températures ambiantes et de l'humidité relative des environnements (moyenne ± écart type). E1, E2 et E3 correspondent à trois environnements thermiques différents, J1 = journée n°1 ou première phase expérimentale de 2h et J2 = journée n°2 ou deuxième phase expérimentale de 2h pour chaque volontaire. 122

Tableau 2.5 : Caractérisation du contexte des zones d'expérimentation : pourcentage des individus gênés par chacun des éléments (mentionnés dans la colonne de gauche) des environnements. Tableau réalisé à partir des réponses à la question n°6 du questionnaire Q2 et Q3 (cf. Annexe 2) pour les deux protocoles et à partir des remarques exprimées par les volontaires pendant les expérimentations. 123

Tableau 2.6 : Caractérisation des groupes : Nombre total de sujets et d'hommes, âge et Indice de Masse Corporelle (IMC) (moyenne ± écart type), nombre de fumeur pour chaque groupe. 126

Tableau 2.7 : Valeurs des p-valeurs du test des rangs signés de Wilcoxon appliqué aux scores de ressenti (sensation thermique, confort thermique, état de bien ou inconfort) de tous les volontaires confondus et par groupe de sensibilité au froid. 128

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau 2.8 : Significativité p du test de l'ANOVA à 2 facteurs (facteur 1 : température ambiante, facteur 2 groupe de sensibilité "globale" au froid) avec interaction appliqué aux valeurs transformées des seuils de perception 135

Tableau 2.9 : Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de mesure de la couleur de peau. CIE signifie Commission Internationale de l'Eclairage. [Fullerton, Fischer *et al.* 1996; Piérard 1998; Agache 2000d] 143

Tableau 2.10 : Valeurs moyennes et écart types des températures de front, de joue et des écarts de température entre le front et la joue obtenus sur 13 volontaires dans chacun des deux protocoles A et B et dans des environnements thermiques différents. 148

Tableau 2.11 : Valeurs moyennes et écarts types des coordonnées L*, a*, b* de couleur de peau mesurées dans différents environnements thermiques (E1 à ~20°C, E2 à ~25°C et E3 à ~30°C). La significativité p du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare les valeurs obtenues dans chacun des environnements thermiques E2 et E3 avec les valeurs obtenues dans E1 est représentée par une * lorsque p < 0,05. 150

Tableau 2.12 : Les p-valeurs du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare les températures cutanées obtenues avant et après la/les transition(s) thermique(s) chaude(s) pour chacun des groupes de sensibilité au froid G1 et G2. Si p < 0,05, les températures de front et de joues ont significativement augmenté et les écarts de températures ont significativement diminué après la transition thermique chaude. 152

Tableau 2.13 : Coefficients de corrélation de Spearman entre les températures cutanées et le ressenti thermique de chacun des deux groupes G1 et G2. 155

Tableau 2.14 : Différentes techniques de mesures du contenu en eau (CE) du SC [Bernengo et de Rigal 2000] 161

Tableau 2.15 : Différentes techniques de mesures du niveau courant des lipides de la surface cutanée (LSC) [Agache 2000a; Piérard, Piérard-Franchimont *et al.* 2000] 165

Tableau 2.16 : Valeurs moyennes et écarts types de certaines variables cutanées mesurées dans différents environnements thermiques (E1 à ~20°C, E2 à ~25°C et E3 à ~30°C). La significativité p du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare les valeurs obtenues dans chacun des environnements thermiques E2 et E3 avec les valeurs obtenues dans E1 est représentée par une * lorsque p<0,05. 173

Tableau 2.17 : Les p-valeurs du test des rangs signés de Wilcoxon qui compare différentes propriétés cutanées obtenues avant et après la/les transition(s) thermique(s) chaude(s). Si p < 0,05, les variables cutanées ont significativement changé après la transition thermique chaude. 180

Tableau 3.1 : Données anthropométriques du panel (avec les 13 sujets analysés) 200

