



Titre: Développement d'un modèle d'estimation de l'inconfort des passagers relatif à la pressurisation des cabines d'avion
Title:

Auteur: Emilie Racine
Author:

Date: 2011

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Racine, E. (2011). Développement d'un modèle d'estimation de l'inconfort des passagers relatif à la pressurisation des cabines d'avion [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/626/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/626/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Daniel Imbeau
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE L'INCONFORT
DES PASSAGERS RELATIF À LA PRESSURISATION DES CABINES
D'AVION

EMILIE RACINE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE EN SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2011

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire est intitulé:

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE L'INCONFORT DES
PASSAGERS RELATIF À LA PRESSURISATION DES CABINES D'AVION

Présenté par : RACINE Emilie

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise en sciences appliquées en génie industriel

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. ROBERT Jean-Marc, Ph. D., président

M. IMBEAU Daniel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. BASSETTO Samuel-Jean, Ph. D., membre

DÉDICACE

*À mes parents et ami,
je vous offre le fruit de mon dur labeur
qui m'a fait grandir et devenir qui je suis aujourd'hui.*

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que les Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT). Ces deux organismes ont assuré le financement de mes études de maîtrise en génie industriel à l'École Polytechnique de Montréal et ce, en collaboration avec une entreprise québécoise de renom, Bombardier Aéronautique.

En plus de découvrir le monde fascinant de l'aéronautique, j'ai eu la chance et l'honneur de travailler avec des personnes passionnées par leur travail. Parmi celles-ci, je tiens particulièrement à remercier M. Johan Johnsson de m'avoir accueillie au sein de son équipe de travail et de m'avoir offert la chance d'étudier la notion de confort pour les passagers des avions d'affaires. J'adresse un merci très spécial à M. Ben Pownall pour son support et sa compréhension. Au fil des jours, il a su partager une partie de son savoir mais surtout, me transmettre sa passion pour les avions. Mon expérience en sa compagnie restera gravée dans ma mémoire. J'espère un jour avoir la chance de donner au suivant une partie de cette générosité et la patience dont il a fait preuve. Merci infiniment Ben de m'avoir permis de démarrer ma carrière professionnelle sur des bases aussi solides et captivantes.

Je tiens également à remercier mon directeur d'étude, M. Daniel Imbeau. Il a su semer une graine qui a bien germé dans mon esprit. Grâce à ses précieux conseils, son assurance et ses bons mots d'encouragement, j'ai franchi le seuil des études supérieures et je les achève aujourd'hui avec fierté. Merci Daniel pour ton support et ta patience absolue, je n'aurais pas su faire un meilleur choix pour diriger mes recherches. Qui sait, peut-être un jour, ce sera moi qui sèmerai les graines?

Enfin, un merci tout particulier à Alexis Dugré, stagiaire en génie aérospatial avec qui j'ai partagé une majeure partie de la recherche. Ses connaissances et sa vivacité d'esprit ont permis d'amener la recherche à un niveau supérieur. Ce fut un grand plaisir de travailler sur ce projet avec lui. Merci beaucoup Alexis pour ton aide et ton apport à la recherche, grâce à ton œil scientifique et à ta façon de raisonner, j'ai enfin compris de quelle façon un ingénieur réfléchit!

RÉSUMÉ

L'industrie de l'aéronautique travaille sans relâche au développement de technologies d'avant-garde; ce n'est toutefois pas toujours chose simple lorsqu'il est question d'une approche de conception centrée sur l'utilisateur. De fait, de façon à maintenir un avantage compétitif, les fabricants d'avions doivent développer les domaines de connaissances spécifiques qui leur assureront un avenir durable. Dans ce contexte, un élément-clé est sans contredit l'amélioration de la compréhension des utilisateurs. Ainsi, lorsqu'on considère l'utilisateur d'un avion, la notion de confort joue un rôle primordial. Le confort peut être mesuré selon des critères ergonomiques, physiques ou psychologiques, mais demeure une mesure souvent subjective et difficile à qualifier dans son ensemble. Ce mémoire s'intéresse plus particulièrement à l'influence de la pressurisation des cabines d'avion sur le confort de ses passagers. Les deux principales questions qui ont mené nos travaux sont les suivantes. Est-il nécessaire d'abaisser l'altitude interne de la cabine au niveau de la mer pour accroître le confort des passagers? Quel est le seuil d'altitude auquel le corps humain commence à ressentir une variation au niveau du confort? Dans cette étude, une analyse de la littérature concernant les répercussions physiologiques d'une variation de pression sur le corps humain a été réalisée. Celle-ci couvre les risques en haute altitude, l'oxygénation des tissus et le processus d'adaptation physiologique aux changements de pression. L'analyse de la saturation d'oxygène dans le sang apparaît également comme un facteur déterminant du confort.

La triangulation des résultats issus des diverses études recensées a permis la construction d'un modèle novateur permettant d'estimer les probabilités d'inconfort ressenties par les passagers en période de vol selon leurs conditions de santé et l'altitude simulée dans la cabine. Le modèle fournit trois courbes. La première représente une population en bonne santé et ne présentant pas de pathologies considérées à risques en haute altitude. La seconde courbe représente quant à elle une population en général et fournit des seuils plus conservateurs. Enfin, la dernière courbe simule un cas de personne à risques en haute altitude. L'application de ce modèle, en cours de validation à travers des projets de conception d'avions, contribuera à l'amélioration des connaissances sur le confort pour les passagers.

ABSTRACT

Aerospace has always been about developing cutting edge technologies, but this has not always been done with a passenger centered approach. In order to maintain a competitive advantage, aircraft manufacturers need to develop specific knowledge domains that will also ensure them a sustainable future. In this context, one key aspect that is being considered is an improved understanding of the users. When considering the users of an aircraft, the notion of comfort plays an essential role. Comfort can be measured according to a variety of criteria of ergonomic, physical or psychological nature, and is therefore subjective and difficult to qualify in general. This thesis focuses on the influence of aircraft cabin pressure on the comfort of passengers. Is it necessary to lower the internal cabin altitude at sea level to increase the comfort of the passengers? What is the threshold of altitude for which the human body begins to feel a variation on comfort? In this study, regarding comfort factors in high altitude, an analysis of the literature about the physiological repercussions of a variation of pressure on the human body is presented. This analysis covers risks in high altitude, the oxygenation of tissues and the process of physiological adaptation to pressure variation. In addition, the analysis of the oxygen saturation in the blood also appears as a determining factor of the comfort.

The synthesis of the results stemming from diverse studies allowed the construction of an innovative model allowing the estimation of the level of discomfort felt by the passengers during flight according to their health conditions and the cabin pressurization. This model contains three curves that are used to gauge the level of discomfort. The first one represents a healthy population and/or not presenting pathologies considered at risks in high altitude. The second curve, based on various studies, represents a population in generally and thus supplies more conservative thresholds. Finally, the last curve, feigns a case of person at risks in high altitude. The application of this model, currently in the process of validation via aircraft design projects, will contribute to improve the level of comfort of the passengers.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XI
GLOSSAIRE	XII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE L'INCONFORT RESSENTI PAR L'HUMAIN SELON L'ALTITUDE	3
1.1 Le confort	3
1.2 Symptômes d'inconfort	5
1.3 Adaptation physiologique aux changements de pression.....	6
1.4 Oxygénation des tissus	8
1.5 La pression partielle en oxygène dans les artères selon la pression atmosphérique	9
1.6 Dissociation de l'oxyhémoglobine	10
1.7 Origine de l'inconfort.....	15
1.7.1 Susceptibilité aux inconforts en altitude.....	15
1.7.2 L'état de santé et l'altitude.....	16
1.7.3 Autres facteurs d'ambiance thermique	18

1.7.4	L'impact du temps de vol	19
1.8	Variation de la saturation en oxygène dans le sang	21
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE CONSTRUCTION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE L'INCONFORT DES PASSAGERS.....		22
2.1	Construction du modèle de probabilités d'inconfort.....	22
2.2	Analyse de l'impact de la déviation de la courbe ODC sur le modèle	25
CHAPITRE 3 RÉSULTATS DE L'UTILISATION DU MODÈLE D'ESTIMATION DE L'INCONFORT DES PASSAGERS		28
3.1	Modèle de probabilité d'inconfort	28
3.2	Incidence de pathologies typiques sur le modèle.....	29
3.3	Incidence d'une augmentation du taux d'oxygène sur le modèle.....	32
CHAPITRE 4 DISCUSSION		33
4.1	Utilisation du modèle	34
4.2	Interprétation des résultats.....	34
4.3	Limitations du modèle.....	35
4.4	Perspectives de recherche.....	37
CONCLUSION		38
BIBLIOGRAPHIE		39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Éléments affectant l'oxygénation des tissus et organes du corps humain, Tortora et Grabowski (2000), Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009), Sende (2007) et Essig et al. (2008).	8
Tableau 1.2 : Effet de la partie plateau de la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (ODC) sur la saturation en oxygène du sang pour différentes gammes d'altitudes.	14
Tableau 1.3 : Pression hypobare et saturation artérielle d'oxygène.....	14
Tableau 1.4 : Pourcentage de la population adulte fumeurs pour l'année 2009 selon les nations.	17
Tableau 2.1 Valeurs de $F_{I}O_2$, pH_2O , $PaCO_2$, R et A-a gradient utilisés pour les études présentées dans le modèle de probabilités d'inconfort en altitude.	23
Tableau 2.2 Valeurs de SaO_2 (%) selon la PaO_2 pour les études présentées dans le modèle de probabilités d'inconfort en altitude.....	24
Tableau 2.3 Valeurs de ΔSaO_2 (point de %) pour les études présentées dans le modèle de probabilités d'inconfort en altitude.....	25
Tableau 2.4 Valeurs de $PaCO_2$, de pH et de températures corporelles établies pour les cas de polycythémie secondaire, de MPOC légère et de MPOC modérée (OPIQ; Oakes 2008).....	26

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Résumé des symptômes d'AMS.	6
Figure 1-2 : Conséquences d'une diminution de pression atmosphérique sur l'inconfort.	7
Figure 1-3 : Équation des gaz alvéolaires.	10
Figure 1-4 : Courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (ODC).	11
Figure 1-5 Conditions associées à l'alternance de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène....	13
Figure 1-6 : Variation de la SaO_2 selon l'état de santé pour différentes altitudes.	18
Figure 1-7 : Le niveau de malaise, de douleurs musculaires et de fatigue liés à l'altitude selon le temps de vol (tiré de Muhm et al. 1997, p.25).	20
Figure 2-1 : Équations utilisées pour la réalisation du modèle de probabilité d'inconfort en altitude.....	24
Figure 2-2 : Exemple de calcul pour l'obtention de la valeur de ΔSaO_2	25
Figure 3-1 : Le confort selon l'altitude de cabine.	29
Figure 3-2 : Analyse de l'incidence de pathologies typiques sur le modèle de probabilité d'inconfort.....	31
Figure 3-3 : Incidence de l'augmentation du taux d'oxygène de 2 % et de 5 % sur les courbes « Étude AD », « Autres Études » et « Étude Boeing ».	32

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A-a gradient	Alvéoles-artères gradient
AD study	Advance design group study
AMS	Acute mountain sickness
AMS-c	Acute mountain sickness – cerebral
AMS-r	Acute mountain sickness – respiratory
FAA	Federal aviation administration
CNRC	Conseil national de recherche du Canada
CO ₂	Dioxyde de carbone
F _I O ₂	Fraction d’oxygène dans l’air
HEPA	High efficiency particulate air
O ₂	Oxygène
ODC	Oxyhemoglobin dissociation curve
ORL	Oto-rhino-laryngologie
PaCO ₂	Pression partielle en dioxyde de carbone dans le sang artériel
PACO ₂	Pression partielle en dioxyde de carbone dans le gaz alvéolaire
PaO ₂	Pression partielle en oxygène dans le sang artériel
PAO ₂	Pression partielle en oxygène dans le gaz alvéolaire
P _{atm}	Pression atmosphérique
pH ₂ O	Pression partielle en eau (monoxyde de dihydrogène) de l’air
PO ₂	Pression partielle en oxygène
R	Quotient respiratoire (QR)
SaO ₂	Saturation en oxygène dans le sang

GLOSSAIRE

Capillaire pulmonaire :	Petit vaisseau sanguin qui relie les artérioles (les plus petites divisions des artères) et les veinules (les plus petites divisions de la veine) au niveau pulmonaire.
Hémoglobine :	Pigment des globules rouges transportant l'oxygène entre l'appareil respiratoire et les cellules du corps.
Hypoxie :	Diminution de la concentration d'oxygène dans le sang.
Oxyhémoglobine :	Partie de l'oxygène dans le sang, après le passage de la membrane alvéolocapillaire, se liant à l'hémoglobine pour le transport vers les tissus.
Polycythémie :	Augmentation remarquable de la masse totale d'érythrocytes (globules rouges) circulant dans le sang.
Polyglobulie :	Augmentation du nombre de globules rouges dans le sang.
Ratio céphalo-rachidien :	Espace disponible entre le cerveau et la boîte crânienne permettant l'expansion de l'organe cérébral lors d'une augmentation du flux sanguin.
Rythme circadien :	Rythme biologique de l'être humain se rapportant à une période de 24 heures.
Stase sanguine :	Ralentissement ou arrêt de la circulation d'un liquide organique.
Tachycardie :	Fréquence cardiaque plus rapide que la normale.
Vasoconstriction :	Diminution du calibre des vaisseaux sanguins par contraction de leurs cellules musculaires.

