

FEDER - PROGRAMMATION 2007-2013

Portefeuille de projet SIMBA - LOT 1

Rapport de recherche

PORTEFEUILLE DE PROJETS SIMBA

Compilation de modèles comportementaux : Modélisation du comportement des occupants

Auteurs :

- Sophie Obyn (UCL/ LOCI/Architecture et Climat)
- Geoffrey Van Moeseke (UCL/ LOCI/Architecture et Climat)

Publié le 29 Septembre 2015

Compilation de modèles représentant le comportement des occupants. Les thèmes abordés sont le taux d'occupation, l'éclairage artificiel, l'ouverture des fenêtres, l'usage de protections solaires, de ventilateurs et de chauffage.

Préface

Ce document a été réalisé dans le cadre du projet de recherche FEDER SIMBA (<http://www.project-simba.eu/>), financé par la Région Wallonne et l'Union Européenne (<http://europe.wallonie.be/>). Il a pour vocation de rassembler et d'organiser les données en matière de comportement des occupants disponibles dans la littérature. Pour vous guider vers le chapitre qui vous intéresse, les pages suivantes reprennent la table des matières sous forme d'arbres à décision (repris aux pages ii à iii). Les chapitres traités dans ce document sont les suivants :

1. [Occupation / absentéisme](#)
2. [Eclairage artificiel](#)
3. [Ouverture des fenêtres](#)
4. [Protections solaires](#)
5. [Ventilateurs](#)
6. [Chauffage](#)

Une [table des matières classique](#) est disponible juste après. La table des tableaux et la table des figures sont reprises en pages vi et vii respectivement.

Notez que nous nous reprenons dans ce guide que les hypothèses et résultats principaux des documents de référence. Pour obtenir des informations supplémentaires, veuillez consulter les articles référencés.

Notez par ailleurs que l'International Energy Agency a commencé en 2013 l'Annex 66 de l'« Energy in Buildings and Communities Programme » (EBC) portant sur la définition et la simulation du comportement des occupants dans les bâtiments. Ce document se divise en 5 tâches, comme présenté sur la figure ci-dessous, avec pour cible les bâtiments résidentiels et commerciaux. Cette recherche devrait offrir une vue globale sur l'utilisation de modèle comportementaux dans des simulations en période de conception d'un projet architectural. Le projet n'ayant pas encore été mené à terme, nous attirons votre attention sur son intérêt pour des recherches futures.

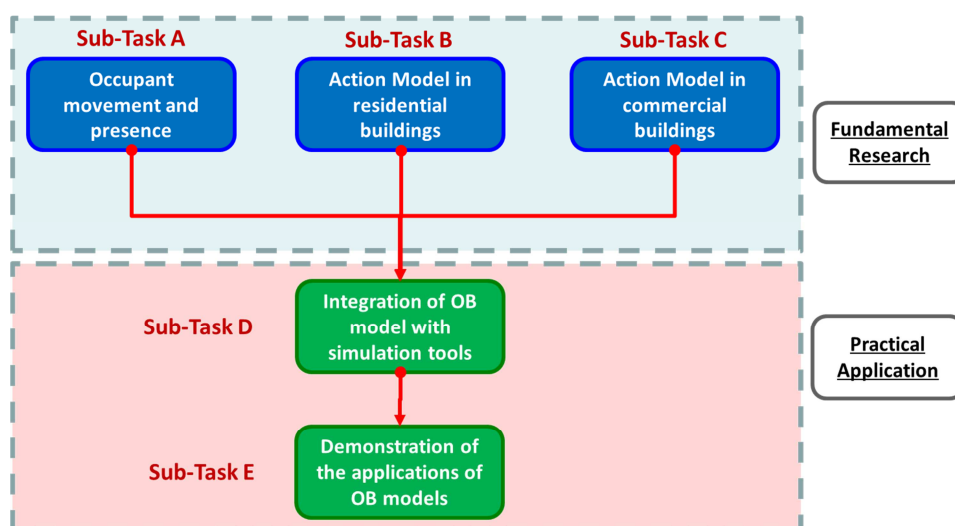
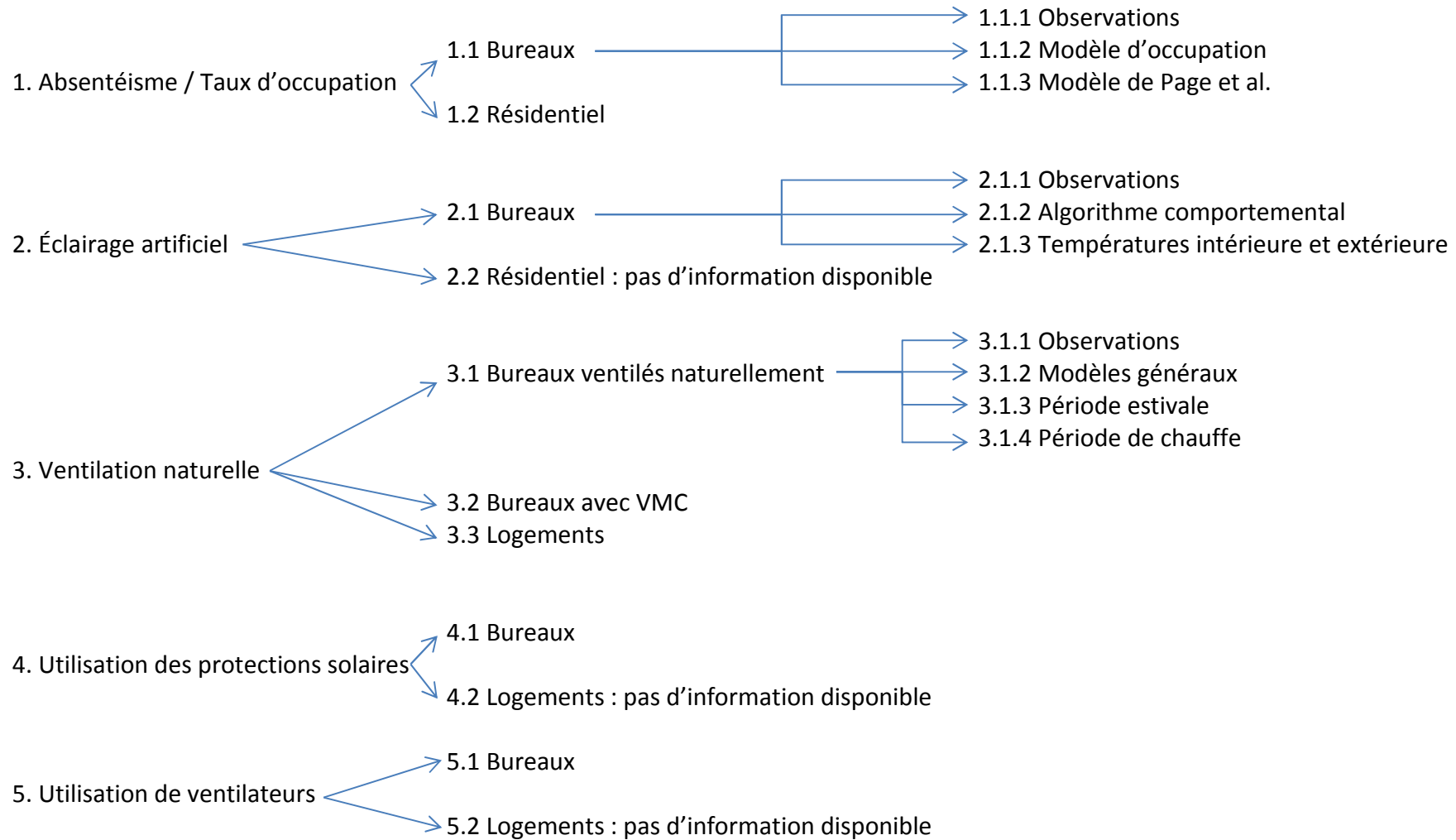


Figure 0-1 : Organigramme de la recherche de l'Energy Agency sur le comportement des occupants : Annex 66¹

¹ <http://www.annex66.org/?q=node/10>

Table des matières sous forme d'arbres à décision



6. Utilisation des appareils de chauffage	→ 6.1 Bureaux
	→ 6.2 Logements : pas d'information disponible
Annexes	→ A. La fonction Logit
	→ B. Description des chaines de Markov
	→ C. Théorie de l'analyse de survie
Table des matières	
Références	

Table des matières

Préface.....	i
Table des matières sous forme d'arbres à décision	ii
Table des matières	iv
Table des tableaux.....	vi
Table des figures.....	vii
Introduction.....	1
1. Absentéisme / Taux d'occupation	3
1.1. Immeubles de bureaux.....	3
1.1.1. Observations.....	3
1.1.2. Modèle d'occupation.....	4
1.1.3. Modèle de Page et al. (Page et al., 2008)	5
1.2. Immeubles résidentiels (Richardson and Thomson, 2008a)	6
2. Éclairage artificiel	7
2.1. Bureaux.....	7
2.1.1. Observations comportementales (Lindelöf and Morel, 2006; Raja et al., 2001)	7
2.1.2. Modèle pour le contrôle manuel et automatique de l'éclairage électrique (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b; Reinhart, 2004; Reinhart and Voss, 2003)	10
2.1.3. Modélisation du comportement des occupants (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004)	17
3. Ventilation naturelle.....	19
3.1. Bureaux ventilés naturellement	19
3.1.1. Observations dans des immeubles de bureaux.....	19
3.1.2. Modèles d'ouverture des fenêtres.....	24
3.1.3. Bureaux ventilés naturellement en période estivale	41
3.1.4. Bureaux sans VMC en période de chauffe	52
3.2. Bureaux avec VMC.....	53
3.3. Logements	54
4. Utilisation des protections solaires	55
4.1. Observations et modèles pour des bureaux	55
4.1.1. Modèle pour le contrôle manuel et automatique des protections solaires (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b; Reinhart, 2004; Reinhart and Voss, 2003)	56
4.1.2. Modélisation du comportement des occupants (Nicol and Humphreys, 2004)	61

4.1.3.	Adaptation du modèle adaptatif par Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008).....	63
5.	Utilisation de ventilateurs	65
5.1.	Utilisation de ventilateur dans les bureaux.....	65
5.1.1.	Modélisation du comportement des occupants (Nicol and Humphreys, 2004)	65
5.1.2.	Adaptation du modèle adaptatif par Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008).....	67
6.	Utilisation des appareils de chauffage	69
6.1.	Chauffage dans les bureaux (Nicol and Humphreys, 2004)	69
Annexes		71
A.	La fonction Logit	71
A.1.	Définition de la procédure probit et de la fonction Logit	71
A.2.	Définition des propriétés et des paramètres statistiques de la fonction Logit.....	72
A.3.	Définition du coefficient de corrélation linéaire(r) de Bravais-Pearson	73
B.	Description des chaînes de Markov	76
C.	Théorie de l'analyse de survie	77
Références		78

Table des tableaux

Tableau 2-1 : Paramètres d'ajustement pour différentes probabilités d'allumage de l'éclairage artificiel avec $y = a + c / (1 + \exp [-b(x-m)])$ pour $x > 0$ et $y = 1$ pour $x = 0$; y = probabilité de commutation et $x = \log_{10}$ (éclairage minimum du plan de travail). (Reinhart and Voss, 2003).....	10
Tableau 2-2 : Hypothèses sous-jacentes de l'algorithme Lightswitch-2002. De plus amples détails sont fournis dans Reinhart and Voss (Reinhart and Voss, 2003). (Reinhart, 2004)	11
Tableau 2-3 : Lightswitch-2002 compte quatre types différents d'utilisateurs. (Reinhart, 2004)	12
Tableau 2-4 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans la fonction Logit ainsi que la corrélation r^* , calculées pour tous les bâtiments en Europe. (Nicol and Humphreys, 2004)	18
Tableau 3-1 : Régression Logit pour l'ouverture des fenêtres pour une ventilation longitudinale ou transversale en fonction de la température intérieure ou de la température extérieure. (Rijal et al., 2007).....	25
Tableau 3-2 : Illustration de la mise en œuvre de la zone morte pour l'algorithme de Humphreys. (Rijal et al., 2007).....	26
Tableau 3-3 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 (Annexe A.1.) et corrélation (r) pour l'utilisation de chaque commande avec la température intérieure du globe (T_g) et la température extérieure (T_o) *, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)	30
Tableau 3-4 : Paramètres de la fonction Logit pour décrire le pourcentage moyen de fenêtres ouvertes et leur coefficient de corrélation r . (Herkel et al., 2008).....	32
Tableau 3-5 : Paramètres de régression des modèles Logit n'intégrant qu'une variable ainsi que les coefficients de corrélation associés (voir Annexe A.3.). (Haldi and Robinson, 2009a)	36
Tableau 3-6 : Paramètres de régression pour les probabilités finales de transition de Markov. (Haldi and Robinson, 2009a).....	37
Tableau 3-7 : Paramètres de validation : taux de vrais positifs (TPR), taux de faux positifs (FPR), précision (PREC), proportion totale de pas de temps simulés avec la fenêtre ouverte (PROP), la durée médiane (min.) des ouvertures et des fermetures (DUR-O et DUR-F). (Haldi and Robinson, 2009a; Haldi and Robinson, 2009b).....	40
Tableau 3-8 : Résultats de la régression et les tests statistiques pour unique fonction de la température intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)	41
Tableau 3-9 : Description des modèles de probabilité dérivés de l'analyse de l'enquête. (Yun and Steemers, 2008).....	45
Tableau 3-10 : Résultats de la régression et des tests statistiques de contrôle de la fenêtre pour les bureaux sans ventilation nocturne en fonction des températures intérieure et extérieure. (Yun and Steemers, 2008).....	47
Tableau 3-11 : Résultats de la régression et des tests statistiques de contrôle de la fenêtre à l'arrivée des occupants pour les bureaux sans ventilation nocturne en fonction de la température intérieure. (Yun and Steemers, 2008).....	48
Tableau 3-12 : Résultats de la régression et des tests statistiques de contrôle de la fenêtre pour les bureaux avec ventilation nocturne en fonction de la température intérieure. (Yun and Steemers, 2008)	48
Tableau 3-13 : Régressions Logit basées sur la température intérieure (ET : écart-type). (Yun and Steemers, 2010).....	51

Tableau 3-14 : Fonctions de probabilité de transition : coefficients de régression Logit pour des modèles de comportement sur le contrôle des fenêtres (ET : écart-type). (Yun and Steemers, 2010)	51
Tableau 4-1 : Résultats sélectionnés dans les études antérieures (Reinhart and Voss, 2003)	56
Tableau 4-2 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 (voir Annexe A.1.) de la fonction Logit ainsi que les corrélations associées (r)*, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)	61
Tableau 4-3 : Résultats de la régression et les tests statistiques pour une fonction de la température intérieure ou extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)	63
Tableau 4-4 : Paramètres de régression pour une régression logistique multiple. (Haldi and Robinson, 2008)	64
Tableau 5-1 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 de la fonction Logit (voir Annexe A.1.) et corrélations associées (r)*, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)	66
Tableau 5-2 : Résultats de la régression et des tests statistiques pour une fonction unique de la température intérieure ou extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)	67
Tableau 5-3 : Paramètre de régression pour une régression logistique multiple. (Haldi and Robinson, 2008)	68
Tableau 6-1 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 (voir Annexe A.1.) et la corrélation associée (r)*, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)	69

Table des figures

Figure 0-1 : Organigramme de la recherche de l'Energy Agency sur le comportement des occupants : Annex 66	i
Figure 1-1 : Occupation moyenne proposée comme donnée pour des applications de simulation de performance des bâtiments (de bureaux). (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b)	3
Figure 1-2 : Taux d'occupation horaire en fonction du temps pour un bureau individuel. (Wang et al., 2005)	4
Figure 1-3 : Comparaison, entre les données de monitoring (ligne solide) et les résultats de simulation (en points tillés) des profils de probabilité de présence d'un bureau. (Page et al., 2008)	5
Figure 2-1 : Boîtes à moustaches du temps entre l'entrée de l'occupant dans le bureau et son utilisation des commandes manuelles, par bureau. (Lindelöf and Morel, 2006)	8
Figure 2-2 : Boîtes à moustaches du temps entre l'utilisation des commandes manuelles et le départ de l'occupant, par bureau. (Lindelöf and Morel, 2006)	8
Figure 2-3 : Relation entre un éclairage artificiel allumé et les températures intérieure et extérieure et la sensation thermique. (Raja et al., 2001)	9
Figure 2-4 : L'algorithme Lightswitch-2002 pour l'éclairage électrique. (Reinhart, 2004)	12
Figure 2-5 : (a) (gauche : (Reinhart, 2004) ; droite : (Mahdavi and Pröglhöf, 2008)) : Probabilité d'allumage mesurée en fonction de à l'arrivée. La fonction originale de Hunt (Hunt, 1979) (en trait plein) décrit le comportement moyen d'utilisation des commutateurs d'un groupe d'utilisateurs. Les modèles de la ligne en pointillés représentent le comportement de commutation d'un utilisateur qui maintient l'éclairage électrique activé tout au long de la journée de travail. (b) : Probabilité <i>intermédiaire</i> ou <i>dans</i>	

<i>la journée</i> d'allumage de l'éclairage électrique (Reinhart and Voss, 2003). (c) : Probabilités d'extinction mesurées pour différentes durées d'absence de l'utilisateur pour un système d'éclairage extinction sans capteur, avec un détecteur de présence et d'un système d'éclairage indirect à intensité variable. (Reinhart, 2004).....	13
Figure 2-6 : Profile hebdomadaire (a) de probabilité annuelle moyenne d'occupation et (c) de puissance électrique d'éclairage dans le bureau d'exemple. (Reinhart, 2004)	14
Figure 2-7 : Relevés d'utilisation de l'éclairage (en % de la charge maximale installée) en fonction de l'occupation moyenne pour tous les intervalles de temps de l'horaire de bureau sur la période de mesures dans quatre immeubles de bureaux (présentés comme des droites de régression pour toutes les observations). (Mahdavi and Pröglhöf, 2008, 2009a, b).....	15
Figure 2-8 : Modèle de probabilité d'allumage de l'éclairage artificiel basé sur le niveau d'éclairement du plan de travail immédiatement avant l'arrivée de l'occupant. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a).....	16
Figure 2-9 : Probabilité d'extinction de l'éclairage artificiel proposée en fonction de la durée d'absence du poste de travail. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b).....	16
Figure 2-10 : Proportion des bureaux avec des lumières allumées en fonction (a) des différentes températures de globe intérieures et (b) des températures de l'air extérieur. Les lignes sont les approximations Logit (équation 2 en Annexe A.1.) pour chaque enquête. Des Probits distincts pour seulement les bâtiments ventilés naturellement (NV) en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée est illustrée par les points. (Nicol and Humphreys, 2004)	18
Figure 3-1 : Fréquence relative d'ouverture des fenêtres et actions de fermeture en fonction de la différence entre la température de l'air intérieur et la température de confort. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b).....	19
Figure 3-2 : Etat d'ouverture des fenêtres en fonction de la différence entre la température de l'air intérieur et la température de confort. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b).....	20
Figure 3-3 : Relation entre le taux d'ouverture des fenêtres et les températures intérieure, extérieure et la sensation thermique. (Raja et al., 2001)	21
Figure 3-4 : Courbes de régression logistique de l'ouverture des fenêtres en fonction de (a) la température du globe et (b) la température de l'air extérieur, dans tous les bâtiments ventilés naturellement de l'enquête longitudinale. Trois lignes (à gauche, au centre et à droite) définissent la zone morte de l'ouverture de fenêtres. On constate que plus de 80% des points représentant la proportion de fenêtres ouvertes se produisent dans la zone morte. (Rijal et al., 2007).....	27
Figure 3-5 : Proportion des bureaux avec des fenêtres ouvertes (a) en fonction de la température de globe intérieure et (b) en fonction de la température extérieure. Les lignes sont les approximations Logit (Equation2) pour chaque enquête. Les Probits distincts pour seulement les bâtiments à ventilation naturelle en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée de fenêtres ouvertes est représentée par les points. (Nicol and Humphreys, 2004).....	29
Figure 3-6 : Corrélation entre le pourcentage moyen de fenêtres ouvertes et la température extérieure sur 13 mois. Valeurs moyennes journalières évaluées durant les heures de bureau (jours de semaine de 8h à 18h). (Herkel et al., 2008)	30
Figure 3-7 : Corrélation entre le pourcentage moyen de fenêtres ouvertes et la température intérieure sur 13 mois (juillet 2002 – juillet 2003). Valeurs moyennes journalières évaluées durant les heures de bureau (jours de semaine de 8h à 18h). (Herkel et al., 2008).....	31
Figure 3-8 : Evolution journalière typique du taux d'ouverture des fenêtres. Valeurs moyennes mensuelle pour chaque heure d'une journée (0h – 23h). (Herkel et al., 2008).....	31

Figure 3-9 : Probabilité d'ouverture à l'arrivée pour une petite fenêtre en fonction de la température extérieure. Les points représentent la probabilité de 100 évènements. (Herkel et al., 2008)	32
Figure 3-10 : Proportion observée de fenêtres ouvertes en fonction de différents paramètres physiques mesurés: (a) - (h) avec les courbes de régression logistique, (i) avec les lignes de contour de mêmes niveaux de probabilités ajustés. (Haldi and Robinson, 2009a)	34
Figure 3-11 : Probabilités de transition observées (données sur une échelle quasi-logarithmique), en fonction des températures intérieures et extérieures, avec des lignes de contour de mêmes probabilités. (Haldi and Robinson, 2009a)	38
Figure 3-12 : Estimations des fonctions de survies établies par Kaplan-Meier pour les durées d'ouverture (au-dessus) et de fermeture (en bas), où les points représentent des données censurées. (Haldi and Robinson, 2009a; Haldi and Robinson, 2009b)	40
Figure 3-13 : Probabilité d'ouverture des fenêtres comme fonction des températures intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008).....	42
Figure 3-14 : Comparaison du nombre d'heures où les températures intérieures et extérieure dépassent une certaine valeur. (Yun and Steemers, 2008)	44
Figure 3-15 : Proportion de temps au-dessus d'une température donnée. (Yun and Steemers, 2010)....	49
Figure 4-1 : Relation entre la fermeture des stores ou des rideaux et les températures intérieure et extérieure et la sensation thermique. (Raja et al., 2001).....	55
Figure 4-2 : Occlusion moyenne des protections solaires pour différentes profondeurs de pénétration solaire pour les dix bureaux étudiés, pour les périodes occupées quand l'éclairement solaire direct était supérieur à 50W/m ² . Le trait plein correspond à la courbe de Inoue, alors que la courbe parabolique est ajustée aux données de Lamparter. La courbe parabolique correspond à $y = 15 + -0,116 + 1359 x$ avec $y =$ l'occlusion des protections solaires [%] et $x =$ la profondeur de pénétration solaire [m]. (Reinhart and Voss, 2003)	57
Figure 4-3 : Occlusion moyenne des protections solaires pour différentes profondeur de pénétration solaire pour les dix bureaux étudiés pour l'ensemble des périodes d'occupation. Les ronds (triangles) correspondent aux périodes où l'éclairement solaire direct est supérieur (inférieur) à 50 W/m ² . (Reinhart and Voss, 2003)	57
Figure 4-4 : Modèle proposé pour décrire la dépendance du déploiement des protections solaires (en %) en fonction de l'orientation de la façade (N : nord, NE : nord-est, NW : nord-ouest, E : est, W : ouest, SE : sud-est, SW : sud-ouest, S : sud) et du rayonnement incident (vertical) global sur la façade. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b)	59
Figure 4-5 : Pourcentage de protections solaires fermées pour une façade SSO en fonction de l'éclairement solaire vertical. (Mahdavi and Pröglhöf, 2008)	60
Figure 4-6 : Proportion de bureaux avec des stores ou des rideaux tirés en fonction (a) des différentes températures de globe intérieures et (b) des températures de l'air extérieur. Les lignes sont les approximations Logit (équation 2 dans l'Annexe A.1.) pour chaque enquête. Des Probits distincts pour seulement les bâtiments à ventilation naturelle (NV) en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée de stores fermés est représentée par les points. (Nicol and Humphreys, 2004).....	62
Figure 4-7 : Proportion de stores fermés pour différentes valeurs de l'éclairement extérieur. Données fournies par Yannick Sutter (Sutter, 2003). (Nicol and Humphreys, 2004).....	63
Figure 4-8 : Probabilité de fermeture des stores en fonction des températures intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)	64

Figure 5-1 : Lignes de probit pour le fonctionnement des ventilateurs dans les bâtiments à ventilation naturelle (NV) dans différents pays européens. (Nicol and Humphreys, 2004)	66
Figure 5-2 : Probabilité de mise en fonctionnement des ventilateurs comme fonction des températures intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)	68
Figure 6-1 : Proportion de bureaux avec chauffage allumé en fonction (a) des différentes températures de globe intérieures et (b) des températures de l'air extérieur. Les lignes sont les approximations logit (équation 2, présentée en Annexe A.1.) pour chaque enquête. Des Probits distincts pour seulement les bâtiments à ventilation naturelle en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée est illustré par les points. (Nicol and Humphreys, 2004)	70
Figure B-1 : Exemple de coefficient de corrélation (http://fr.wikipedia.org/wiki/Corrélation_(statistiques))	73

Modèles de comportement des occupants

« Des progrès ont été réalisés au cours de la dernière décennie pour améliorer notre compréhension de l'impact que les occupants ont sur la performance des bâtiments et comment cela peut être mis sous forme algorithmique. (...) » Mais avant d'utiliser de tels modèles, « nous devrions peut-être nous poser la simple question 'avons-nous vraiment besoin de représenter les occupants d'une manière plus réaliste dans nos analyses (qu'avec de simples modèles horaires) ?' La réponse, comme toujours, est que cela dépend de ce que nous voulons apprendre. Si notre but est simplement de comparer le rendement énergétique relatif de propositions alternatives de conception, tous les autres facteurs restant constants, alors la réponse *peut* être - non. Mais si notre but est de comprendre si une proposition de conception particulière est solide, de déterminer si cette proposition est susceptible d'être confortable ou de comprendre ce que sa performance énergétique et environnementale est susceptible d'être en termes absolus, alors la réponse est plus certainement - oui. En outre, comme la qualité de l'enveloppe des bâtiments s'améliore et que, par conséquent, ils conservent mieux l'énergie, les conséquences de l'action des occupants, pour réguler l'enveloppe, les lumières intérieures et les appareils électroménagers, sont plus marquées. En bref, il sera de plus en plus important de modéliser avec précision la présence et le comportement des occupants puisque la performance de nos bâtiments s'améliore, notamment si nous visons des bâtiments entièrement passifs sans système de chauffage ou de refroidissement. » (Robinson and Haldi, 2011)

« Comprendre la façon dont les utilisateurs interagissent avec des services de construction (stores, éclairage électrique, le refroidissement, la ventilation, l'ouverture de la fenêtre, etc.), et l'impact de leur utilisation sur la consommation d'énergie totale du bâtiment, nous aide à atteindre deux objectifs. Tout d'abord, nous pouvons élaborer de meilleurs modèles de comportement de l'utilisateur pour les logiciels de simulation qui aident les concepteurs à prévoir et optimiser l'utilisation de l'énergie ou le confort offert à l'utilisateur. Ensuite, des algorithmes de contrôle avancés peuvent utiliser cette information pour accroître leur acceptation par les utilisateurs et aider à réaliser des économies d'énergie. » (Lindelöf and Morel, 2006)

« Récemment, il a été démontré que le comportement de l'occupant joue un rôle fondamental sur la quantité d'énergie utilisée dans les bâtiments, par exemple, par le temps et le type d'ouverture des fenêtres, l'utilisation des unités de climatisation (AC) ou le choix de la consigne de température ambiante (Andersen, 2009; Guerra Santin et al., 2009; Herkel et al., 2008; Rijal et al., 2007; Schweiker and Shukuya, 2009). Par conséquent, l'occupant a une grande influence sur la variation de la consommation d'énergie dans différents types de bâtiments: plusieurs études (Emery and Kippenhan, 2006; Maier et al., 2009; Socolow, 1978; Yun and Steemers, 2008) ont montré que le comportement des membres du ménage peut varier à tel point que la consommation d'énergie résidentielle diffère d'un facteur de deux, même si les équipements et appareils sont identiques (Baker and Steemers, 2000). (...) »

Le comportement des occupants est influencé par un assez grand nombre de causes, à la fois 'externes' à l'occupant lui-même (par exemple : la température de l'air, la vitesse du vent), et internes ou 'individuelles' (par exemple : les antécédents personnels, les attitudes, les préférences) et les propriétés de construction (par exemple : la propriété, les appareils de chauffage disponibles) (Andersen, 2009; Schweiker, 2010). (...)

En ce qui concerne le domaine de la science du bâtiment, le comportement des occupants lié aux systèmes de contrôle du bâtiment a traditionnellement été lié majoritairement aux conditions thermiques intérieures et extérieures. Dans les premières études, la température de l'air extérieur participait à la majorité des variations de l'interaction des occupants avec les éléments de l'environnement construit (par exemple les fenêtres ou les radiateurs) (Brundrett, 1977; Dick and Thomas, 1951). Ces paramètres peuvent être désignés comme des 'facteurs externes' tels que proposés par Schweiker (Schweiker, 2010) et le nombre d'études les concernant ont augmenté au cours des dernières années (Andersen, 2009; Haldi and Robinson, 2009a; Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004; Schweiker and Shukuya, 2009).

Dans le domaine des sciences sociales, le comportement humain est mis en relation avec les causes qui pourraient être appelées 'facteurs internes ou individuels' (Schweiker (Schweiker, 2010)) comme la préférence, les attitudes, le contexte culturel et ainsi de suite. En plus des facteurs externes, ils influencent le comportement des occupants d'une manière très complexe. La recherche sur les facteurs individuels menant à une action plutôt qu'une autre a été menée dans le domaine de la psychologie comportementale (Ajzen et al., 2004; Ajzen and Fishbein, 2005; Goven and Langer, 2009; Refsgaard and Magnussen, 2009).

Dans cette lignée, l'approche adaptative stipule que 'si un changement se produit de manière à produire un inconfort, les gens réagissent de manières qui tendent à rétablir leur confort' (Nicol and Humphreys, 2002). Selon l'approche adaptative, si une personne est dans un état d'inconfort, alors il / elle prendra des mesures qui devraient rétablir un état de bien-être.

L'approche adaptative (de Dear and Brager, 1998) est basée sur la notion que le niveau d'adaptation et d'attente des occupants est fortement lié aux conditions climatiques extérieures: de cette façon, à la base du modèle adaptatif de confort se trouve la croyance que les occupants jouent, consciemment ou inconsciemment, un rôle actif dans la réalisation des conditions environnementales intérieures. » (Fabi et al., 2012)

Une régression souvent employée pour décrire le comportement des occupants est la relation Logit issue de l'analyse Probit. Cette dernière suppose que la probabilité d'un événement se passe augmente à mesure que l'intensité du stimulus augmente. La probabilité p qu'un événement se soit passé est définie selon le modèle Logit et est décrite par Nicol et Humphreys (Nicol and Humphreys, 2004) en [Annexe A.1](#).

1. Absentéisme / Taux d'occupation

1.1. Immeubles de bureaux

1.1.1. Observations

Bauman et McClintock (Bauman and McClintock, 1993) annoncent en 1993 que les occupants sont hors de leur bureau de 25 à 30 % des heures normales d'occupation.

Par ailleurs, sur base d'une campagne de mesure de 9 à 14 mois dans différents types de bureaux à Vienne en Autriche, Mahdavi et Pröglhöf (Mahdavi and Pröglhöf, 2008, 2009a, b) proposent des modèles généraux pouvant servir lors de simulations dynamiques pour représenter la présence des occupants et leurs actions (voir figures 1-1, [2-8](#), [2-9](#) et [4-4](#)). Ils notent toutefois qu'il est difficile de prédire les interactions d'un occupant avec les systèmes à sa disposition et que les données comportementales issues d'un immeuble de bureaux ne peuvent pas être transposées à d'autres bâtiments de bureaux sans ajustement sur base de la superficie, du contexte (physique, climatique et culturel), de l'usage (fonction), de l'orientation, de l'enveloppe, des systèmes, etc. Toutefois, les modèles comportementaux basés sur des résultats d'observations à long terme et des mesures à haute résolution dans les bâtiments typiques de bureaux sont préférables à la plupart des hypothèses généralement appliquées dans la conception de systèmes, la simulation et l'exploitation.

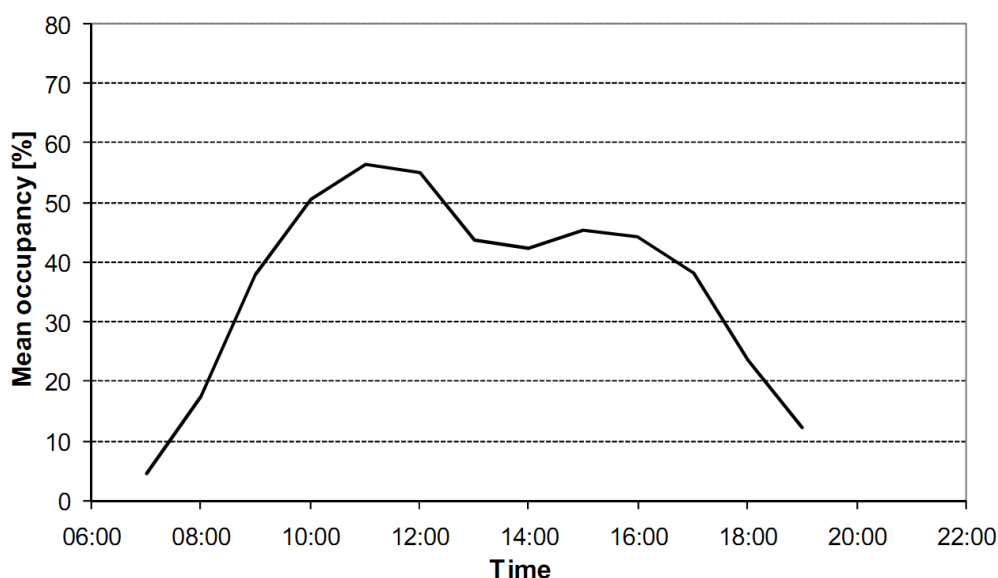


Figure 1-1 : Occupation moyenne proposée comme donnée pour des applications de simulation de performance des bâtiments (de bureaux). (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b)

Reinhart (Reinhart, 2004) propose également un profil hebdomadaire de probabilité moyenne d'occupation. Il est repris à la [Figure 2-6\(a\)](#).