Tableau 3.2 : Principales méthodes non invasives de mesure du flux sanguin. Les méthodes de mesures directes de volume ou de flux sanguin sont sur fond rosé, les méthodes de visualisation des microvaisseaux qui mesurent aussi le flux sanguin sont sur fond bleu, les méthodes indirectes sont sur fond violet. 208

Tableau 3.3 : Caractérisation anthropométrique et caractérisation des peaux des sujets des deux groupes. . 227

Tableau 3.4 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des ressentis déclarés entre « avant » et « après » chaque transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 228

Tableau 3.5 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des perfusions sanguines entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 235

Tableau 3.6 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des coordonnées colorimétriques L*, a*, b* mesurées sur les joues et l'avant-bras entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 239

Tableau 3.7 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des critères des spectres de réflectance entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 246

Tableau 3.8 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des températures cutanées entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 250

Tableau 3.9 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des écarts de températures entre différentes zones du corps entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 251

Tableau 3.10 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des pertes en eau entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 257

Tableau 3.11 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des contenus en eau entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 258

Tableau 3.12 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences de la cohésion (ou de la quantité de protéines prélevées), de la quantité de lipides surfaciques (QLS).entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 261

Tableau 3.13 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences des quantités de lactate, d'acide aminé libre (AAL), d'acide pyroglutamique (PCA) et d'acide urocanique (UCA) entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 263

Tableau 3.14 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences de la cohésion (ou de la quantité de protéines prélevées), de la perte d'intégrité de la barrière cutanée après une perturbation mécanique, entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 265

Tableau 3.15 : Les « p-valeurs » des tests des rangs signés de Wilcoxon évaluant la significativité des différences du pourcentage de récupération de la barrière cutanée des avant-bras après une perturbation mécanique, entre l'« avant » et l'« après » transition thermique et entre E3-25°C et E4-25°C pour chacun des groupes (G1, G2). Les sens de variation sont représentés par ↑ pour augmentation et ↓ pour diminution. 270

Tableau 3.16 : Synthèse des observations significatives faites sur les mesures des joues du groupe frileux G2 mais pas sur celles du groupe G1 non frileux. Les résultats obtenus avec le test de Mann-Whitney sont indiqués en italique. Se reporter à la table des abréviations. 276

Tableau 3.17 : Synthèse des observations significatives faites sur les mesures des avant-bras du groupe frileux G2 mais pas sur celles du groupe G1 non frileux. Les résultats obtenus avec le test de Mann-Whitney sont indiqués en italique. Se reporter à la table des abréviations. 281

Tableau 3.18 : Résultats des régressions PLS1 pour la prédiction de la sensation thermique déclarée (Y) dans les 6 environnements thermiques. La première colonne indique l'échantillon des individus (G1 : groupe non sensible au froid et/ou G2 : groupe sensible au froid) utilisé pour la prédiction, la deuxième colonne répertorie les variables X utilisées à la base pour la prédiction, la troisième colonne mentionne les variables cutanées (X) retenues pour la prédiction (après élimination des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés

variables dont le VIP>0,8) dans l'ordre décroissant des coefficients de régression (en valeur absolue) et la quatrième colonne indique la qualité de prédiction du modèle. 285

Tableau 3.19 : Résultats des régressions PLS1 pour la prédiction du confort thermique déclaré (Y) dans 3 environnements thermiques (E1 : 22°C, E2 : 17°C, E3 : 25°C). La première colonne indique l'échantillon des individus (G1 : groupe non sensible au froid et/ou G2 : groupe sensible au froid) utilisé pour la prédiction, la deuxième colonne répertorie les variables X utilisées à la base pour la prédiction, la troisième colonne mentionne les variables X retenues pour la prédiction (après élimination des variables dont le VIP>0,8) dans l'ordre décroissant des coefficients de régression (en valeur absolue) et la quatrième colonne indique la qualité de prédiction du modèle..... 288

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0144/these.pdf
© [A. Bigouret], [2012], INSA de Lyon, tous droits réservés