INTRODUCTION

Le confort dans les cabines d'avion est devenu une préoccupation majeure pour l'industrie aéronautique en raison de la forte compétition régnant dans ce secteur. De plus en plus d'avions d'affaires tendent à augmenter la pressurisation de la cabine avec l'altitude de vol pour simuler, à l'intérieur de la cabine, une altitude plus proche de celle du niveau de la mer dans le but d'améliorer le confort des passagers. Comme les réactions sont très positives à ce sujet, la prochaine génération d'avions de ligne suivra cette même tendance. La baisse de pression, associée à une augmentation de l'altitude simulée dans la cabine, est à l'origine de changements physiques et psychologiques dans le corps humain qui provoquent un certain inconfort pour les passagers, en période de vol. Ainsi, plus l'altitude simulée dans la cabine est proche du niveau de la mer, meilleur est le confort pour les passagers. En revanche, une augmentation de la pressurisation de la cabine entraîne des conséquences au niveau de la conception de l'aéronef dont, notamment, un poids plus élevé afin que sa structure soit plus robuste, lequel entraîne à son tour une augmentation du coût d'opération. Le choix de la pressurisation dans la cabine apparaît comme un compromis à établir entre le niveau de confort à assurer aux passagers et les impératifs économiques.

Nous serions tentée de croire que la solution pour accroître le confort à bord est de tenter d'obtenir un niveau d'altitude se rapprochant le plus possible de celui du niveau de la mer. Toutefois, peu d'études traitent de façon précise des limites de confort en altitude ainsi que de la pression à laquelle les symptômes d'inconfort apparaissent. Des recherches documentent très bien les conditions des symptômes du mal des montagnes, l'AMS (*Acute Mountain Sickness*), relatifs aux malaises ressentis lors d'expéditions en haute altitude (McFarland 1971; Hackett et Roach 2001; West 2004). La plupart d'entre elles portent sur des altitudes supérieures à 2400 m (8000 pi), alors que, dans les cabines d'avion, l'altitude de cabine varie entre 0 et 2400 m (8000 pi).

Par ailleurs, des études ont été effectuées afin d'établir la réglementation du plafond d'altitude jugé sécuritaire, soit à 2400 m (8000 pi) en période de vol (FAA 2001). Ces études fournissent des informations très utiles permettant de comprendre de quelle façon un changement d'altitude peut affecter le corps humain (CNRC 2002; McFarland 1971; FAA 2001). Toutefois, leurs buts

n'étaient pas de définir les limites du confort pour les passagers en période de vol, mais plutôt d'indiquer les limites sécuritaires pour les personnes à risques voyageant dans les avions commerciaux.

Comme c'est souvent le cas, l'écart entre les conditions environnementales assurant le confort d'une personne et celles assurant sa sécurité peut être important; les conditions environnementales de sécurité dans une cabine d'avion peuvent se révéler être très inconfortables pour une majorité de passagers.

L'objectif de cette étude est d'analyser la littérature consacrée aux effets physiologiques de la pression atmosphérique sur le corps humain afin de dégager des repères permettant la construction d'un modèle d'estimation de l'inconfort ressenti par les passagers d'un avion en période de vol. Ce modèle pourra éventuellement guider les concepteurs d'aéronefs dans le choix de niveaux de pressurisation des cabines.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE L'INCONFORT RESSENTI PAR L'HUMAIN SELON L'ALTITUDE

1.1 Le confort

D'un auteur à l'autre, les définitions varient beaucoup (Mayr 1959; Branton 1972; Osborne 1978; Slater 1985; Metzger 1994). Selon le Dictionnaire Larousse (2010), le confort est défini comme étant « un ensemble de commodités produisant un bien-être et une tranquillité psychologique, intellectuelle et morale obtenue par le rejet de toute préoccupation ». Initialement, les concepteurs tentaient de réduire au minimum le niveau d'inconfort afin d'introduire un sentiment positif de confort (Osborne 1978). Dans le même ordre d'idées, Branton (1972) définit le confort par la négative; comme pour la santé, c'est au moment où il vient à faire défaut qu'il est possible de le qualifier. Ainsi, le meilleur moyen de mesurer le confort serait par son absence. En ce qui a trait au confort dans les transports, Mayr (1959) le fait reposer sur trois principes : le confort de conduite étant le confort du véhicule en lui-même; le confort local, correspondant à l'expérience d'une station (par exemple l'expérience dans un aéroport); et le confort organisationnel identifiable au bon rapport et à la fiabilité du service. L'auteur précise que le confort dépend en grande partie de l'opinion et des attentes d'un passager.

Selon le moment, le coût et la raison du voyage, la perception du confort par un passager peut varier. Ainsi, entre un vol de 10 heures et un autre de 10 minutes, les attentes d'un passager face au confort (ou son niveau de tolérance à l'inconfort) ne seront pas les mêmes. Quehl (2001) explique que le concept du confort est interprété différemment selon la nationalité. Les Anglais percevraient le confort davantage comme un bien-être physique et mental caractérisé par l'absence de douleur, de stress et d'anxiété. Les Allemands, quant à eux, définissent le confort par un environnement luxueux. Selon Metzger (1994) et Quehl (2001), le confort est principalement associé à un sentiment d'aise, de relaxation, de commodité et de bien-être. Le passager se trouve influencé par des facteurs physiques (objectifs) et psychologiques (subjectifs). Compte tenu du fait qu'aucun consensus n'existe pour cette notion, l'interprétation du confort que propose Slater (1985) semble la plus complète et a donc été la définition considérée dans la présente étude. Selon lui, le confort représente un état de plaisance physiologique, psychologique

et physique en harmonie entre l'être humain et son environnement (Slater 1985 dans Quehl 2001, p. 11).

Ainsi, Slater (1985) conçoit la notion de confort selon trois dimensions : une première dimension physiologique relative au confort des membres du corps; une seconde, psychologique, s'associe à la capacité de l'esprit à se tenir en état de satisfaction, créant ainsi une image positive (bien-être); et une dernière relative à l'environnement physique de la personne. Cette troisième dimension peut être influencée par les deux premières, soit par le niveau de confort physiologique et/ou psychologique au moment où un inconfort physique est ressenti. Afin d'illustrer l'interrelation entre ces dimensions, nous ferons appel à l'exemple d'un homme voyageant en classe Affaires. Bien que l'environnement physique soit très confortable, le passager souffre de douleurs chroniques au dos et se montre contrarié de voyager sur cette classe puisque normalement, il voyage en première classe. Ses attentes relatives au confort seront probablement élevées et il percevra l'environnement (siège + espace) en classe Affaires comme inconfortable. Inversement, une personne habituée à voyager en classe Économique sera probablement enchantée par le confort offert en classe Affaires. Il s'agit pourtant du même environnement que celui de l'homme contrarié. Ce bref exemple illustre bien que l'état physiologique et psychologique du passager influence sa perception globale du confort de l'environnement physique. Pour qu'il puisse y avoir une situation de confort, la définition de Slater démontre que la notion centrale sur laquelle repose les trois dimensions est l'équilibre entre celles-ci.

Tout comme Slater, Vink (2005) perçoit la notion de confort comme étant la contribution de trois facteurs menant à trois situations de confort distinctes. Selon lui, une situation de confort ou d'inconfort est liée premièrement aux facteurs psychologiques d'une personne, formés de ses expériences antérieures et de son état d'esprit avant et après l'exposition. On retrouve ensuite les facteurs physiques de la personne et de son environnement telles que la température, l'humidité, la posture et les points de pression. En dernier lieu, on complète avec les facteurs physiologiques de la personne telles que la vue, l'odorat et l'ouïe. Vink explique que la combinaison des ces trois facteurs provoque l'une des trois situations de confort suivantes : une situation d'inconfort (une ou plusieurs des composantes sont perturbées); une situation de « non inconfort » (pas d'inconfort et pas de confort); une situation de confort (aucune des composantes ne sont perturbées et il y a davantage de confort qu'attendu préalablement).

1.2 Symptômes d'inconfort

Selon les recherches menées respectivement par Tortora et Grabowski (2000), Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009), Savourey et al. (1995) et Hackett et Roach (2001), une comparaison est possible entre les symptômes du mal des montagnes (AMS) ou du mal d'altitude, ressentis par les alpinistes en haute altitude et ceux rapportés par les passagers des avions (Figure 1-1). Les symptômes d'AMS, relatifs à l'inconfort physiologique présenté par Slater (1985), sont caractérisés par l'apparition de maux de têtes, de fatigue, d'insomnie, de nausées, d'étourdissements, de perte d'appétit et de difficultés à accomplir des tâches complexes. Les symptômes majeurs d'AMS peuvent apparaître dans des cas extrêmes : ils ne sont donc pas applicables pour le cas des cabines d'avion, à l'exception du cas d'un passager présentant de graves problèmes de santé.

Une étude réalisée par le Centre des sciences de la santé de l'Université d'Oklahoma (Muhm et al. 2007), en collaboration avec la compagnie Boeing, a tenté de déterminer les effets de l'altitude sur l'inconfort des passagers. Suite à des simulations de vol de 20 heures réalisées en chambre hypobare, auprès d'un groupe de 500 participants âgés entre 21 à 75 ans, les résultats ont montré qu'entre une altitude de 2100 m et 2400 m (7000 pi et 8000 pi), il y aurait une baisse de 4 % de l'oxygène dans le sang et qu'après une exposition de trois à neuf heures, les personnes non acclimatées commenceraient à ressentir des symptômes d'inconfort. On entend par personnes non acclimatées les personnes vivant au niveau de la mer, dont les organismes sont habitués, « acclimatés » à ce niveau de pression. Ainsi, lorsque ces personnes se trouvent en haute altitude, elles ressentent des inconforts physiques puisque leurs corps subissent un déséquilibre au niveau des échanges gazeux dans les vaisseaux sanguins. Il en est tout autrement pour les personnes acclimatées en haute altitude; leurs organismes retrouvent l'équilibre gazeux nécessaire et elles sont habituées, « acclimatées » à la pression de l'environnement. Les résultats de Muhm et al. (2007) ont démontré également qu'à des altitudes inférieures à 1800 m (6000 pi), aucun changement significatif n'a été ressenti par les passagers. Hackett et Roach (2001) rapportent que des symptômes du mal d'altitude apparaîtraient généralement après une période de six heures en haute altitude et auraient tendance à augmenter jusqu'à l'occurrence de 24 heures. Par la suite, ils tendraient à s'atténuer jusqu'à une acclimatation parfaite des sujets.

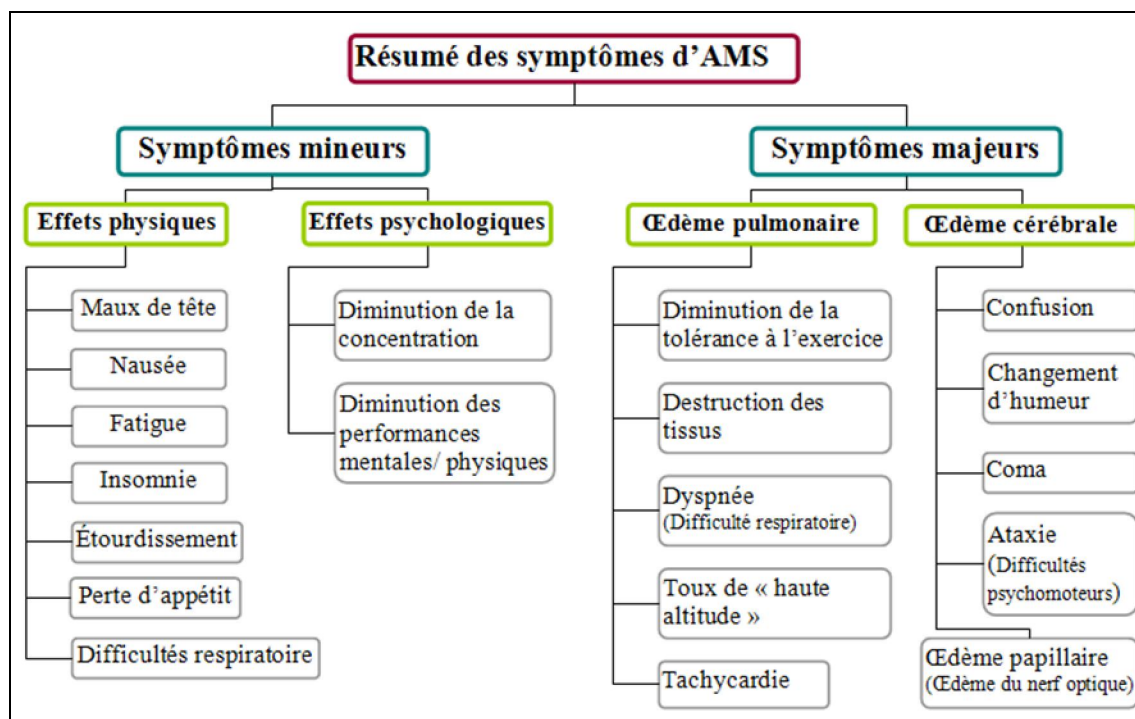


Figure 1-1 : Résumé des symptômes du mal des montagnes.

1.3 Adaptation physiologique aux changements de pression

Muhm et al. (2007), Savourey et al. (1995), Brundrett (2002), CNRC (2002), Space et Nagda (2000) ainsi que Baele et Van der Linden (2002) ont montré que lorsque la pression à l'intérieur de la cabine diminue, il se crée un déséquilibre au niveau des échanges gazeux dans les vaisseaux sanguins, provoquant ainsi un début d'hypoxie, à l'origine des symptômes d'inconfort. Selon Tortora et Grabowski (2000) et Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009), l'hypoxie se caractérise par un déficit en oxygène dans les tissus. Il existe quatre types d'hypoxie déterminés selon leur origine. Le type traité dans cette étude est l'hypoxie hypoxique qui résulte d'une faible pression d'oxygène dans le sang artériel et causé principalement par une exposition à une haute altitude. Lors de l'apparition des premiers symptômes d'hypoxie, le corps déclenche un mécanisme de compensation afin de recouvrer l'équilibre (Figure 1-2). Ce mécanisme se reconnaît par trois principaux facteurs. On retrouve en premier lieu la fréquence cardiaque qui augmente pour ajuster les échanges gazeux dans le sang. Cette accélération crée une augmentation du débit sanguin, l'apparition d'une tachycardie et d'une vasoconstriction des

vaisseaux sanguins. L'accélération du flux sanguin expose les personnes ayant des problèmes cardiovasculaires à des risques supérieurs puisque l'organisme doit fournir un effort accru afin de rétablir l'équilibre.