1.1.2. Modèle d'occupation

En 2005, Wang et ses partenaires (Wang et al., 2005) examinent les propriétés statistiques d'occupation dans 35 bureaux individuels d'un grand immeuble de bureaux à San Francisco, entre le 29 décembre 1998 et le 20 décembre 1999. Suite à cela, ils proposent un modèle probabiliste pour décrire et simuler l'occupation de bureaux individuels. Ils décrivent les intervalles d'occupation et d'absence à l'aide de deux distributions exponentielles indépendantes. La densité de fonction d'une variable aléatoire exponentielle est :

$$f(y) = [1/\beta]e^{-y/\beta}, y > 0$$

Où β représente la longueur des intervalles d'occupation ou d'absence.

Néanmoins, ils ont constaté que si la distribution exponentielle pour les périodes d'absence s'avère acceptable (bonne corrélation avec les mesures et bonne déviance), ce n'est pas le cas pour les périodes d'occupation (déviance trop élevée).

Aussi, les observations de Wang et ses partenaires leurs ont permis d'établir l'horaire d'occupation présenté en figure 1-2.

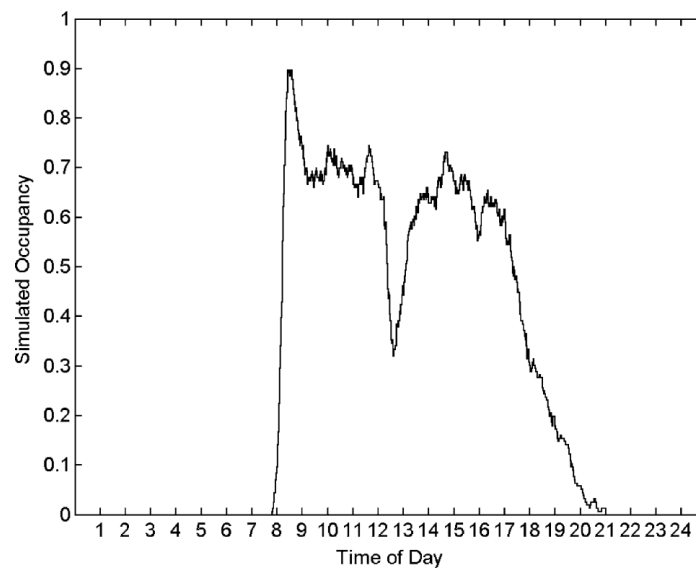


Figure 1-2 : Taux d'occupation horaire en fonction du temps pour un bureau individuel. (Wang et al., 2005)

D'autre part, Tabak et de Vries ont analysé la prédiction des activités intermédiaires des occupants de bureaux et présentent leurs observations dans (Tabak and de Vries, 2010). Ils proposent aussi des modèles de prédiction d'occurrences et de fréquence d'activités intermédiaires comme les pauses et les passages aux toilettes afin d'étudier l'utilisation de l'espace. (Tabak and de Vries, 2010)

1.1.3. Modèle de Page et al. (Page et al., 2008)

Page et ses partenaires décrivent un algorithme pour la simulation de la présence des occupants. Ils ont fait l'hypothèse que la probabilité d'occupation à un pas de temps donné ($P_{ij}(t)$) ne dépend que de l'état d'occupation à l'intervalle de temps précédent et utilisent la chaîne inhomogène de Markov (voir Annexe B), interrompue par des périodes occasionnelles de longue absence. Ils utilisent une chaîne de Markov inhomogène parce que les probabilités qu'un occupant arrive à 8h00 ou à 18h00 ne sont pas les mêmes. De ce fait, $P_{ij}(t)$ est dépendante du temps.

Les données utilisées pour réaliser le modèle sont issues de mesures dans 20 bureaux privés du LESO à Lausanne, en Suisse, entre décembre 2001 et janvier 2006. La comparaison entre résultats de monitoring et de simulation est présentée à la figure 1-3.

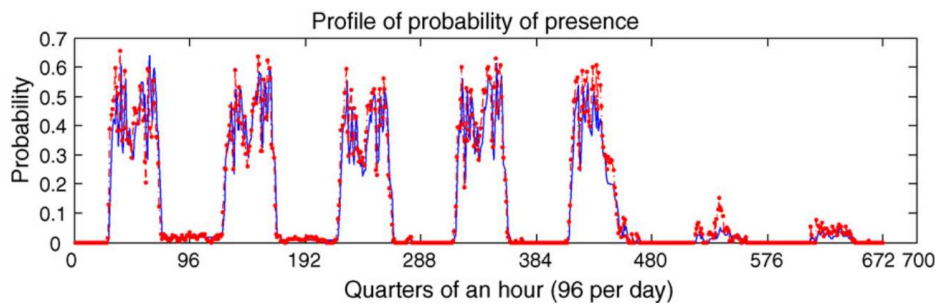


Figure 1-3 : Comparaison, entre les données de monitoring (ligne solide) et les résultats de simulation (en points tillés) des profils de probabilité de présence d'un bureau. (Page et al., 2008)

1.2. Immeubles résidentiels (Richardson and Thomson, 2008a)

Richardson et Thomson ont réalisé un fichier Excel proposant un exemple de simulation d'une occupation active dans une maison unifamiliale (téléchargeable gratuitement à l'adresse web : <http://hdl.handle.net/2134/3112>). « Le modèle génère des ensembles de données stochastiques représentant le nombre d'occupants actifs dans une maison, sur une période de 24 heures, avec une résolution de deux minutes. Un occupant actif est défini comme une personne qui est présente dans une maison mais qui ne dort pas. Le modèle est exécuté en introduisant le nombre de résidents qui vivent dans une maison et si les données voulues portent sur un jour de semaine ou sur un jour de weekend. La simulation utilise des données dérivées de l'enquête « Time Use Survey » réalisée en 2000 au Royaume-Uni, disponible depuis le *UK Data Archive*. Le fichier Excel contient toutes les informations nécessaires pour lancer la simulation ainsi que le code source Visual Basic. Le fonctionnement du modèle est décrit dans l'article de journal de Richardson et al. publié en 2008 (Richardson et al., 2008). » (Richardson and Thomson, 2008a)

Les résultats de chaque simulation considérant les mêmes hypothèses sont différents à cause des nombres aléatoires considérés lors de la génération stochastique mais chaque simulation est basée sur les mêmes matrices de probabilité de transition et reflète donc des caractéristiques similaires.

Des modèles de consommations liées à l'éclairage (Richardson et al., 2009) et de consommations électriques (Richardson et al., 2010) ont été générés sur base du modèle ci-dessus et sont téléchargeables gratuitement respectivement aux adresses : <http://hdl.handle.net/2134/4065> (Richardson and Thomson, 2008b) et <http://hdl.handle.net/2134/5786> (Richardson and Thomson, 2010).

2. Éclairage artificiel

Sur base du modèle original de Lightswitch mis au point par Newsham et al. (Newsham et al., 1995), Reinhart a dérivé l'algorithme de Lightswitch2002 (Reinhart, 2001; Reinhart, 2004) afin de prévoir un contrôle personnel des [systèmes d'éclairage](#) et de [stores électriques](#). Les concepts clés incluent des fonctionnalités stochastiques, les réponses dynamiques aux changements à court terme dans des conditions lumineuses et des motifs d'occupation. Par stochastique, on veut dire que chaque fois qu'un utilisateur est confronté à une décision de contrôle, par exemple pour allumer l'éclairage ou non, un processus stochastique est lancé pour déterminer le résultat de la décision. Par dynamique, on entend qu'au lieu de chercher une journée moyenne au cours d'une année ou d'un mois, l'occupation de l'utilisateur, les éclairagements intérieurs et l'état résultant des systèmes, des stores électriques et de l'éclairage sont examinées à intervalles de temps réguliers (par exemple 5 min) tout au long de l'année. Reinhart a introduit l'utilisation de modèles de prédiction différents en fonction que les occupants allument ou éteignent leurs lumières ou non à leurs arrivées, ou que ces mêmes occupants éteignent ou non la lumière au moment du départ.

Bourgeois (Bourgeois, 2005) a développé une méthode pour intégrer les processus stochastiques sous-horaires en simulation de bâtiment en adoptant les modèles de Nicol (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) et Reinhart mentionné ci-dessus.

2.1. Bureaux

2.1.1. [*Observations comportementales \(Lindelöf and Morel, 2006; Raja et al., 2001\)*](#)

L'étude de Lindelöf et Morel (Lindelöf and Morel, 2006) a été menée dans des bureaux (environ 30 personnes) du LESO à Lausanne en Suisse. Il ressort des observations réalisées que les trois quarts de toutes les actions de l'utilisateur (en termes d'allumage ou d'extinction de l'éclairage artificiel) sont survenues moins de 300 s, soit 5 min, après que l'utilisateur soit entré dans le bureau ou avant qu'il le quitte (voir Figures 2-1 et 2-2). Les distributions semblent similaires mais on observe une montée du 25 %-quantile inférieur dans le cas du départ. Cela est lié à la valeur intrinsèque de temporisation de 30 s des capteurs d'occupation. « En d'autres termes, les utilisateurs utilisent habituellement les contrôles qui s'offrent à eux alors qu'ils sont "en mouvement". Les utilisateurs ne quittent pas leurs sièges pour ajuster leurs paramètres, sauf si la situation est clairement inconfortable. (...) Cela a des conséquences importantes pour le choix du placement des contrôles de l'utilisateur dans un bureau qui devraient être aussi proche que possible de l'utilisateur qui, sinon, ne les utilisera tout simplement pas. »

On observe également que les utilisateurs peuvent tolérer des conditions d'éclairage juste à la limite inférieure de la zone d'inconfort (environ 200-300 lux) indéfiniment et ils ne vont allumer la lumière que lorsqu'ils se déplacent à proximité des contrôles, ce qui nous prive, encore une fois, de points de données pour les niveaux d'éclairement plus proche de la zone de confort.

Par ailleurs, en réalité, les utilisateurs se comportent très différemment les uns des autres. Il y a les utilisateurs qui utilisent très souvent les interrupteurs et ceux qui semblent plus passifs et ne se

soucient pas d'utiliser le système. Cela donne de la crédibilité à la classification des utilisateurs dans l'algorithme Lightswitch-2002 (Reinhart, 2004) en différents types en fonction de leur utilisation dynamique ou statique de commandes manuelles.

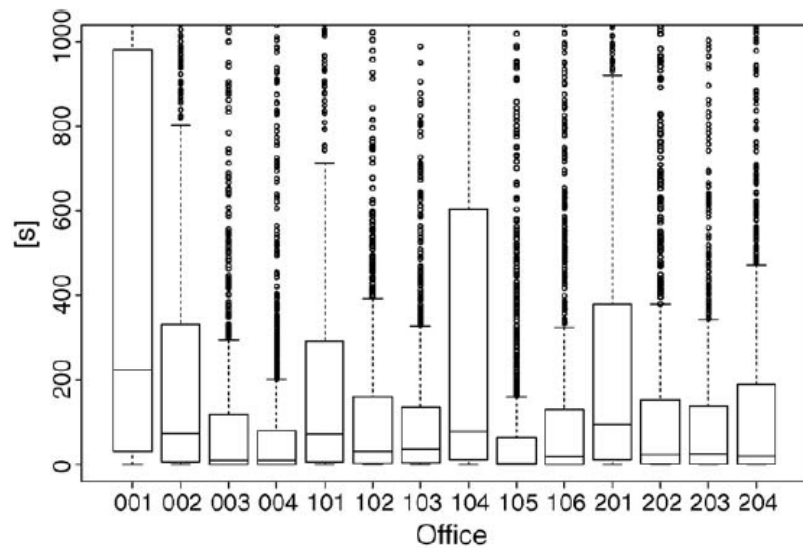


Figure 2-1 : Boîtes à moustaches du temps entre l'entrée de l'occupant dans le bureau et son utilisation des commandes manuelles, par bureau. (Lindelöf and Morel, 2006)

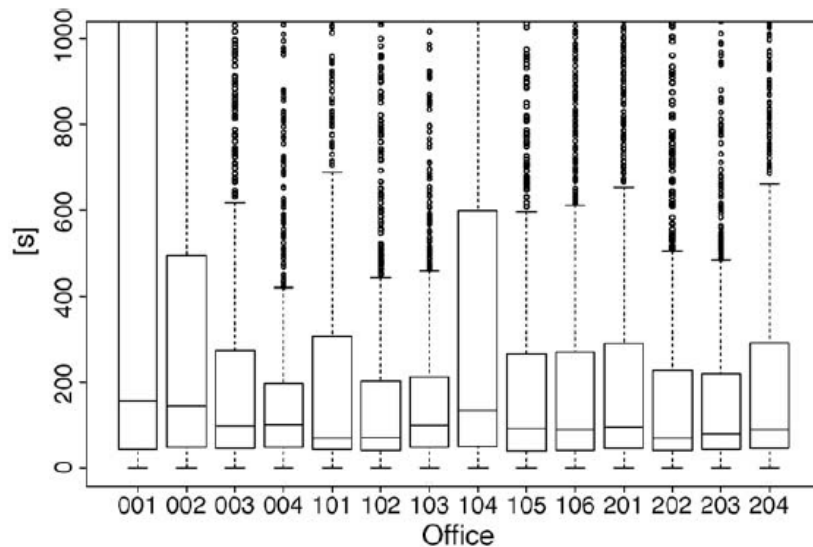


Figure 2-2 : Boîtes à moustaches du temps entre l'utilisation des commandes manuelles et le départ de l'occupant, par bureau. (Lindelöf and Morel, 2006)

Finalement, dans les bâtiments où les contrôles d'éclairage sont placés à proximité de l'entrée des bureaux, les utilisateurs utilisent très rarement la fonction de variation de puissance (dimming) de leur éclairage électrique. Ils passent presque toujours de complètement allumé à complètement éteint et inversement.

Raja et ses partenaires (Raja et al., 2001) ont étudié l'utilisation de contrôles de construction dans 15 immeubles de bureaux ventilés naturellement à Oxford et à Aberdeen au Royaume-Uni, pendant une **période estivale** (de juin à août), à l'aide de questionnaires. L'étude a porté sur l'analyse de la relation de [fenêtres](#), de portes, de [stores](#), de [ventilateurs](#), de l'éclairage artificiel, etc. avec des températures intérieure et extérieure et le confort thermique.

Ils ont observés que l'éclairage artificiel est plus largement utilisé en hiver qu'en été dans les conditions climatiques du Royaume-Uni. Une analyse de régression de l'éclairage artificiel avec la sensation thermique et les températures intérieure et extérieure montre une très faible corrélation entre ces variables. Cependant, la Figure 2-4 suggère que les jours ensoleillés d'été, les gens ont tendance à ne pas allumer les lumières, en dépit d'une faible corrélation. Dans les bureaux en open-space, les utilisateurs ont moins de contrôle sur les lumières générales. Par conséquent, en dépit d'un éclairage naturel suffisant, les lumières sont allumées en de nombreux endroits. Finalement, lorsque l'éclairage est allumé en début de matinée, il le reste généralement tout au long de la journée.

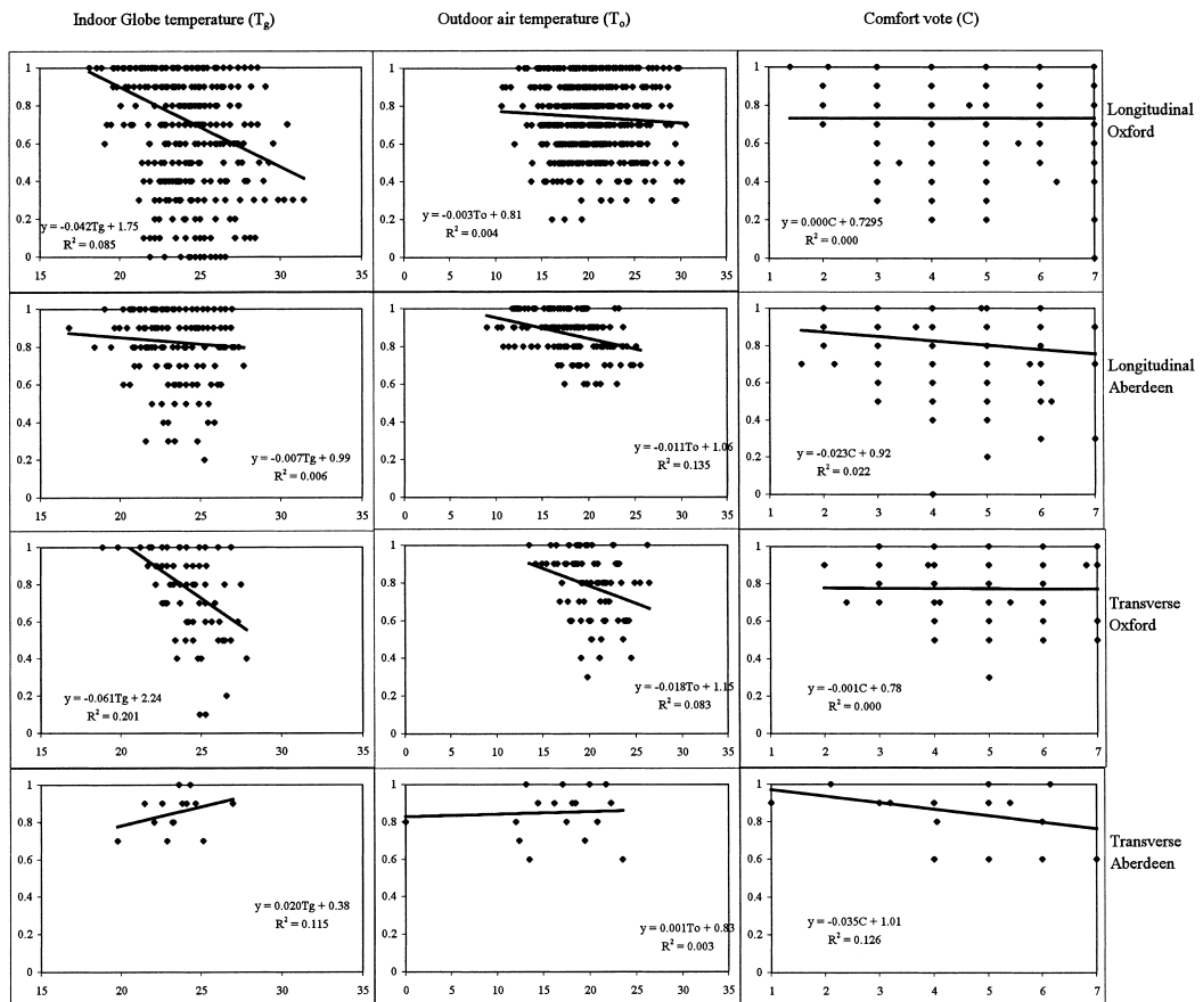


Figure 2-3 : Relation entre un éclairage artificiel allumé et les températures intérieure et extérieure et la sensation thermique. (Raja et al., 2001)

2.1.2. Modèle pour le contrôle manuel et automatique de l'éclairage électrique (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b; Reinhart, 2004; Reinhart and Voss, 2003)

(Reinhart and Voss, 2003)

Cette étude porte sur 10 bureaux (individuels ou occupés par deux personnes) orientés SSO et situés en Allemagne. La plupart des résultats sont repris dans le document de Reinhart publié en 2004 (Reinhart, 2004), présenté ci-après. Nous reprenons les courbes de probabilité d'allumage au moment de l'arrivée des occupants en Figure 2-5(a) et le Tableau 2-1 rassemblant la valeur des paramètres des probabilités d'allumage de l'éclairage artificiel identifiées par Reinhart et Voss (Reinhart and Voss, 2003).

Tableau 2-1 : Paramètres d'ajustement pour différents probabilités d'allumage de l'éclairage artificiel avec $y = a + c / (1 + \exp[-b(x-m)])$ pour $x > 0$ et $y = 1$ pour $x = 0$; y = probabilité de commutation et $x = \log_{10}$ (éclairage minimum du plan de travail). (Reinhart and Voss, 2003)

Paramètre	a	b	c	m	Médiane (lux)
Probabilité d'allumage à l'arrivée de Hunt	- 0,0175	- 4,0835	1,0361	1,8223	121
Probabilité d'allumage à l'arrivée de cette étude pilote	- 0,00238	- 3,0965	1,0157	1,8536	195
Probabilité d'allumage intermédiaire de cette étude pilote	0,0027	- 64,19	0,017	2,41	241

(Reinhart, 2004)

Les données du modèle sont les profils d'occupation et les éclairagements sur les plans de travail. A chaque intervalle de temps de la simulation, l'état de l'éclairage artificiel est évalué en fonction son état à l'intervalle précédent et du nouvel état de l'ombrage solaire. Le modèle a été développé sur base des données de terrain au Canada, au Japon, en Allemagne, au Royaume-Uni et aux États-Unis. Le modèle de contrôle des ombrages solaires est décrit au [chapitre 4.1.1](#).

Tout d'abord, le profil d'occupation qui détermine la décision de commutation s'applique. Ensuite un processus aléatoire est déclenché pour déterminer si l'événement de commutation aura lieu ou non. Tous les processus stochastiques dans la Figure 2-4 sont basés sur les données de l'étude sur le terrain. Les hypothèses sous-jacentes de l'algorithme sont énoncées dans le Tableau 2-2.

Notez que les deux cases grisées à la Figure 2-4 réfèrent au modèle d'utilisation des protections solaires présenté au [chapitre 4.1.1](#). « Dans le cas « the blind setting has just changed » (2^{ème} case grise à la Figure 2-7) soit la probabilité d'allumage de l'éclairage artificiel de la Figure 2-5(a), soit celle de la Figure 2-5(b) est appliquée. La justification de ce basculement entre deux fonctions de

probabilité si la position des protections solaires est révisée tient au fait que l'attention de l'occupant est attirée vers la situation de l'éclairage dans la salle, c'est à dire qu'une réévaluation de la situation lumineuse s'enclenche. Notez qu'une décision d'allumage de l'éclairage artificiel détermine si l'éclairage est *allumé*. Dans Lightswitch-2002, l'éclairage ne peut être *éteint* que si l'occupant quitte le bureau. »

Tableau 2-2 : Hypothèses sous-jacentes de l'algorithme Lightswitch-2002. De plus amples détails sont fournis dans Reinhart and Voss (Reinhart and Voss, 2003). (Reinhart, 2004)

(i)	Même si les occupants se comportent différemment, ils utilisent leur commande d'éclairage <i>consciemment</i> et <i>systématiquement</i> .
(ii)	La commande manuelle de l'éclairage coïncide surtout avec l'arrivée de l'occupant ou avec son départ du lieu de travail. Certaines personnes activent toujours leur éclairage pendant toute la journée de travail indépendamment des niveaux de lumière naturelle (comportement <i>l'utilisateur ne considère pas la lumière du jour</i> dans la Figure 2-5 (a)). D'autres enclenchent leur éclairage électrique uniquement lorsque le niveau d'éclairement intérieur du à la lumière du jour est faible (<i>l'utilisateur considère la lumière du jour</i> dans la Figure 2-5 (a)). Pour le dernier type d'utilisateur, la probabilité d'allumage de l'éclairage électrique tend à être corrélée à un niveau minimal d'éclairement intérieur au niveau du plan de travail à l'arrivée (Hunt, 1979; Love, 1998).
(iii)	Les événements de mise en marche <i>intermédiaire</i> ou <i>dans la journée</i> de l'éclairage électrique sont liés aux minima d'éclairements sur les plans de travail comme le montre la Figure 2-5 (b). La probabilité d'enclenchement augmente de 0,5% à 2% par pas de temps de 5 minutes pour un minimum éclairement du plan de travail en dessous de 250 lux. Ce niveau ressemble aux niveaux d'éclairements autour desquels les sujets d'une étude en laboratoire tendent à rétablir leurs niveaux d'éclairage électriques qui ont été lentement diminués dans le temps (Newsham et al., 2002). Comme les utilisateurs ne peuvent pas travailler dans l'obscurité, la probabilité intermédiaire a été modifiée et mis à l'unité pour des niveaux d'éclairement inférieurs à 250 lux. Cette modification plausible apportée à la probabilité intermédiaire fonction de commutation devra être affinée/validée dès que de nouvelles données de terrain seront disponibles.
(iv)	La durée de l'absence du lieu de travail est fortement corrélée avec la probabilité que l'éclairage électrique soit coupé manuellement. Il a été constaté que la présence de commandes d'éclairage automatisées influe sur le comportement de certaines personnes. Les occupants de bureaux privés équipés de détecteurs d'occupation se sont révélés être moins enclins à éteindre leurs lumières lors d'un départ temporaire que les occupants de bureaux sans capteurs. De même, les probabilités d'extinction des lampes se révèlent être plus faible pour un système d'éclairage à intensité variable (dimming) purement indirect que pour un système à intensité fixe. Ces effets sont résumés dans la Figure 2-5 (c).

Tableau 2-3 : Lightswitch-2002 compte quatre types différents d'utilisateurs. (Reinhart, 2004)

User DdBd *	L'utilisateur contrôle le système d'éclairage avec une sensibilité aux conditions d'éclairage ambiantes et utilise les protections solaires sur base quotidienne.
User DiBd	L'utilisateur contrôle le système d'éclairage indépendamment des conditions d'éclairage ambiantes et utilise les protections solaires sur base quotidienne.
User DdBs	L'utilisateur contrôle le système d'éclairage avec une sensibilité aux conditions d'éclairage ambiantes et maintien les protections solaires baissées en permanence avec un angle d'inclinaison des lamelles de 75°.
User DiBs	L'utilisateur contrôle le système d'éclairage indépendamment des conditions d'éclairage ambiantes et maintien les protections solaires baissées en permanence avec un angle d'inclinaison des lamelles de 75°.

* : Dd = Daylight dependant lighting use ; Di = Daylight independant lighting use ; Bs = Blinds statics; Bd = Blinds dynamic.

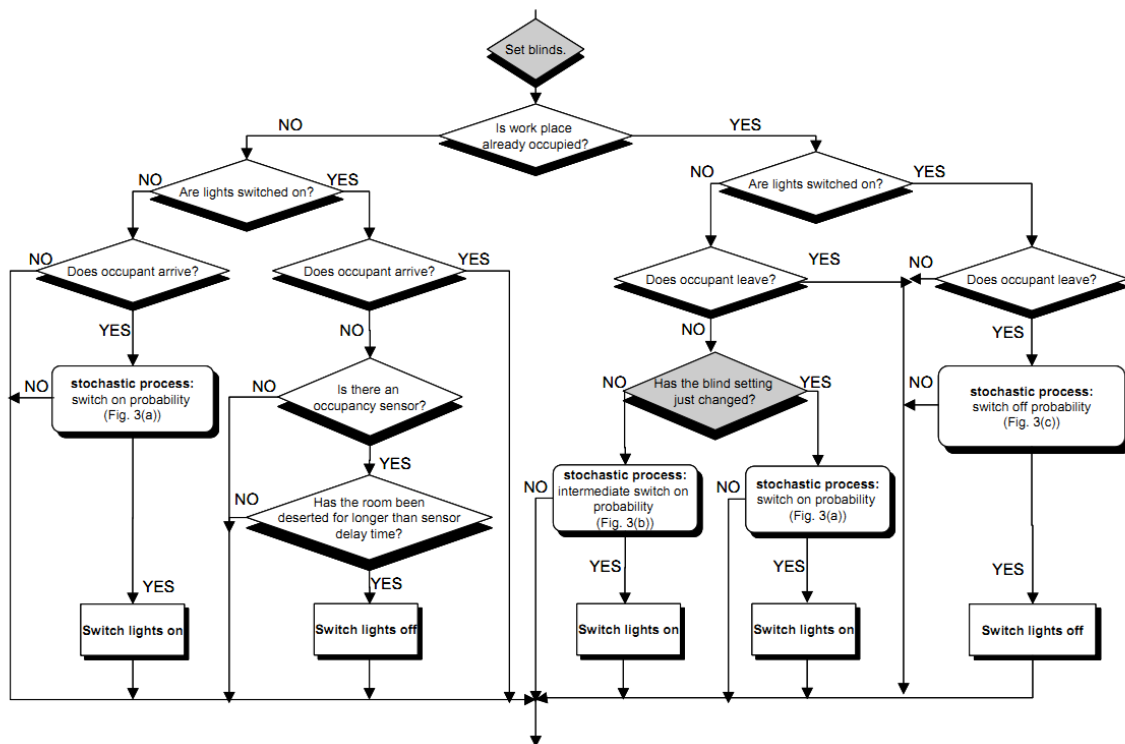


Figure 2-4 : L'algorithme Lightswitch-2002 pour l'éclairage électrique. (Reinhart, 2004)

Le modèle présenté ici a des limitations qui sont la conséquence d'un manque de données quantitatives de terrain. Nous en énumérons quelques-unes ci-dessous :

« *Extinction intermédiaire de l'éclairage artificiel* : Le scénario dans lequel un occupant retourne à son poste de travail après une absence temporaire et éteint les lampes n'est pas couvert par le modèle. (...) »

Orientation du poste de travail : L'orientation du poste de travail de l'utilisateur détermine son champ de vision et peut donc influencer son usage de l'éclairage artificiel. A cause de l'absence de données concluantes, le modèle présenté ici ne considère que les niveaux d'éclairage horizontaux sur le plan de travail, c'est-à-dire que l'orientation de l'occupant est ignorée.

Position des commandes : La fréquence à laquelle les commandes d'éclairage artificiel sont utilisées dépend de la position des commandes par rapport au poste de travail des occupants. Les utilisateurs sont moins enclins à interrompre leur tâche pour utiliser une commande proche de la porte qu'à utiliser une commande accessible depuis leur poste de travail (Bordass et al., 1994). »

Ce modèle a ensuite été appliqué à un bureau 'exemple' en considérant quatre types d'utilisation, présentés dans le Tableau 2-3. Les profils d'occupation et d'utilisation de l'éclairage artificiel ainsi obtenus sont présentés à la Figure 2-6.