Un deuxième facteur généré par le mécanisme de compensation est l'augmentation du flux sanguin au niveau du cerveau. Lorsque la pression partielle en oxygène dans le sang passe sous la barre des 60 mm Hg (pression normale au niveau de la mer ≈ 100 mm Hg), le flux sanguin augmente en raison de la chute exponentielle de la saturation en oxygène (SaO_2).

Le troisième et dernier facteur impliqué dans le mécanisme de compensation est une vasoconstriction pulmonaire due au manque d'oxygène dans les poumons. Son rôle est d'égaliser la circulation du sang sur toute la hauteur du poumon afin de rétablir l'équilibre d'échange gazeux. Les personnes souffrant de problèmes respiratoires sévères (une SaO_2 inférieure par défaut) ou bien de problèmes cardiaques (hypertension sévère ou autres) peuvent éventuellement être atteintes de niveaux d'hypoxie plus graves; ceci justifie la nécessité de considérer l'état de santé des passagers avant une période de vol.

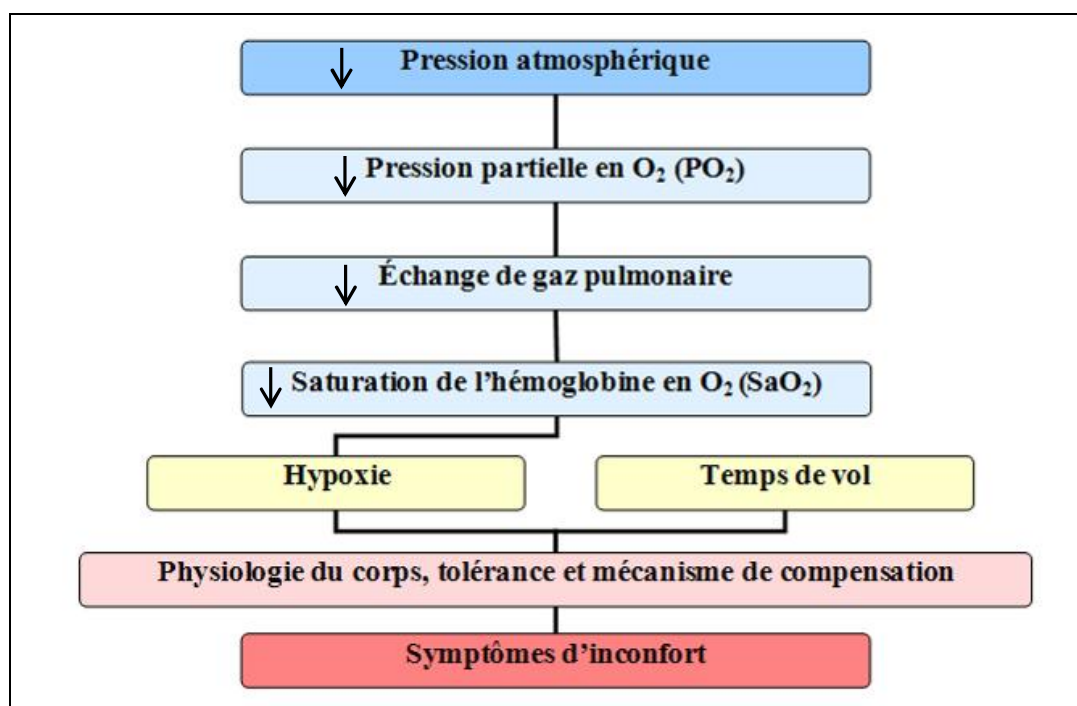


Figure 1-2 : Conséquences d'une diminution de pression atmosphérique sur l'inconfort.

1.4 Oxygénation des tissus

Dans le processus d'oxygénation des tissus, l'oxygène se fixe à l'hémoglobine pour être ensuite libérée vers les tissus et les organes du corps (CNRC 2002; Space et Nagda 2000; Baele et Van der Linden 2002). Les six éléments qui affectent cette oxygénation sont présentés au Tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Éléments affectant l'oxygénation des tissus et organes du corps humain, Tortora et Grabowski (2000), Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009), Sende (2007) et Essig et al. (2008).

PaO₂	La valeur de pression partielle en oxygène dans les artères désigne le taux d'oxygène transporté par le sang artériel vers les organes grâce à une pression adéquate.
SaO₂	La saturation en oxygène dans le sang indique la quantité d'oxygène, liée à l'hémoglobine des vaisseaux sanguins, transportée vers les tissus.
pH sanguin	Le pH est la mesure d'ions d'hydrogène dans le sang. Il se situe généralement entre 7,35 et 7,45.
PaCO₂	La pression partielle en dioxyde de carbone dans le sang artériel représente le taux résiduel de CO ₂ dans les artères après élimination de celui-ci en excès dans les poumons.
T°	La température interne du corps (37°C).
2,3 DPG	La molécule 2,3 - diphosphoglycérate est un ligand pour l'hémoglobine et sa concentration dans le sang peut réduire les affinités de liaison entre l'hémoglobine et l'oxygène et ainsi favoriser la libération de l'oxygène aux tissus. La 2,3 DPG se forme dans les globules rouges.

Considérant le cas d'une situation de vol, la température du corps est fixe à 37 °C et le pH peut varier légèrement. À cette température constante, le point de saturation est toujours le même. Pour un taux constant d'oxygène (autour de 21 %) avec une PaO₂ normale au niveau de la mer (100 mm Hg), les échanges gazeux s'effectuent parfaitement et tout le corps est en équilibre (aucun signe d'inconfort) (CNRC 2000; Brundrett 2001).

L'échange en oxygène dans le corps est totalement dépendant de la pression atmosphérique (P_{atm}) (Tortora et Grabowski 2000; Wilkins, Stoller et Kacmarek 2009). La force motrice de l'échange de gaz entre les alvéoles et les capillaires pulmonaires correspond à la pression partielle de chaque gaz. Plus la pression partielle est grande, plus l'échange de gaz

augmente. La pression partielle d'un gaz est égale à sa concentration multipliée par la pression totale des gaz. La pression totale d'un mélange gazeux est la somme des pressions partielles de ses gaz constituants. Dans le cas de cette étude, le gaz est l'air contenant 21 % d'oxygène, et ce, peu importe l'altitude. Donc, lors de l'oxygénation des tissus, la diminution de la P_{aO_2} , due à une baisse de la P_{atm} , est la principale cause de réduction des échanges gazeux dans le sang; les tissus manquent d'oxygène (origine de l'hypoxie) et les premiers signes d'inconfort apparaissent. Par ailleurs, la facilité de diffusion varie en fonction de la superficie disponible pour les poumons et d'autres paramètres indépendants de la pression.

1.5 La pression partielle en oxygène dans les artères selon la pression atmosphérique

Il est possible de calculer la pression partielle en oxygène dans les artères (P_{aO_2}) une fois la pression partielle en oxygène dans les alvéoles (P_{AO_2}) connue. Il existe une différence entre les deux pressions partielles (P_{AO_2} et P_{aO_2}) puisque, lors de la respiration, la diffusion n'est pas parfaite. Habituellement, dans l'analyse des gaz du sang, la valeur P_{aO_2} est connue puisqu'elle est directement mesurée dans les artères. Une alternative, plus théorique, est l'équation des gaz alvéolaires (Figure 1-3) (Curran-Everett 2006; O'Brian 2009). Utilisée dans le domaine médical pour calculer la P_{AO_2} , elle permet de comparer les deux pressions partielles (P_{AO_2} et P_{aO_2}) afin de vérifier si les poumons d'un patient fonctionnent à pleine capacité. La différence entre les deux valeurs de pressions partielles d'oxygène est appelée le A-a gradient. Selon O'Brian (2009) et Cherniack (1995), la valeur de ce gradient est généralement inférieure à 20 mm Hg et elle peut être trouvée dans une gamme de valeurs dépendant de l'âge et des conditions de santé d'une personne. À ce sujet, il est possible d'obtenir ces valeurs sur l'Internet à l'aide de programmes de calcul médical (Med Calc 3000).

Selon Moses (2010), O'Brian (2009), Cherniack (1995), Tortora et Grabowski (2000) et Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009), la valeur de l'A-a gradient augmente avec l'âge et peut être encore plus élevée pour des personnes souffrant de problèmes pulmonaires. Cette hypothèse peut expliquer les résultats obtenus par le CNRC (2002) lorsque la P_{aO_2} est inférieure à la P_{AO_2} et le fait que différentes personnes peuvent avoir une SaO_2 différente pour une même altitude. Tel que

Brundrett (2002) le démontre, cela peut également expliquer les raisons pour lesquelles les personnes présentant des problèmes pulmonaires sont plus prédisposées aux AMS.

Il est important de considérer que les valeurs de P_{aO_2} et de P_{aCO_2} varient lorsque le débit de respiration augmente. Ce changement de débit respiratoire aura pour effet de réduire la P_{aCO_2} et d'augmenter la P_{aO_2} . En somme, la P_{aO_2} est principalement dépendante de la P_{aCO_2} et de l'A-a gradient.

$$p_{AO_2} = F_{IO_2}(P_{ATM} - p_{H_2O}) - \frac{p_{aCO_2}(1 - F_{IO_2}[1 - R])}{R}$$

p_{AO_2} (Pression partielle en oxygène dans les alvéoles, pO_2) P_{ATM} (Pression atmosphérique) : 760 mm Hg p_{H_2O} (Pression partielle H_2O dans l'air) : 47 mm Hg	p_{aCO_2} (Pression partielle CO_2) : 36 mm Hg F_{IO_2} (Concentration d'O_2 inspiré) : 21 % R (Quotient respiratoire) : 0,8
--	--

Figure 1-3 : Équation des gaz alvéolaires.

1.6 Dissociation de l'oxyhémoglobine

La SaO_2 est directement reliée à la variation de la P_{aO_2} . Cette relation est représentée par une courbe connue sous le nom de courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (ODC), ou de courbe Barcroft présenté en Figure 1-4 (CNRC 2002; Tortora et Grabowski 2000; Wilkins, Stoller et Kacmarek 2009). Cette courbe présente deux zones distinctes. Plusieurs études montrent que la partie plateau est comprise lorsqu'une P_{aO_2} supérieure à 60 mm Hg (CNRC 2002; O'Brian 2009; Dietz 2000; Varjavand 2000; Richalet et Rathat 1991). Dans cette zone, la valeur de SaO_2 varie légèrement pour une grande variation de P_{aO_2} , contrairement à ce que l'on constate dans la seconde partie de la pente. Aux fins de conception d'aéronefs, la partie plateau est la plus intéressante puisqu'elle démontre de façon scientifique qu'il existe une variation très faible de la SaO_2 pour une grande variation de pression dans la cabine. En d'autres termes, cela prouve qu'une pression égale à une altitude au niveau de la mer dans la cabine n'est pas nécessaire du point de vue du confort. À titre d'exemple, pour une variation de P_{aO_2} de 100 mm Hg à 60 mm Hg, la SaO_2 chute d'environ 6,5 %. De 60 à 40 mm Hg, la variation de

SaO₂ est d'environ 15 %. Dans une situation d'équilibre (au niveau de la mer par exemple), la PaO₂ avoisine les 100 mm Hg, la SaO₂ peut être considérée comme complète et, en moyenne, elle se situe autour de 97,5 %. Au moment où la PaO₂ descend à 80 mm Hg, la saturation diminue aux environs de 95,8 %, ce qui est légèrement plus faible, mais tout de même proche de la saturation complète.

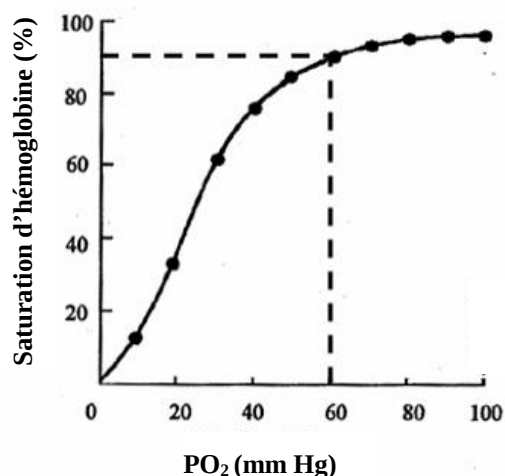


Figure 1-4 : Courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (ODC).