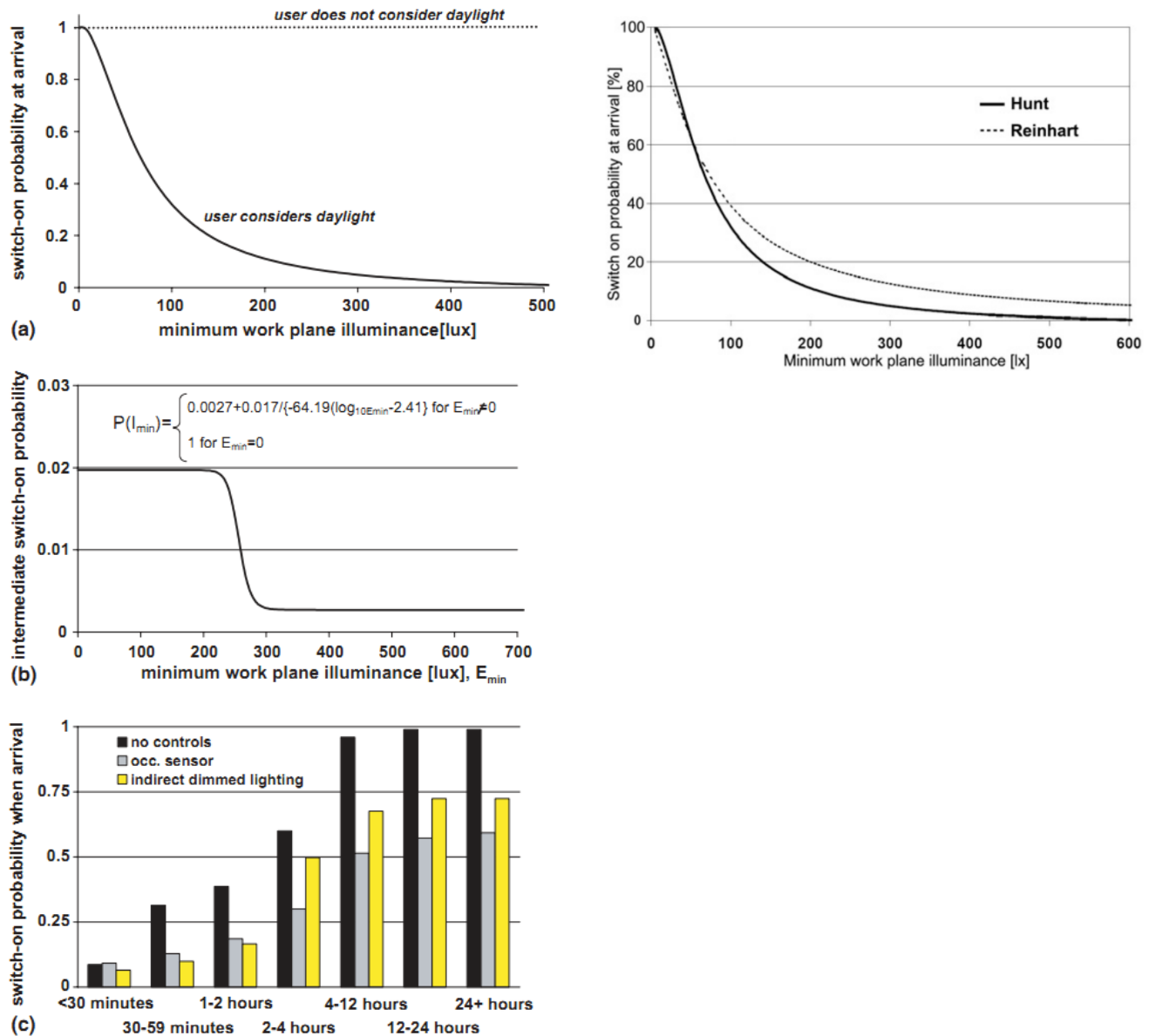


Figure 2-5 : (a) (gauche : (Reinhart, 2004) ; droite : (Mahdavi and Pröglhöf, 2008)) : Probabilité d'allumage mesurée en fonction de l'arrivée. La fonction originale de Hunt (Hunt, 1979) (en trait plein) décrit le comportement moyen d'utilisation des commutateurs d'un groupe d'utilisateurs. Les modèles de la ligne en pointillés représentent le comportement de commutation d'un utilisateur qui maintient l'éclairage électrique activé tout au long de la journée de travail. (b) : Probabilité *intermédiaire* ou *dans la journée* d'allumage de l'éclairage électrique (Reinhart and Voss, 2003). (c) : Probabilités d'extinction mesurées pour différentes durées d'absence de l'utilisateur pour un système d'éclairage extinction sans capteur, avec un détecteur de présence et d'un système d'éclairage indirect à intensité variable. (Reinhart, 2004)

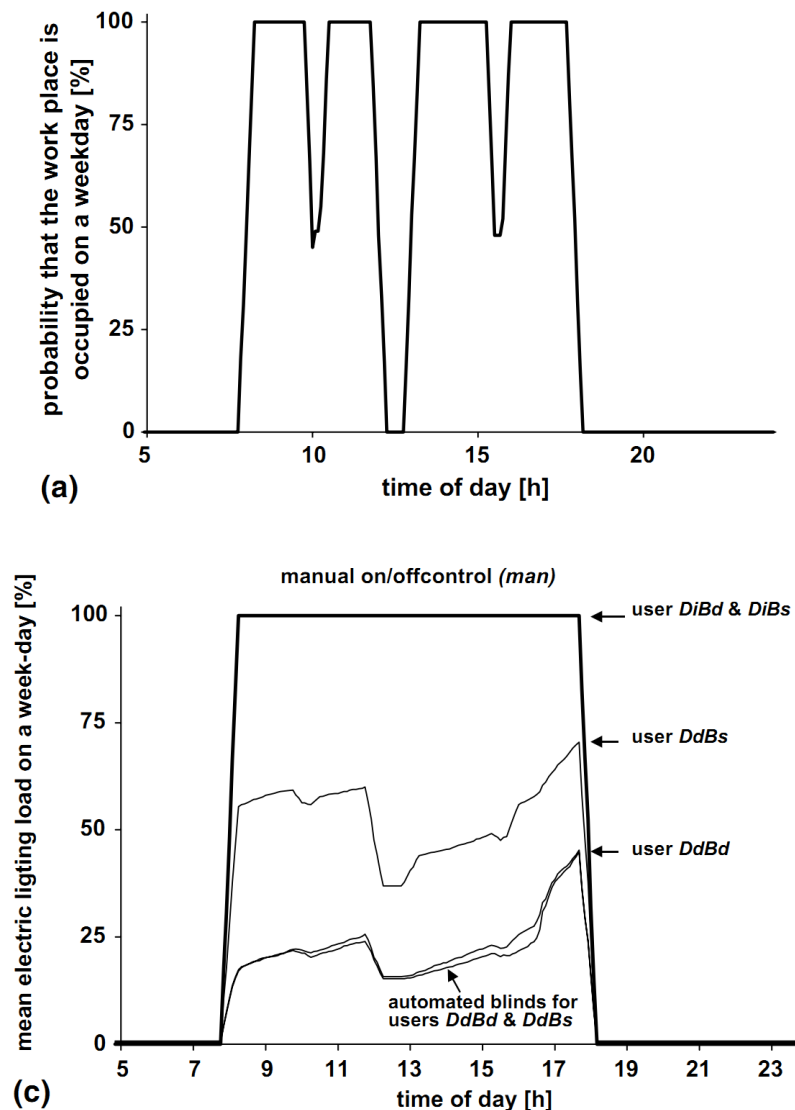


Figure 2-6 : Profile hebdomadaire (a) de probabilité annuelle moyenne d'occupation et (c) de puissance électrique d'éclairage dans le bureau d'exemple. (Reinhart, 2004)

Sur base d'une campagne de mesure de 9 à 14 mois dans différents types de bureaux à Vienne en Autriche, Mahdavi et Pröglhöf (Mahdavi and Pröglhöf, 2008, 2009a, b) proposent des modèles généraux pouvant servir lors de simulations dynamiques pour représenter la présence des occupants et leurs actions (voir les Figures 1-1, 2-8, 2-9 et 4-4). Ils notent toutefois qu'il est difficile de prédire les interactions d'un occupant avec les systèmes à sa disposition et que les données comportementales issues d'un immeuble de bureaux ne peuvent pas être transposées à d'autres bâtiments de bureaux sans ajustement sur base de la superficie, du contexte (physique, climatique et culturel), de l'usage (fonction), de l'orientation, de l'enveloppe, des systèmes, etc. Toutefois, les modèles comportementaux basés sur des résultats d'observations à long terme et des mesures à

haute résolution dans les bâtiments typiques de bureaux sont préférables à la plupart des hypothèses généralement appliquées dans la conception de systèmes, la simulation et l'exploitation.

D'après les résultats de leurs mesures, on peut observer que pour quatre immeubles de bureaux à Vienne (Autriche), les relevés d'utilisation de l'éclairage en puissance moyenne en fonction du temps sont très variables. On peut difficilement en tirer un modèle comportemental. Par contre, la Figure 2-7 propose un modèle de taux d'utilisation de l'éclairage en fonction du taux d'occupation. Ces données peuvent être croisées au taux d'occupation en fonction du temps présenté à la [Figure 1-1](#).

Mahdavi et Pröglhöf proposent d'autres relevés de puissance effective d'éclairage en fonction de l'éclairement horizontal global extérieur, de probabilité d'allumage de l'éclairage au moment de l'arrivée dans les bureaux et de fréquence d'actions d'allumage en fonction de l'éclairement.

Finalement, les figures 2-8 et 2-9 illustrent les modèles comportementaux proposés.

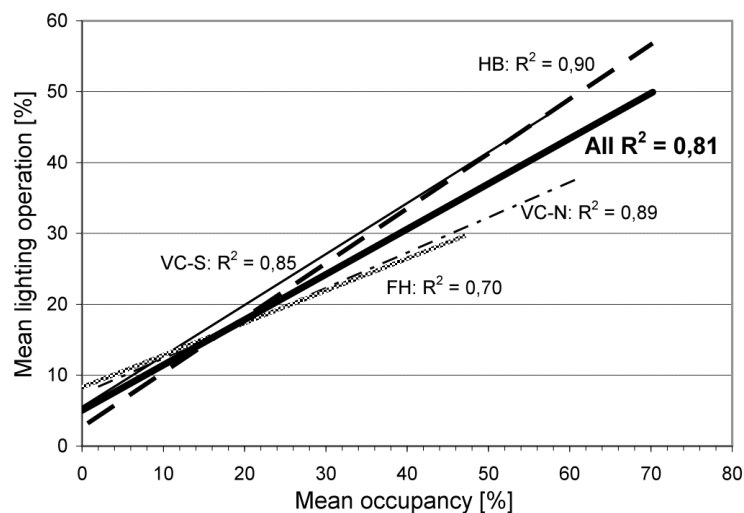


Figure 2-7 : Relevés d'utilisation de l'éclairage (en % de la charge maximale installée) en fonction de l'occupation moyenne pour tous les intervalles de temps de l'horaire de bureau sur la période de mesures dans quatre immeubles de bureaux (présentés comme des droites de régression pour toutes les observations). (Mahdavi and Pröglhöf, 2008, 2009a, b)

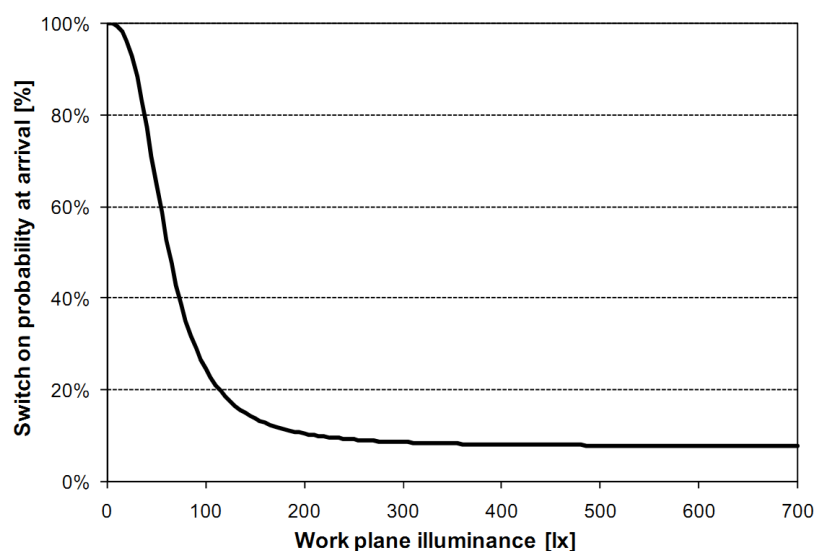


Figure 2-8 : Modèle de probabilité d'allumage de l'éclairage artificiel basé sur le niveau d'éclairement du plan de travail immédiatement avant l'arrivée de l'occupant. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a)

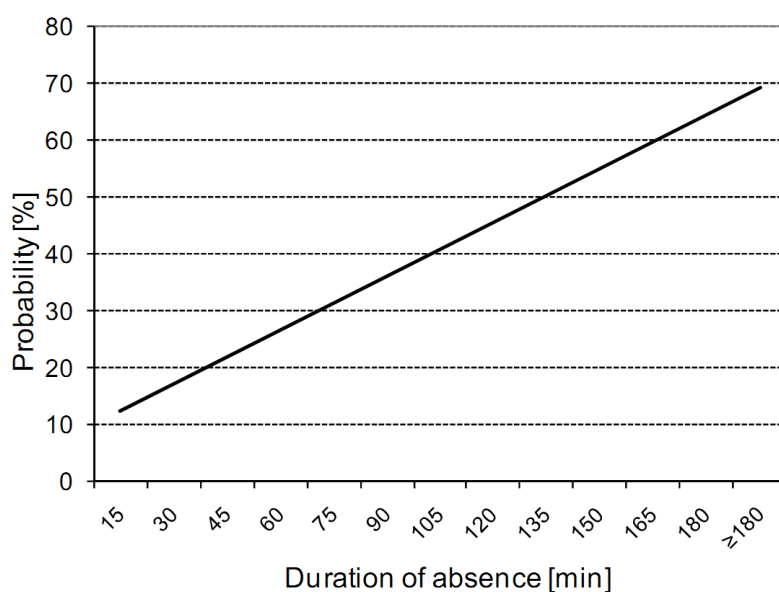


Figure 2-9 : Probabilité d'extinction de l'éclairage artificiel proposée en fonction de la durée d'absence du poste de travail. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b)

2.1.3. Modélisation du comportement des occupants (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004)

Trois bases de données sont utilisées dans les études de Nicol (Nicol, 2001) et Nicol and Humphreys (Nicol and Humphreys, 2004) pour faire une estimation de l'utilisation des contrôles. La première, dont les résultats sont repris ci-dessous, se base sur des études de terrain du confort subjectif menées dans des immeubles de bureaux dans cinq pays européens – Suède, Royaume-Uni, France, Portugal et Grèce (McCartney et Nicol, 2001). Elle comprend environ 4.655 sujets répartis dans 25 bâtiments, dont 11 ont été ventilés naturellement (1.649 dossiers). Les deux autres bases de données se basent sur des études au Royaume-Uni (McCartney et al. 1998) et au Pakistan (Nicol et al. 1999).

Les données collectées comprennent le niveau de confort des sujets, les conditions thermiques intérieures (températures de l'air et de globe, humidité et vitesse de l'air) ainsi que la température et l'humidité extérieures, les vêtements des sujets, leur activité et l'utilisation des différentes commandes (fenêtres, stores, portes, éclairage, ventilateurs, appareils de chauffage et, le cas échéant, de la climatisation).

Ils (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) ont modélisé le comportement des occupants vis-à-vis de ces commandes sur base du principe adaptatif : « si un changement arrive de sorte à produire un inconfort, les personnes réagissent d'une façon qui tend à rétablir leur confort » (Humphreys and Nicol, 1998). Le modèle utilisé dans les études reprises ici est le modèle Logit (voir [Annexe A.1.](#)) avec comme variable x la température extérieure ou la température intérieure (température de globe). La raison de l'utilisation de la température extérieure dans l'analyse de l'utilisation de contrôles est qu'elle fait partie des données de toute simulation, contrairement à la température à la température intérieure qui fait partie des résultats. Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 2-4.

Les résultats des enquêtes européennes traduits en courbes probit révèlent une baisse progressive de l'utilisation de l'éclairage avec l'augmentation de la température, tant intérieure qu'extérieure. Mis dans son contexte, ce comportement est cohérent avec la plus grande probabilité que les lumières soient allumées dans les mois sombres d'hiver, lorsque la température est également plus basse, qu'en été. On observe aussi que près de 60% des bureaux européens utilisent des lumières, même par temps chaud. Pour conclure, il y a une utilisation importante de l'éclairage dans tous les bureaux (70% à 90%) et elle est peu affectée par la température extérieure.

Tableau 2-4 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans la fonction Logit ainsi que la corrélation r^{2*} , calculées pour tous les bâtiments en Europe. (Nicol and Humphreys, 2004)

Commande	Base de données	Température extérieure (°C)			Température de globe (°C)		
		Interception a	Pente b	r	Interception a	Pente b	r
Allumage de l'éclairage artificiel	Europe	2,47 $\pm$ 0,18	-0,058 $\pm$ 0,011	-0,18	6,98 $\pm$ 0,58	-0,220 $\pm$ 0,200	-0,18

* En raison du grand nombre de cas, toutes les corrélations sont statistiquement très significatives à $p < 0,1\%$, sauf dans le cas des stores et la température extérieure dans l'enquête européenne.

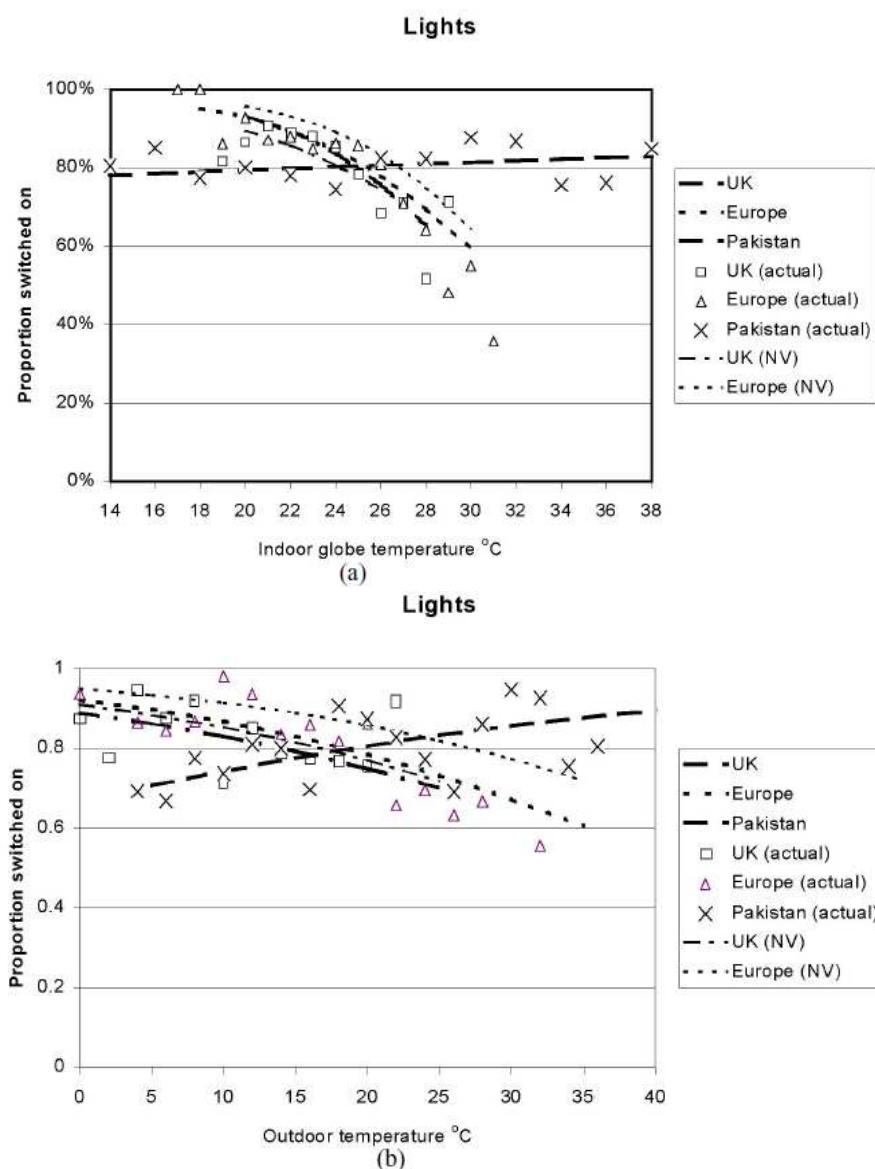


Figure 2-10 : Proportion des bureaux avec des lumières allumées en fonction (a) des différentes températures de globe intérieures et (b) des températures de l'air extérieur. Les lignes sont les approximations Logit (équation 2 en Annexe A.1.) pour chaque enquête. Des Probits distincts pour seulement les bâtiments ventilés naturellement (NV) en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée est illustrée par les points. (Nicol and Humphreys, 2004)

² La corrélation (r) est définie en Annexe A.3.

3. Ventilation naturelle

3.1. Bureaux ventilés naturellement

3.1.1. Observations dans des immeubles de bureaux

Sur base d'une campagne de mesure de 9 à 14 mois dans différents types de bureaux à Vienne en Autriche, Mahdavi et Pröglhöf (Mahdavi and Pröglhöf, 2008, 2009a, b) proposent des modèles généraux pouvant servir lors de simulations dynamiques pour représenter la présence des occupants et leurs actions (voir Figures 1-1, 2-8, 2-9 et 4-3). Ils notent toutefois qu'il est difficile de prédire les interactions d'un occupant avec les systèmes à sa disposition et que les données comportementales issues d'un immeuble de bureaux ne peuvent pas être transposées à d'autres bâtiments de bureaux sans ajustement sur base de la superficie, du contexte (physique, climatique et culturel), de l'usage (fonction), de l'orientation, de l'enveloppe, des systèmes, etc. Toutefois, les modèles comportementaux basés sur des résultats d'observations à long terme et des mesures à haute résolution dans les bâtiments typiques de bureaux sont préférables à la plupart des hypothèses généralement appliquées dans la conception de systèmes, la simulation et l'exploitation. En ce qui concerne la ventilation naturelle, les données issues d'un bâtiment ventilé naturellement sont présentées aux Figures 3-1 et 3-2. Ces données illustrent que les interventions d'ouverture et de fermeture des fenêtres sont liées à la différence entre la température intérieure et la température neutre (ou 'température de confort'). En effet, les occupants ouvrent les fenêtres lorsque la température intérieure est trop élevée et les ferment lorsqu'elle est trop basse. Aussi, le degré maximum d'ouverture coïncide avec l'écart minimum entre la température intérieure et la température neutre. Le degré d'ouverture diminue considérablement lorsque cet écart augmente.

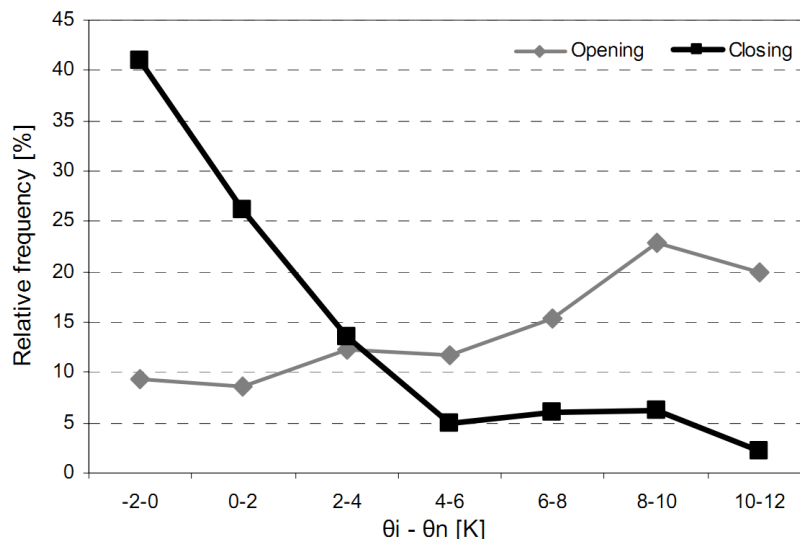


Figure 3-1 : Fréquence relative d'ouverture des fenêtres et actions de fermeture en fonction de la différence entre la température de l'air intérieur et la température de confort. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b)

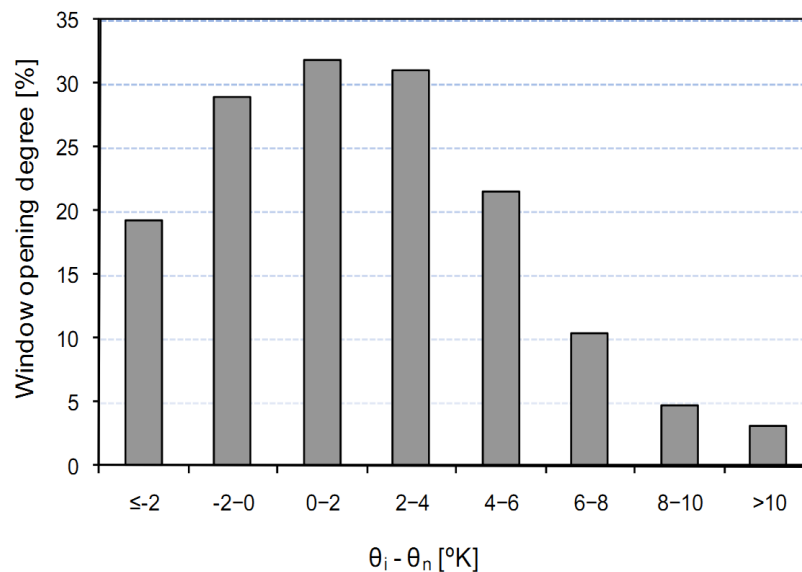


Figure 3-2 : Etat d'ouverture des fenêtres en fonction de la différence entre la température de l'air intérieur et la température de confort. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b)

Par ailleurs, Nicol (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) a fait une enquête sur l'utilisation des contrôles simples – [fenêtres](#), [éclairage](#), [stores](#) et [chauffage](#) – dans des immeubles de bureaux ventilés naturellement au Royaume-Uni, en Suède, en France, au Portugal, en Grèce et au Pakistan. Son intention était de faire des hypothèses réalistes sur le comportement de l'utilisateur qui peuvent ensuite être utilisées pour les simulations. Il a montré comment l'utilisation de chaque commande varie en fonction de la température extérieure :

« Bien que des variations considérables aient été observées entre les différents climats – la plus forte proportion de fenêtres ouvertes a été enregistrée au Royaume-Uni, suivi par les autres pays européens et finalement le Pakistan – dans tous les pays, les occupants commencent à ouvrir des fenêtres à une température extérieure supérieure à 10 °C. Lorsque la température augmente, il y a une forte probabilité que la fenêtre sera ouverte. » Nicol calcule la probabilité p que les fenêtres soient ouvertes en fonction de la température extérieure. L'expression définissant la probabilité d'ouverture des fenêtres en fonction des températures intérieure ou extérieure ainsi que les résultats majeurs des enquêtes sont présentés au [point 3.1.2.2](#) à la page 28.

Raja et ses partenaires (Raja et al., 2001) ont étudié l'utilisation de contrôles de construction dans 15 immeubles de bureaux ventilés naturellement à Oxford et à Aberdeen au Royaume-Uni, pendant une **période estivale** (de juin à août), à l'aide de questionnaires. L'étude a porté sur l'analyse de la relation de fenêtres, de portes, de [stores](#), de [ventilateurs](#), de [l'éclairage artificiel](#), etc. avec des températures intérieure et extérieure et le confort thermique. Ils rapportent que la proportion de fenêtres ouvertes augmente avec l'augmentation des températures intérieure et extérieure. Seules quelques fenêtres sont ouvertes lorsque la température extérieure est inférieure à 15 °C alors que la plupart des fenêtres sont ouvertes lorsque la température dépasse environ 25 °C. L'inconfort est fortement corrélé à l'utilisation de fenêtres, ce qui suggère les fenêtres sont généralement ouvertes

en réponse à un inconfort. Finalement, les occupants assis près d'une fenêtre, et donc qui peuvent plus facilement l'ouvrir et la fermer, rapportent moins d'inconfort que ceux qui sont loin d'une fenêtre.

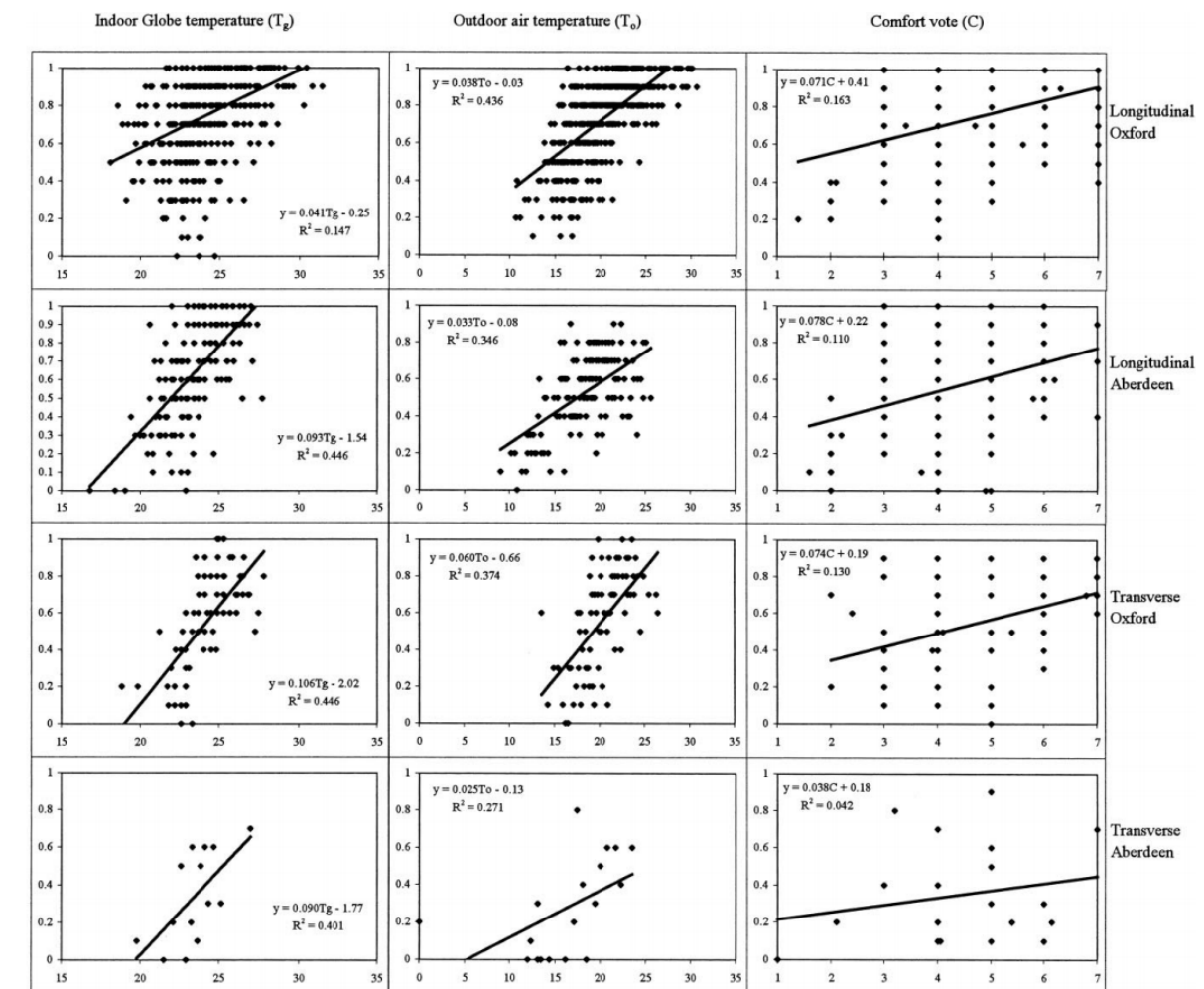


Figure 3-3 : Relation entre le taux d'ouverture des fenêtres et les températures intérieure, extérieure et la sensation thermique. (Raja et al., 2001)

Warren et ses partenaire (Warren and Parkins, 1984) ont mené une étude dans cinq immeubles de bureaux ventilés naturellement, au Royaume-Uni, sur une période de 3 mois pendant la **saïson de chauffage**. L'étude décrit le comportement d'ouverture de fenêtre par les occupants et indique qu'il est fortement lié aux conditions météorologiques. En effet, la température extérieure représente 76 pour cent de la variance observée, suivie par les gains solaires (8 %) et la vitesse du vent (4 pour cent). Warren distingue les petites et les grandes ouvertures. Les faibles ouvertures sont moins fortement liées aux conditions météorologiques puisque les fenêtres sont légèrement ouvertes afin de garantir une bonne qualité de l'air intérieur. En revanche, les grandes ouvertures sont fortement liées à la température extérieure et à l'apport solaire. En effet, les fenêtres sont ouvertes entièrement en vue de réaliser une ventilation intensive afin de contrôler la température intérieure. La mesure dans laquelle les fenêtres sont utilisées pendant la saison de chauffage pour contrôler la température intérieure dépend d'un certain nombre de facteurs, y compris les caractéristiques de

construction tels que la surface vitrée et l'orientation, le type de système de chauffage et de ses commandes. Une enquête par questionnaires a montré que l'ouverture des fenêtres est uniformément répartie tout au long de la journée. Cependant, la plupart des gens ferment leurs fenêtres à la fin de la journée plutôt qu'à n'importe quel autre moment. Cela suggère qu'une fois que les fenêtres ont été ouvertes, elles le restent jusqu'à ce que la pièce soit quittée en fin de journée de travail.

Fritsch et ses partenaires (Fritsch et al., 1990) ont pris des mesures dans quatre salles de bureaux dans l'immeuble de bureaux expérimental LESO au cours d'une **saison de chauffage** complète. Ils ont ensuite développé un modèle stochastique utilisant des chaînes de Markov afin de générer des séries chronologiques d'angles d'ouverture de fenêtre. La variable motrice principale est la température extérieure. Cependant, la forte relation entre l'angle d'ouverture de la fenêtre et la température extérieure observée en hiver n'existe pas durant l'été. En effet, pour des températures extérieures supérieures à 18 °C, la proportion de fenêtres ouvertes et l'angle d'ouverture semblent être indépendants de la température. Par conséquent, le modèle développé n'est valable que pour la période hivernale.

Herkel et ses partenaire (Herkel et al., 2008) ont publié en 2008 un document qui examine, valide et prolonge les résultats d'études antérieures en matière de contrôle manuel des fenêtres. Il propose une veste revue de la littérature et présente une étude de terrain réalisée dans 21 bureaux orientés au sud à l'intérieur du bâtiment de l'Institut Fraunhofer de Fribourg, en Allemagne. Ce bâtiment n'est pas équipé de système de conditionnement d'air.

Les résultats des études antérieures (Ebel et al., 2003; Fritsch et al., 1990; Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004; Raja et al., 2001; Reinhart, 2001; Reinhart, 2004; Warren and Parkins, 1984) ne peuvent généralement pas être appliqués à n'importe quel bâtiment, puisque des variables telles que le climat, la culture, la structure du bâtiment, la typologie (par exemple, résidentiel ou un immeuble de bureaux) jouent un rôle important. Herkel et ses partenaires (Herkel et al., 2008) ont noté dans la littérature, l'identification des forces motrices guidant l'interaction entre les occupants et les fenêtres n'a pas été évaluée par des questionnaires.

Sur base des conclusions principales tirées de la littérature, Herkel et ses partenaires (Herkel et al., 2008) ont formulé et vérifié les hypothèses suivantes, par l'analyse des données enregistrées dans 21 bureaux du bâtiment du Fraunhofer Institut à Freiburg en Allemagne. « Le pourcentage de fenêtres ouvertes, les heures d'ouverture et la fréquence d'ouverture ou de fermeture des fenêtres dépendent, selon diverses études, de :

- *La saison* : en été, le pourcentage de fenêtres ouvertes est plus élevé qu'en hiver. En été, la fréquence d'ouverture ou de fermeture des fenêtres est inférieure à celle rencontrée en hiver.
- *La température extérieure* : plus la température extérieure est élevée, au plus il y a de fenêtres ouvertes. Les fenêtres sont ouvertes plus souvent dès que la température dépasse

une certaine valeur. Lorsqu'une certaine température extérieure est atteinte, plus aucune fenêtre n'est ouverte.