La position de la courbe ODC varie en fonction de quatre paramètres internes du corps. Ces paramètres sont le pH sanguin, la température interne du corps, la pression en CO₂ dans les artères et la molécule 2,3 DPG. Leurs niveaux affectent l'affinité de l'hémoglobine avec l'O₂. La Figure 1-5 démontre qu'il peut y avoir une déviation supérieure à la courbe normale (augmentation de l'affinité) ou une déviation inférieure à la courbe normale (diminution de l'affinité). Lorsque la température, la PaCO₂ et la valeur de 2,3 DPG chutent et que le pH sanguin augmente (alcalin), il y a augmentation de l'affinité de l'hémoglobine pour l'O₂. Dans un cas contraire, lorsque la température, la PaCO₂ et la valeur de 2,3 DPG s'élèvent et que le pH sanguin diminue (basique), l'affinité de l'hémoglobine est réduite. Ainsi, lors d'une situation où l'affinité est élevée, les globules rouges sont saturés en O₂. Au moment de la diffusion de l'O₂ aux tissus et organes, la liaison des globules rouges sera trop élevée pour que la quantité nécessaire d'O₂ soit diffusée. À l'inverse, lorsque l'affinité est réduite, les globules rouges ne sont pas suffisamment

saturés pour fournir la quantité nécessaire d'O₂ aux tissus et organes. Dans chacun des cas, le corps se retrouve donc en carence d'O₂ (Oakes (2008), Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009))

Selon Tortora et Grabowski (2000) et Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009), l'une des principales pathologies liées à un cas d'affinité élevée est la présence d'une polycythémie. Il existe deux formes de polycythémie : la polycythémie vraie et la polycythémie secondaire. La polycythémie vraie est causée par des anomalies au niveau de la moelle osseuse tandis que la polycythémie secondaire est attribuable aux effets du tabagisme sur les poumons. Dans ce cas, la nicotine transmise aux poumons charge une partie des globules rouges en CO (oxyde de carbone); l'espace réservé à l'oxygène est occupé par ce gaz, il y a donc moins d'oxygène libéré aux tissus et organes (Oakes 2008). Comme le sang est moins chargé en oxygène, l'organisme cherche à compenser le déficit en produisant davantage de globules rouges jusqu'à atteindre un seuil où il y en a trop, ce qui occasionne l'épaississement du sang. Il y a donc une plus grande quantité de globules rouges pour une même quantité d'oxygène. La polycythémie secondaire peut aussi être attribuable à une exposition prolongée à une haute altitude, cependant pour les besoins de cette recherche, l'exposition n'est que pour de courtes durées, l'étude de ces cas ne sera pas explorée davantage.

Les pathologies pouvant être associées à un cas d'affinité réduite sont entre autres la présence d'une maladie cardiovasculaire connue, une anémie, un cas d'hypertension non contrôlée (aucune médication relative à ce trouble de santé) ou d'une maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC) (Tortora et Grabowski 2000; Wilkins, Stoller et Kacmarek 2009). Les cas de MPOC sont très variables d'une personne à l'autre et plusieurs facteurs sont à considérer. Les types de MPOC peuvent être légers, modérés et sévères. Les cas de MPOC sévère ne s'appliquent pas dans le contexte de cette recherche du confort des passagers d'avions d'affaires puisque l'état de santé d'une personne atteinte est très critique. Une MPOC peut également être associée au tabagisme qui en constitue une des principales causes d'apparition. Avec le temps, le tabagisme réduit l'élasticité de certaines zones des poumons et provoque l'atrophie des alvéoles, ce qui limite le transfert d'oxygène aux vaisseaux sanguins.

Dans l'étude de ces deux situations d'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène, il est important de comprendre que les personnes atteintes d'une MPOC peuvent présenter une PaCO₂ plus élevée que la normale et que leur pH soit normal (Oakes 2008). C'est seulement lorsqu'elles

développent une infection telle qu'un rhume, une grippe ou une pneumonie que leur niveau de pH diminuera puisque les échanges gazeux seront altérés. De plus, un fumeur ne présente pas automatiquement une MPOC. La courbe de dissociation de l'hémoglobine pour les adultes âgés de 15 à 40 ans n'a pas toujours une déviation inférieure à la normale (affinité basse). Ces personnes peuvent cependant développer une polycythémie, ce qui se traduira par une courbe ayant une déviation supérieure à la normale (affinité élevée).

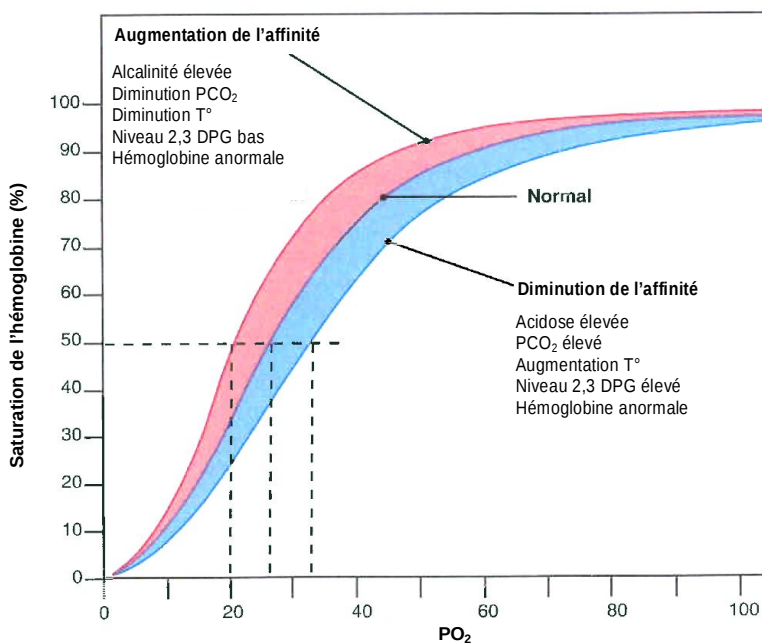


Figure 1-5 Conditions associées à l'alternance de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène.

Le tableau 1.2 fait état de la relation entre l'altitude et la dissociation de l'oxyhémoglobine. Il est clair que la différence augmente avec l'altitude et que le passage de 0 à 600 m (2000 pi) semble faible lorsqu'il est comparé aux autres.

Tableau 1.2 : Effet de la partie plateau de la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (ODC) sur la saturation en oxygène du sang pour différentes gammes d'altitudes.

Altitude (m) [Altitude (pi)]	0-600 [0-2000]	600-1200 [2000-4000]	1200-1800 [4000-6000]	1800-2400 [6000-8000]
Delta SaO₂ (%)	0.3	1.0	1.5	2.2

D'autre part, dans le Tableau 1.3 (CNRC 2002), il est possible de constater une variation de seulement 1 % entre 0 et 1500 m (5000 pi), ce qui suggère que la variation de SaO₂ pour cette gamme d'altitudes n'est pas suffisamment importante pour que l'humain puisse ressentir une différence. Comme l'expliquent Muhm et al. (2007), Brundrett (2001), CNRC (2002) et Scheuring et al. (2008), après une variation de 3 à 5 %, il y a des probabilités d'éprouver de l'inconfort et, au-delà d'une variation de 5 %, il y a de fortes probabilités de ressentir de l'inconfort. Donc en deçà de 1%, les possibilités d'inconfort sont faibles. L'hypothèse-clé affectant le confort est la différence entre la valeur de SaO₂ de départ et celle en haute altitude. Ce delta SaO₂ est directement responsable de la quantité d'oxygène fournie à l'organisme, donc de l'origine de l'hypoxie. Ainsi, plus ce Δ SaO₂ est faible, moins il existe de probabilité de ressentir de l'inconfort. Comme l'expliquent Richalet et Rathat (1991), dans le cas d'une personne en bonne santé acclimatée à la pression de son environnement, la SaO₂ peut être plus basse que les valeurs présentées au Tableau 1.3 et être toujours considérée comme normale. Ceci s'explique par le processus d'acclimatation.

Tableau 1.3 : Pression hypobare et saturation artérielle d'oxygène.

Altitude (pi)	Pression atmosphérique (mm Hg)	PO₂, mm Hg^a	Saturation artérielle d'O₂ Sans ajout d'O₂, (%)
0	760	160	96
2,500	694	147	95
5,000	632	133	95
7,500	575	121	93
10,000	523	110	89

^a Pression atmosphérique 21%
Source : NRC (1986).

Selon McFarland (1971), Muhm et al. (2007) et Space et Nagda (2000), la variation de la SaO_2 est signalée comme la principale source d'apparition d'inconfort. Il est recommandé de conserver la saturation supérieure à 90 % en raison d'un risque croissant d'AMS mineurs en deçà de cette limite. Toutefois, se référer à la différence absolue de SaO_2 n'est pas toujours souhaitable puisqu'une personne atteinte d'un dysfonctionnement pulmonaire peut vivre avec une SaO_2 de 90 % au niveau de la mer sans problème en raison d'un taux d'hémoglobine supérieur lui permettant d'assurer le transport d'oxygène nécessaire à l'équilibre du système. Il est donc préférable, pour les personnes à risque, de se référer à la rapidité avec laquelle le SaO_2 diminue avec l'altitude (ΔSaO_2 (Figure 1-6)).

1.7 Origine de l'inconfort

1.7.1 Susceptibilité aux inconforts en altitude

La tolérance ou la résistance aux changements de pression de certaines personnes peut être due à leur structure génétique ainsi qu'à leur environnement. Au niveau génétique, les résultats de Muza et al. (1999) et Ross (1985) indiquent que la tolérance aux variations de SaO_2 dans le sang, démontrée par certaines personnes, pourrait être due à une plus grande proportion du ratio céphalo-rachidien. Puisque selon Savourey et al. (1995), Brundrett (2002), CNRC (2002) et Baele et Van der Linden (2002), une diminution de la pression peut provoquer un changement dans le système circulatoire cardio-vasculaire, ces personnes seraient davantage en mesure de compenser l'augmentation du volume sanguin au cerveau dû à ce ratio. Au niveau de l'environnement, cette tolérance peut également résulter de l'acclimatation; les personnes déjà acclimatées à une pression atmosphérique élevée sont moins susceptibles de développer les symptômes mineurs d'AMS.

Selon Hackett et Roach (2001) et Scheuring et al. (2008), l'apparition des symptômes mineurs d'AMS ne serait pas fondamentalement liée au sexe ou à l'âge. Toutefois, bien que la littérature médicale reste vague à ce sujet, Muhm et al. (2007) ont démontré que même si les niveaux de SaO_2 sont plus faibles pour les personnes âgées, elles rapportent moins de symptômes mineurs d'AMS que les personnes plus jeunes, et ce, en raison d'un changement physiologique

avec l'âge. En dépit des diverses théories sur les causes de l'apparition de l'inconfort avec l'altitude, Rayman (1997) explique que certains facteurs physiologiques peuvent prédisposer aux symptômes mineurs d'AMS. Par exemple, Brundrett (2002), West (2004) et Gendreau et DeJohn (2008) indiquent que les personnes souffrant d'obésité et/ou de problèmes respiratoires et/ou qui ont déjà présenté des symptômes mineurs d'AMS auparavant sont plus susceptibles de ressentir de l'inconfort en haute altitude. Évidemment, les personnes résidant au niveau de la mer peuvent être davantage prédisposées aux symptômes mineurs d'AMS que des personnes vivant à une altitude plus élevée puisqu'elles sont acclimatées à une altitude moins élevée.

En ce qui a trait à la population en général, Scheuring et al. (2008) démontrent qu'entre 7 % et 25 % des adultes auraient éprouvé des malaises après une ascension rapide du niveau de la mer à 1400 m (6500 pi). Brundrett (2002) conclut qu'à une altitude de 1500 m (5000 pi), un faible pourcentage de la population ressent une gêne, tandis qu'à une altitude de 3000 m (10 000 pi), plus de la moitié de la population ressent un malaise, et enfin qu'à 4500 m (15 000 pi), l'ensemble de la population éprouve un malaise.

1.7.2 L'état de santé et l'altitude

En raison de l'hypothèse de la constante de l'ODC, les personnes ayant des problèmes de santé et/ou souffrant de troubles pulmonaires ou cardiovasculaires sont considérées comme à risque en haute altitude (Tortora et Grabowski 2000; Wilkins, Stoller et Kacmarek 2009). Selon Richalet et Rathat (1991) et Wilkins, Stoller et Kacmarek (2009), divers problèmes de santé peuvent prédisposer les gens à exprimer des malaises en haute altitude, en particulier pour des personnes souffrant d'asthme sévère, de bronchite chronique, d'hypertension artérielle, d'infection ORL ou d'anémie sévère, de même que pour une personne ayant des difficultés cérébro-vasculaires ou souffrant d'arthrite aiguë aux membres inférieurs. Ainsi, ces personnes sont moins bien disposées à répondre au déséquilibre causé par une variation de pression. Les principaux éléments responsables de l'amplification des risques sont dus à une polyglobulie ou une stase sanguine.

Considérant les pathologies exposant les personnes atteintes à des risques de voyager en haute altitude, le tabagisme apparaît comme un facteur important (Oakes 2008; Tortora et

Grabowski 2000). Il peut être la cause ou participer en grande partie à l'apparition d'une polycythémie secondaire ou bien d'une MPOC légère, modérée ou sévère. Il est donc intéressant de connaître l'étendue de la population de fumeur au niveau mondial. Les valeurs du Tableau 1.4, issue de la base de données de l'OCDE sur la santé (Organisation de Coopération et de Développement Économique, OCDE 2011) exposent les pourcentages de la population adulte qui sont considérés comme des fumeurs, pour les années 2008 et 2009 selon les nations. L'analyse de ces statistiques permet le constat suivant; en 2009, environ 1 Nord-Américain sur 6, 1 Européen sur 4 et 1 Asiatique sur 4 sont des fumeurs réguliers. Ceci démontre qu'une proportion importante de la population mondiale inhale quotidiennement de la nicotine et court ainsi des risques élevés de développer des maladies cardio-vasculaires et pulmonaires chroniques.

Tableau 1.4 : Pourcentage de la population adulte fumeurs pour l'année 2009 selon les nations.