- *La température intérieure* : lorsque la température intérieure dépasse une certaine valeur, le pourcentage de fenêtres ouvertes augmente rapidement jusqu'à ce qu'un pourcentage de 100% soit atteint.
- *Le moment de la journée* : pendant la nuit, le pourcentage de fenêtres complètement ouvertes est proche de zéro. Le pourcentage de fenêtres inclinées ouvertes varie à peine entre le jour et la nuit.
- *La présence* : l'utilisation de fenêtres se produit principalement lorsque les occupants arrivent ou quittent leur poste de travail. Les fenêtres ouvertes sont fermées principalement à la fin d'une journée de travail. » (Herkel et al., 2008)

Sur base des résultats de l'étude menée par Herkel et ses partenaires (Herkel et al., 2008), la meilleure corrélation définissant l'ouverture des fenêtres est fonction de la température extérieure avec $r = 0,81$ pour les petites fenêtres, $r = 0,79$ pour les grandes fenêtres ouvertes et $r = 0,63$ pour les grandes fenêtres inclinées. La seconde variable définissant au mieux l'ouverture des fenêtres est la température intérieure (avec, dans le même ordre que ci-avant, $r = 0,72$ – $r = 0,76$ – $r = 0,62$).

Ils ont également observé une large influence de la saison sur le comportement des occupants en matière d'ouverture de fenêtres :

- Comme attendu, les occupants ouvrent moins souvent les fenêtres de fin octobre à fin mars. En hiver, la durée d'ouverture d'une fenêtre est courte et le pourcentage de fenêtres ouvertes est faible. La fréquence la plus élevée de modification du statut d'ouverture de fenêtres est observé au printemps et en automne, probablement parce que les conditions météorologiques changent brusquement ;
- Une diminution soudaine du pourcentage de fenêtres ouvertes apparaît en septembre/octobre et une augmentation intervient en mars/avril, indiquant que les occupants réagissent au changement climatique au printemps et en automne ;
- En été, entre 60 et 80% des « petites fenêtres » sont ouvertes, alors qu'en hiver ce pourcentage diminue jusque 10% ;
- En arrivant à une certaine température, le pourcentage mesuré de fenêtres ouvertes augmente fortement jusqu'à ce que le maximum soit atteint. Toutefois, le 100 pour cent, que l'on trouve dans les études précédentes, n'est jamais atteint, ce qui indique que certaines fenêtres sont rarement, voire jamais, ouvertes ;
- Les « grandes fenêtres inclinées » suivent le même schéma avec 40% d'entre elles qui sont ouvertes en été ;
- En été, les « grandes fenêtres » sont complètement ouvertes pendant 20% des heures d'occupation ;
- Le pourcentage de petites fenêtres ouvertes et de grandes fenêtres ouvertes inclinées varie peu entre le jour et la nuit, alors que celui de grandes fenêtres complètement ouvertes montrent de grandes différences. La nuit, aucune fenêtre n'est complètement ouverte. L'analyse du comportement de l'utilisateur au cours d'une journée montre que les fenêtres

sont ouvertes et fermées plus fréquemment le matin, à midi et le soir. L'analyse de l'arrivée et du départ de l'occupant en détail révèle que la plupart des ouvertures et fermetures de fenêtres ont lieu à son arrivée. Le départ est la deuxième période de temps durant laquelle les occupants sont les plus susceptibles de manipuler l'état de la fenêtre.

Ces changements saisonniers rapides ne sont pas liés à des variations soudaines de température extérieure. Pourtant, cette variable est significative dans la modélisation de l'ouverture des fenêtres ($p < 0,001$). Il a été observé que la diminution soudaine d'ouverture des fenêtres apparaît avec le premier jour froid, avec une température extérieure inférieure à 10 °C. Jusqu'à ce jour, la température extérieure n'était jamais descendue en dessous de 15 °C.

La relation entre la température extérieure et le pourcentage de fenêtres ouvertes a été investigué et est présenté dans la [section suivante](#). Plus d'informations sur les observations liées à l'analyse des 21 bureaux menée par Herkel et al. sont disponible dans l'article qu'ils ont publié dans *Building and Environment* (Herkel et al., 2008).

3.1.2. Modèles d'ouverture des fenêtres

3.1.2.1. Modèle adaptatif pour prédire l'ouverture des fenêtres (Rijal et al., 2007)

Rijal et ses partenaires (Rijal et al., 2007) basent leur étude sur l'ouverture des fenêtres dans des immeubles de bureaux sur des données recueillies dans des enquêtes de confort thermique menées dans 15 immeubles de bureaux au Royaume-Uni entre mars 1996 et septembre 1997 (McCartney and Nicol, 1997; Nicol and Raja, 1997; Raja et al., 1998). La première observation à noter est que la proportion de fenêtres ouvertes dans un bâtiment équipé d'un système de conditionnement d'air est inférieure à celle qu'on peut mesurer dans un immeuble ventilé naturellement. En effet, dans les bâtiments conditionnés, les fenêtres ouvrables sont limitées et leur utilisation est généralement déconseillée. C'est pourquoi les bâtiments conditionnés ne sont pas repris dans les considérations suivantes. Notez alors que Nicol (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) spécifie que les employés de bureaux ont tendance à ouvrir les fenêtres plus et plus fréquemment au Royaume-Uni que dans d'autres pays européens, pour une température donnée.

Tout d'abord, Rijal et ses partenaires (Rijal et al., 2007) ont étudié l'impact de la température intérieure ou extérieure sur le pourcentage de fenêtre ouvertes à l'aide de la fonction Logit décrite en [Annexe A.1](#). Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 3-1.

Les corrélations du Tableau 3-1 sont statistiquement très significative puisque $p < 0.001$ et la gamme des interceptions pour les différents bâtiments est faible. Ces équations, en fonction de T_g ou de T_{ao_i} pour toutes les données de ventilation longitudinale, sont présentées par les lignes continues dans la Figure 3-4. On observe alors que la proportion de fenêtres ouvertes augmente avec les augmentations des températures intérieure et extérieure. Il est alors possible de considérer la

combinaison de ces paramètres comme indicateur pour l'ouverture des fenêtres. L'utilisation d'une régression logistique multiple pour l'ouverture des fenêtres sur les deux T_g et T_{ao_i} mène à l'équation suivante, aussi bien valable pour la ventilation longitudinale que transversale (avec des valeurs de fidélité r^2 de 0,95 pour les deux types de ventilation) :

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = 0,171 T_g + 0,166 T_{ao_i} - 6,4 \quad (1)$$

Tableau 3-1 : Régression Logit pour l'ouverture des fenêtres pour une ventilation longitudinale ou transversale en fonction de la température intérieure ou de la température extérieure. (Rijal et al., 2007)

Base de données	Bâtiment	T_g (°C)	T_{ao_i} (°C)
Ventilation longitudinale	Chacun	$\text{Logit}(p) = 0,374T_g - 9,61 \sim -8,64$	$\text{Logit}(p) = 0,190T_{ao_i} - 4,34 \sim -2,61$
	Tous	$\text{Logit}(p) = 0,354T_g - 8,54$	$\text{Logit}(p) = 0,181T_{ao_i} - 2,76$
Ventilation transversale	Chacun	$\text{Logit}(p) = 0,436T_g - 11,73 \sim -10,18$	$\text{Logit}(p) = 0,160T_{ao_i} - 3,80 \sim -2,09$
	Tous	$\text{Logit}(p) = 0,425T_g - 10,68$	$\text{Logit}(p) = 0,157T_{ao_i} - 2,92$

T_g est la température de globe et T_{ao_i} est la température de l'air extérieur ; p est la probabilité que la fenêtre soit ouverte ; $\sim$: gamme des interceptions de chaque bâtiment.

Implémentation de l'algorithme d'ouverture des fenêtres dans un logiciel de simulations dynamiques :

Les équations définissant la température de confort varient selon que le bâtiment soit chauffé ou en fonctionnement « libre » parce que la température intérieure est découplée de la température extérieure lorsque le bâtiment est chauffé. Rijal et ses partenaires (Rijal et al., 2007) considèrent que, dans le cas d'un immeuble de bureau, le système de chauffe est plus susceptible d'être allumé qu'éteint lorsque la température moyenne extérieure (T_{rm}) est inférieure à 10 °C. Les équations liant la température de confort à la température moyenne extérieure sont alors les suivantes (CIBSE, 2006) :

$$\text{Pour } T_{rm} > 10 \text{ °C : } T_{conf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 \quad (\text{standard CEN}) \quad (2)$$

$$\text{Pour } T_{rm} \leq 10 \text{ °C : } T_{conf} = 0,09 T_{rm} + 22,6 \quad (3)$$

On définit l'état de l'occupant comme 'confortable' lorsque la température opérative est comprise entre la température du confort plus 2 K et la température de confort moins 2 K. L'occupant a 'chaud' si la température opérative est au-dessus de la température de confort de plus de 2 K et il a 'froid' si la température opérative est en dessous de la température de confort de plus de 2 K. Lorsque l'occupant est dans une situation 'confortable', il n'agit pas sur les fenêtres.

Les actions sur les fenêtres sont des réactions à un inconfort. Dans un cas d'inconfort, la probabilité que la fenêtre soit ouverte (p_w) est calculée à partir de la température opérative (T_{op}) et de la température extérieure (T_{out}) à l'aide la fonction Logit dérivée des données de l'enquête (eq. (1)). Dans ce cas, la température opérative calculée (T_{op}) et la température de l'air extérieur du fichier

climatique (T_{out}) sont substituées par la température de globe (T_g) et la température extérieure instantanée (T_{ao_i}) dans l'équation (1) pour donner :

$$\text{Logit}(p_w) = 0,171 T_{op} + 0,166 T_{out} - 6,4 \quad (5)$$

Pour décider si l'action d'ouvrir ou de fermer une fenêtre va se produire, la probabilité d'une fenêtre ouverte est calculée et comparée à un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 pour représenter une seule fonction binomiale de projection.

Néanmoins, si l'occupant a 'chaud' et que la fenêtre est ouverte ou s'il a 'froid' et que la fenêtre est fermée, aucun changement n'intervient.

On peut ainsi dire que l'algorithme a une zone morte de 4 K (± 2 K) autour de la température de confort, comme illustré dans la Figure 3-4 et dans le Tableau 3-2. Cette zone morte de ± 2 K est cohérente avec l'analyse de Nicol et Humphreys (CIBSE, 2006; Nicol and Humphreys, 2007) utilisant un large éventail de données du Royaume-Uni et d'Europe.

Tableau 3-2 : Illustration de la mise en œuvre de la zone morte pour l'algorithme de Humphreys. (Rijal et al., 2007)

Limite de la zone morte	Description
$T_{op} > T_{conf} + 2K$	Probabilité adaptative de fenêtre ouverte
$T_{op} > T_{conf}$	Zone morte
T_{conf}	Zone morte
$T_{op} < T_{conf}$	Zone morte
$T_{op} < T_{conf} - 2K$	Probabilité adaptative de fenêtre fermée

« Puisque les données ont été recueillies durant les périodes d'occupation, on ne sait rien au sujet de l'ouverture des fenêtres en dehors des heures de bureau. En l'absence de données, une approche possible pour la fermeture de la fenêtre durant la nuit est de permettre aux fenêtres d'être fermées selon l'algorithme. L'effet de cette approche est que, durant l'hiver, le printemps et l'automne, toutes les fenêtres ouvertes sont fermées pendant ou peu après la fin de l'occupation, tandis qu'en été, elles restent ouvertes tard dans la soirée les jours les plus chauds. Cette approche permettrait de mimer les gardes de sécurité auxquels on a demandé de fermer les fenêtres plus tard dans la période estivale. Alternativement, il peut être précisé que toutes les fenêtres seront fermées et le restent à partir d'une heure fixée (éventuellement pour coïncider avec la fin de l'occupation). » (Rijal et al., 2007)

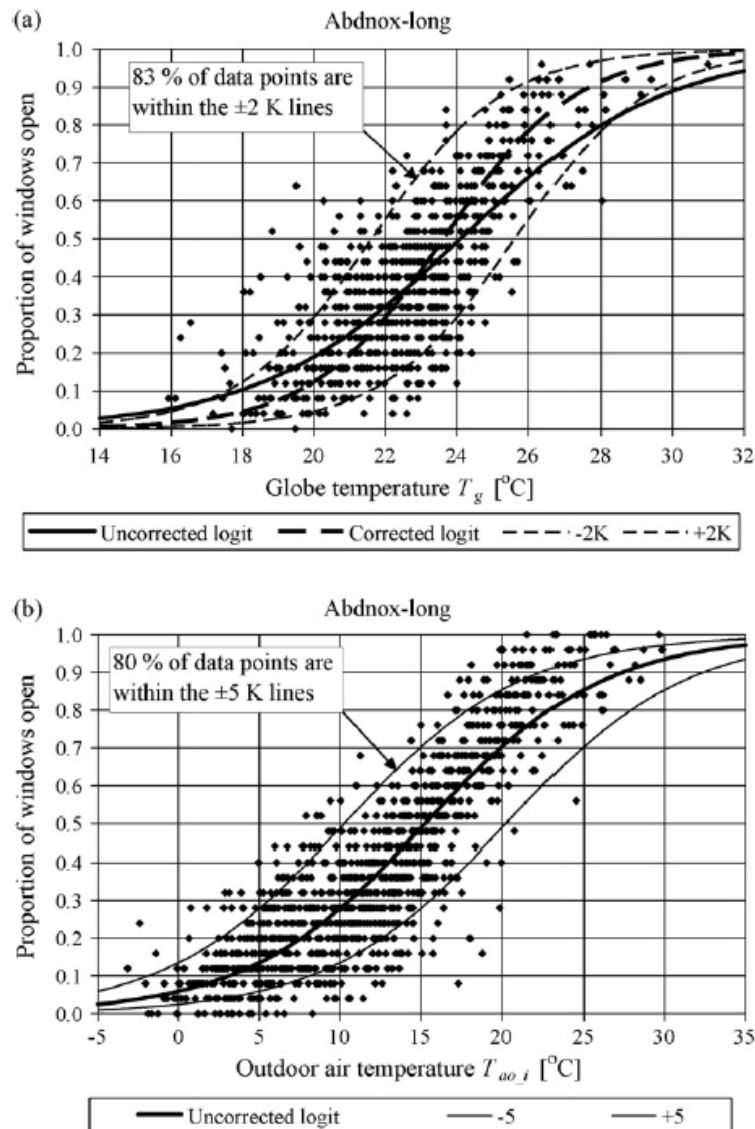


Figure 3-4 : Courbes de régression logistique de l'ouverture des fenêtres en fonction de (a) la température du globe et (b) la température de l'air extérieur, dans tous les bâtiments ventilés naturellement de l'enquête longitudinale. Trois lignes (à gauche, au centre et à droite) définissent la zone morte de l'ouverture de fenêtres. On constate que plus de 80 % des points représentant la proportion de fenêtres ouvertes se produisent dans la zone morte. (Rijal et al., 2007)

3.1.2.2. Modélisation du comportement des occupants (Herkel et al., 2008; Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004)

Dans leurs études, Nicol et Humphreys (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) utilisent trois bases de données pour faire une estimation de l'utilisation des contrôles. La première, dont les résultats sont repris ci-dessous, se base sur des études de terrain du confort subjectif menées dans des immeubles de bureaux dans cinq pays européens – Suède, Royaume-Uni, France, Portugal et Grèce (McCartney et Nicol, 2001). Elle comprend environ 4.655 sujets répartis dans 25 bâtiments, dont 11 ont été ventilés naturellement (1.649 dossiers). Les deux autres bases de données se basent sur des études au Royaume-Uni (McCartney et al. 1998) et au Pakistan (Nicol et al. 1999).

Ils (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) ont modélisé le comportement des occupants vis-à-vis de ces commandes sur base du principe adaptatif : « si un changement arrive de sorte à produire un inconfort, les personnes réagissent d'une façon qui tend à rétablir leur confort » (Humphreys and Nicol, 1998). Le modèle utilisé dans les études reprises ici est le modèle Logit (voir [Annexe A.1.](#)) avec comme variable 'x' la température extérieure ou la température intérieure (température de globe). Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 3-3.

« Les occupants des bâtiments à ventilation naturelle ouvrent leurs fenêtres pour deux raisons: pour améliorer la qualité de l'air intérieur ou pour aider à améliorer le confort en réduisant la température intérieure et favoriser la circulation de l'air. En Europe, il y a une augmentation significative de la vitesse moyenne de l'air lorsque les fenêtres sont ouvertes. La Figure 3-5 (a) montre la proportion de sujets ayant signalé avoir ouvert leurs fenêtres pour différentes températures de globe intérieur, présentant une relation modérée, mais hautement significative statistiquement, entre l'ouverture des fenêtres et la température. » (Nicol and Humphreys, 2004)

Il est à noter que dans les trois enquêtes, la proportion de fenêtres ouvertes tend à augmenter considérablement lorsque la température extérieure dépasse 10 °C ou lorsque la température intérieure atteint 22 °C. 50% des bureaux européens ont leurs fenêtres ouvertes pour une température extérieure de 22 °C et cette proportion monte à 80% lorsque cette température atteint 33 °C.

La Figure 3-5 (b) montre qu'il y a beaucoup moins de cohérence dans les changements de l'utilisation de la fenêtre en fonction de la température extérieure que de la température intérieure.

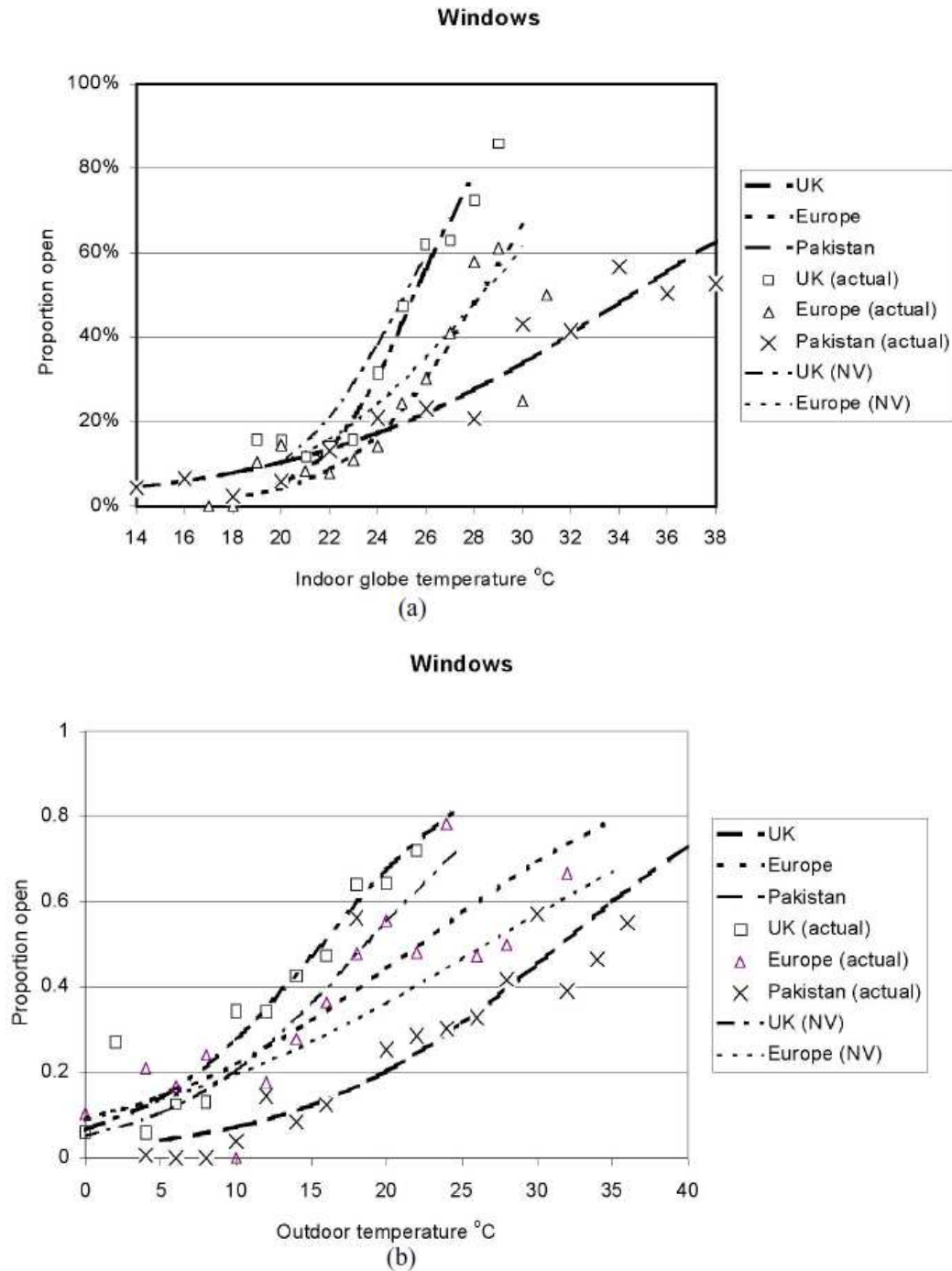


Figure 3-5 : Proportion des bureaux avec des fenêtres ouvertes (a) en fonction de la température de globe intérieure et (b) en fonction de la température extérieure. Les lignes sont les approximations Logit (Equation2) pour chaque enquête. Les Probits distincts pour seulement les bâtiments à ventilation naturelle en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée de fenêtres ouvertes est représentée par les points. (Nicol and Humphreys, 2004)

Tableau 3-3 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 (Annexe A.1.) et corrélation (r)³ pour l'utilisation de chaque commande avec la température intérieure du globe (T_g) et la température extérieure (T_o) *, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)

Commande	Base de données	Température extérieure (°C)			Température de globe (°C)		
		Interception a	Pente b	r	Interception a	Pente b	r
Ouverture des fenêtres	Europe	-2,31 $\pm$ 0,16	0,104 $\pm$ 0,010	0,27	-10,69 $\pm$ 0,52	0,379 $\pm$ 0,020	0,28

* En raison du grand nombre de cas, toutes les corrélations sont statistiquement très significatives à $p < 0,1\%$, sauf dans le cas des stores et la température extérieure dans l'enquête européenne.

Herkel et ses partenaires (Herkel et al., 2008) ont réalisé une étude de terrain dans 21 bureaux orientés au SSO à l'intérieur du bâtiment de l'Institut Fraunhofer de Fribourg, en Allemagne. Sur base des conclusions établies dans cette étude (présentées dans la section 3.1.1.), la relation entre le pourcentage de fenêtres ouvertes et les températures extérieure et intérieure a été analysée (voir Figures 3-6 et 3-7). Aussi, la Figure 3-8 présente l'évolution journalière typique du taux d'ouverture des fenêtres (sur base de moyennes mensuelles).

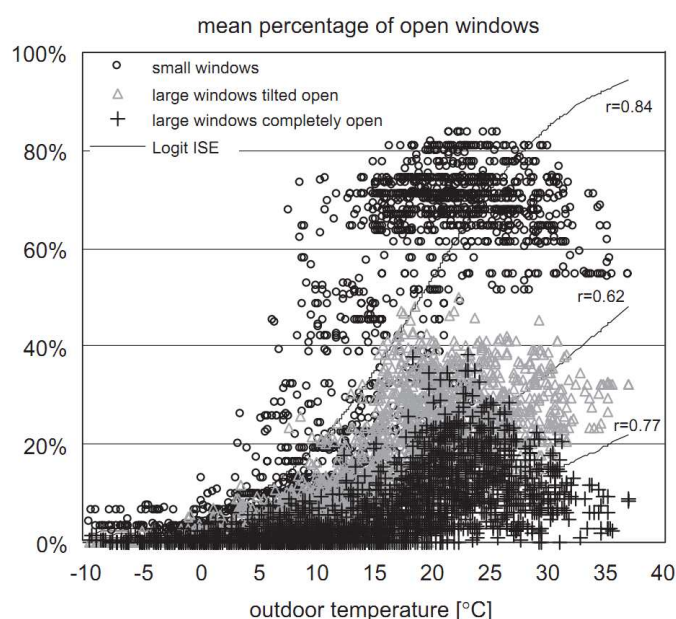


Figure 3-6 : Corrélation entre le pourcentage moyen de fenêtres ouvertes et la température extérieure sur 13 mois. Valeurs moyennes journalières évaluées durant les heures de bureau (jours de semaine de 8h à 18h). (Herkel et al., 2008)

³ La corrélation (r) est définie en Annexe A.3.

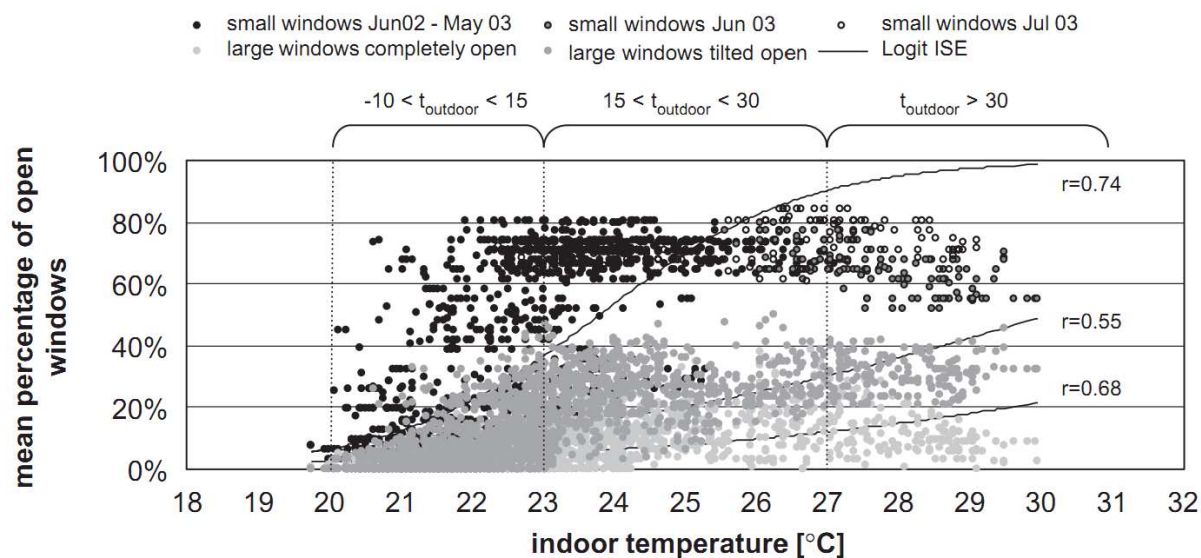


Figure 3-7 : Corrélation entre le pourcentage moyen de fenêtres ouvertes et la température intérieure sur 13 mois (juillet 2002 – juillet 2003). Valeurs moyennes journalières évaluées durant les heures de bureau (jours de semaine de 8h à 18h). (Herkel et al., 2008)

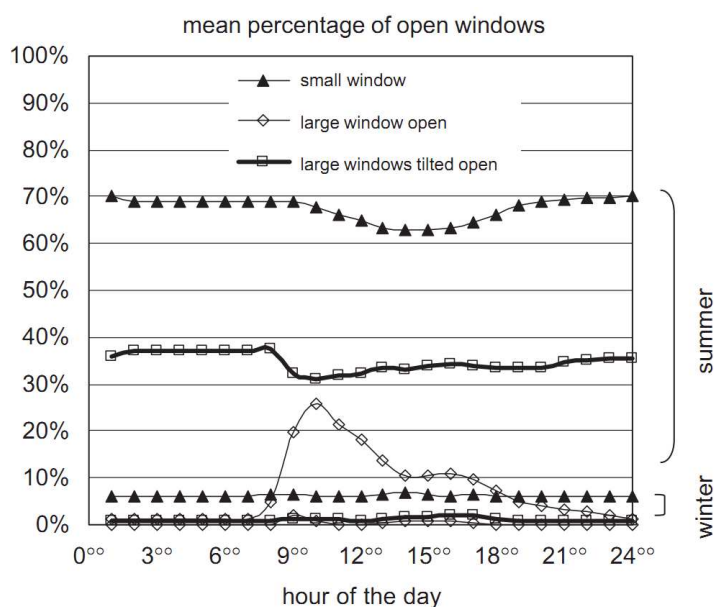


Figure 3-8 : Evolution journalière typique du taux d'ouverture des fenêtres. Valeurs moyennes mensuelle pour chaque heure d'une journée (0h – 23h). (Herkel et al., 2008)

Tableau 3-4 : Paramètres de la fonction Logit pour décrire le pourcentage moyen de fenêtres ouvertes et leur coefficient de corrélation r ⁴. (Herkel et al., 2008)

Cas	a	b	r
Nicol	- 2,31	0,34	0,27
Herkel et al. – petites fenêtres	- 2,99	0,16	0,84
Herkel et al. – grandes fenêtres inclinées	- 3,13	0,08	0,62
Herkel et al. – grandes fenêtres ouvertes	- 4,05	0,08	0,77

Herkel et ses partenaires (Herkel et al., 2008) comparent les relations Logit (voir [Annexe A.1.](#)) ainsi obtenues à celle identifiée par Nicol (Nicol, 2001) dans le Tableau 3-4, où la probabilité p de fenêtres ouvertes est calculée comme une fonction de la température extérieure.

Les relations entre le comportement des utilisateurs et la saison, les températures intérieure et extérieure, le cours de la journée et l'occupation de l'utilisateur sont analysées dans une nouvelle étude de terrain menée dans 21 bureaux. Sur la base de ces résultats, un modèle préliminaire de l'utilisateur est développé en utilisant le moment de la journée comme une entrée pour générer l'occupation à travers un processus stochastique. L'état de la fenêtre est prédit à l'aide d'un modèle stochastique en fonction de l'occupation (l'occupant arrive pour la première fois, arrivée intermédiaire, départ intermédiaire, dernier départ ou l'occupant est présent) et de la température extérieure. Pour ce faire, la probabilité d'ouverture à l'arrivée est évaluée pour chaque type de fenêtre et chaque type d'occupation en fonction de la température (exemple à la Figure 3-9).

Les schémas représentant le fonctionnement des logarithmes de décision et l'organigramme de prédiction de l'état des fenêtres sont disponibles dans leur article complet (Herkel et al., 2008).

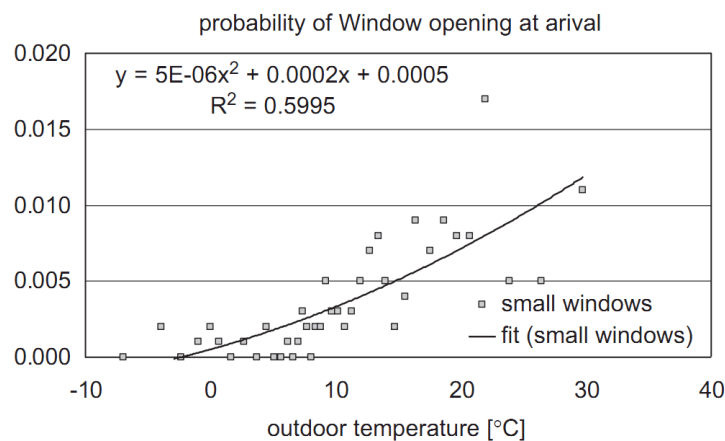


Figure 3-9 : Probabilité d'ouverture à l'arrivée pour une petite fenêtre en fonction de la température extérieure. Les points représentent la probabilité de 100 évènements. (Herkel et al., 2008)

⁴ Coefficient défini en Annexe A.3.

3.1.2.3. Modèle stochastique complet de l'utilisation de la fenêtre: la théorie et la validation (Haldi and Robinson, 2009a; Haldi and Robinson, 2009b)

Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2009a; Haldi and Robinson, 2009b) ont étudié en détail l'influence des modes d'occupation, des températures intérieure locale et extérieure ainsi que des paramètres climatiques (température, vitesse et direction du vent, humidité relative et précipitations) sur le comportement d'ouverture et de fermeture de fenêtres à l'aide de mesures prises en continu durant sept ans (du 19 décembre 2001 au 15 novembre 2008) dans 14 bureaux orientés sud du bâtiment expérimental "Solar Energy and Building Physics Laboratory" (LESO- PB), situé dans la banlieue de Lausanne, en Suisse. « Dans chaque bureau, les occupants ont la possibilité d'incliner ou d'ouvrir à n'importe quel angle chacune des deux fenêtres du local (hauteur 90 cm, largeur 70 cm). En outre, des stores extérieurs sont contrôlables à partir de chaque bureau. Six bureaux sont occupés par deux personnes, qui peuvent accéder individuellement à leur propre fenêtre, tandis que huit bureaux accueillent des personnes seules capables d'agir sur les deux fenêtres. Les 14 bureaux sont orientés au sud. » (Haldi and Robinson, 2009b)

Les articles repris ici présentent le développement et l'évaluation de plusieurs approches de modélisation, y compris les distributions de probabilité logistique ([Annexe A.1.](#)), les chaînes de Markov ([Annexe B](#)) et des processus aléatoires en temps continu ([Annexe C](#)).

Le logiciel statistique R (R-Development-Core-Team, 2007) a été utilisé pour l'analyse de toutes les données et pour la programmation des modèles.

Observations

Comme observé dans des études antérieures (Herkel et al., 2008; Warren and Parkins, 1984; Yun and Steemers, 2008), les actions sur les fenêtres interviennent généralement lorsque l'occupant arrive ou quitte son bureau.

Aussi, la Figure 3-10 (a) présente la proportion de fenêtres ouvertes en fonction de la température intérieure. On y observe que la proportion de fenêtres ouvertes augmente considérablement pour une température intérieure (T_{in}) comprise entre 20 °C à 28 °C et diminue nettement pour des températures supérieures⁵. Un phénomène similaire se produit avec la température extérieure (T_{out}), comme illustré à la Figure 3-10 (b). En effet, la proportion maximum de fenêtres ouvertes est atteinte aux environs de 26 °C et on observe une claire diminution du nombre de fenêtres ouvertes pour une température plus élevée. Les actions sur les fenêtres sont donc liées aux températures intérieure et extérieure, comme indiqué dans les études antérieures. Néanmoins, Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2009a) notent également une diminution, certes moins forte, de la proportion de fenêtres ouvertes lorsque l'humidité extérieure augmente (Figure 3-10 (c)).