	2008	2009
Amérique du Nord		
Canada		16,2
États-Unis		16,1
Europe		
Allemagne		21,9
Espagne		26,2
France	26,2	
Grande Bretagne		21,5
Grèce	39,7	
Italie		23,3
Pologne		27
Asie		
Japon		24,9
Corée		25,6

La Figure 1-6 montre la différence entre les personnes non à risque acclimatées et les personnes à risque exposées à des altitudes au niveau de la mer et de 1200 m (4000 pi). Deux d'entre elles ne sont pas considérées à risque (triangles et carrés en contour et bleus) et les deux autres représentent des personnes à risque (triangles et carrés pleins et rouges). On constate que les personnes à risque ont des valeurs de SaO_2 plus basses que les valeurs normales pour une même altitude. En outre, la moitié d'entre elles vivent et sont acclimatées à une altitude de 1200 m (4000 pi) (triangle) et l'autre moitié à une altitude au niveau de la mer (carré). Les

personnes à risque ont des valeurs normales de ΔSaO_2 plus élevées, ce qui signifie que leur SaO_2 de départ est inférieure à 97,5 %. Les personnes résidant en haute altitude ou ayant un A-a gradient plus élevé (valeur de PaO_2 inférieure résultant d'une maladie pulmonaire) peuvent également présenter un point de départ de SaO_2 inférieur. Ce qui est important ici, c'est la différence entre les variations de ΔSaO_2 en fonction de l'altitude pour les différents cas.

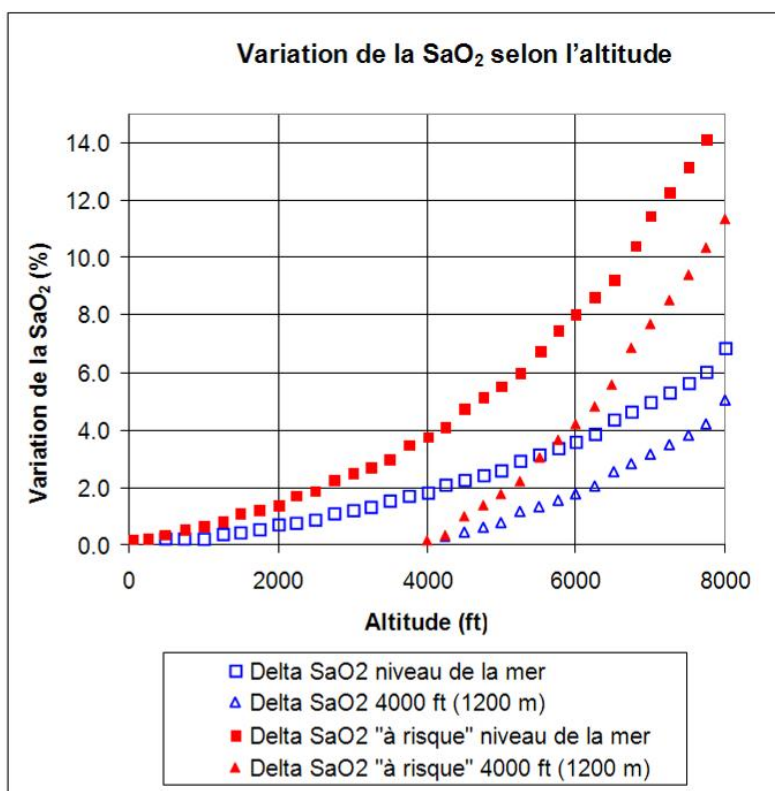


Figure 1-6 : Variation de la SaO_2 selon l'état de santé pour différentes altitudes.

1.7.3 Autres facteurs d'ambiance thermique

Du point de vue de l'environnement de cabine, il existe un facteur d'ambiance thermique non négligeable pouvant amplifier la sensation d'inconfort pour l'ensemble des passagers. Ce facteur amplificateur est l'humidité relative (HR) de la cabine. L'air très sec amplifie la déshydratation du corps et cause rapidement de l'inconfort au niveau des voies respiratoires, des yeux et de la peau. Le corps cherche ainsi à rétablir l'équilibre et suite à cette réaction une fatigue peut être ressentie. Selon les experts de la compagnie Bombardier Aéronautique, Lavoie et Pownall (2011), l'HR au sol est autour de 35 à 50 % (Santé Canada 2007) tandis qu'en vol elle

varie entre 2 et 15 %. La raison de ce faible taux d'HR est simple; l'air circulant dans la cabine est constitué d'environ 80 % d'air frais (extérieur) et 20 % d'air recyclé. La température sèche de l'air provenant de l'extérieur en haute altitude atteint des niveaux très bas. Cet air doit donc être chauffé pour être utilisé dans la cabine, par ce fait le taux d'HR s'en trouve grandement réduit. Le taux d'humidité dans l'air de la cabine provient essentiellement de l'eau issue de la respiration des passagers et de l'évaporation des liquides distribués à bord. Ce taux est fonction de l'humidité générée par les occupants, ainsi plus il y a de passagers à bord, plus le taux d'humidité est élevé, donc l'air est souvent plus sec en classe Affaire et dans les avions d'affaire (Lavoie et Pownall 2011). Selon la norme ASHRAE STD 55-2004, un environnement thermique confortable a une HR de 2 à 86 % dépendamment de la température sèche de l'air et de l'isolement vestimentaire procuré par les vêtements que les passagers portent. Selon Kodak (2004), un environnement thermique confortable, pour une exposition de 2 heures ou plus, doit avoir une HR au-delà de 25%. Les systèmes de climatisation des cabines sont munis de puissants filtres antibactériens « HEPA » (High Efficiency Particulate Air) – et ce sont les mêmes systèmes utilisés par les hôpitaux –, tuant 99,97 % des bactéries de l'air ambiant (H.E.P.A. System 2005; HEPA Filter Service).

En ce qui concerne le confort, ce facteur d'ambiance thermique (HR) joue certainement un rôle important, et ce, au-delà de la pressurisation de la cabine. Toutefois, seule la variable temporelle peut déterminer l'ordre d'importance des différents facteurs de l'environnement pouvant conduire à l'inconfort. Actuellement, il existe des systèmes d'humidification de l'air pouvant annuler l'effet de ce facteur en cabine. En revanche, ils ne sont pas très courants puisque ce type de système nécessite le transport d'une grande quantité d'eau, ce qui engendre une augmentation du poids transporté (Lavoie et Pownall 2011). Le vol est donc plus coûteux en carburant, ce qui accroît les coûts d'opération. Il expose également les aéronefs à des risques de condensation, de moisissures, de corrosion et à l'endommagement des systèmes électriques.

1.7.4 L'impact du temps de vol

Muhm et al. (2007) et Hackett et Roach (2001) mentionnent que les symptômes d'inconfort ont tendance à s'accroître avec le temps d'exposition. Ainsi, plus le vol est de longue durée, plus les symptômes seront ressentis par l'ensemble des passagers. Également, les effets du

rythme circadien sur le corps peuvent augmenter la sensation de fatigue. De fait, il est intéressant de savoir qu'en moyenne, les avions de type Affaires de la compagnie Bombardier volent moins longtemps que les durées pour lesquelles ils ont été conçus, ce qui peut contribuer à l'apparition de l'inconfort.

La Figure 1-7, issue de l'étude Muhm et al. (2007), montre la prévalence des malaises, des douleurs musculaires et de la fatigue pour différentes altitudes dans le temps. Le graphique « Malaise », lié à l'altitude, a été défini par les auteurs comme la combinaison d'AMS-c (cérébrale) et d'AMS-r (respiratoires). Une variation importante peut être observée pour la courbe de 2400 m (8000 pi) par rapport aux autres courbes. Pour les altitudes de 190 m (650 pi) à 2100 m (7000 pi), les prévalences sont très semblables jusqu'à 10 heures de vol; ensuite la courbe de 2100 m (7000 pi) se détache résolument des autres. Les altitudes simulées en-deçà de 1800 (6000 pi) montrent des courbes presque identiques. En somme, les symptômes d'inconfort sont davantage prévalents autour d'une pressurisation de 2100 m (7000 pi) et 2400 m (8000 pi) et en-deçà d'une altitude de 1800 m (6000 pi), ils apparaissent nettement moindres.

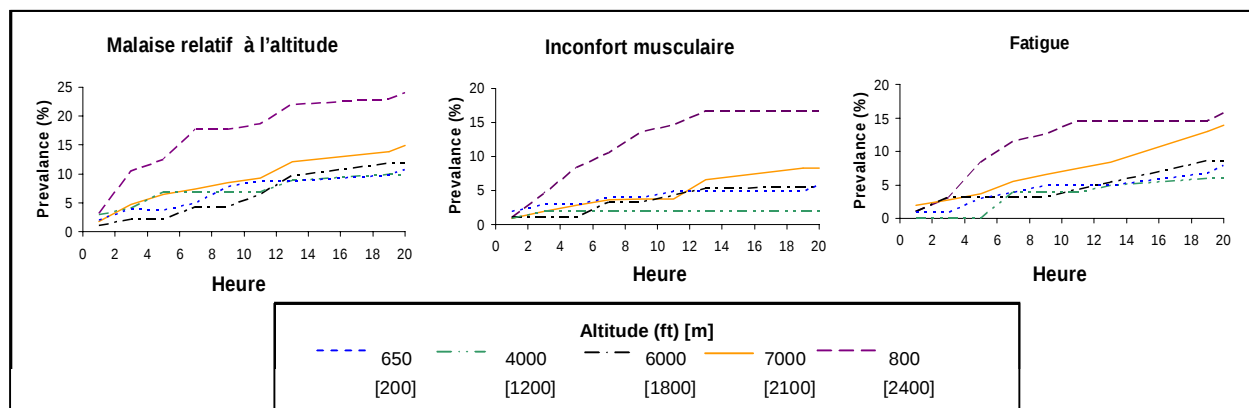


Figure 1-7 : Le niveau de malaise, de douleurs musculaires et de fatigue lié à l'altitude selon le temps de vol (tiré de Muhm et al. 1997, p.25).

1.8 Variation de la saturation en oxygène dans le sang

Muhm et al. (2007) expliquent que leurs valeurs de SaO_2 obtenues sont plus basses que celles obtenues par McFarland (1971) sur le même sujet. La différence peut s'expliquer par le fait que leurs expérimentations ont été menées dans une chambre hypobare simulant un vol tandis que celles effectuées par McFarland (1971) ont été réalisées en situation réelle de haute altitude. Les sujets participant à l'étude de Muhm et al. (2007) étaient acclimatés à une altitude près du niveau de la mer (190 m (650 pi)), ce qui signifie que leur valeur initiale de SaO_2 était d'environ 97,5 %. À titre de comparaison, les niveaux de SaO_2 obtenus par les sujets de Muhm et al. (2007), à 1800 m, 2100 m, et 2400 m (6000, 7000 et 8000 pi), ont été respectivement autour de 95 %, 94 % et 92 %. Muhm et al. (2007) supposent donc qu'un ΔSaO_2 d'au plus 3 % (1800 m (6000 pi)) représente la limite avant l'apparition de certains symptômes d'inconfort. D'autres recherches confirment ces résultats, notamment celle de Brundrett (2001) qui mentionne qu'à une altitude de cabine de 2400 m (8000 pi), il y a un risque pour les personnes ayant des problèmes cardio-vasculaires et qu'une partie de la population peut éprouver de l'inconfort. Brundrett (2002) associe une baisse de 5 % de la SaO_2 à une augmentation de la température du corps et une augmentation de l'intensité des symptômes d'inconfort. Le CNRC (2002) établit le niveau d'hypoxie maximum acceptable à une altitude de cabine de 2400 m (8000 pi) et recommande que, pour des conditions normales, l'altitude de cabine soit comprise entre 1500 et 1800 m (5000 et 6000 pi). Enfin, Scheuring et al. (2008) concluent qu'à la suite d'une exposition prolongée à une altitude entre 1900 et 2500 m (6500 et 8500 pi), les sujets seraient susceptibles de ressentir des symptômes d'AMS.

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE CONSTRUCTION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE L'INCONFORT DES PASSAGERS

Les recherches au sujet de l'impact d'un environnement de cabine pressurisée sur l'inconfort des passagers et les malaises en haute altitude ont permis de constater que la variation de la SaO_2 du sang est un indicateur clé de l'inconfort (CNRC 2002; Muhm et al. 2007; Brundrett 2002; West 2004; Scheuring et al. 2008; Samuels 2003; Rayman 1997; McFarland 1975; Tortora et Grabowski 2000; Wilkins, Stoller et Kacmarek 2009). L'intégration des résultats issus de l'ensemble des études recensées à ce sujet a mené dans un premier temps à la construction d'un modèle permettant d'estimer les probabilités d'inconfort ressenti par les passagers en période de vol selon leurs conditions de santé et la pressurisation de la cabine. Dans un deuxième temps, l'analyse de l'impact de la déviation de la courbe ODC selon des pathologies types sur le modèle de probabilités d'inconfort a permis de valider son applicabilité avec des personnes jugées à risque en altitude. Enfin, une augmentation du taux d'oxygène dans l'air a été appliquée aux divers cas de pathologies types identifiés ainsi qu'aux cas présentés dans le modèle initial afin d'analyser si cet apport représenterait une solution valable pour réduire les situations d'inconfort dans les avions d'affaires.

2.1 Construction du modèle de probabilités d'inconfort

Le modèle présente trois cas types de la population. Le premier groupe de résultats, intitulé « Étude Boeing » et issus de l'étude de Muhm et al. (2007), s'associe à une population ne présentant aucun risque en haute altitude, donc à une situation idéale. Les résultats de Scheuring et al. (2008) et du CNRC (2002), regroupés sous le nom « Autres études », sont plus conservateurs que les premiers et représentent une moyenne des cas étudiés. Le troisième groupe de résultats, « Étude AD », provient des recherches menées dans le cadre de cette étude et traite des personnes considérées à risque en haute altitude. Pour ce troisième groupe, les valeurs utilisées pour les calculs provenaient des données de SaO_2 de personnes atteintes de problèmes de santé (Tortora et Grabowski 2000; Wilkins, Stoller et Kacmarek 2009) et ont été confirmées par

le Dr. François Sestier, cardiologue et directeur du programme de médecine d'assurance et d'expertise en sciences de la santé de la faculté de médecine de l'Université de Montréal.

Considérant un environnement de cabine contrôlé, le Tableau 1.1 présente les valeurs de $F_{I}O_2$, pH_2O , $PaCO_2$, R et A-a gradient utilisés pour chaque étude présentée dans le modèle. Ces valeurs ont été établies à partir de la littérature. Pour la première série de tests, il a été choisi de les maintenir constantes, peu importe l'altitude. Ce choix s'explique par la volonté de maintenir un niveau de confort optimal, il ne doit donc pas y avoir de variation des valeurs à l'origine d'inconforts. Puisqu'il s'agit d'un environnement contrôlé, les valeurs de $F_{I}O_2$ et de pH_2O sont constantes pour chacun des cas à 21% et 47 mm Hg (Baele et Van der Linden 2002; O'Brian 2009; Brown 2004; Jurist 2005). Généralement, les valeurs de $PaCO_2$ varient entre 35 et 45 mm Hg et diminuent selon l'altitude (O'Brian 2009; Moses 2010); cependant, le choix de les maintenir constantes est conservateur puisqu'elles réduisent la valeur de PaO_2 dans l'équation des gaz alvéolaires. Les valeurs de $PaCO_2$ pour « Étude AD », « Étude Boeing » et « Autres études » sont 40, 33 et 35 mm Hg. La valeur constante du quotient respiratoire (R) à 0,8 s'explique par un niveau de respiration stable puisque les passagers ne sont pas en activité (O'Brian 2009; Curran-Everett 2006; Moses 2010). Ainsi, il n'est pas souhaité que ce quotient augmente (mécanisme de compensation) et accentue les risques d'inconfort. Les valeurs de A-a gradient ont été obtenues à partir d'un programme de calcul médical (Med Calc 3000). Pour assurer un scénario conservateur, les valeurs utilisées sont faibles de façon à réaliser une estimation raisonnable et comparable à des cas réels (O'Brian 2009; Cherniack 1995).

Tableau 2.1 Valeurs de $F_{I}O_2$, pH_2O , $PaCO_2$, R et A-a gradient utilisés pour les études présentées dans le modèle de probabilités d'inconfort en altitude.

	Valeurs normales	Étude AD (Pires cas)	Étude Boeing (Cas idéaux)	Autres études (Cas moyens)
$F_{I}O_2$	0,21	0,21	0,21	0,21
pH_2O (mm Hg)	47	47	47	47
$PaCO_2$ (mm Hg)	35-45	40	33	35
R	0,8	0,8	0,8	0,8
A-a gradient (mm Hg)	Variable	10	5	10

Les valeurs de $PACO_2$ et PAO_2 sont fixes (vs débit respiratoire) (scénario conservateur) dans les calculs afin d’assurer qu’il n’y ait pas apparition d’inconfort. À chaque altitude, la pression atmosphérique (mm Hg) a été déterminée (*Atmosphère normalisée* 2010) et pour chacune d’elles, la PaO_2 a été obtenue à partir de l’équation des gaz alvéolaires puis en utilisant l’équation du A-a gradient (Figure 2-1).

$$p_{AO_2} = F_{IO_2} (P_{atm} - p_{H_2O}) - p_aCO_2 (1 - F_{IO_2} [1 - R]) / R$$

&

$$PaO_2 = PAO_2 - \text{“A-a gradient”}$$

Figure 2-1 : Équations utilisées pour la réalisation du modèle de probabilité d’inconfort en altitude.

Ainsi, en se référant à la courbe ODC (CNRC 2002), les valeurs de saturation en oxygène (%) correspondant à chacune des valeurs de PaO_2 ont été établies (Varjavand 2000) (Tableau 2.2). Enfin, le ΔSaO_2 pour chaque altitude a été obtenu en calculant la différence entre la SaO_2 en altitude 0 et la SaO_2 à l’altitude donnée (Tableau 2.3), voir l’exemple de calcul à la Figure 2-2.

Tableau 2.2 Valeurs de SaO_2 (%) selon la PaO_2 pour les études présentées dans le modèle de probabilités d’inconfort en altitude.

Altitude (m) [pi]	Pression (mm Hg)	Étude AD (Pires cas) PaO_2 (mm Hg)	Étude AD (Pires cas) SaO_2 (%)	Étude Boeing (Cas idéaux) PaO_2 (mm Hg)	Étude Boeing (Cas idéaux) SaO_2 (%)	Autres études (Cas moyens) PaO_2 (mm Hg)	Autres études (Cas moyens) SaO_2 (%)
0 [0]	760	92	96,96	105	97,49	98	97,36
76 [250]	753	90	96,88	104	97,49	96	97,3
152 [500]	746	89	96,7	102	97,49	95	97,18
229 [750]	740	88	96,61	101	97,49	94	97,11
305 [1000]	733	86	96,51	100	97,45	92	97,04
...	...	...	...	...	...	...	...

Ex : « Étude AD » : $96,96 - 96,88 = 0,1$

Figure 2-2 : Exemple de calcul pour l'obtention de la valeur de ΔSaO_2 .

Tableau 2.3 Valeurs de ΔSaO_2 (point de %) pour les études présentées dans le modèle de probabilités d'inconfort en altitude.

Altitude (m) [pi]	Pression (mm Hg)	Étude AD (Pires cas) SaO_2 (%)	Étude AD (Pires cas) ΔSaO_2 (% pt.)	Étude Boeing (Cas idéaux) SaO_2 (%)	Étude Boeing (Cas idéaux) ΔSaO_2 (% pt.)	Autres études (Cas moyens) SaO_2 (%)	Autres études (Cas moyens) ΔSaO_2 (% pt.)
0 [0]	760	96,96	0.0	97,49	0	97,36	0
76 [250]	753	96,88	0.1	97,49	0	97,3	0
152 [500]	746	96,7	0.3	97,49	0	97,18	0
229 [750]	740	96,61	0.3	97,49	0	97,11	0
305 [1000]	733	96,51	0.4	97,45	0	97,04	0
...	...	...	...	...	...	...	...

2.2 Analyse de l'impact de la déviation de la courbe ODC sur le modèle

Pour la seconde série de tests, les valeurs du groupe « Étude AD » ont été modifiées pour démontrer l'incidence de certaines pathologies types, associées à l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène, sur le modèle. Le choix des pathologies a été établi à partir des recherches faites dans le cadre de cette étude. Ainsi, puisque le tabagisme représente une habitude de vie répandue à travers le monde et exposant les personnes à des maladies cardiaques et pulmonaires, il a été le principal critère pour définir les pathologies types étudiées. Pour chacune d'entre elles, les valeurs de R , $F_{\text{I}}\text{O}_2$, pH_2O et de température corporelle demeurent constantes. Également, la valeur de A-a gradient n'est pas considérée pour ces cas puisqu'elle peut être très variable selon les pathologies et les degrés de sévérités des symptômes. Sa valeur est négligeable pour ces cas

types étant donné qu'elle n'influence pas de manière significative la SaO_2 . Pour obtenir les valeurs exactes de PAO_2 , nécessaires aux calculs du A-a gradient, des tests sanguins devraient être réalisés sur chacun des passagers à l'étude. Par ailleurs, les valeurs de PaCO_2 et de pH varient en fonction des pathologies ciblées. Pour la représentation d'une affinité élevée de l'hémoglobine, un cas de polycythémie secondaire fut sélectionné comme pathologie type. Ce choix est dû au fait qu'une polycythémie est une des principales pathologies reliées à une augmentation de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène. Pour démontrer une situation de basse affinité de l'hémoglobine, les pathologies types considérées sont des cas de MPOC légère et modérée. Ces choix s'expliquent parce que les variations de PaCO_2 de pH et de température attribuable à ces deux pathologies sont similaires aux autres pathologies pouvant occasionner une réduction de l'affinité de l'hémoglobine telles l'hypertension, les maladies cardiovasculaires et l'anémie. Il n'a donc pas été nécessaire de faire le test pour la totalité des pathologies associées à la réduction de l'affinité. Les valeurs de PaCO_2 , de pH et de températures corporelles attribuées à chacun des cas ont été établies avec la consultation d'une inhalothérapeute membre de l'Ordre professionnel des inhalothérapeutes du Québec (OPIQ). Pour le cas de polycythémie secondaire, les valeurs de PaCO_2 , de pH et de température sont de 30 mm Hg, 7,47 et 37°C (Oakes 2008). Pour la représentation d'une MPOC légère, les valeurs de PaCO_2 , de pH et de température sont 50 mm Hg, 7,30 et 37°C (Oakes 2008) et les valeurs attribuées à la représentation d'une MPOC modérée sont 60 mm Hg, 7,27 et 37°C (Oakes 2008). Le Tableau 2.4 résume les valeurs attribuées pour chacune des pathologies étudiées.

Tableau 2.4 Valeurs de PaCO_2 , de pH et de températures corporelles établies pour les cas de polycythémie secondaire, de MPOC légère et de MPOC modérée (OPIQ; Oakes 2008).

	Polycythémie secondaire	MPOC légère	MPOC modérée
PaCO_2 (mm Hg)	30	50	60
pH	7,47	7,3	7,27
Température corporelle (°C)	37	37	37

À partir de l'analyse de la courbe ODC pour chacune des pathologies types, les valeurs de SaO_2 furent relevées et les ΔSaO_2 ont été obtenus. Ainsi, les courbes, pour chaque pathologie, ont été générées dans le modèle de probabilités d'inconfort en altitude. Enfin, l'augmentation du taux d'oxygène de 2 % et de 5 % a été expérimentée avec les cas de polycythémie secondaire, de

MPOC légère et de MPOC modérée ainsi qu’avec les courbes « Étude Boeing », « Autres études » et « Étude AD » du modèle initial afin de connaître l’impact de cette augmentation sur le confort des passagers. Cette expérimentation permettra de découvrir si une augmentation du taux d’oxygène dans la cabine s’avère une solution envisageable pour réduire les inconforts et par le fait même améliorer le confort des passagers.

CHAPITRE 3 RÉSULTATS DE L'UTILISATION DU MODÈLE D'ESTIMATION DE L'INCONFORT DES PASSAGERS

3.1 Modèle de probabilité d'inconfort

Les courbes présentées dans le modèle de probabilité d'inconfort (Figure 3-1) ont été produites à partir des Δ SaO₂ des cas « Études AD », « Étude Boeing » et « Autres études » présentés dans le Tableau 2.3. Les zones « grises » créées entre ces courbes correspondent à une population à risque et non à risque présentant des symptômes mineurs d'AMS en situation de haute altitude. En filigrane de ce modèle, il est possible de discerner trois autres zones, divisées horizontalement, représentant les probabilités de percevoir de l'inconfort. Ces trois dernières zones sont fixées selon le niveau de variation de SaO₂ dans le sang (rapport de SaO₂ au niveau de la mer et de SaO₂ en haute altitude). Ainsi pour une variation de SaO₂ de 0 à 3 %, « aucun inconfort »; de 3 à 5 %, « probabilité de ressentir de l'inconfort »; et au-delà d'une variation de 5 %, on note de « grandes probabilités de ressentir de l'inconfort » (Muhm et al. 2007; Brundrett 2001; CNRC 2002; Scheuring et al. 2008). Considérant la zone « personnes non à risque », en deçà d'une altitude de cabine de 1500 m (5000 pi), la population se trouvant dans cette zone rencontrerait peu de probabilité d'éprouver de l'inconfort; au-delà de 1500 m (5000 pi), il y aurait des probabilités que cette population éprouve de l'inconfort; et au-delà de 1900 m (6500 pi), il y aurait de grandes probabilités qu'elle éprouve de l'inconfort dû à l'altitude. Pour une population se trouvant dans la zone « personnes à risque », en deçà de 1200 m (4000 pi), il existerait peu de probabilité qu'elle éprouve de l'inconfort; au-delà de 1200 m (4000 pi), il y aurait des probabilités que cette population éprouve de l'inconfort; et au-delà de 1600 m (5500 pi), il y aurait de grandes probabilités qu'elle éprouve de l'inconfort dû à l'altitude.

Le tableau présenté dans ce modèle est issu de l'analyse des trois types de symptômes identifiés à la Figure 1-7 (Muhm et al. 2007). Il permet d'estimer un pourcentage de personnes pouvant éprouver des symptômes d'inconfort en fonction de la durée d'un vol. Ainsi, après un vol de 2 heures, 1 à 4 % des passagers peuvent être affectés par de l'inconfort issu d'une variation de pression dans la cabine; après 4 heures, 1 à 8 % des passagers; après 9 heures, 2 à 11 % des

passagers et après un vol de 14 heures, 4 à 12 % des passagers peuvent être affectés par cet inconfort.