⁵ Une proportion plus élevée de fenêtres ouvertes à basse T_{in} est perceptible sur la Figure 3-10 (a). Ceci est provoqué par une fenêtre laissée ouverte pendant que T_{out} est faible. Les intervalles de confiance de 95% sont grands en raison du très faible nombre d'observations dans les marges appropriées.

Les Figures 3-10 (d), (e) et (f) présentent la proportion de fenêtres ouvertes en fonction, respectivement, des précipitations, de la vitesse et de la direction du vent. On observe ainsi que les précipitations et la direction du vent n'ont pas d'influence claire sur la proportion de fenêtres ouvertes. Par contre, la proportion de fenêtres diminue pour une vitesse de vent (v_{wind}) supérieure à 2 m/s.

Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2009a) ont également observé que malgré des conditions climatiques assez similaires entre les bureaux étudiés, certains occupants utilisent leurs fenêtres plus souvent que d'autres. Il y a donc une certaine variabilité entre les occupants.

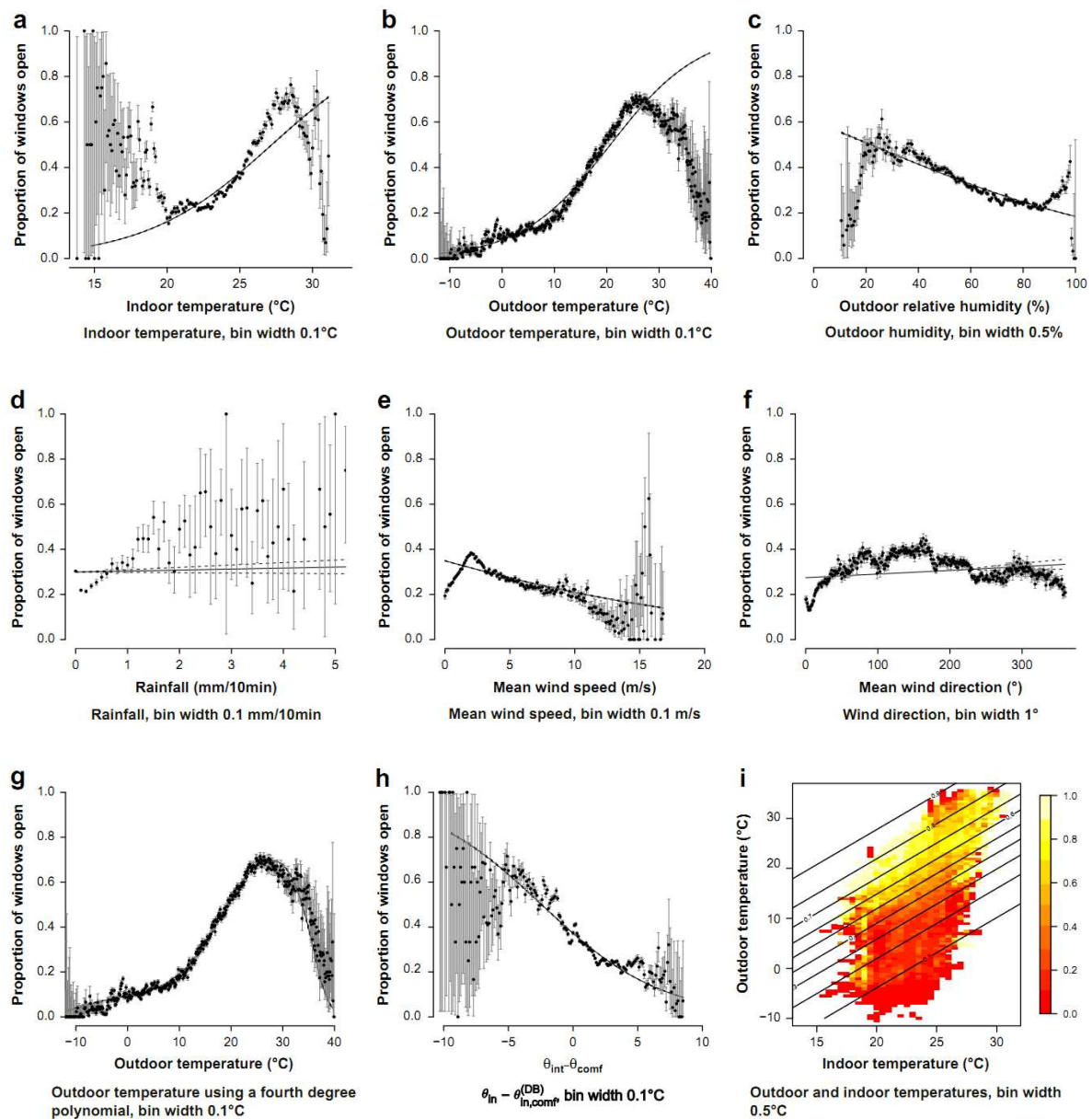


Figure 3-10 : Proportion observée de fenêtres ouvertes en fonction de différents paramètres physiques mesurés: (a) - (h) avec les courbes de régression logistique, (i) avec les lignes de contour de mêmes niveaux de probabilités ajustés. (Haldi and Robinson, 2009a)

Par conséquent, Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2009a) ont proposé un modèle de prédiction d'action sur les fenêtres qui intègre différents types de comportement en fonction de l'occupation (à l'arrivée, au moment du départ et pendant la présence de l'occupant). Pour ce faire, l'occupation elle-même doit être modélisée explicitement. Ensuite, les variables motrices principales considérées sont les températures intérieure et extérieure. Finalement, plusieurs modèles peuvent être proposés afin de représenter les différents types de comportement des occupants, à savoir plutôt 'passifs' ou 'actifs' selon les définitions proposées par Reinhart (Reinhart, 2004) et Rijal et ses partenaires (Rijal et al., 2007).

Modèles basés sur une distribution de probabilité Logit (voir [Annexe A.1](#))

Dans cette section, on considère une distribution Logit multiple avec la suivante :

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = a + b_{in}T_{in} + b_{out}T_{out} + b_{\varphi}\varphi_{out} + b_Rf_R + b_{WS}f_{WS} + b_{WD}f_{WD} \quad (1)$$

où a et b_i sont les paramètres de régression et f_R , f_{WS} et f_{WD} sont des variables nominales (basées sur une discrétisation brute) pour, respectivement, les précipitation, les niveaux de vitesse du vent et les secteurs de direction du vent.

Haldi et Robinson ont commencé par évaluer des régressions logistiques distinctes utilisant chacune des variables indépendantes disponibles. Les courbes de régression sont présentées sur la Figure 3-10 (a) - (f) et le paramètre de régression sont présentés dans le Tableau 3-5. Ils en concluent que chaque paramètre testé est significatif mais que la température extérieure (T_{out}) a la plus grande vraisemblance statistique et offre le meilleur ajustement.

En considérant plusieurs variables, Haldi et Robinson ont constaté que le modèle avec T_{out} et T_{in} ($a = 1,459 \pm 0,032$, $b_{out} = 0,14477 \pm 0,00033$, $b_{in} = -0,1814 \pm 0,0015$) a la pertinence statistique la plus élevée et les meilleurs paramètres de qualité de l'ajustement. La Figure 3-10 (i) présente les proportions observées de fenêtres ouvertes en fonction de T_{out} et T_{in} . Haldi et Robinson ont également évalué la pertinence de l'ajout d'une troisième variable et ils ont observé que l'exactitude prédictive ajoutée est marginale. D'autres paramètres dans des modèles avec quatre ou cinq variables ont également été trouvés statistiquement significatifs mais sans augmentation des indicateurs de qualité d'ajustement. Par souci de parcimonie, il est donc judicieux de conserver le modèle avec juste les deux variables T_{out} et T_{in} .

Ils ont également constaté qu'une régression linéaire ne permet pas de prédire correctement la proportion de fenêtres ouvertes. Des régressions polynomiales de degré q ont alors été évaluées selon l'équation (2) et sont présentées à la Figure 3-10 (g).

$$\text{logit}(p) = a + b_1T_{out} + b_2T_{out}^2 + \dots + b_qT_{out}^q \quad (2)$$

Une régression logistique est utilisée afin de déterminer l'ordre le plus significatif des variables. Il ressort de cette évaluation qu'un polynôme du quatrième degré est approprié, avec des paramètres de régression $a = -2,275 \pm 0,008$, $b_1 = (5,45 \pm 0,23) \cdot 10^{-2}$, $b_2 = (-0,70 \pm 3,24) \cdot 10^{-4}$, $b_3 = (3,86 \pm 0,17) \cdot 10^{-4}$, $b_4 = (-1,112 \pm 0,029) \cdot 10^{-5}$ (avec $R^2 = 0,262$). La Figure 3-10 (g) présente la confrontation entre la distribution de probabilité obtenue avec ce polynôme et les proportions observées. Par ailleurs, les

régressions avec des polynômes de degré supérieur n'offrent pas de nettes améliorations par rapport au modèle Logit linéaire. Bien que les indicateurs de qualité d'ajustement ne sont pas beaucoup améliorés (Tableau 3-5), c'est le meilleur modèle en utilisant un seul indicateur.

Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2009a) proposent également des modèles basés sur l'écart entre T_{in} ou T_{out} et une température de confort $T_{in,conf}$ comme variable d'entraînement. Ils posent ainsi $T_{in,conf}^{(DB)} = 17,8 + 0,31 T_{out,mm}$, où $T_{out,mm}$ est la moyenne mensuelle de la température extérieure. Ils composent une régression logistique avec $(T - T_{in,conf}^{(DB)})$ comme variable d'entraînement, en alternance avec $T = T_{in}$ et $T = T_{out}$. Les résultats correspondants sont présentés dans la Figure 3-10 (h) et le Tableau 3-5 (en bas).

Dans ce cas, le coefficient d'ajustement obtenu est légèrement moins bon que précédemment, c'est-à-dire que la qualité de l'ajustement est un peu plus faible que lors de l'utilisation des variables thermiques premières. Il est cependant intéressant de noter que la proportion de fenêtres ouvertes atteint un maximum près de $T_{out} = (T - T_{in,conf}^{(DB)})$. Cette procédure a été répétée avec l'équation donnée par la norme CEN, en produisant des résultats similaires.

Tableau 3-5 : Paramètres de régression des modèles Logit n'intégrant qu'une variable ainsi que les coefficients de corrélation associés (voir Annexe A.3.). (Haldi and Robinson, 2009a)

Paramètres	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
T_{out}	$2,472 \pm 0,0045$	$0,1212 \pm 0,00027$	0,247
T_{in}	$-6,22 \pm 0,026$	$0,230 \pm 0,0011$	0,046
φ_{out}	$0,381 \pm 0,0083$	$-0,0180 \pm 0,00012$	0,022
v_{wind}	$-0,582 \pm 0,0031$	$-0,0754 \pm 0,00081$	0,009
α_{wind} (direction du vent)	$-0,990 \pm 0,0034$	$0,00104 \pm 0,000018$	0,004
D_{prec}	$-0,828 \pm 0,0019$	$0,15 \pm 0,014$	0,000
$T_{out} - T_{conf}^{(DB)}$	$0,266 \pm 0,0031$	$0,1310 \pm 0,00031$	0,226
$T_{in} - T_{conf}^{(DB)}$	$-0,522 \pm 0,0025$	$-0,215 \pm 0,0011$	0,043
$T_{out} - T_{conf}^{(CEN)}$	$0,475 \pm 0,0035$	$0,1320 \pm 0,00031$	0,228
$T_{in} - T_{conf}^{(CEN)}$	$-0,861 \pm 0,0020$	$-0,251 \pm 0,0012$	0,046

Modèle basé sur un processus de Markov à temps discret (voir [Annexe B](#))

Ces modèles ne décrivent pas une probabilité d'action (ouverture ou fermeture d'une fenêtre) mais une probabilité d'état (fenêtre ouverte ou fermée) en fonction de paramètres physiques donnés. En outre, ils ignorent les motifs particuliers causés par des événements d'occupation, comme les arrivées ou les départs des occupants.

Sur base de l'observation de l'influence de l'occupation sur les actions, Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2009a) déduisent différentes probabilités de transition P_{ij} , soit trois sous-modèles différents pour des actions à l'arrivée, au départ et pendant l'occupation, comme proposé dans (Herkel et al., 2008; Yun and Steemers, 2008) :

L'ouverture à l'arrivée est prévue par une probabilité spécifique $P_{01,arr}$, et la fermeture à l'arrivée par $P_{10,arr}$. Les actions après l'arrivée sont prévues par un autre sous-modèle lancé à des intervalles de temps réguliers, avec des probabilités de transition $P_{01,int}$ si la fenêtre est fermée à ce moment et $P_{10,int}$ si elle est ouverte. Lorsque l'occupant quitte son bureau, un troisième sous-modèle prévoit les actions au moment du départ, avec des probabilités de transition $P_{01,dep}$ et $P_{10,dep}$. Dans chaque cas, P_{00} et P_{11} sont facilement déduites par : $P_{00} = 1 - P_{01}$ et $P_{11} = 1 - P_{10}$.

Ces probabilités sont basées sur des régressions logistiques selon l'équation (3) dont les paramètres sont présentés dans le Tableau 3-6 et la Figure 3-11 (a)-(d).

$$\text{logit}(p) = a + b_{in}T_{in} + b_{out}T_{out} + b_{dm}T_{out,dm} + b_Rf_R + b_{WS}f_{WS} + b_{WD}f_{WD} + b_{GF}f_{GF} + b_{pres}T_{pres} + b_{abs,prev}f_{abs,prev} + b_{abs,next}f_{abs,next} \quad (3)$$

où T_{pres} est la durée de présence continue, $f_{abs,prev}$, $f_{abs,next}$ et f_{GF} sont des variables binaires égales à 1 respectivement pour précéder ou suivre les absences de plus de 8h et pour les bureaux non au rez-de-chaussée, et b_{pres} , $b_{abs,prev}$, $b_{abs,next}$, b_{GF} sont les paramètres de régression associés.

Tableau 3-6 : Paramètres de régression pour les probabilités finales de transition de Markov. (Haldi and Robinson, 2009a)

Type	Paramètre	Probabilité d'ouverture		Probabilité de fermeture	
		Estimation	χ^2	Estimation	χ^2
Arrivée	a	-13,70 ± 0,40		3,95 ± 0,39	
	b_{in}	0,308 ± 0,017	312,21	-0,286 ± 0,018	247,24
	b_{out}	0,0395 ± 0,0036	117,95	-0,0500 ± 0,0049	105,55
	$b_{abs,prev}$	1,826 ± 0,048	1428,6		
	b_R	-0,43 ± 0,12	12,86		
Intermédiaire	a	-11,78 ± 0,30		-4,14 ± 0,24	
	b_{in}	0,263 ± 0,014	377,75	0,026 ± 0,011	5,48
	b_{out}	0,0394 ± 0,0036	95,01	-0,0625 ± 0,0024	668,27
	b_{pres}	(-9,00 ± 0,57).10 ⁻⁴	245,81		
	b_R	-0,336 ± 0,088	14,65		
Départ	a	-8,72 ± 0,23		-8,68 ± 0,25	
	b_{in}			0,222 ± 0,024	86,04
	$b_{out,dm}$	0,1352 ± 0,0078	301,31	-0,0936 ± 0,0067	197,60
	$b_{abs,next}$	0,85 ± 0,12	46,51	1,534 ± 0,077	399,79
	b_{GF}	0,82 ± 0,14	33,47	-0,845 ± 0,074	131,79

La Figure 3-11 met en évidence que la température intérieure (T_{in}) est le stimulus principal pour l'ouverture des fenêtres alors que la température extérieure (T_{out}) détermine la probabilité de fermeture.

Les sous-modèles proposés ne présentent pas la même qualité d'ajustement (voir Tableau 3-6). Le pouvoir prédictif le plus élevé est obtenu pour $P_{01,arr}$, suivi par les sous-modèles pour des actions au moment du départ et $P_{10,arr}$, et la plus faible performance des actions durant la présence, avec $P_{10,int}$ étant le sous-modèle le moins satisfaisant. Ces valeurs sont liées à la relativement faible quantité de données relatives aux interactions pendant l'occupation.

Notez que dans le Tableau 3-6, les probabilités de transitions sont très proches de zéro. Le processus aléatoire en temps continu (décrit ci-après) semble plus approprié pour les actions intermédiaires.

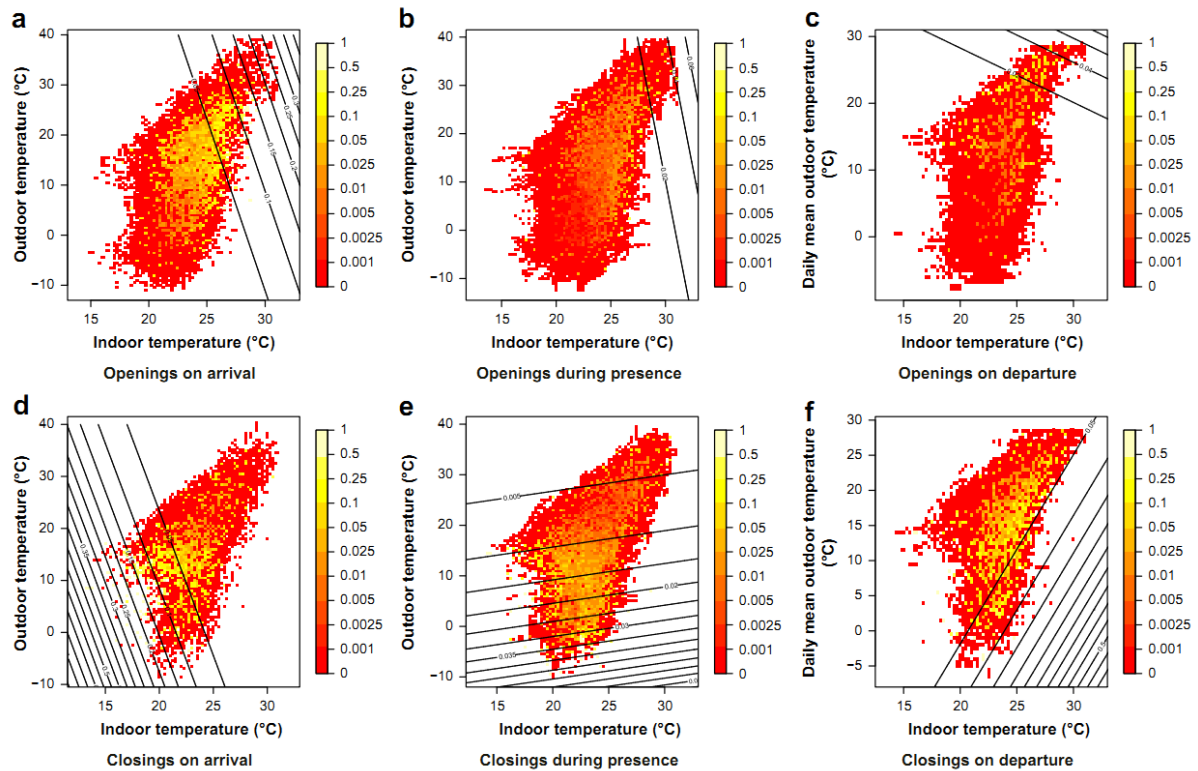


Figure 3-11 : Probabilités de transition observées (données sur une échelle quasi-logarithmique), en fonction des températures intérieures et extérieures, avec des lignes de contour de mêmes probabilités. (Haldi and Robinson, 2009a)

Processus aléatoire en temps continu (voir [Annexe C](#))

Dans ce cas, la valeur modélisée est la durée des processus plutôt que les transitions en elles-mêmes. Par conséquent, c'est la distribution de la durée pendant laquelle les gens laissent leur fenêtre fermée après leur arrivée et pendant laquelle la fenêtre est ouverte qui est étudiée. Les courbes de survie évaluées par Kaplan-Meier sont présentées à la Figure 3-12 (a) et (b), dans laquelle chaque courbe se réfère à un intervalle de valeurs initiales observées de T_{in} ou T_{out} . Les taux de décroissance sont plus clairement différenciés par des gammes de température extérieure (T_{out}), ce qui signifie que les durées d'ouverture sont plus fortement associées à cette variable.

Notez par ailleurs que la durée d'ouverture des fenêtres qui ont été fermées au moment du départ de l'occupant nécessite un traitement spécial. Dans ce cas, la raison de la fermeture des fenêtres (ou de les laisser ouvertes) n'est pas liée à l'inconfort. Par conséquent, on ne sait pas si l'occupant aurait fermé la fenêtre s'il était resté plus longtemps. Ces durées d'ouverture n'ont par conséquent pas été prises en compte par Haldi et Robinson dans la création de leurs modèles.

Le fait que les courbes de survie présentées à la Figure 3-12 soit décroissantes signifie que les fenêtres ont plus de chance d'être fermées peu de temps après leur ouverture. Aussi, Haldi et Robinson ont observé que la température extérieure (T_{out}) est la meilleure variable d'entraînement (p

$< 0,001$, $R^2 = 0,102$) pour la probabilité de fermeture des fenêtres pendant l'occupation ($P_{10,int}$). L'explication de ce résultat est que le changement dans la sensation thermique est directement influencé par le flux d'air à T_{out} . La température intérieure, ainsi que les autres variables, n'est pas statistiquement significative ($p < 0,1$). La fonction décrivant le risque ($h(t)$), soit la probabilité que la durée d'ouverture prennent fin est décrite par :

$$h(t) = \lambda \alpha (\lambda t)^{\alpha-1} \quad (4)$$

où le paramètre α est appelé la forme et λ l'échelle, offre plus de flexibilité.

Dans le cas de la durée d'ouverture intermédiaire, l'estimation de la forme est $\log(1/\alpha) = 0,871 \pm 0,0115$, tandis que l'échelle est $\lambda = 1/\exp((2,123 \pm 0,071) + (0,1727 \pm 0,0049).T_{out})$.

Les données de durée de fermeture comprennent deux types d'intervalles : délai jusqu'à l'ouverture après l'arrivée des occupants, et délai jusqu'à l'ouverture suite à une fermeture. La variable principale pour la durée de fermeture (voir Figure 3-12 (d) et (e)) est T_{in} , suivie par T_{out} .

La durée de fermeture est décrite à l'aide de fois la distribution de Weibull. La variable principale est T_{in} mais l'ajout de T_{out} est significatif ($p < 0,001$, $R^2 = 0,033$).

Sur la base de l'équation (4) et de 183.949 intervalles de temps avec les fenêtres fermées, le modèle prend la forme : $\log(1/\alpha) = 0,866 \pm 0,00635$, avec l'échelle $\lambda = 1/\exp((15,789 \pm 0,28596) + (-0,249 \pm 0,01279).T_{in} + (-0,105 \pm 0,00312).T_{out})$; et avec $R^2 = 0,033$. La fonction de survie ajustée avec T_{in} comme variable d'entraînement est illustrée à la Figure 3-12 (f).

Remarque :

« La principale limitation dans la modélisation des actions avec des courbes de survie est le risque évident de prédire à l'avance des potentielles longues périodes d'ouverture, indépendamment des variations ultérieures des stimuli environnementaux. » (Haldi and Robinson, 2009a)

VALIDATION : Méthodologie et résultats

Haldi et Richardson ont réalisé une évaluation des capacités prédictives des trois modèles d'interaction des occupants avec les fenêtres présentés ci-avant (Logit, Markov et analyse de survie) ainsi que celle d'un modèle hybride (modification du processus de Markov à temps discret complété par la distribution de Weibull pour les durées d'ouverture) sur base de quatre indicateurs : (1) la reproduction correcte de la liste des états de fenêtre observés, (2) la prédiction conforme de la proportion globale de fenêtres ouvertes tout au long de la période de simulation, (3) la prédiction conforme des délais entre les actions et (4) le nombre total fenêtres prédites comme étant ouvertes. Les valeurs de ces quatre indicateurs sont reprises dans le Tableau 3-7. D'avantages de modèles sont validés de la sorte dans l'article d'Haldi et Richardson (Haldi and Robinson, 2009a).

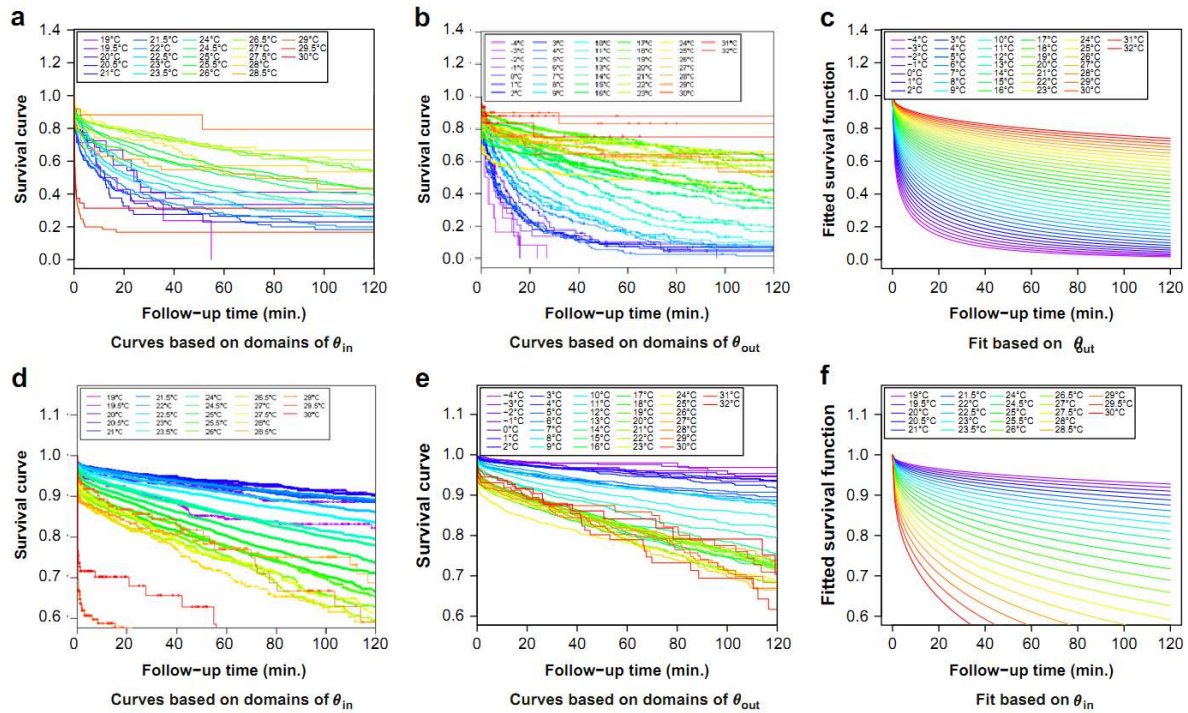


Figure 3-12 : Estimations des fonctions de survies établies par Kaplan-Meier pour les durées d'ouverture (au-dessus) et de fermeture (en bas), où les points représentent des données censurées. (Haldi and Robinson, 2009a; Haldi and Robinson, 2009b)

Tableau 3-7 : Paramètres de validation : taux de vrais positifs (TPR), taux de faux positifs (FPR), précision (PREC), proportion totale de pas de temps simulés avec la fenêtre ouverte (PROP), la durée médiane (min.) des ouvertures et des fermetures (DUR-O et DUR-F). (Haldi and Robinson, 2009a; Haldi and Robinson, 2009b)

Modèle	TPR	FPR	PREC	PROP	DUR_O	DUR_F
Exact	100 %	0 %	100 %	30,2 %	110	1290
Logit (avec T_{in} et T_{out})	43,0 %	25,0 %	65,1 %	30,4 %	5	10
Markov	30,6 %	17,9 %	66,4 %	21,8 %	710	2895
Weibull	33,4 %	22,1 %	64,2 %	25,5 %	5	5
Hybride	31,4 %	12,4 %	70,3 %	18,1 %	250	2975
Aléatoire	30,2 %	30,2 %	58,6 %	30,2 %	5	10

3.1.3. Bureaux ventilés naturellement en période estivale

3.1.3.1. Adaptation du modèle adaptatif par Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008)

Les paramètres utilisés par Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008) sont définis en [Annexe A.1](#). Il s'agit de la fonction Logit. Les résultats des valeurs de a et b , ainsi que des caractéristiques associées à la fonction logit (voir [Annexe A.2](#)), sont présentés dans le Tableau 3-8 ci-après. Ils ont été établis à partir d'une enquête menée dans huit immeubles de bureaux en Suisse durant l'été 2006.

Tableau 3-8 : Résultats de la régression et les tests statistiques pour unique fonction de la température intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)

Contrôle	Nombre d'occurrences et de participants	Stimulus thermique	a	b	θ_{50}	G-statistique	Déviations résiduelle	BIC	R^2
Fenêtres	40	Intérieur	-5,64±0,38	0,220±0,015	25,6	238,1	5209,9	5227,3	0,08
	3931	Extérieur	-1,12±0,15	0,049±0,006	22,9	57,4	5390,5	5407,9	0,02

D'après les valeurs des caractéristiques associées à la fonction Logit présentées dans le Tableau 3-8, il apparaît que la température intérieure permet de mieux caractériser l'ouverture des fenêtres ($G = 238,1$) que la température extérieure ($G = 57,4$, $R^2 = 0,02$), ce qui est en contradiction avec (Nicol, 2001). Cependant, la température extérieure influe sur les actions d'ouverture et de fermeture des fenêtres dans le but d'éviter les courants d'air, les gains de chaleur excédentaires ou pour favoriser le refroidissement naturel. Néanmoins, l'étude se basant sur des données recueillies en période estivale, elle ne permet pas de déterminer l'impact de la température extérieure sur la décision d'action sur les fenêtres pour ces motifs particuliers ou dans le cas d'une faible température extérieure.

Finalement, il apparaît que les actions sur les fenêtres sont largement utilisées par les occupants pour des températures intérieures modérées (assez faible valeur θ_{50}). Toutefois, s'il existe une influence clairement significative de la température intérieure sur les actions sur les fenêtres, en accord avec les travaux publiés précédemment (Yun and Steemers, 2008), la pente est assez faible ($b = 0,220$), tout comme le R^2 , ce qui suggère que d'autres paramètres doivent être pris en compte (voir Figure 3-13).

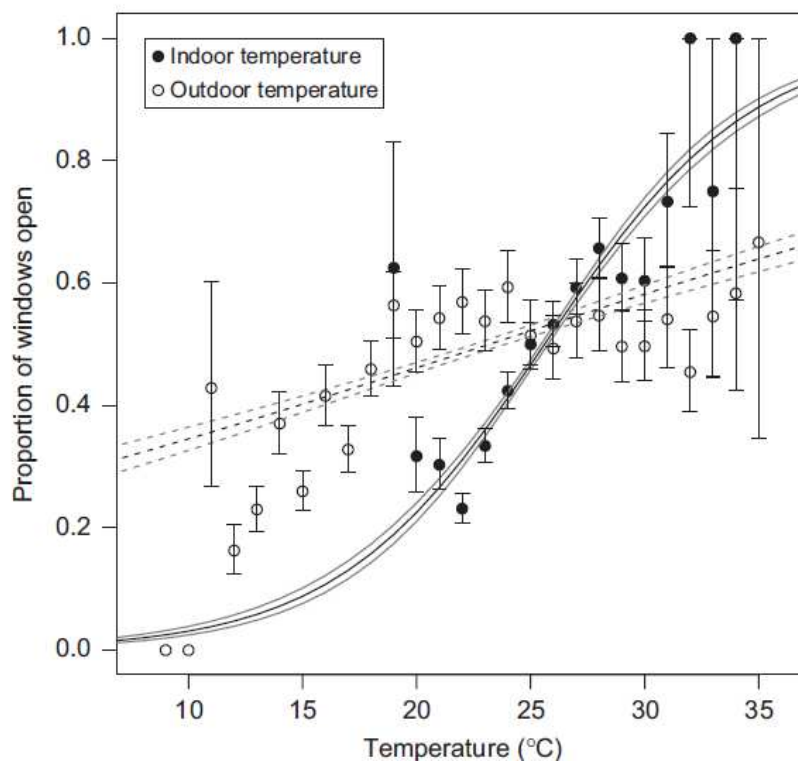


Figure 3-13 : Probabilité d'ouverture des fenêtres comme fonction des températures intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)

Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008) ont alors appliqué une régression logistique multiple sur leurs données, considérant conjointement les températures intérieure et extérieure comme stimulus. Les résultats de l'analyse de cette régression logistique multiple sont présentés dans leur article de 2008 (Haldi and Robinson, 2008). Ils notent que, dans le cas d'une période estivale, une régression logistique multiple n'offre pas d'amélioration (pas de différence significative de R^2) mais peut, au contraire, mener à des tendances erronées si on considère les températures intérieure et extérieure simultanément comme variables motrice.

3.1.3.2. Modélisation du contrôle des fenêtres en été dans des immeubles de bureaux (Yun and Steemers, 2008)

Cette étude porte sur une enquête menée dans deux immeubles de bureaux ventilés naturellement situés à Cambridge, au Royaume uni, entre le 13 juin et le 15 septembre 2006. Six bureaux ont été monitorés dont un avec ventilation nocturne et un occupé par deux personnes (les autres sont des bureaux privés). Notez alors que Nicol (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) spécifie que, pour une même température, les employés de bureau ouvrent moins fréquemment les fenêtres dans les pays européens continentaux qu'au Royaume-Uni.

Observations

Du fait que la température extérieure soit une variable indépendante, contrairement à la température intérieure qui est une variable dépendante et relativement difficile à obtenir (Nicol, 2001; Warren and Parkins, 1984), elle est souvent utilisée pour expliquer l'interaction des occupants avec le contrôle des fenêtres (Fritsch et al., 1990; Herkel et al., 2005; Nicol, 2001; Warren and Parkins, 1984). Par ailleurs, il n'y a pas de relation statistiquement significative entre les températures intérieures et la position des fenêtres en hiver (Fritsch et al., 1990) puisque la température intérieure est relativement invariable durant la saison de chauffage.

Néanmoins, la Figure 3-14, représentant les proportions du nombre d'heures pendant lesquelles une certaine température est dépassée entre 08h30 et 18h30 pour la période de surveillance, suggère que la température intérieure peut permettre de modéliser les actions d'ouverture et fermeture des fenêtres par les occupants en été.

Par ailleurs, les modèles expliquant le comportement des occupants par la température extérieure aboutissent à la prédiction de comportements identiques pour des stimuli thermiques intérieurs différents. En effet, la température intérieure varie en fonction de divers facteurs tels que l'orientation, la conception de l'enveloppe, la masse thermique de la structure du bâtiment, les gains de chaleur internes, etc., en plus des conditions climatiques extérieures. Il semble donc plus raisonnable de lier la température intérieure avec des comportements d'ouverture des fenêtres en été.

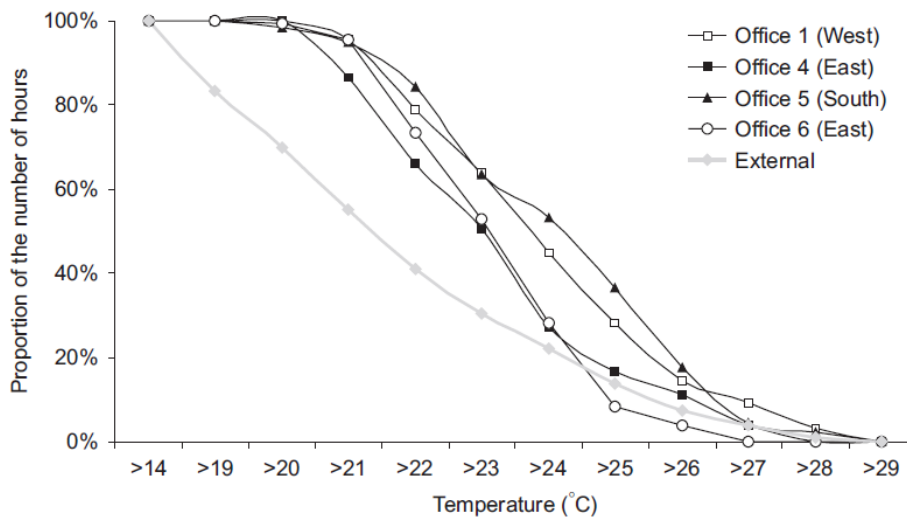


Figure 3-14 : Comparaison du nombre d'heures où les températures intérieures et extérieure dépassent une certaine valeur. (Yun and Steemers, 2008)

Bureaux sans ventilation nocturne

Dans le cas de bâtiments où les fenêtres sont fermées en fin de journée pour des mesures de sécurité, on observe que les changements d'état des fenêtres se produisent principalement aux moments de l'arrivée ou du départ des occupants du bureau. En effet, l'état de la fenêtre reste presque inchangé durant l'occupation.

Bureaux avec ventilation nocturne

Dans le cas de bureaux autorisant la ventilation nocturne, la majorité des actions sur les fenêtres interviennent au début de la journée de travail. On note aussi une plus grande probabilité d'intervention sur les fenêtres lorsqu'elles sont fermées au moment de l'arrivée des occupants que lorsqu'elles étaient restées ouvertes. Comme dans le cas précédent, on observe peu d'actions sur les fenêtres au cours de la période intermittente. Finalement, peu d'actions sur les fenêtres ont été enregistrées au moment du départ. L'occupant laisse généralement les fenêtres légèrement ouvertes avant son départ du bureau.

Modèle comportemental dépendant du temps

Puisque les comportements des occupants sont dépendants du temps, Yun et Steemers (Yun and Steemers, 2008) ont divisé une journée occupée en trois périodes pour analyser la relation entre le stimulus intérieur et les contrôles d'ouverture des fenêtres: l'arrivée, les heures intermittentes et le départ.

Leurs modèles de probabilité pour l'ouverture des fenêtres dans des bureaux avec et sans ventilation nocturne sont dérivés de la relation probit (présentée en [Annexe A.1.](#)) et d'une analyse linéaire ordinaire des données de monitoring, soit de la fonction logit.

« Il ressort clairement de l'analyse des résultats de monitoring que l'état précédent d'une fenêtre a un effet significatif sur l'état suivant de la fenêtre. Par conséquent, les fonctions de probabilité de changement d'état d'une fenêtre de fermé à ouvert ou d'ouvert à fermé pour les différentes périodes d'occupation ont été proposées. Cela permet de prédire l'état de la fenêtre par rapport son état précédent.

Les modèles de probabilité dépendants du temps considérés sont résumés dans le Tableau 3-9. Pour les bureaux sans ventilation nocturne, on a observé que la probabilité de fermeture d'une fenêtre à la fin de la période d'occupation est de 100 %. » (Yun and Steemers, 2008)

Tableau 3-9 : Description des modèles de probabilité dérivés de l'analyse de l'enquête. (Yun and Steemers, 2008)

	Abréviations	Moment de la journée	État de la fenêtre		Comparaison
			Précédent	Actuel	
Bureaux sans ventilation nocturne	$P_{F-O(Arr)}$	Arrivée	Fermé	Ouvert	$P_{F-F(Arr)} = 1 - P_{F-O(Arr)}$
	$P_{F-O(Int)}$	Intermittence	Fermé	Ouvert	$P_{F-F(Int)} = 1 - P_{F-O(Int)}$
	$P_{O-F(Int)}$	Intermittence	Ouvert	Fermé	$P_{O-O(Int)} = 1 - P_{O-F(Int)}$
Bureaux avec ventilation nocturne	$P_{F-O(Arr)}$	Arrivée	Fermé	Ouvert	$P_{F-F(Arr)} = 1 - P_{F-O(Arr)}$
	$P_{O-O(Int)}$	Intermittence	Ouvert	Ouvert	$P_{O-O(Int)} = 1 - P_{O-F(Int)}$
	$P_{O-F(Dep)}$	Départ	Ouvert	Fermé	$P_{O-F(Int)} = 1 - P_{O-O(Int)}$

Bureaux sans ventilation nocturne

Yun et Steemers (Yun and Steemers, 2008) ont étudié les températures intérieures et extérieure comme facteur déterminant pour les activités de contrôle des fenêtres par les occupants. Les modèles de régression à l'arrivée et au cours de la période intermittente et une partie de leurs évaluations sont donnés dans le Tableau 3-10. L'analyse probit pour l'arrivée des occupants révèle que le modèle de régression basé uniquement sur la température intérieure est statistiquement significatif et a une capacité prédictive. A contrario, les modes de contrôle de la fenêtre à l'arrivée des occupants ne sont pas liés à la température extérieure. Pendant les heures intermittentes, on observe également une relation étroite et statistiquement significative entre les modes de contrôle de la fenêtre et la température intérieure. Par ailleurs, il y a peu de corrélation entre les modes de contrôle de la fenêtre et la température extérieure. Après avoir identifié ce fait, les modèles de régression basés uniquement sur la température intérieure sont donnés dans les Tableaux 3-11 et 3-12.

Bureaux avec ventilation nocturne

Yun et Steemers (Yun and Steemers, 2008) ont observé que dans les cas de la période intermittente et de la fin d'une période d'occupation, une fois que la fenêtre a été fermée, elle le reste. Par ailleurs, une fenêtre ouverte au moment du départ des occupants le reste jusqu'au moment de l'arrivée de la période d'occupation suivante. Les probabilités d'action sur les fenêtres ne sont par conséquent pas

proposées pour ces cas particuliers. Les valeurs de chaque constante pour les autres configurations sont données dans le Tableau 3-12.

Par ailleurs, Yun et Steemers (Yun and Steemers, 2008) disposent de peu de données pour les cas où une fenêtre a été fermée à l'arrivée des occupants. Par conséquent, bien que le modèle de probabilité de l'ouverture d'une fenêtre fermée à l'arrivée ne puisse pas être considéré comme précis (voir Tableau 3-12), la prédiction par ce modèle semble plausible.

Le modèle de comportement des occupants permet de prédire s'il y aura une ventilation nocturne au départ de l'occupant en fonction de la température intérieure correspondante. Cela correspond à plus de 90 % de probabilité lorsque la température intérieure est supérieure à 24 °C et la fenêtre est ouverte à l'intervalle de temps précédent. Les rares cas de fermeture d'une fenêtre ouverte sont prédits par le modèle de régression linéaire ordinaire développé, ce qui est cohérent avec le cas des bureaux sans ventilation nocturne. Aucune fenêtre n'est fermée pour une température supérieure à 26 °C.

Tableau 3-10 : Résultats de la régression et des tests statistiques de contrôle de la fenêtre pour les bureaux sans ventilation nocturne en fonction des températures intérieure et extérieure. (Yun and Steemers, 2008)

Model	Modèle de probabilité	Variable motrice	Test de qualité de l'ajustement du Pearson p	Essai de variables indépendantes	
				Coefficient de régression	
$P_{F-O(Arr)}$	$P_{F-O(Arr)} = \frac{e^{a+bt}}{1 + e^{a+bt}}$	Température intérieure	0,594	Constante (a)	- 4,849
				Température intérieure (b)	0,218
	$P_{F-O(Arr)} = \frac{e^{a+bt+ct_{out}}}{1 + e^{a+bt+ct_{out}}}$	Températures intérieure et extérieure	0,516	Constante (a)	- 4,842
				Température intérieure (b)	0,220
				Température extérieure (c)	- 0,003
Model	Modèle de probabilité	Variable motrice	Analyse de la variance $R^2 *$	Essai de variables indépendantes	
				Coefficient de régression	
$P_{O-F(Int)}$	$P_{O-F(Int)} = a + bt \ (t \leq 30)$	Température intérieure	0,634	Constante (a)	0,209
				Température intérieure (b)	- 0,007
	$P_{O-F(Int)} = a + bt_{out}$	Température extérieure	0,000	Constante (a)	0,040
				Température extérieure (b)	0,000
$P_{F-O(Int)}$	$P_{F-O(Int)} = a + bt \ (t > 20)$	Température intérieure	0,628	Constante (a)	- 0,629
				Température intérieure (b)	0,030
	$P_{F-O(Int)} = a + bt_{out} \ (t_{out} > 15)$	Température extérieure	0,302	Constante (a)	- 0,115
				Température extérieure (b)	0,009

* R^2 se réfère à la proportion de la variance expliquée par la variable indépendante (voir Annexe A.3.).

Tableau 3-11 : Résultats de la régression et des tests statistiques de contrôle de la fenêtre à l'arrivée des occupants pour les bureaux sans ventilation nocturne en fonction de la température intérieure. (Yun and Steemers, 2008)

Model	Modèle de probabilité	Numéro de bureau	Test de qualité de l'ajustement du Pearson	Essai de variables indépendantes	
			p	Coefficient de régression	
$P_{F-O(Arr)}$	$P_{F-O(Arr)} = \frac{e^{a+bt}}{1 + e^{a+bt}}$	1	0,730	Constante (a)	- 4,636
				Température intérieure (b)	0,174
		2	0,209	Constante (a)	- 7,864
				Température intérieure (b)	0,325
		3	0,096	Constante (a)	- 5,775
				Température intérieure (b)	0,272
		4	0,641	Constante (a)	- 8,250
				Température intérieure (b)	0,420
		5	0,259	Constante (a)	- 3,758
				Température intérieure (b)	0,173

Tableau 3-12 : Résultats de la régression et des tests statistiques de contrôle de la fenêtre pour les bureaux avec ventilation nocturne en fonction de la température intérieure. (Yun and Steemers, 2008)

Model	Modèle de probabilité	Test de qualité de l'ajustement du Pearson	Essai de variables indépendantes	
		p		Coefficient de régression
$P_{F-O(Arr)}$	$P_{F-O(Arr)} = \frac{e^{a+bt}}{1 + e^{a+bt}}$	0,594	Constante (a)	- 38,622
			Température intérieure (b)	1,823
$P_{O-O(Dep)}$	$P_{O-O(Dep)} = \frac{e^{a+bt}}{1 + e^{a+bt}}$	0,837	Constante (a)	- 11,264
			Température intérieure (b)	0,543
Model	Modèle de probabilité	Analyse de la variance	Essai de variables indépendantes	
		R^2		Coefficient de régression
$P_{O-F(Int)}$	$P_{O-F(Int)} = a + bt \ (t \leq 26)$	0,613	Constante (a)	0,444
			Température intérieure (b)	- 0,017

3.1.3.3. Ventilation nocturne en période estivale (Yun and Steemers, 2010)

Cette étude porte sur une étude de terrain dans deux bâtiments de bureaux avec des stratégies de ventilation naturelle nocturne, à Cambridge au Royaume-Uni. Trois bureaux ont été sélectionnés et étudiés durant les étés 2006 et 2007.

L'étude a encore une fois révélé l'importance du moment de la journée sur l'utilisation des fenêtres puisque d'avantage d'actions ont été enregistrées aux moments de l'arrivée et du départ des occupants que durant la période intermédiaire. Cette influence du moment de la journée sur les actions apportées aux fenêtres a été identifiée dans des bureaux avec une ventilation naturelle uniquement diurne (Herkel et al., 2008; Yun and Steemers, 2008) et a également été reconnue dans des études portant sur le comportement vis-à-vis d'autres contrôles que les fenêtres (Hunt, 1979; Reinhart, 2004).

Yun et Steemers ont étudié les proportions de temps au-dessus d'une température intérieure et extérieure données, de 09h00 à 18h00 en semaine (Figure 3-15) pour analyser les effets potentiels de la ventilation naturelle nocturne sur les conditions de température intérieure. On observe que des fenêtres bien conçues, permettant une ventilation naturelle nocturne, sont très utiles dans le maintien de conditions intérieures confortables.

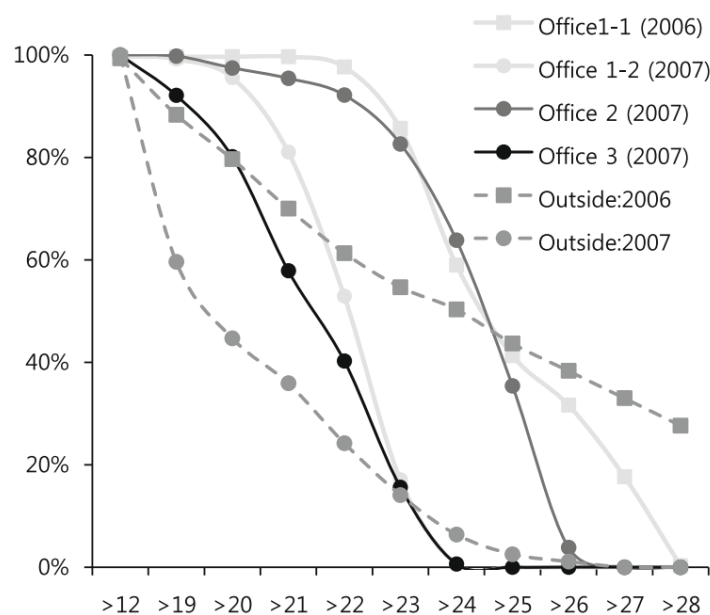


Figure 3-15 : Proportion de temps au-dessus d'une température donnée. (Yun and Steemers, 2010)

Yun et Steemers ont utilisé le modèle de régression logistique (voir [Annexe A.1.](#)) pour développer des modèles prédictifs du contrôle de la fenêtre dans des bureaux utilisant la ventilation naturelle nocturne. Comme dans la section [3.1.3.2.](#), les modèles de contrôle des fenêtres sont divisés en trois périodes : l'arrivée des occupants, la période d'occupation et le départ. Ils ont réalisé et analysé des

modèles considérant la température intérieure, la température extérieure et une combinaison des deux températures comme variables décrivant le comportement des occupants vis-à-vis de l'ouverture des fenêtres. Ils en concluent qu'il n'est pas conseillé d'utiliser un modèle basé sur la température extérieure pour la prédire la ventilation de nuit dans des bureaux.

« Toutefois, les résultats des tests statistiques indiquent que les modèles basés uniquement sur la température intérieure donnent des prédictions robustes et fiables (Tableau 3-13) et sont statistiquement significatifs ($p < 0,05$). Ces résultats suggèrent que l'utilisation de la température intérieure contribue considérablement à l'amélioration de la prédiction de modèles de régression. Ainsi, l'absence de tout effet de la température intérieure sur le comportement de commande des fenêtres par les occupants est rejetée. »

Sur base de ces résultats, Yun et Steemers ont réalisé un algorithme comportemental combiné basé sur les chaînes de Markov (voir [Annexe B](#)). Les constantes de ces modèles sont présentées dans le Tableau 3-14.

Tableau 3-13 : Régressions Logit basées sur la température intérieure (ET : écart-type). (Yun and Steemers, 2010)

Moment de la journée	Etat de la fenêtre	P (Pearson)	% de prédiction	Variable	Coefficient	ET	p pour la variable
Arrivée	De fermé à ouvert	0,026	81,5	T_{in}	0,806	0,389	0,039
				Constante	- 16,22	8,395	0,053
Pendant l'occupation	D'ouvert à fermé	Reste ouvert					
	De fermé à ouvert	0,030	87,7	T_{in}	0,724	0,364	0,047
				Constante	- 17,814	8,065	0,027
	D'ouvert à fermé	0,032	95,4	T_{in}	- 0,242	0,119	0,042
Départ				Constante	2,288	2,589	0,377
	De fermé à ouvert	Reste fermé					
	D'ouvert à fermé	0,017	73,5	T_{in}	- 0,345	0,160	0,031
				Constante	6,807	3,598	0,058

Tableau 3-14 : Fonctions de probabilité de transition : coefficients de régression Logit pour des modèles de comportement sur le contrôle des fenêtres (ET : écart-type). (Yun and Steemers, 2010)

Moment de la journée	Ventilation	Occupants	Transition	Coefficients de régression	
				Température intérieure (ET)	Constante (ET)
Arrivée	Ventilation seulement le jour	Utilisateur actif	De fermé à ouvert	0,717 (0,428)	- 14,094 (9,195)
		Utilisateur moyen	De fermé à ouvert	0,359 (0,080)	- 7,989 (1,856)
		Utilisateur passif	De fermé à ouvert	0,293 (0,183)	- 7,777 (4,292)
	Ventilation nocturne et diurne	Utilisateur moyen	De fermé à ouvert	0,806 (0,389)	- 16,220 (8,395)
Pendant l'occupation			D'ouvert à fermé	Reste ouvert	
	Ventilation seulement le jour	Utilisateur moyen	De fermé à ouvert	0,365 (0,108)	- 11,383 (2,669)
			D'ouvert à fermé	- 0,289 (0,103)	3,748 (2,462)
Départ	Ventilation nocturne et diurne	Utilisateur moyen	De fermé à ouvert	0,724 (0,364)	- 17,814 (8,065)
			D'ouvert à fermé	- 0,242 (0,119)	2,288 (2,589)
	Ventilation seulement le jour	Utilisateur moyen	De fermé à ouvert	Reste fermé	
			D'ouvert à fermé	Toujours fermé	
	Ventilation nocturne et diurne	Utilisateur moyen	De fermé à ouvert	Reste fermé	
			D'ouvert à fermé	- 0,345 (0,160)	6,807 (3,598)

3.1.4. Bureaux sans VMC en période de chauffe

Warren et al. (Warren and Parkins, 1984) ont mené une étude dans cinq immeubles de bureaux ventilés naturellement, au Royaume-Uni, sur une période de 3 mois pendant la saison de chauffage. L'étude décrit le comportement d'ouverture de fenêtre par les occupants et les variables l'influençant : l'ouverture d'une fenêtre a été identifiée comme étant fortement liée aux conditions météorologiques. La principale variable indépendante était la température extérieure et elle représente 76% de la variance observée. Les gains solaires (8%) et la vitesse du vent (4%) ont eu des effets moins importants. Warren distingue les petites et les grandes ouvertures. Les premières ont été moins fortement liées aux conditions météorologiques puisque les fenêtres sont ouvertes légèrement pour satisfaire des exigences de qualité de l'air intérieur. En revanche, les grandes ouvertures ont été fortement affectées par la température extérieure et l'apport solaire. Des fenêtres ont été entièrement ouvertes pour donner des taux de ventilation plus élevés afin de contrôler la température intérieure. La mesure dans laquelle les fenêtres sont utilisées durant la saison de chauffage pour contrôler la température intérieure dépend d'un certain nombre de facteurs, y compris les caractéristiques de construction telles que la surface vitrée et l'orientation, le type du système de chauffage et de ses commandes. Un questionnaire a montré que l'ouverture des fenêtres est uniformément répartie tout au long de la journée. Cependant, la plupart des gens ferment leurs fenêtres à la fin de la journée plutôt qu'à n'importe quel autre moment. Cela suggère que, une fois ouvertes, les fenêtres sont rarement fermées jusqu'à ce que la pièce soit quittée en fin de journée de travail.

3.2. Bureaux avec VMC

Rijal et ses partenaires (Rijal et al., 2007) basent leur étude sur l'ouverture des fenêtres dans des immeubles de bureaux sur des données recueillies dans des enquêtes de confort thermique menées dans 15 immeubles de bureaux au Royaume-Uni entre mars 1996 et septembre 1997 (McCartney and Nicol, 1997; Nicol and Raja, 1997; Raja et al., 1998). La première observation à noter est que la proportion de fenêtres ouvertes dans un bâtiment équipé d'un système de conditionnement d'air est considérablement inférieure à celle qu'on peut mesurer dans un immeuble ventilé naturellement. En effet, dans les bâtiments conditionnés, les fenêtres ouvrables sont limitées et leur utilisation est généralement déconseillée.

3.3. Logements

« Des enquêtes pionnières sur les bâtiments résidentiels réalisées par Dick et Thomas en 1951 (Dick and Thomas, 1951), Brundrett de 1975 à 1979 (Brundrett, 1977) et Lyberg en 1982 (Lyberg, 1982) convergent sur le fait que les actions sur les fenêtres étaient positivement corrélées avec la température de l'air extérieur, et marginalement associées négativement à la vitesse du vent. L'influence d'autres stimuli n'a pas été examinée. » (Haldi and Robinson, 2009a)

« Ebel et al. (Ebel et al., 2003) ont suivi le comportement d'occupant d'immeubles résidentiels ("maisons passives" avec une consommation d'énergie $< 15 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$) sur une année complète. Ils ont mesuré le nombre d'heures qu'une fenêtre individuelle était ouverte pendant la journée. En hiver, les fenêtres n'étaient pas ouvertes aussi longtemps qu'en été. Une diminution constante du nombre d'heures d'ouverture a été observée au cours de l'hiver de novembre à janvier. À partir de février, les fenêtres ont été maintenues ouvertes plus longtemps, ce qui suggère que les occupants commencent à changer leur comportement à la fin de la saison de chauffage. Suivie par le rayonnement solaire, la température extérieure a le plus d'effet sur l'utilisation des fenêtres. À partir de 8°C et en augmentant, le nombre d'heures d'ouverture des fenêtres augmente jusqu'à atteindre un maximum à une température de 18°C . À des températures plus élevées, le nombre moyen d'heures d'ouverture des fenêtres pendant la journée tend à diminuer légèrement. » (Herkel et al., 2008)

4. Utilisation des protections solaires

4.1. Observations et modèles pour des bureaux

Raja et ses partenaires (Raja et al., 2001) ont étudié l'utilisation de contrôles, durant la période estivale (de juin à août), dans 15 immeubles de bureaux ventilés naturellement, situés à Oxford et Aberdeen au Royaume-Uni. Ils ont observés que les stores et les rideaux sont utilisés pour réduire les reflets sur les écrans de visualisation et pour réduire la lumière directe du soleil, par temps chaud et par temps très chaud. L'utilisation de stores / rideaux varie d'un bâtiment à l'autre et dans un bâtiment d'une personne à l'autre. L'utilisation varie en fonction de la distance entre la personne et la fenêtre, avec une utilisation des protections solaires variant de 76,2% près de la fenêtre 8,1% loin de la fenêtre. L'utilisation des stores augmente également avec l'augmentation des températures intérieure et extérieure et la sensation thermique (Figure 4-1), mais le taux de variation est faible par rapport à celui des [fenêtres](#) et des [ventilateurs](#), probablement parce que la raison de l'utilisation de stores est d'éviter l'éblouissement plutôt que la chaleur.

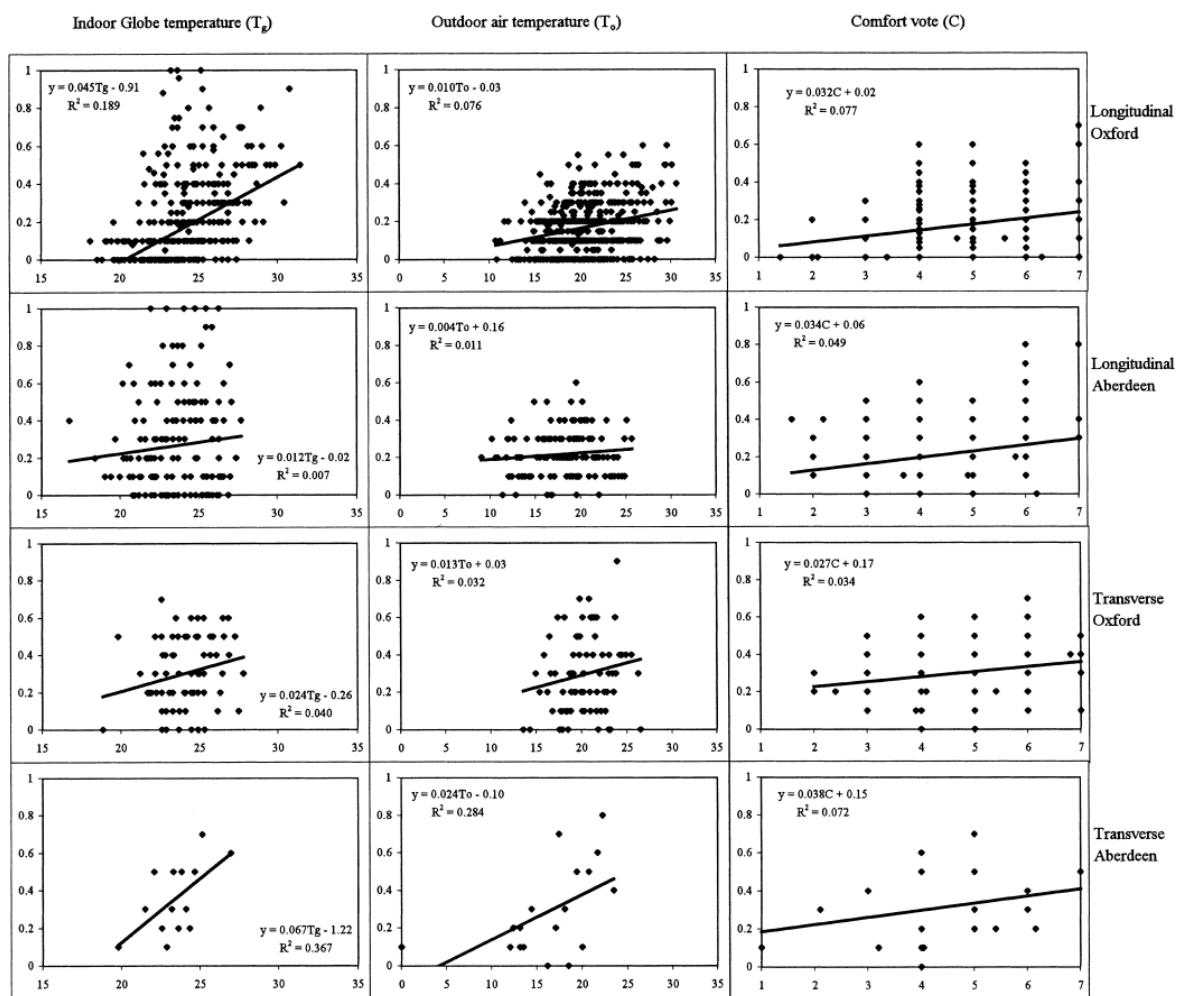


Figure 4-1 : Relation entre la fermeture des stores ou des rideaux et les températures intérieure et extérieure et la sensation thermique. (Raja et al., 2001)

4.1.1. Modèle pour le contrôle manuel et automatique des protections solaires (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b; Reinhart, 2004; Reinhart and Voss, 2003)

Les observations réalisées par Reinhart et Voss (Reinhart and Voss, 2003) en matière de comportement envers les protections solaires sont présentées dans le Tableau 4-1 et la Figure 4-2 ci-après. Leur étude porte sur dix bureaux (individuels ou occupés par deux personnes) orientés sud-sud-ouest, situés en Allemagne. Les informations reprises ici sont à la base de l'étude de Reinhart (Reinhart, 2004) présentée ci-après. Les conclusions sont que l'ensemble des sujets utilisent leurs protections solaires pour éviter l'ensoleillement direct au-dessus de 50 W/m² et les gains solaires entrant supérieurs à 50 klux (~450W/m²).

Tableau 4-1 : Résultats sélectionnés dans les études antérieures (Reinhart and Voss, 2003)

Contrôle manuel des protections solaires	Références
Les occupants mettent consciemment leurs stores dans une certaine position. Le choix de la position des stores semble être le résultat d'une réflexion sur les effets positifs et négatifs sur une période aussi longue que des semaines ou des mois, tandis que les opérations quotidiennes sur les protections solaires sont rares.	(Rea, 1984; Rubin, 1978)
Les occupants sont plus enclins à accepter que leurs stores soient ouverts automatiquement que fermés.	(Rubin, 1978)
L'occlusion des protections solaires est plus fréquente dans les bureaux au Sud que dans ceux orienté au Nord puisque les occupants ont tendance à utiliser leurs protections solaires pour bloquer la lumière solaire directe.	(Rubin, 1978)
Au-delà d'un seuil de rayonnement solaire direct sur une façade d'environ 50 W/m ² , la fermeture des protections solaires est proportionnelle à la profondeur de pénétration de la lumière dans la pièce.	(Inoue et al., 1988)
L'utilisation manuelle et individuelle des protections solaires varie de jamais à tous les jours pour une même façade et tend à intervenir dans les extrêmes d'une journée de travail.	(Lindsay and Littlefair, 1993)

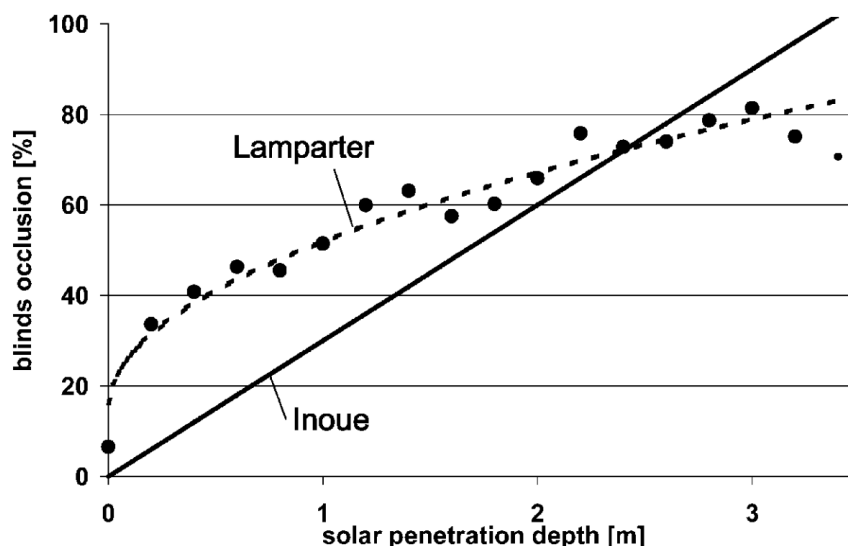


Figure 4-2 : Occlusion moyenne des protections solaires pour différentes profondeurs de pénétration solaire pour les dix bureaux étudiés, pour les périodes occupées quand l'éclairement solaire direct était supérieur à 50 W/m^2 . Le trait plein correspond à la courbe de Inoue, alors que la courbe parabolique est ajustée aux données de Lamparter. La courbe parabolique correspond à $y = 15 + \sqrt{-0,116 + 1359 x}$ avec y = l'occlusion des protections solaires [%] et x = la profondeur de pénétration solaire [m]. (Reinhart and Voss, 2003)

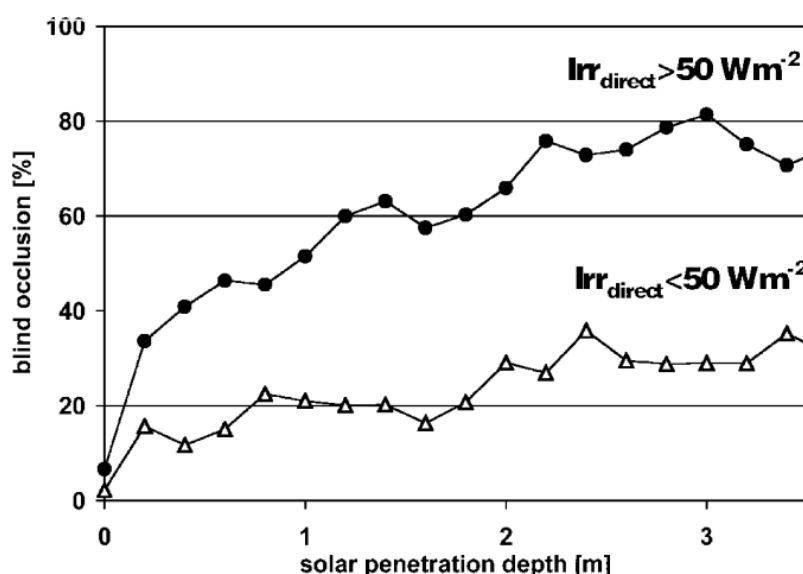


Figure 4-3 : Occlusion moyenne des protections solaires pour différentes profondeur de pénétration solaire pour les dix bureaux étudiés pour l'ensemble des périodes d'occupation. Les ronds (triangles) correspondent aux périodes où l'éclairement solaire direct est supérieur (inférieur) à 50 W/m^2 . (Reinhart and Voss, 2003)

D'après Reinhart (Reinhart, 2004), bien que les critères de fermeture des protections solaires soient bien établis (Bülow-hübe, 2000; Rea, 1984; Rubin, 1978), la façon dont les occupants ré-ouvrent leurs stores sur une base quotidienne, hebdomadaire ou même saisonnière reste confuse. En effet, comme c'est le cas pour l'éclairage artificiel (voir [Chapitre 2](#)), le comportement des occupants varie fortement d'une personne à l'autre. Il y a, d'un côté, les personnes qui ne modifient pas la position des protections solaires pendant des semaines, voire des mois (Foster and Oreszczyn, 2001; Rubin, 1978) et, d'autre part, celle qui ont tendance à replier leurs stores quotidiennement au moment du départ ou le matin à l'arrivée (Inoue et al., 1988; Lindsay and Littlefair, 1993). Ces résultats ont été traduits dans une stratégie automatisée et deux stratégies de contrôle manuel des protections solaires :

Commande automatique des protections solaires : les protections solaires sont automatiquement entièrement ouvertes si l'éclairement ne dépasse pas ces 50 W.m^{-2} et complètement abaissées dès que l'éclairement solaire direct sur le plan de travail dépasse 50 W.m^{-2} . L'angle des lamelles, lorsque les stores sont abaissés, est le plus petit parmi 0° (horizontal), 45° et 75° (vers l'extérieur et vers le bas) pour lequel le rayonnement solaire direct est complètement bloqué sur le plan de travail. (Trois inclinaisons distinctes ont été considérées car un nouvel ensemble de coefficients de lumière du jour doit être simulé pour chaque réglage des protections solaires. Le nombre de positions des stores considéré peut être augmenté à volonté.) Il s'agit d'un contrôle idéal des protections solaires puisque la lumière du jour disponible est maximisée si les critères d'éblouissement sont respectés.