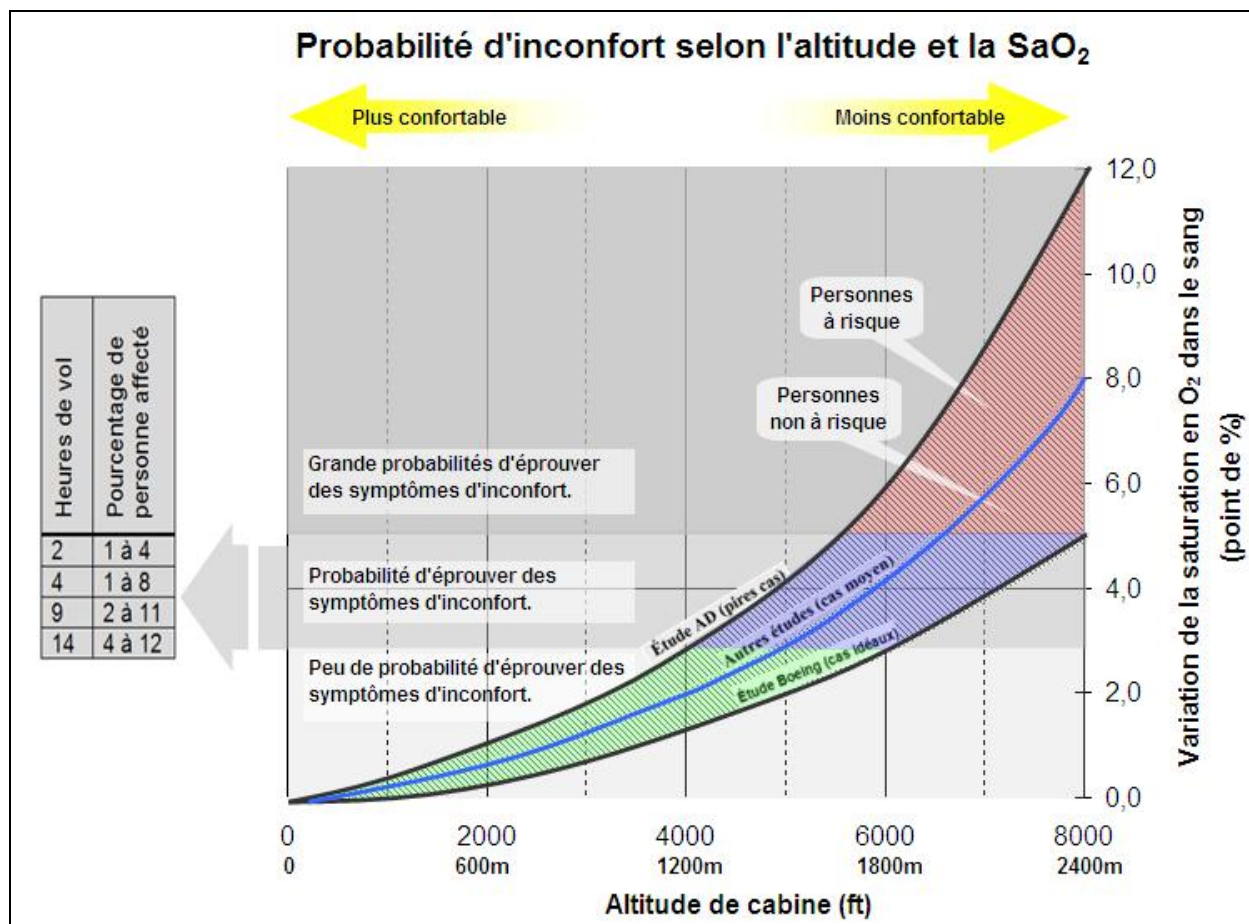


Figure 3-1 : Le confort selon l'altitude de cabine.

3.2 Incidence de pathologies typiques sur le modèle

À la Figure 3-2 A., la courbe ODC du cas d'une polycythémie secondaire est présentée. Il est possible de voir une déviation supérieure à la courbe normale. À partir des valeurs de cette courbe, un cas de polycythémie secondaire est généré au travers du modèle (Figure 3-2 B.). À la Figure 3-2 B., la courbe pleine représente le cas de polycythémie secondaire, l'on constate que la courbe se situe sous la zone définie par le modèle. Les courbes pointillées à la Figure 3-2 B. exposent ce même cas de polycythémie secondaire avec une augmentation de 2 % et de 5 % du taux d'oxygène dans la cabine.

La courbe ODC relative à un cas de MPOC légère, en Figure 3-2 C., démontre une déviation inférieure à la courbe normale. Les valeurs de cette courbe ont généré la courbe pleine présentée à la Figure 3-2 D. On constate que la courbe est supérieure à la zone émise par le modèle. Selon le modèle, une personne atteinte d'une MPOC légère rencontrerait de l'inconfort, dû à la pressurisation de la cabine, au moment où la pression surpasserait 900 m (3000 pi). Les courbes en pointillés représentent ce cas de MPOC légère avec une augmentation du taux d'oxygène de 2% et de 5% dans l'environnement de cabine. À remarquer qu'avec un ajout de 5 % d'oxygène, la situation s'améliore de façon considérable. Les personnes atteintes d'une MPOC légère ne percevraient pas d'inconfort dû à la pression avant d'atteindre une altitude de cabine de 2100 m (7000 pi). La Figure 3-2 E. et F. présentent le cas d'une MPOC modérée. On constate une déviation inférieure à la courbe ODC normale (Figure 3-2 E.) de même qu'une élévation marquée de la courbe pleine par rapport à la zone définie dans le modèle (Figure 3-2 F.). Les résultats pour ce cas (Figure 3-2 F.) sont comparables à ceux d'une MPOC légère. Selon le modèle, un passager atteint de ce type de pathologie débiterait à ressentir de l'inconfort, dû à la pressurisation de la cabine, au moment où la pression surpasserait 600 m (2000 pi). Les courbes en pointillés démontrent que l'augmentation du taux d'oxygène a tendance à améliorer la situation de confort des passagers atteints. Ainsi, avec une augmentation du taux d'oxygène de 5 %, la limite de probabilité d'inconfort passe à 1800 m (6000 pi) pour les passagers atteints de cette pathologie.

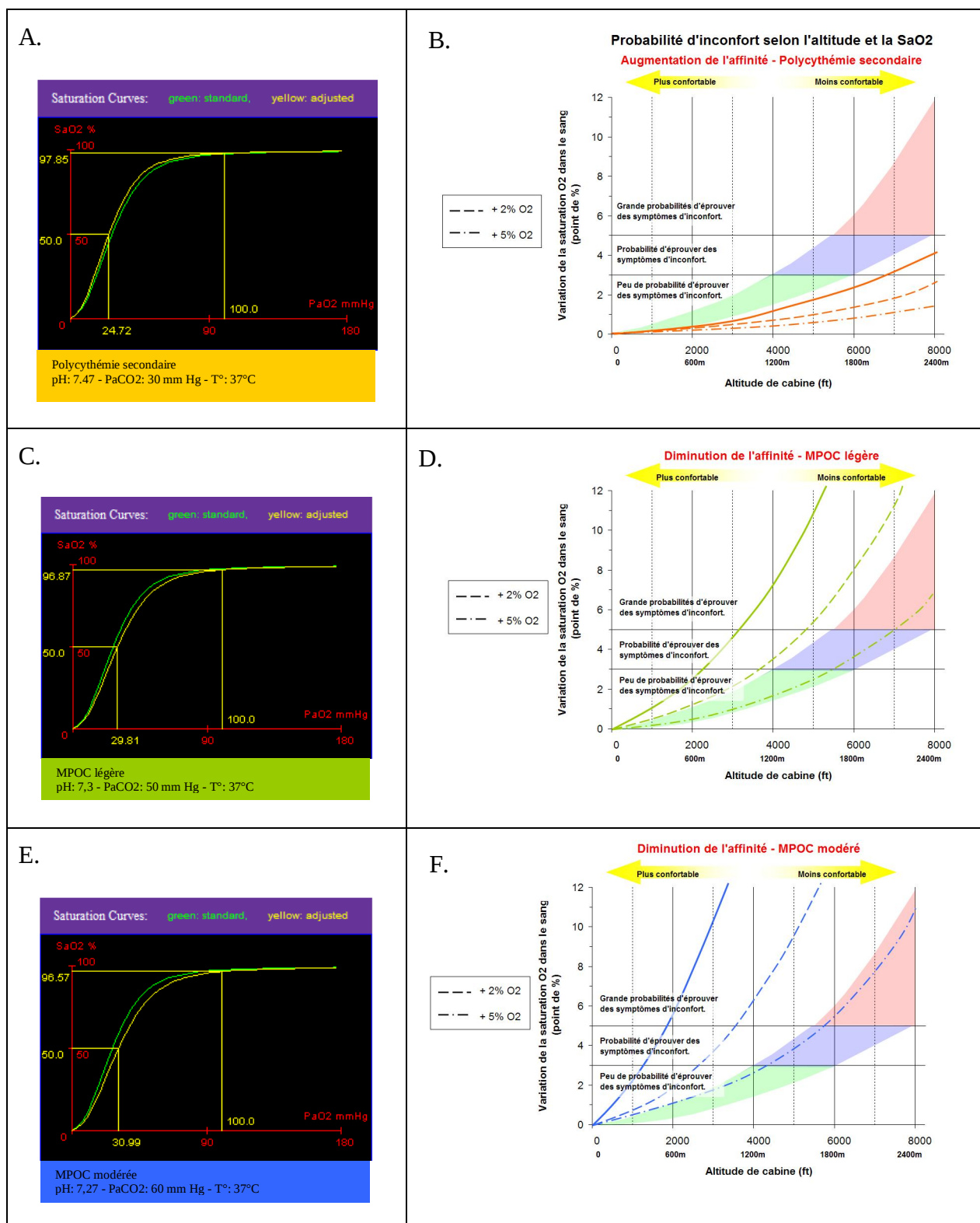


Figure 3-2 : Analyse de l'incidence de pathologies typiques sur le modèle de probabilité d'inconfort.

3.3 Incidence d'une augmentation du taux d'oxygène sur le modèle

Les Figure 3-3 A. et B. présentent l'incidence d'une augmentation du taux d'oxygène dans la cabine de 2 % et de 5 % sur les courbes « Étude AD », « Autres Études » et « Étude Boeing ». À la Figure 3-3 A., il est possible de constater qu'entre une altitude de cabine de 0 à 2100 m (7000 pi) l'ensemble des courbes se retrouve sous la limite des grandes probabilités d'éprouver de l'inconfort. À la Figure 3-3 B., on constate qu'entre une altitude de cabine de 0 à 2400 m (8000 pi) l'ensemble des courbes se retrouve sous la limite des probabilités d'éprouver de l'inconfort.

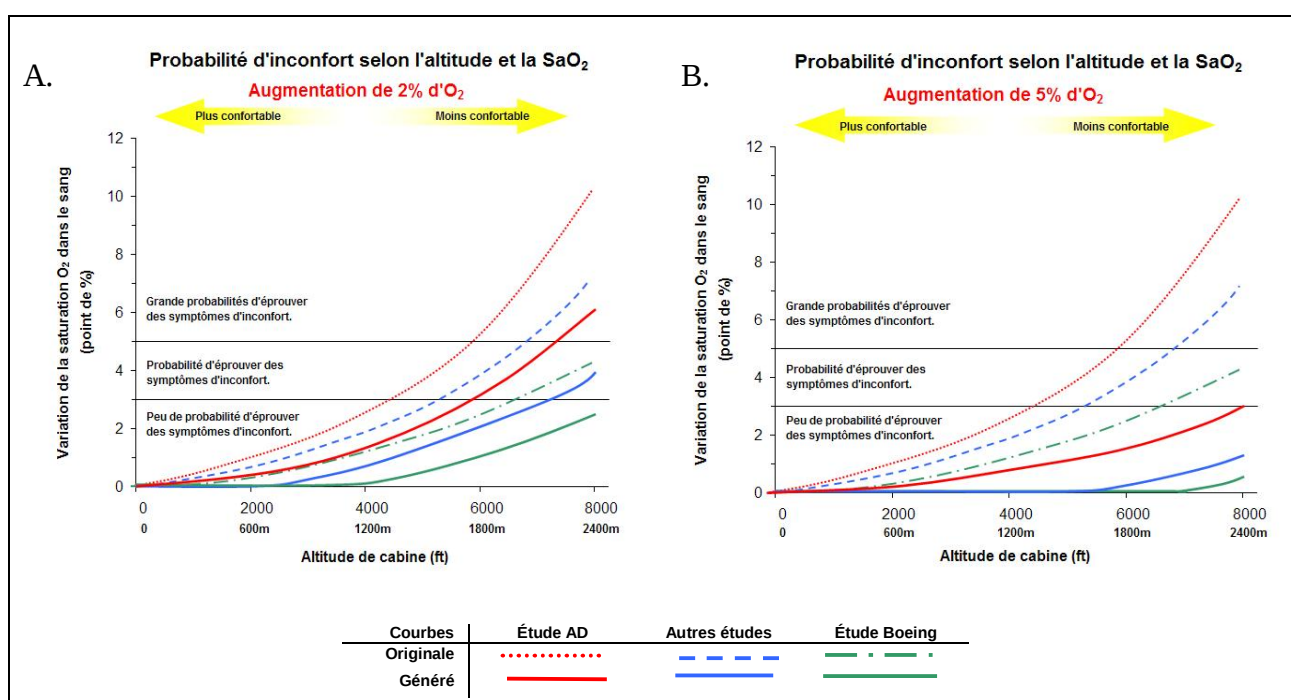


Figure 3-3 : Incidence de l'augmentation du taux d'oxygène de 2 % et de 5 % sur les courbes « Étude AD », « Autres Études » et « Étude Boeing ».

CHAPITRE 4 DISCUSSION

Pour parvenir à augmenter le confort à l'intérieur des cabines d'avion, il est généralement recommandé d'augmenter la pression interne afin de ralentir l'apparition des symptômes d'inconfort. Il est toutefois difficile d'y arriver en considérant l'altitude externe d'environ 15 500 m (51 000 pi) et une altitude interne d'environ 600 m (2000 pi) car, plus le différentiel de pression est élevé, plus le fuselage doit être solide pour résister à cet écart. Ceci représente donc un enjeu important pour l'industrie aéronautique, puisque pour avoir la possibilité d'augmenter le confort à l'intérieur des avions, un travail colossal doit être effectué sur la structure de l'avion lequel peut être très coûteux en poids et, de fait, avoir un impact économique majeur sur le projet dans son ensemble. Ainsi, la construction d'un modèle permettant d'estimer les probabilités d'inconfort ressenti par les passagers en période de vol devient un élément déterminant pour les concepteurs.