Commande manuelle dynamique des protections solaires : les protections solaires sont complètement abaissées manuellement dès que l'éclairement solaire direct entrant sur le plan de travail dépasse 50 W/m^{-2} , avec les mêmes hypothèses pour l'angle des lamelles que dans le cas précédent. Les protections solaires sont complètement ré-ouvertes une fois par jour, au matin, à l'arrivée. Ce comportement ressemble à celui identifié par Lindsay (Lindsay and Littlefair, 1993) and Inoue (Inoue et al., 1988) (voir (Reinhart and Voss, 2003) ci-avant).

Commande manuelle statique des protections solaires : les protections solaires sont complètement baissées en permanence (angle des lamelles de 75°). Ce scénario décrit un utilisateur qui utilise rarement les protections solaires et utilise principalement les fenêtres pour maintenir un contact visuel avec l'extérieur (Rubin, 1978).

Le modèle présenté ici a des limitations qui sont la conséquence d'un manque de données quantitatives de terrain. Nous en énumérons quelques-unes ci-dessous :

« *Les protections solaires sont toujours complètement ouvertes ou fermées* : Le modèle considère que les utilisateurs ouvrent ou ferment complètement les protections solaires. En réalité, certains utilisateurs baissent les protections solaires uniquement jusqu'à ce que les rayonnements solaires directs soient bloqués.

Considérations thermiques : Le modèle néglige également l'influence des conditions thermiques sur l'utilisation des protections solaires en vue de limiter la surchauffe.

Questions de confidentialité : Les preuves anecdotiques suggèrent que les occupants de bureaux dans des milieux urbains densément peuplés utilisent leurs stores pour bloquer la vue de l'extérieur pour satisfaire leurs besoins en matière de vie privée. Ces besoins d'intimité ne sont pas modélisés.

Orientation du poste de travail : L'orientation du poste de travail de l'utilisateur détermine son champ de vision et peut donc influencer son usage des protections solaires. A cause de l'absence de données concluantes, le modèle présenté ici ne considère que les niveaux d'éclairement horizontaux sur le plan de travail, c'est-à-dire que l'orientation de l'occupant est ignorée.

Position des commandes : La fréquence à laquelle les commandes des protections solaires sont utilisées dépend de la position des commandes par rapport au poste de travail des occupants. Les utilisateurs sont moins enclins à interrompre leur tâche pour utiliser une commande proche de la porte qu'à utiliser une commande accessible depuis leur poste de travail (Bordass et al., 1994). » (Reinhart, 2004)

Sur base d'une campagne de mesure de 9 à 14 mois dans différents types de bureaux à Vienne en Autriche, Mahdavi et Pröglhöf (Mahdavi and Pröglhöf, 2008, 2009a, b) proposent des modèles généraux pouvant servir lors de simulations dynamiques pour représenter la présence des occupants et leurs actions (voir les Figures 1-1, 2-8, 2-9 et 4-4). Ils notent toutefois qu'il est difficile de prédire les interactions d'un occupant avec les systèmes à sa disposition et que les données comportementales issues d'un immeuble de bureaux ne peuvent pas être transposées à d'autres bâtiments de bureaux sans ajustement sur base de la superficie, du contexte (physique, climatique et culturel), de l'usage (fonction), de l'orientation, de l'enveloppe, des systèmes, etc. Toutefois, les modèles comportementaux basés sur des résultats d'observations à long terme et des mesures à haute résolution dans les bâtiments typiques de bureaux sont préférables à la plupart des hypothèses généralement appliquées dans la conception de systèmes, la simulation et l'exploitation.

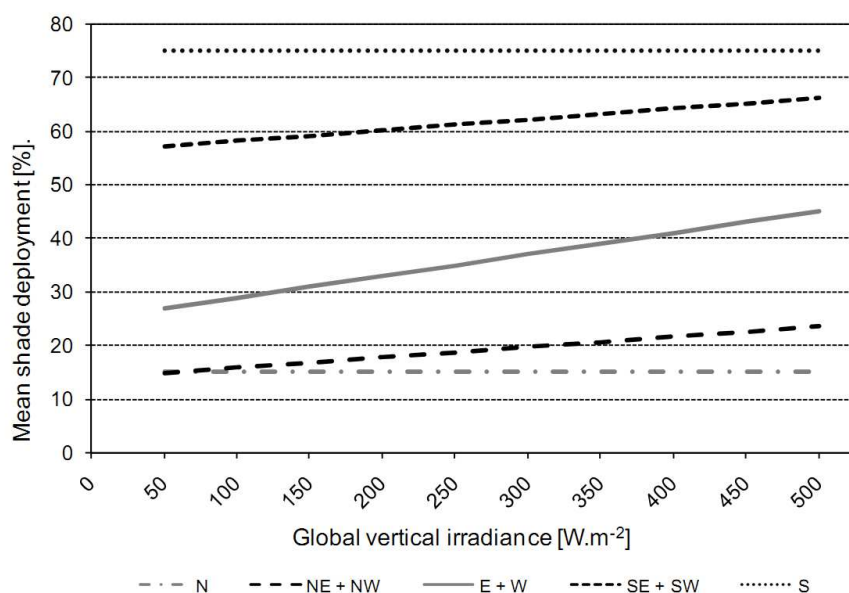


Figure 4-4 : Modèle proposé pour décrire la dépendance du déploiement des protections solaires (en %) en fonction de l'orientation de la façade (N : nord, NE : nord-est, NW : nord-ouest, E : est, W : ouest, SE : sud-est, SW : sud-ouest, S : sud) et du rayonnement incident (vertical) global sur la façade. (Mahdavi and Pröglhöf, 2009a, b)

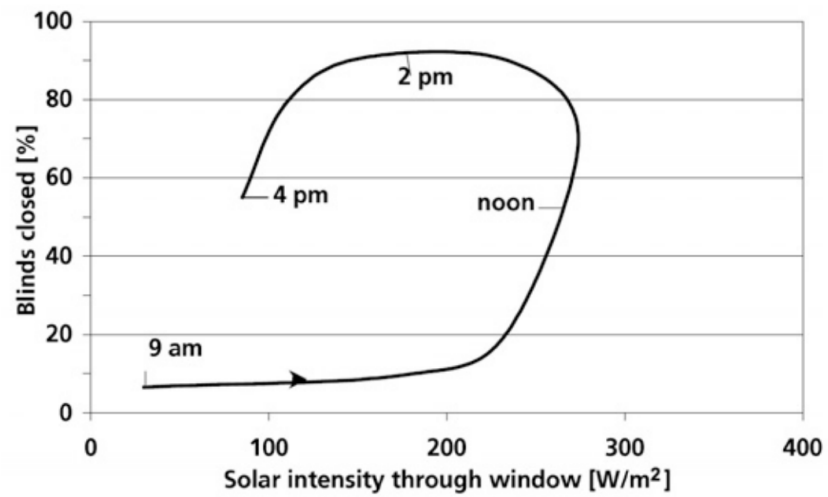


Figure 4-5 : Pourcentage de protections solaires fermées pour une façade SSO en fonction de l'éclairement solaire vertical. (Mahdavi and Pröglhöf, 2008)

4.1.2. Modélisation du comportement des occupants (Nicol and Humphreys, 2004)

Dans leurs études, Nicol et Humphreys (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) utilisent trois bases de données pour faire une estimation de l'utilisation des contrôles. La première, dont les résultats sont repris ci-dessous, se base sur des études de terrain du confort subjectif menées dans des immeubles de bureaux dans cinq pays européens – Suède, Royaume-Uni, France, Portugal et Grèce (McCartney et Nicol, 2001). Elle comprend environ 4.655 sujets répartis dans 25 bâtiments, dont 11 ont été ventilés naturellement (1.649 dossiers). Les deux autres bases de données se basent sur des études au Royaume-Uni (McCartney et al. 1998) et au Pakistan (Nicol et al. 1999).

Ils (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) ont modélisé le comportement des occupants vis-à-vis de ces commandes sur base du principe adaptatif : « si un changement arrive de sorte à produire un inconfort, les personnes réagissent d'une façon qui tend à rétablir leur confort » (Humphreys and Nicol, 1998). Le modèle utilisé dans les études reprises ici est le modèle Logit (voir [Annexe A.1.](#)) avec comme variable 'x' la température extérieure ou la température intérieure (température de globe). Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 4-2.

Il apparaît que les stores ou les rideaux peuvent être utilisés par les occupants du bâtiment pour contrôler l'éblouissement causé par les fenêtres. Les Figures 4-6 (a) et (b) illustre le fait que l'utilisation des protections solaires peut être accru par temps chaud. Cependant, l'effet est faible, en particulier avec la température extérieure, et à peine significatif statistiquement. Aussi, la plage d'utilisation des stores et rideaux est limitée.

Tableau 4-2 : Valeurs des constantes *a* et *b* ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 (voir [Annexe A.1.](#)) de la fonction Logit ainsi que les corrélations associées (*r*)*, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)

Commande	Base de données	Température extérieure (°C)			Température de globe (°C)		
		Interception <i>a</i>	Pente <i>b</i>	<i>r</i>	Interception <i>a</i>	Pente <i>b</i>	<i>r</i>
Fermeture des stores et des rideaux	Europe	-0,30 $\pm$ 0,12	0,005 $\pm$ 0,008	0,030	-2,99 $\pm$ 0,38	0,099 $\pm$ 0,016	0,097

* En raison du grand nombre de cas, toutes les corrélations sont statistiquement très significatives avec $p < 0,1\%$, sauf dans le cas des stores et la température extérieure dans l'enquête européenne.

Par ailleurs, sachant que qu'une fonction majeure des stores la protection vis-à-vis des reflets provenant de l'extérieur, il est possible que l'éclairement extérieur soit une meilleure variable explicative pour l'utilisation de stores. Ne disposant pas de données d'éclairement, Nicol et Humphreys ont réalisé une régression probit en utilisant les mesures prises par Sutter (Sutter, 2003). Les résultats sont illustrés à la Figure 4-7. On observe une relation étroite entre l'utilisation de stores et le logarithme de l'éclairement externe.

Pour conclure, si l'utilisation de stores ou de rideaux est presque indépendante de la température dans les bureaux européens, elle dépend fortement de l'éclairage extérieur.

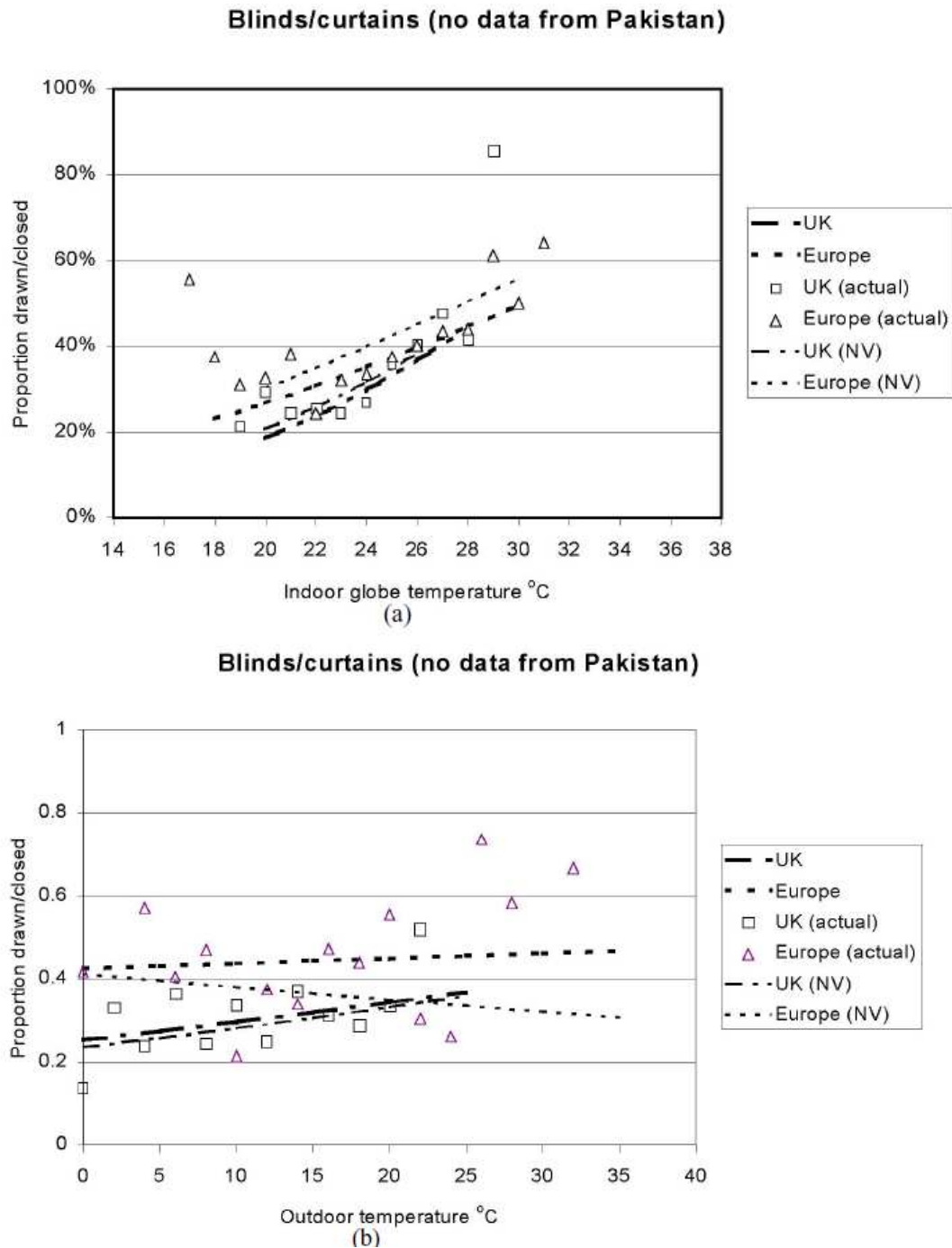


Figure 4-6 : Proportion de bureaux avec des stores ou des rideaux tirés en fonction (a) des différentes températures de globe intérieures et (b) des températures de l'air extérieur. Les lignes sont les approximations Logit (équation 2 dans l'[Annexe A.1.](#)) pour chaque enquête. Des Probits distincts pour seulement les bâtiments à ventilation naturelle (NV) en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée de stores fermés est représentée par les points. (Nicol and Humphreys, 2004)

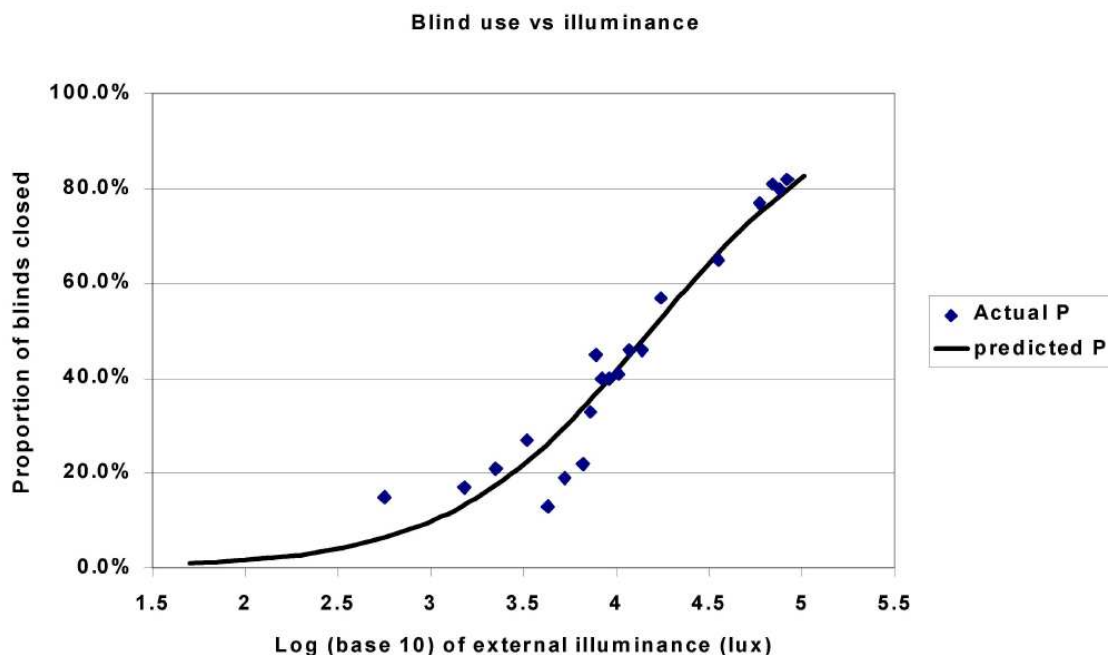


Figure 4-7 : Proportion de stores fermés pour différentes valeurs de l'éclairement extérieur. Données fournies par Yannick Sutter (Sutter, 2003). (Nicol and Humphreys, 2004)

4.1.3. Adaptation du modèle adaptatif par Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008)

Les paramètres utilisés par Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008) sont définis en [Annexe A.1](#). Il s'agit de la fonction Logit. Les résultats des valeurs de a et b , ainsi que des caractéristiques associées à la fonction logit (voir [Annexe A.2](#)), sont présentés dans le Tableau 4-3 ci-après. Ils ont été établis à partir d'une enquête menée dans huit immeubles de bureaux en Suisse durant l'été 2006.

Tableau 4-3 : Résultats de la régression et les tests statistiques pour une fonction de la température intérieure ou extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)

Contrôle	Nombre d'occurrences et de participants	Stimulus thermique	a	b	θ_{50}	G-statistique	Déviations résiduelle	BIC	R^2
Stores	31	Intérieur	-11,37±0,54	0,425±0,021	26,8	535,1	3438,0	3455,4	0,22
	2957	Extérieur	-3,54±0,19	0,139±0,008	25,5	313,1	3660,0	3677,4	0,14

Dans le cas de l'utilisation des protections solaires, la température intérieure est un bon indicateur ($G = 535,1$, $R^2 = 0,22$) et la valeur élevée de la pente ($b = 0,425$) indique une sensibilité assez forte à la température ambiante autour de la valeur de $\theta_{50} = 26,8$ °C (Figure 4-8). Par ailleurs, le G-statistique de la température extérieure est acceptable ($G = 313,1$) mais beaucoup plus faible que celui de la température intérieure, comme le sont la pente et R^2 ($b = 0,139$, $R^2 = 0,14$). Finalement, les valeurs de BIC suggèrent que la température intérieure a une puissance prédictive légèrement supérieure à celle de la température extérieure.

Haldi et Robinson ont alors appliqué une régression logistique multiple sur leurs données, considérant conjointement les températures intérieure et extérieure comme stimulus. Les résultats de l'analyse de cette régression logistique multiple sont présentés dans le Tableau 4-4. Ils notent que, dans le cas d'une période estivale, une régression logistique multiple n'offre pas d'amélioration de la précision prédictive mais peut, au contraire, mener à des tendances erronées si on considère les températures intérieure et extérieure comme variables motrice puisque ces deux prédicteurs sont fortement liés. On observe en effet que la valeur de b_{in} de la régression logistique multiple est plus petite que celle de la régression simple sur la température intérieure, indiquant que le stimulus principal (interne) est freiné par l'autre (externe).

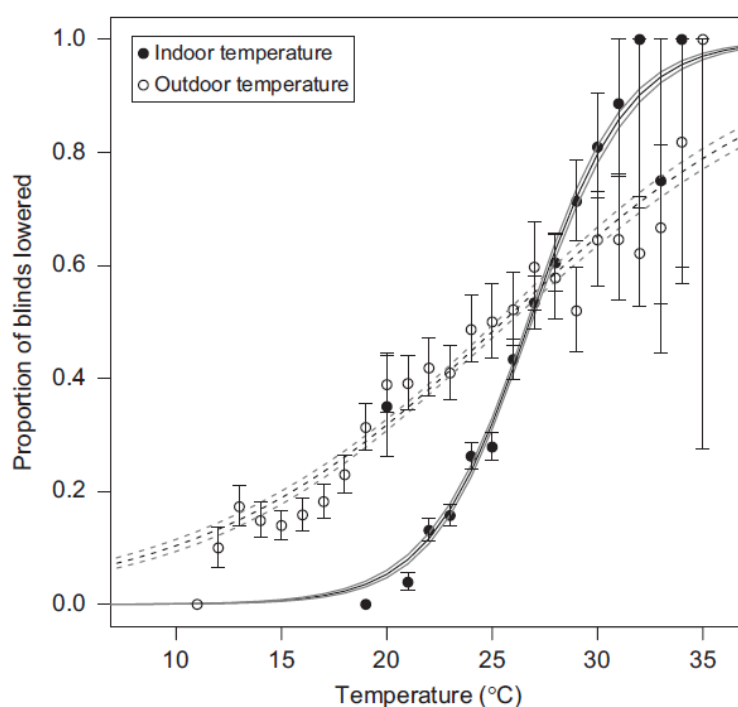


Figure 4-8 : Probabilité de fermeture des stores en fonction des températures intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)

Tableau 4-4 : Paramètres de régression pour une régression logistique multiple. (Haldi and Robinson, 2008)

Contrôle	a	b_{in}	b_{out}	G-statistique total	Déviations résiduelle	G-statistique ajouté	BIC	R^2
Stores	-11,15±0,59	0,407±0,029	0,010±0,012	535,9	3437,2	0,8	3463,3	0,22

5. Utilisation de ventilateurs

5.1. Utilisation de ventilateur dans les bureaux

Raja et ses partenaires (Raja et al., 2001) ont étudié l'utilisation de contrôles, durant la période estivale (de juin à août), dans 15 immeubles de bureaux ventilés naturellement, situés à Oxford et Aberdeen au Royaume-Uni. Ils ont observés que les ventilateurs jouent un rôle important dans la réduction du stress thermique dans les bâtiments à ventilation naturelle en augmentant la circulation d'air. Par ailleurs, le taux d'utilisation des ventilateurs présente une forte corrélation avec les températures intérieure et extérieure et la sensation thermique, avec des coefficients de corrélation comparables à ceux obtenus pour l'ouverture des fenêtres (voir [3.1.1](#)).

Notons toutefois que leur utilisation est relativement faible (38% en moyenne, la plupart du temps en dessous de 30%). La faible proportion d'utilisation des ventilateurs suggère soit que les ventilateurs ne sont pas disponibles, soit que les autres moyens de ventilation sont suffisants pour assurer le confort thermique intérieur.

5.1.1. Modélisation du comportement des occupants (Nicol and Humphreys, 2004)

Dans leurs études, Nicol et Humphreys (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) utilisent trois bases de données pour faire une estimation de l'utilisation des contrôles. La première, dont les résultats sont repris ci-dessous, se base sur des études de terrain du confort subjectif menées dans des immeubles de bureaux dans cinq pays européens – Suède, Royaume-Uni, France, Portugal et Grèce (McCartney et Nicol, 2001). Elle comprend environ 4.655 sujets répartis dans 25 bâtiments, dont 11 ont été ventilés naturellement (1.649 dossiers). Les deux autres bases de données se basent sur des études au Royaume-Uni (McCartney et al. 1998) et au Pakistan (Nicol et al. 1999).

Ils (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) ont modélisé le comportement des occupants vis-à-vis de ces commandes sur base du principe adaptatif : « si un changement arrive de sorte à produire un inconfort, les personnes réagissent d'une façon qui tend à rétablir leur confort » (Humphreys and Nicol, 1998). Le modèle utilisé dans les études reprises ici est le modèle Logit (voir [Annexe A.1.](#)) avec comme variable 'x' la température extérieure ou la température intérieure (température de globe). Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 5-1.

Si l'effet de ventilateurs sur la température intérieure est minime, limité à une augmentation du transfert de chaleur par convection et une légère augmentation de la charge thermique, les ventilateurs sont principalement utilisés pour compenser les effets de la température intérieure élevée. En effet, il a été estimé que l'effet d'une circulation d'air plus élevée équivaut à une baisse de la température intérieure d'un maximum de 4 °C (par exemple, (Nicol, 1974)). Dans l'étude européenne, la vitesse moyenne de l'air avec ventilateurs en marche était de 0,18 ms⁻¹, mais seulement de 0,09 ms⁻¹ quand ils étaient éteints. Cette augmentation de vitesse de l'air est à peu près équivalente à une réduction de la température de 1 °C.

Tableau 5-1 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 de la fonction Logit (voir [Annexe A.1.](#)) et corrélations associées (r)*, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)

Commande	Base de données	Température extérieure (°C)			Température de globe (°C)		
		Interception a	Pente b	r	Interception a	Pente b	r
Allumage des ventilateurs	Europe	-3,80 $\pm$ 0,25	0,110 $\pm$ 0,014	0,17	-8,36 $\pm$ 0,66	0,243 $\pm$ 0,026	0,14

* En raison du grand nombre de cas, toutes les corrélations sont statistiquement très significatives à $p < 0,1\%$, sauf dans le cas des stores et la température extérieure dans l'enquête européenne.

Le fonctionnement du principe d'adaptation est limité par la disponibilité des moyens d'exercer un contrôle sur l'environnement. L'absence de ventilateur sera une telle contrainte. La Figure 5-1 montre les probits européens séparément par pays et suggère qu'il y a une différence dans la disponibilité des ventilateurs entre les pays. Le nombre relativement faible d'utilisation de ventilateurs par les sujets de l'enquête européenne peut être dû dans de nombreux cas à l'absence du ventilateur nécessaire.

L'analyse suggère que, si les ventilateurs sont fournis, l'utilisation de ventilateurs suivra le modèle donné par les courbes de probit du Pakistan et de la Grèce qui présente un bon accès à des ventilateurs. Les données obtenues pour ces pays suggèrent que 20% des occupants du bâtiment utilisent des ventilateurs à une température extérieure de 18 °C, 50% à 23 °C, et 80% à 28 °C. À des températures extérieures supérieures à 30 °C, l'utilisation de ventilateurs est presque universelle; en dessous de 15 °C, elle est presque nulle. Au regard des températures intérieures, l'utilisation de ventilateurs commence à une température d'environ 22 °C et monte à 100% à une température intérieure de 34 °C (température extérieure de 30 °C) si les ventilateurs sont disponibles.

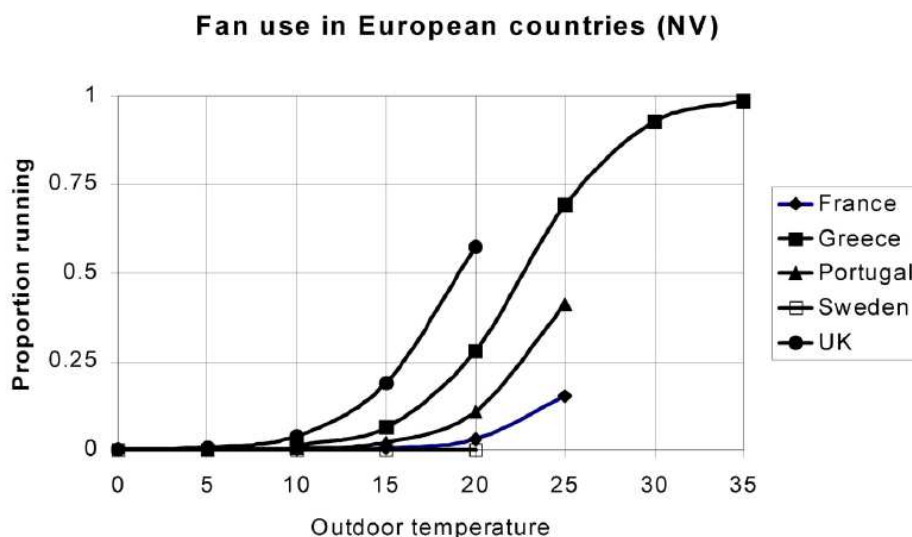


Figure 5-1 : Lignes de probit pour le fonctionnement des ventilateurs dans les bâtiments à ventilation naturelle (NV) dans différents pays européens. (Nicol and Humphreys, 2004)

5.1.2. Adaptation du modèle adaptatif par Haldi et Robinson (Haldi and Robinson, 2008)

Les paramètres utilisés par Haldi et Robinson sont définis en [Annexe A.1](#). Les résultats des valeurs de a et b , ainsi que des caractéristiques associées à la fonction logit (voir [Annexe A.2](#)), sont présentées dans le Tableau 5-2 ci-après. Ils ont été établis à partir d'une enquête menée dans six immeubles de bureaux situés à Lausanne, en Suisse, en 2006.

Tableau 5-2 : Résultats de la régression et des tests statistiques pour une fonction unique de la température intérieure ou extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)

Contrôle	Nombre d'occurrences et de participants	Stimulus thermique	a	b	θ_{50}	G-statistique	Déviations résiduelle	BIC	R^2
Ventilateurs	37	Intérieur	-19,32±0,70	0,696±0,026	27,8	1110,1	3081,8	3098,7	0,39
	3538	Extérieur	-8,18±0,28	0,311±0,011	26,3	1132,5	3058,9	3076,3	0,39

Si l'utilisation de ventilateurs présente un impact assez négligeable sur le bilan énergétique d'une pièce, elle peut avoir une grande influence sur l'équilibre thermique du corps humain et, par conséquent, sur le confort thermique et l'utilisation d'autres contrôles.

« La régression logistique selon la température intérieure est hautement significative ($G = 1110,1$, $R^2 = 0,39$) avec une haute température caractéristique de l'action ($\theta_{50} = 27,8$ °C). La pente est la plus élevée de tous les contrôles étudiés ($b = 0,696$), ce qui montre une forte sensibilité à la température intérieure autour θ_{50} (voir Figure 5-2). Les actions sur les ventilateurs devraient être bien décrites par la température intérieure, car elles semblent être entraînées principalement par des stimuli thermiques locaux, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour les autres contrôles, tels que les fenêtres et les stores qui régulent les échanges d'énergie avec le microclimat extérieur.

Néanmoins, des résultats pertinents sont également obtenus avec la température extérieure, avec des valeurs de G-statistique, R^2 et BIC très semblables à celles trouvées pour la température intérieure, mais avec une pente moins forte ($b = 0,311$). Cette différence tend à nouveau à préconiser l'utilisation de la température intérieure, par opposition à la température extérieure de base pour la prédiction, puisque des pentes plus raides indiquent des relations plus déterministes. » (Haldi and Robinson, 2008)

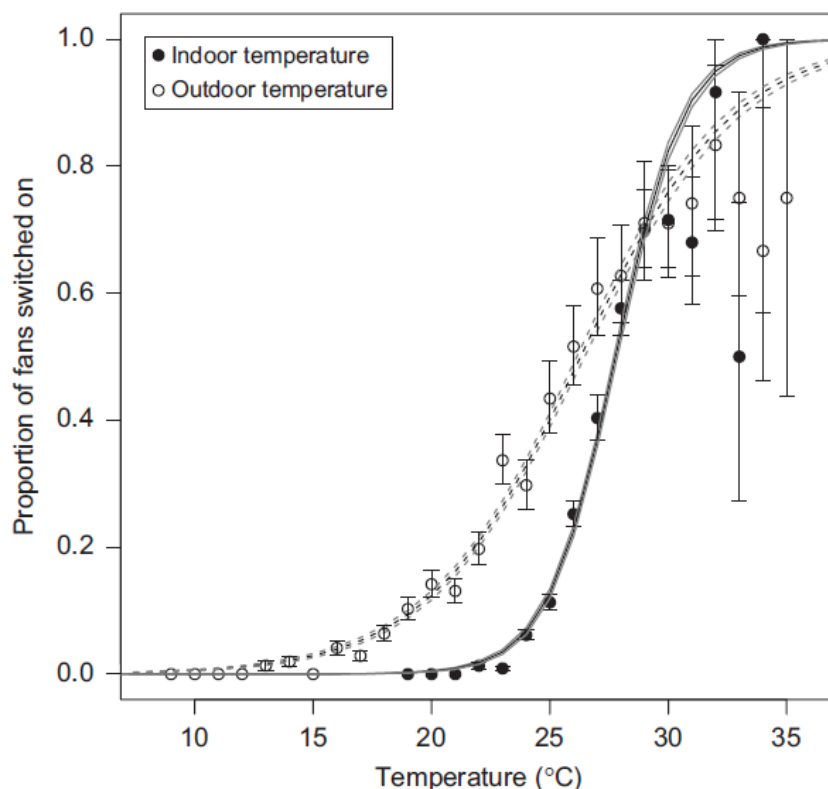


Figure 5-2 : Probabilité de mise en fonctionnement des ventilateurs comme fonction des températures intérieure et extérieure. (Haldi and Robinson, 2008)

Suite à cela et sur base des conclusions de Rijal (Rijal et al., 2007), ils ont appliqué une régression logistique multiple en fonction conjointement des températures intérieure et extérieure. Les valeurs des constantes a , b_{in} et b_{out} ainsi obtenues sont présentées dans le Tableau 5-3 (voir [Annexe A.1.](#)).

On observe que la température extérieure a une propriété prédictive très faible et que la valeur de b_{in} de la régression logistique multiple est plus petite que celle de la régression simple, indiquant que le stimulus principal (interne) est freiné par l'autre (externe). Ceci est lié à la dépendance entre les deux variables. Pour conclure, la régression logistique multiple n'offre pas d'amélioration de la précision prédictive et peut mener à des tendances erronées causées par de fortes corrélations entre les variables.

Tableau 5-3 : Paramètre de régression pour une régression logistique multiple. (Haldi and Robinson, 2008)

Contrôle	a	b_{in}	b_{out}	G-statistique total	Déviati on résiduelle	G-statistique ajouté	BIC	R^2
Ventilateurs	-15,75±0,73	0,396±0,033	0,187±0,016	1286,1	2905,3	153,6	2931,4	0,44

6. Utilisation des appareils de chauffage

6.1. Chauffage dans les bureaux (Nicol and Humphreys, 2004)

Dans leurs études, Nicol et Humphreys (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) utilisent trois bases de données pour faire une estimation de l'utilisation des contrôles. La première, dont les résultats sont repris ci-dessous, se base sur des études de terrain du confort subjectif menées dans des immeubles de bureaux dans cinq pays européens – Suède, Royaume-Uni, France, Portugal et Grèce (McCartney et Nicol, 2001). Elle comprend environ 4.655 sujets répartis dans 25 bâtiments, dont 11 ont été ventilés naturellement (1.649 dossiers). Les deux autres bases de données se basent sur des études au Royaume-Uni (McCartney et al. 1998) et au Pakistan (Nicol et al. 1999).

Ils (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004) ont modélisé le comportement des occupants vis-à-vis de ces commandes sur base du principe adaptatif : « si un changement arrive de sorte à produire un inconfort, les personnes réagissent d'une façon qui tend à rétablir leur confort » (Humphreys and Nicol, 1998). Le modèle utilisé dans les études reprises ici est le modèle Logit (voir [Annexe A.1.](#)) avec comme variable 'X' la température extérieure ou la température intérieure (température de globe). Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 6-1. Les Figures 6-1 (a) et (b) montrent l'utilisation de chauffage dans les bâtiments.

On note que peu de sujets utilisent leur chauffage d'appoint. Aussi, la relation entre l'utilisation du chauffage et de la température intérieure n'est pas très cohérente entre les différentes enquêtes. Cela est peut-être lié au fait que l'effet de l'allumage du chauffage est de chauffer l'air de sorte que la température intérieure est à la fois la cause du comportement et son effet. Dans la Figure 6-1 (b), on observe que les lignes de probit pour la probabilité d'utilisation de chauffage en fonction de la température extérieure sont à peu près les mêmes pour les trois enquêtes. La température extérieure est clairement le facteur clé pour déterminer l'utilisation du chauffage. Ainsi, on note une utilisation significative du chauffage à partir d'une température extérieure de 15 °C et qui augmente lorsque la température extérieure diminue, pour atteindre environ la moitié de tous les bâtiments à 10 °C. Lorsque la température extérieure est inférieure à 5 °C, presque tous les bâtiments sont chauffés.

Tableau 6-1 : Valeurs des constantes a et b ($\pm$ erreur) dans les équations 1 et 2 (voir [Annexe A.1.](#)) et la corrélation associée (r) *, calculées pour tous les bâtiments dans chacune des trois bases de données. (Nicol and Humphreys, 2004)

Commande	Base de données	Température extérieure (°C)			Température de globe (°C)		
		Interception a	Pente b	r	Interception a	Pente b	r
Enclenchement du chauffage	Europe	2,72 $\pm$ 0,18	-0,322 $\pm$ 0,017	-0,65	4,12 $\pm$ 0,42	-0,210 $\pm$ 0,017	-0,18

* En raison du grand nombre de cas, toutes les corrélations sont statistiquement très significatives à $p < 0,1\%$, sauf dans le cas des stores et la température extérieure dans l'enquête européenne.

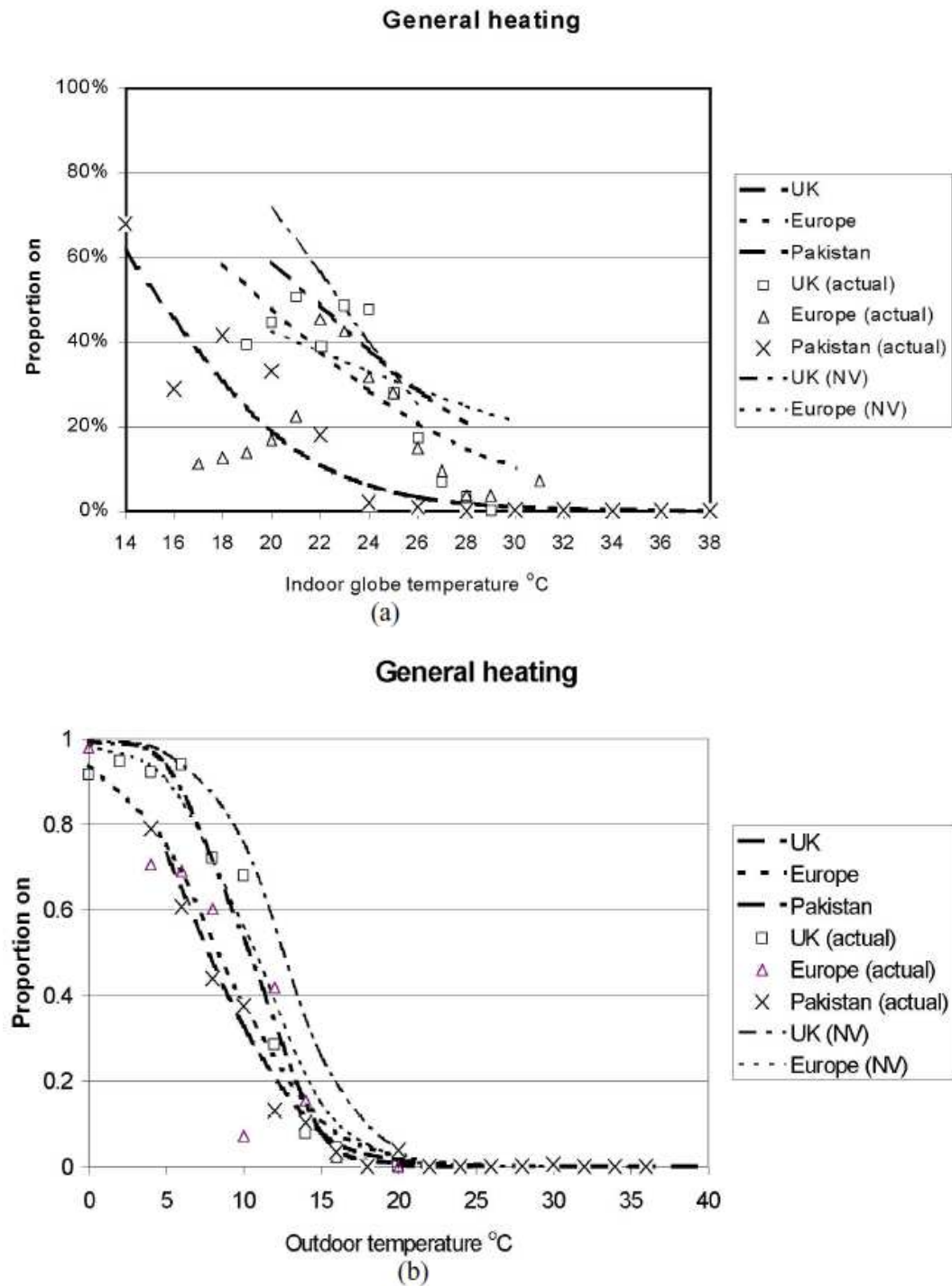


Figure 6-1 : Proportion de bureaux avec chauffage allumé en fonction (a) des différentes températures de globe intérieures et (b) des températures de l'air extérieur. Les lignes sont les approximations logit (équation 2, présentée en [Annexe A.1.](#)) pour chaque enquête. Des Probits distincts pour seulement les bâtiments à ventilation naturelle en Europe sont également représentés. La proportion réelle enregistrée est illustré par les points. (Nicol and Humphreys, 2004)

Annexes

A. La fonction Logit

A.1. Définition de la procédure probit et de la fonction Logit

Le modèle très souvent utilisé dans les études présentées ici est le modèle Logit.

« La procédure de probit suppose que la probabilité qu'un événement se produise augmente à mesure que l'"intensité" de la stimulation (par exemple la température) augmente. Le modèle traditionnel suppose une loi gaussienne sous-jacente entre le stimulus et la réponse probabiliste, mais d'autres distributions de causalité peuvent être utilisées (Finney, 1964).

Le modèle associé est le modèle Logit.

$$\text{Logit}(p) = \log[p/(1 - p)] = a + bx \quad (1)$$

où

$\text{Log}[p/(1 - p)]$ = la fonction Logit et est supposée être dépendante linéairement de la valeur de x ;

p = la probabilité qu'un événement ait lieu ;

a et b = des constantes ;

x = une variable (généralement une température).

Les valeurs de a et b sont déterminés en effectuant une régression probit pour la fonction Logit en utilisant les cas où un événement particulier s'est produit (fenêtre ouverte, store fermé, etc.) pour différentes valeurs de x . Une analyse de régression pondérée du Logit en fonction des valeurs de x donne alors une estimation des valeurs des constantes a et b .⁶

Une fois que les valeurs des constantes sont connues, une courbe peut être construite en liant l'indice x et la probabilité de l'événement particulier en utilisant l'équation (2), qui est dérivée de l'équation (1) ci-dessus.

$$p(x) = \frac{\exp(a+bx)}{1 + \exp(a+bx)} \quad \gg \text{ (Nicol, 2001; Nicol and Humphreys, 2004)}$$

Un modèle Logit multiple à deux variables prend la forme suivante :

$$p(x_1, x_2) = \frac{\exp(a+b_1x_1+b_2x_2)}{1 + \exp(a+b_1x_1+b_2x_2)} \quad (3)$$

⁶ Les logiciels statistiques couramment utilisés tels que SPSS peuvent être utilisés pour calculer les valeurs de a et b .

A.2. Définition des propriétés et des paramètres statistiques de la fonction Logit

« La distribution Logit a plusieurs propriétés intéressantes. On peut observer que $p(\vartheta)$ atteint 0,5 pour une température $\vartheta_{50} = -a/b$. En outre, la tangente à $p(\vartheta)$ à ϑ_{50} est $b/4$. Ainsi, la pente obtenue b est liée à la raideur de la variation de $p(\vartheta)$ près de $\vartheta = -a/b$.

La propriété précédente nous permet d'interpréter ϑ_{50} comme la température caractéristique à laquelle la moitié des occupants aura utilisé un contrôle donné, s'il est disponible. Le paramètre b mesure indirectement la sensibilité des occupants à des variations de température autour de cette valeur. En particulier, si b est égal à zéro, la distribution devient indépendant de ϑ , et pour un très grand b , $p(\vartheta)$ tend vers une fonction échelon. Nous pouvons donc interpréter les faibles valeurs de b , conjointement avec la valeur de p associée, comme un signe que ϑ est non pertinent pour expliquer une action donnée. Inversement, les grandes valeurs de b augmentent le degré de détermination des prédictions.

Nous basons nos conclusions sur la validité d'un modèle déduit de la valeur obtenue pour sa déviance associée $D = -2 \log(\lambda / \lambda_s)$, où λ est la vraisemblance du modèle et λ_s la probabilité résultant d'un modèle saturé considéré. On peut alors définir le G-statistique comme $G = D_{null} - D = -2 \log(\lambda_{null} / \lambda)$, où l'indice "null" se réfère à un modèle sans variable.

Un autre paramètre statistique valable est le *critère d'information bayésien* (BIC). Il est défini par $-2 \log(\lambda / \lambda_s) + k \log N$, où N est la taille de l'échantillon. Avec cette définition, le BIC mesure l'équilibre entre l'information apportée par le modèle et la complexité induite par le nombre de prédicteurs. Des modèles ajustés alternatifs peuvent ensuite être comparés à l'aide des plus faibles valeurs de BIC indiquant les modèles avec le meilleur équilibre entre complexité et information.

Avec les tests de cette étude, nous tenons aussi à sélectionner les modèles qui offrent de bonnes valeurs pour la pente b , car elles permettent de meilleures prévisions (plus déterministe) dans le contexte de la simulation du bâtiment.

Une autre statistique d'intérêt est une version adaptée de R^2 proposé par Nagelkerke (Nagelkerke, 1991), qui décrit la proportion de la déviance expliquée par ces modèles de régression logistique, et est définie comme :

$$R^2 = \frac{1 - \exp((D - D_{null})/N)}{1 - \exp((-D_{null})/N)}.$$

Nous ne nous attendons pas nécessairement à obtenir des valeurs très élevées de R^2 de Nagelkerke, puisque des stimuli thermiques seuls ne peuvent expliquer les variations de probabilités. » (Haldi and Robinson, 2008)

A.3. Définition du coefficient de corrélation linéaire(r) de Bravais-Pearson

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

où σ_{xy} désigne la covariance entre les variables x et y , et σ_x, σ_y leur écart type. (...)

Par exemple, nous allons calculer le coefficient de corrélation entre deux séries de même longueur (cas typique : une régression). On suppose qu'on a les tableaux de valeurs suivants : $X(x_1, \dots, x_n)$ et $Y(y_1, \dots, y_n)$ pour chacune des deux séries. Alors, pour connaître le coefficient de corrélation liant ces deux séries, on applique la formule suivante :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \gg (\text{http://fr.wikipedia.org/wiki/Corr\u00e9lation_(statistiques)})$$

On parle de corrélation faible si $-0.5 < r < 0.5$ et de corrélation forte si $\text{abs}(r) > 0.5$.



Figure B-1 : Exemple de coefficient de corrélation
([http://fr.wikipedia.org/wiki/Corr\u00e9lation_\(statistiques\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Corr\u00e9lation_(statistiques)))

« Il existe aussi R^2 : Le carré du coefficient de corrélation (pour le cas d'une relation linéaire) est le coefficient de détermination (R^2). Le r exprime la corrélation entre les deux variables, alors que le R^2 exprime le pourcentage de variance de la variable y_1 expliquée par la variable x_1 .

Le coefficient de détermination (R^2) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Certes, le R^2 a ses imperfections, mais son utilité n'a d'égale que sa simplicité.

Deux façons de le définir (entre autres) :

Dans le cadre d'une régression linéaire simple, c'est le carré du coefficient de corrélation.

La deuxième façon est beaucoup plus riche en implications car elle s'applique aussi bien à une régression simple qu'à une régression multiple.

On sait que la valeur y_i d'une observation peut être décomposée en deux parties : une part expliquée par le modèle et une part résiduelle. La dispersion de l'ensemble des observations se décompose donc en variance expliquée par la régression et en variance résiduelle (MSE), inexpliquée. Le R^2 se définit alors comme la part de variance expliquée par rapport à la variance totale, autrement dit de $[(1 - \text{somme des carrés des résidus}) / \text{somme des carrés totale}]$ la somme des carrés totale étant la somme des carrés des distances entre les points du nuage et une droite horizontale qui passerait par son centre de gravité.

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT} \gg (\text{http://www.jybaudot.fr/Correlations/coeffdeterm.html})$$

«

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens
Expliquée	$SCE = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	p	$CME = \frac{SCE}{p}$
Résiduelle	$SCR = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$	n - p - 1	$CMR = \frac{SCR}{n - p - 1}$
Totale	$SCT = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$	n - 1	

» (http://fr.wikipedia.org/wiki/Régression_linéaire_multiple)

Avec n le nombre d'éléments dans l'échantillon et p le nombre de variables explicatives, y la valeur exacte, $\hat{y}$ la valeur estimée par la corrélation.

Dans le meilleur des cas, $SCR = 0$, le modèle arrive à prédire exactement toutes les valeurs de y à partir des valeurs des x_j . SCR est la somme des carrés des résidus. SCT est la somme des carrés totaux.

« Le coefficient de détermination ajusté tient compte du nombre de variables. En effet, le principal défaut du R^2 est de croître avec le nombre de variables explicatives. Or, on sait qu'un excès de variables produit des modèles peu robustes. C'est pourquoi on s'intéresse davantage à cet indicateur qu'au R^2 . Mais ce n'est pas un véritable « carré » et il peut même être négatif. Voici deux

présentations du R^2 ajusté, sachant que certains auteurs donnent une définition légèrement différente :

$$R^2 \text{ ajusté} = R^2 - \frac{p(1-R^2)}{n-p-1} = 1 - \frac{(1-R^2)(n-1)}{n-p-1} \gg$$

(<http://www.jybaudot.fr/Correlations/coeffdeterm.html>)

Avec ici p le nombre de variables explicatives.

B. Description des chaines de Markov

« La théorie des processus à temps discret de Markov »

Il est possible de déduire un processus stochastique qui fournit des probabilités de transition entre les états d'une fenêtre, modélisé comme une variable aléatoire Y_t , pour un pas de temps convenablement choisi. Une possibilité serait de se limiter à des processus de Markov qui ne considèrent que l'état précédent et sont donc indépendants de l'histoire du processus (propriété de Markov). Dans ce cas, nous avons ce qui suit:

$$P(Y_{t+1} = j | Y_t = i, Y_{t-1} = h, \dots)(\mathbf{x}) = P(Y_{t+1} = j | Y_t = i)(\mathbf{x}) = P_{ij}(\mathbf{x})$$

où $P_{ij}(\mathbf{x})$ est la probabilité de transition d'un état i à l'état j , en fonction des paramètres $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_p)$.

L'un des principaux inconvénients de ces processus aléatoires à temps discret est la nécessité de choisir un pas de temps fixe, conduisant à une perte possible de l'information (par exemple des ouvertures de courte durée peuvent être ignorées si elles durent moins que le pas de temps donné), ou à des calculs redondants (par exemple, pour les périodes où il n'y a pas de changement d'état). En outre, les transitions de probabilités dérivées restent dépendantes du pas de temps, ce qui limite quelque peu leur généralisation. Ainsi, le choix de l'intervalle de temps doit être soigneusement déterminé. » (Haldi and Robinson, 2009a)

C. Théorie de l'analyse de survie

« (Kleinbaum and Klein, 2005) L'analyse de survie tente généralement de modéliser les distributions de durées de survie jusqu'à ce qu'un échec intervienne.⁷ Ainsi, cette approche pourrait être utilisée pour modéliser la durée pendant laquelle un occupant laissera une fenêtre fermée après son arrivée, ou ouverte depuis son ouverture, selon une variable motrice pertinente. Les durées t sont modélisées comme une variable aléatoire non-négative T , avec la fonction de répartition $F(t) = P(T \leq t)$ et la fonction de densité de probabilité correspondante $f(t)$. On définit alors la fonction de survie associée (ou la fonction de fiabilité) $S(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t)$ et la fonction de risque $h(t) = f(t)/S(t)$. Il résulte de ces définitions que $f(t) = dS(t)/dt$ et $h(t) = d \log(S(t))/dt$.

Une force de ces méthodes statistiques réside dans la possibilité d'inclure le temps de survie contenant des informations partielles comme la survie pendant au moins une période de temps donnée, sans avoir besoin de nouvelles connaissances sur le processus après cette période. L'inclusion de ces soi-disant données censurées permet à des observations incomplètes, par exemple comme la fermeture au moment du départ ou l'absence d'ouverture pendant toute la période d'occupation, d'être incluses dans la modélisation de la durée des ouvertures de fenêtres. A partir de r_i le nombre d'éléments survivant jusqu'à l'instant t_i (y compris les observations censurées), et d_i le nombre d'"échecs" à l'instant t_i , nous constatons que la probabilité conditionnelle de survivre au-delà de t_i , sachant que le sujet est vivant juste avant t_i est donnée par $(r_i - d_i)/r_i$. La fonction de survie peut alors être déduite par l'estimateur de Kaplan-Meier non-paramétrique,

$S(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) = \prod_{i|t_i < t} \left(1 - \frac{d_i}{r_i}\right)$, qui définit sans ambiguïté un estimateur de la distribution $F(t) = 1 - S(t)$.

Toutefois, afin d'effectuer une estimation paramétrique, une distribution de survie doit être ajustée en utilisant la régression du maximum de vraisemblance. Le lecteur peut consulter (Kleinbaum and Klein, 2005) pour plus de détails. Nous considérons ici deux distributions spéciales à utiliser dans notre étude:

- La distribution exponentielle, avec $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$, $S(t) = \exp(-\lambda t)$, ce qui suppose un taux de risque constant $h(t) = \text{const}$, est le modèle le plus simple.
- La distribution de Weibull, avec $f(t) = \lambda \alpha (\lambda t)^{\alpha-1} \exp(-(\lambda t)^\alpha)$, $S(t) = \exp(-(\lambda t)^\alpha)$ et $h(t) = \lambda \alpha (\lambda t)^{\alpha-1}$, où le paramètre α est appelé la forme et λ l'échelle, offre plus de flexibilité. Dans le cas particulier où $\alpha = 1$, elle correspond à la distribution exponentielle. Lorsque $\alpha < 1$, $h(t)$ diminue avec t , et les échecs sont plus fréquents sur des petites périodes, et inversement pour $\alpha > 1$.

Il est à noter qu'une variable aléatoire T a une distribution exponentielle $S(t) = \exp(-\lambda t)$ si et seulement si elle a la propriété sans mémoire $P(T > s + t | T > s) = P(T > t)$ pour tous $s, t \geq 0$. En d'autres termes, un processus de Markov peut être utilisé de façon rigoureuse si et seulement si les délais entre les actions peuvent être correctement modélisés par une distribution exponentielle. » (Haldi and Robinson, 2009a)

⁷ Par exemple, les applications typiques comprennent l'étude des temps de survie des patients atteints de leucémie jusqu'à la mort (avec évaluation de l'effet des traitements différenciés) ou la prédiction de la durée de vie moyenne des composants industriels dans des conditions différentes.

Références

- Ajzen, I., Brown, T.C., Carvajal, F., 2004. Explaining the Discrepancy between Intentions and Actions: The Case of Hypothetical Bias in Contingent Valuation. *Personality and Social Psychology Bulletin* 30, 1108-1121.
- Ajzen, I., Fishbein, M., 2005. The influence of attitudes on behavior, In: Albarracín D, Johnson BT, Zanna MP, editors. *The handbook of attitudes*. N. J. Mahwah: Erlbaum, pp. 173-221.
- Andersen, R.V., 2009. Occupant behaviour with regard to control of the indoor environment, Ph.D. Thesis. International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- Baker, N., Steemers, K., 2000. *Energy and environment in architecture: a technical design guide*. E & FN Spon.
- Bauman, F., McClintock, M., 1993. A Study of Occupant Comfort and Workstation Performance in PG&E's Advanced Office Systems Testbed, Final Report to PG&E Research and Development. Center for Environmental Design Research, University of California, Berkeley, p. 135.
- Bordass, B., Heasman, T., Leaman, A., Perry, M., 1994. Daylight use in open-plan offices: the opportunities and the fantasies, *CIBSE National Lighting Conference*, pp. 251-259.
- Bourgeois, D., 2005. Adding detailed occupancy prediction and advanced behavioural modelling in energy simulation, PhD. Faculté des études supérieures, Université Laval.
- Brundrett, G.W., 1977. Ventilation: A behavioural approach. *International Journal of Energy Research* 1, 289-298.
- Bülöw-hübe, H., 2000. Office worker preferences of exterior shading devices, EURO SUN, Copenhagen, Denmark, pp. Page 27 of 43 version of this paper has been published in the *International Journal Lighting Research & Technology*, 35:23.
- CIBSE, 2006. *CIBSE guide A, Environmental design*, 7th ed. ed. Chartered Institution of Building Services Engineers, London.
- de Dear, R., Brager, G.S., 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.
- Dick, J.B., Thomas, D.A., 1951. Ventilation research in occupied houses. *Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers* pp. 279-305.
- Ebel, W., Großklos, M., Knissel, J., Loga, T., 2003. Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern : eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der "Gartenhofsiedlung Lummerlund" in Wiesbaden-Dotzheim. *Energieteil des Endberichts; Bauprojekt, messtechnische Auswertung*. Institut für Wohnen und Umwelt IWU, Darmstadt, p. 287.
- Emery, A.F., Kippenhan, C.J., 2006. A long term study of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the Pacific Northwest constructed according to improved thermal standards. *Energy* 31, 677-693.
- Fabi, V., Andersen, R.V., Corgnati, S., Olesen, B.W., 2012. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment* 58, 188-198.
- Foster, M., Oreszczyn, T., 2001. Occupant control of passive systems: the use of Venetian blinds. *Building and Environment* 36, 149-155.
- Fritsch, R., Kohler, A., Nygård-Ferguson, M., Scartezzini, J.L., 1990. A stochastic model of user behaviour regarding ventilation. *Building and Environment* 25, 173-181.
- Goven, J., Langer, E.R., 2009. The potential of public engagement in sustainable waste management: designing the future for biosolids in New Zealand. *Journal of Environment Management* 90, 921-930.
- Guerra Santin, O., Itard, L., Visscher, H., 2009. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings* 41, 1223-1232.
- Haldi, F., Robinson, D., 2008. On the behaviour and adaptation of office occupants. *Building and Environment* 43, 2163-2177.

- Haldi, F., Robinson, D., 2009a. Interactions with window openings by office occupants. *Building and Environment* 44, 2378-2395.
- Haldi, F., Robinson, S., 2009b. A comprehensive stochastic model of window usage: theory and validation, Eleventh International IBPSA Conference, July 27-30, 2009, Glasgow, Scotland.
- Herkel, S., Knapp, U., Pfafferott, J., 2005. A preliminary model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings Eighth REHVA world congress clima 2005, Lausanne, Switzerland
- Herkel, S., Knapp, U., Pfafferott, J., 2008. Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and Environment* 43, 588-600.
- Humphreys, M.A., Nicol, J.F., 1998. Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions* 104, pp. 991-1004.
- Hunt, D.R.G., 1979. The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy. *Building and Environment* 14, 21-33.
- Inoue, T., Kawase, T., Ibamoto, T., Takakusa, S., Matsuo, Y., 1988. The development of an optimal control system for window shading devices based on investigations in office buildings. *ASHRAE Transactions* 104, 1034-1049.
- Kleinbaum, D.G., Klein, M., 2005. *Survival analysis – a self-learning text*. Springer.
- Lindelöf, D., Morel, N., 2006. A field investigation of the intermediate light switching by users. *Energy and Buildings* 38, 790-801.
- Lindsay, C.R.T., Littlefair, P.J., 1993. PD233/92 - Occupant use of Venetian blinds in offices. Building Research Establishment.
- Love, J.A., 1998. Manual switching patterns in private offices. *Lighting Research and Technology* 30, 45-50.
- Lyberg, M.D., 1982. Energy losses due to airing by occupants, CIB commission W67 symposium – energy conservation in the built environment Dublin, Ireland.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C., 2008. Observation-based models of user control actions in buildings, PLEA 2008 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C., 2009a. Toward empirically-based models of people's presence and actions in buildings, Building Simulation 2009 - Eleventh International IBPSA Conference, July 27-30, 2009, Glasgow, Scotland.
- Mahdavi, A., Pröglhöf, C., 2009b. User behaviour and energy performance in buildings, IEWT 2009 - Internationalen Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, Vienne.
- Maier, T., Krzaczek, M., Tejchman, J., 2009. Comparison of physical performances of the ventilation systems in low-energy residential houses. *Energy and Buildings* 41, 337-353.
- McCartney, K.J., Nicol, J.F., 1997. Comfort in office buildings: a wider approach based on adaptive theory, CIBSE National Conference, London, UK, pp. 184-192.
- Nagelkerke, N.J.D., 1991. A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika* 78, 691-692.
- Newsham, G.R., Mahdavi, A., Beausoleil-Morrison, I., 1995. Lightswitch: a stochastic model for predicting office lighting energy consumption., Proceedings of the right light three, 3rd European conference on energy efficient lighting, Newcastle, UK., pp. 59–66.
- Newsham, G.R., Marchand, R.G., Svec, J.M., Veitch, J.A., 2002. The Effect of power constraints on occupant lighting choices and satisfaction: a pilot study IESNA Annual Conference, Aug. 5-7, Salt Lake City, pp. 115-131.
- Nicol, F., Humphreys, M., 2007. Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort. *Solar Energy* 81, 295-304.
- Nicol, F., Raja, I., 1997. Modelling temperature and human behaviour in buildings. *IBPS News* (International Building Performance Simulation Association, Reading, UK) 9, 8-11.
- Nicol, J., 2001. Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. In Proceedings of seventh international IBPSA conference.

- Nicol, J.F., 1974. An analysis of some observations of thermal comfort in Roorkee, India and Baghdad, Iraq.
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34, 563-572.
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., 2004. A Stochastic Approach to Thermal Comfort--Occupant Behavior and Energy Use in Buildings. *ASHRAE Transactions* 110, 554-568.
- Page, J., Robinson, D., Morel, N., Scartezzini, J.L., 2008. A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings* 40, 83-98.
- R-Development-Core-Team, 2007. R: A Language and Environment for Statistical Computing
- Raja, I.A., Nicol, J.F., McCartney, K.J., 1998. Natural ventilated buildings: use of controls for changing indoor climate. *Renewable Energy* 15, 391-394.
- Raja, I.A., Nicol, J.F., McCartney, K.J., Humphreys, M.A., 2001. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy and Buildings* 33, 235-244.
- Rea, M.S., 1984. Window blind occlusion: a pilot study. *Building and Environment* 19, 133-137.
- Refsgaard, K., Magnussen, K., 2009. Household behaviour and attitudes with respect to recycling food waste - experiences from focus groups. *Journal of Environment Management* 90, 760-771.
- Reinhart, C.F., 2001. Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings - Simulation Studies and Analysis of Measurements. Ph.D. thesis. Technical University of Karlsruhe, Faculty of Architecture.
- Reinhart, C.F., 2004. Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy* 77, 15-28.
- Reinhart, C.F., Voss, K., 2003. Monitoring manual control of electric lighting and blinds. *Lighting Research & Technology* 35, 243-260.
- Richardson, I., Thomson, M., 2008a. Domestic active Occupancy Model - Simulation Example (<http://hdl.handle.net/2134/3112>). Loughborough University Institutional Repository.
- Richardson, I., Thomson, M., 2008b. Domestic Lighting Demand Model - Simulation Example (<http://hdl.handle.net/2134/4065>). Loughborough University Institutional Repository.
- Richardson, I., Thomson, M., 2010. Domestic Electricity Demand Model - Simulation Example (<http://hdl.handle.net/2134/5786>). Loughborough University Institutional Repository.
- Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., 2008. A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings* 40, 1560-1566.
- Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., Clifford, C., 2010. Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings* 42, 1878-1887.
- Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., Delahunty, A., 2009. Domestic lighting: A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings* 41, 781-789.
- Rijal, H.B., Tuohy, P., Humphreys, M.A., Nicol, J.F., Samuel, A., Clarke, J., 2007. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings* 39, 823-836.
- Robinson, D., Haldi, F., 2011. Modelling Occupants' Presence and Behaviour - Part I. *Journal of Building Performance Simulation* 4, 301-302.
- Rubin, A.I.C., Belinda LowenhauptTibbott, Robert L, 1978. Window blinds as a potential energy saver : a case study. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards : for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off, Washington.
- Schweiker, M., 2010. Occupant Behaviour and the Related Reference Levels for Heating and Cooling, Ph.D. dissertation. Tokyo City University.
- Schweiker, M., Shukuya, M., 2009. Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-unit usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions. *Building and Environment* 44, 2137-2149.
- Socolow, R.H., 1978. The twin rivers program on energy conservation in housing: Highlights and conclusions. *Energy and Buildings* 1, 207-242.

- Sutter, Y.F.M.I.n.d.s.a.e., 2003. Etude analytique et expérimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimal dans le cas du travail sur écran de visualisation.
- Tabak, V., de Vries, B., 2010. Methods for the prediction of intermediate activities by office occupants. *Building and Environment* 45, 1366-1372.
- Wang, D., Federspiel, C.C., Rubinstein, F., 2005. Modeling occupancy in single person offices. *Energy and Buildings* 37, 121-126.
- Warren, P.R., Parkins, L.M., 1984. Window-opening behaviour in office buildings. *Building Services Engineering Research and Technology* 5, 89-101.
- Yun, G.Y., Steemers, K., 2008. Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer. *Building and Environment* 43, 1471-1482.
- Yun, G.Y., Steemers, K., 2010. Night-time naturally ventilated offices: Statistical simulations of window-use patterns from field monitoring. *Solar Energy* 84, 1216-1231.