Le choix du niveau de pressurisation de la cabine se fait tôt dans les processus de conception. Pour les ingénieurs, ce choix fait partie des principaux éléments d'optimisation de la conception de l'avion. Le niveau de pressurisation d'un avion a un impact sur un ensemble de caractéristiques de l'avion dont le poids total, la consommation de carburant et la portée de l'avion, de même que sur les coûts de fabrication et d'opération. La réalisation de modèles tels que celui proposé ici permettra aux ingénieurs de mieux comprendre la situation de pression en lien avec l'inconfort des passagers et de justifier leurs choix de conception et les coûts encourus. Ce modèle d'estimation de l'inconfort relatif à la pressurisation apparaît comme un élément de départ dans un ensemble sur lequel sont basées des décisions influençant le confort en cabine. Il est souhaitable que, dans un avenir proche, des modèles similaires portant sur d'autres facteurs qui influencent l'environnement des passagers, comme l'acoustique, la luminosité, la qualité de l'air dans la cabine, soient développés aux fins d'aide à la conception et à l'amélioration des conditions de confort dans les avions.

4.1 Utilisation du modèle

Les étapes à suivre pour utiliser le modèle présenté à la Figure 3-1 sont comme suit:

- Identifier si la conception est destinée une population à risque ou non en haute altitude, en considérant l'âge, les conditions de santé et l'altitude de résidence de la population ciblée par le design.
- Sélectionner le niveau de confort souhaité en cabine, en identifiant le type d'appareil et les coûts envisagés. Ainsi, le niveau de confort souhaité par un client d'avion(s) d'affaires ne sera pas le même que celui souhaité par un client d'avion commercial. Le client d'un avion d'affaires payera plus cher pour avoir son propre appareil et pour s'y sentir aussi confortable qu'à sa résidence (zone « aucun inconfort ») comparativement à un client d'avion(s) commercial dont le coût du billet sera moins élevé et qui s'attendra à un confort plus standard (zone « possibilité de ressentir de l'inconfort »).
- À partir du croisement de ces informations (« à risque »/« non à risque » et « aucun inconfort »/« possibilité de ressentir de l'inconfort »), il sera ainsi possible de connaître les seuils d'altitudes de cabine à respecter pour garantir le confort de la population de passagers ciblés.

4.2 Interprétation des résultats

L'analyse de l'incidence de certaines pathologies typiques, associées à l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène, sur le modèle de probabilité d'inconfort a permis de valider son applicabilité. Notamment à la Figure 3-2 B., le cas d'une polycythémie secondaire présente une courbe sous la zone définie par le modèle. Cette situation est due au fait que le modèle attribue les probabilités d'inconfort en fonction du taux de saturation d'oxygène et que dans un cas de polycythémie secondaire l'ensemble des globules rouges sont à saturation complète, mais d'une combinaison de CO et d'oxygène. Par ce fait, il est donc normal que la courbe se trouve sous la zone définie par le modèle (près d'une saturation complète). Le problème d'une polycythémie est que puisque l'affinité de l'hémoglobine est élevée, l'oxygène n'est pas libéré convenablement aux tissus et organes, donc l'augmentation du taux d'oxygène ne s'avère pas une solution envisageable pour améliorer la situation de confort des passagers atteints. Les courbes pointillées

présentées en Figure 3-2 B. confirment que l'ajout d'oxygène (2 % et 5 %) augmente la saturation. Pour les cas de MPOC légère et modérée, les courbes générées aux Figure 3-2 D. et F. se trouvent au-dessus des zones décrites par le modèle. Ces situations s'expliquent par une saturation de l'hémoglobine inférieure à la normale, il est donc logique que ces cas rencontrent de grandes probabilités d'éprouver de l'inconfort en haute altitude. Ainsi, autant pour les cas de MPOC que pour les courbes décrites dans le modèle initial, l'augmentation du taux d'oxygène dans la cabine réduit les situations d'inconfort pour les passagers. À la suite de ces expérimentations, l'augmentation du taux d'oxygène dans la cabine s'avère une solution envisageable afin d'améliorer le confort des passagers en santé et des passagers ayant des problèmes de santé pouvant les incommoder en situation de haute altitude.

4.3 Limitations du modèle

Lors de l'utilisation de ce modèle d'estimation de probabilité d'inconfort, certaines limites doivent être prises en considération :

- Le modèle permet d'estimer les probabilités d'inconfort ressenti par les passagers en période de vol en fonction de leur condition de santé. En tant que concepteur, il est possible de faire une approximation de l'état de santé de la population ciblée par le concept. Toutefois, lorsqu'il est question de l'état de santé d'une personne, un avis médical s'impose et comme le démontre la seconde expérimentation, l'état de santé d'un passager peut modifier de façon distincte la courbe. Ainsi, du point de vue du concepteur, un choix conservateur (demeurer dans la zone « Peu de chance de ressentir de l'inconfort ») peut être fait si la population ciblée est une population vieillissante, désirant ne pas subir d'inconforts en vol, puisque le taux de problèmes de santé est plus élevé pour cette population.
- Au moment de la réalisation du modèle, une large majorité de la population a été prise en compte, ce qui doit donc inciter l'utilisateur de ce modèle à être prudent puisque, tel que démontré par la deuxième expérimentation (incidence des pathologies), une autre partie de la population est exclue de ces zones. Cela signifie que la totalité de la population mondiale n'est pas représentée par le modèle. Il est encore trop tôt pour

déterminer le taux de la population se trouvant dans la zone « personnes à risque en situation de haute altitude ». Éventuellement, il serait intéressant d'en connaître davantage sur le taux de population atteint par les pathologies à risques en altitude et ainsi apporter les modifications nécessaires pour que le modèle soit plus représentatif.

- Les zones décrites par le modèle désignent une population en santé, elles ne sont donc pas applicables aux situations où l'état de santé du passager est comparable aux pathologies présentées plus tôt (affinité de l'hémoglobine basse ou élevée). Le modèle devrait être ajusté de sorte que la portion de la population atteinte de ces types de pathologies soit mieux représentée par les zones définies dans le modèle.

- Puisque l'attribution des probabilités d'inconfort du modèle est réalisée à partir du ΔSaO_2 , les cas où l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène est élevée, par exemple une polycythémie secondaire, ne peuvent être représentés par le modèle. L'hémoglobine des personnes atteintes par cette pathologie est déjà près de la saturation complète, la source de leur problème ne provient pas de la saturation, mais bien du taux d'oxygène libéré aux tissus et organes.

- Le modèle présenté dans cette étude peut informer quant aux probabilités d'inconfort éprouvé par les passagers en fonction de la pressurisation de la cabine. Il est important de noter que ce modèle ne renseigne pas l'utilisateur sur le niveau ou le degré de confort. Il serait intéressant que des recherches futures se penchent sur cette question de la gradation de l'inconfort en fonction de la durée du vol et de la pression de cabine, ce qui permettrait d'affiner le présent modèle.

- Cette étude se concentre uniquement sur des facteurs liés à la pressurisation de la cabine d'un avion. En réalité, de nombreux autres facteurs peuvent influencer la perception de confort pour les passagers tels que l'impact du rythme circadien, l'ambiance thermique (débit d'air frais, vitesse de l'air, humidité, etc.), la qualité de l'air (contaminants chimiques, biologiques, etc.) et, également, les autres facteurs de stress psychologiques et physiques (vibrations, bruit, luminosité, etc.).

4.4 Perspectives de recherche

Après avoir examiné un grand nombre de recherches sur le confort en altitude, on note que plusieurs aspects entourant le confort dans des conditions de vol ne sont pas suffisamment documentés, comme par exemple, l'impact potentiel d'un environnement pressurisé sur les jeunes enfants (hypoxie chez les enfants) et les femmes enceintes (hypoxie du fœtus), le contrôle du phénomène des oreilles bouchées pendant la montée et la descente (un aspect important en ce qui a trait au confort en cabine) ainsi que les risques potentiels de l'ajout d'oxygène pour les passagers atteints de polycythémie secondaire. Il serait également intéressant de tester les niveaux de tolérance aux symptômes mineurs d'AMS selon le sexe, l'âge ou le poids des passagers (notamment pour les cas d'obésité). En définitive, afin d'élargir les connaissances sur la question du confort dans les transports aériens, il serait intéressant de déterminer si le A-a gradient varie selon l'altitude et si cela a des conséquences sur les niveaux de confort à diverses altitudes et à diverses SaO_2 à travers le temps.

CONCLUSION

Cette étude a permis de réunir les connaissances au sujet du confort des passagers selon la pressurisation d'une cabine d'avion aux fins de développement d'un modèle d'estimation du confort. Ce modèle démontre qu'il n'est pas nécessaire d'abaisser l'altitude de cabine (augmenter la pressurisation) au niveau de la mer pour réellement accroître le confort des passagers. Du point de vue des ingénieurs-concepteurs en aéronautique, l'existence d'un modèle de ce type est d'un grand intérêt puisqu'il donne un aperçu de l'impact de la pressurisation sur le confort des passagers. Ainsi, il leur permettra de faire des choix appropriés afin de concilier l'optimisation des coûts d'opération et de fabrication et le confort des passagers.

En se basant sur le modèle présenté dans cette étude, il serait pertinent d'analyser l'impact d'une pressurisation élevée de la cabine sur le poids global de l'appareil : cela octroierait aux ingénieurs un argument additionnel pour leurs choix de conception. D'autres modèles du même type pourraient également être développés selon différents facteurs environnementaux de la cabine ayant un impact sur le confort du passager (ambiance thermique, vibration, luminosité, etc.).

BIBLIOGRAPHIE

- 2,3 - *Diphosphoglycerate* (2010). Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://translate.google.ca/translate?hl=fr&langpair=en%7Cfr&u=http://www.online-medical-dictionary.org/2,3-Diphosphoglycerate.asp%3Fq%3D2%252C3-Diphosphoglycerate>.
- Aerosp Med Assoc; Aviation Safety Comm; Civil Aviation, S. (2008). Cabin cruising altitudes for regular transport aircraft. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 79(4), 433-439.
- Aldrete, J. A., & Aldrete, L. E. (1983). Oxygen Concentrations in Commercial Aircraft Flights. *Southern Medical Journal*, 76(1), 12-14.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2004). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 : thermal environmental conditions for human occupancy*
- Atmosphère normalisée* (2010). Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8renormalis%C3%A9e>.
- Auten, J. D., Kuhne, M. A., Walker Ii, H. M., & Porter, H. O. (2010). Neurologic decompression sickness following cabin pressure fluctuations at high altitude. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 81(4), 427-430.
- Baele, P. M., & Van der Linden, P. (2002). *Le transport de l'oxygène par le sang* (Doctorat, Université Catholique de Louvain/ Université Libre de Bruxelles, Louvain/ Bruxelles).
- Balducci, G., Bianco, V., Manca, O., Nardini, S., & Roma, M. (2009). Numerical investigation on thermal and fluid dynamic behaviors of air conditioning in aircraft cabin. *Jacksonville, FL* (Vol. 3, pp. 387-394). Scopus 2 juin 2010. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70349111523&partnerID=40&md5=542dc5ed2ca9698261baf7cd10c35a97>
- Boeing_Commercial_Airplanes (2008). [Boeing 787 Dreamliner Offers Improved Experience for Passengers].
- Brandt, M. S., Morrison, T. O., & Butler, W. P. (2009). Decompression sickness rates for chamber personnel: Case series from one facility. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 80(6), 570-573.
- Branton, P. (1972). *Ergonomic Research Contributions to the Design of the passenger Environment*. Paper presented at the Passenger Environment Conference, London.
- Brown, A. C. (2004). *Respiration Physiology: Alveolar Gas Exchange: Review of Partial Pressure*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.acbrown.com/lung/Lectures/RsAlvl/RsAlvlPrtl.htm>
- Brown, T. P., Shuker, L. K., Rushton, L., Warren, F., & Stevens, J. (2001). The possible effects on health, comfort and safety of aircraft cabin environments. *The journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, 121(3), 177-184.

- Brundrett, G. (2001). Comfort and health in commercial aircraft: a literature review. *The journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, 121(1), 29-37.
- Brundrett, G. (2002). Sickness at high altitude: a literature review. *The journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, 122(1), 14-20.
- Butler, C., & Griffin, M. J. (2009). Motion sickness with combined fore-aft and pitch oscillation: effect of phase and the visual scene. *Aviation, space, and environmental medicine*, 80(11), 946-954.
- Chee, Y. L., & Watson, H. G. (2005). Air travel and thrombosis. *British Journal of Haematology*, 130(5), 671-680.
- Chengular, S. R., Rodgers, S. H., & Bernard, T. E. (2004). *Kodak's ergonomic design for people at work, 2e edition*. New Jersey: Wiley and Sons.
- Cherniack, R. (1995). Physiologic diagnosis and function in asthma. *Clinics in Chest Medicine*, 16(4), 567-581.
- CNRC. (2002). *The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew*. Washington: National Academy Press.
- Coker, R. K., & Partridge, M. R. (2000). Assessing the risk of hypoxia in flight: the need for more rational guidelines. *European Respiratory Journal*, 15, 128-130.
- Committee, A. T. M. (1997). The Very Large Airplane: Safety, Health, and Comfort Considerations. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 68, 943-946.
- Coste, O., Van Beers, P., & Touitou, Y. (2007). Impact of hypobaric hypoxia in pressurized cabins of simulated long-distance flights on the 24h patterns of biological variables, fatigue, and clinical status. *Chronobiology International*, 24(6), 1139-1157.
- Curran-Everett, D. (2006). A classic learning opportunity from Fenn, Rahn, and Otis (1946): the alveolar gas equation. *Advances in Physiology Education*, 30, 58-62.
- Denison, D. M., Lewith, F., & Poulton, E. C. (1966). Complex Reaction Times at Simulated Cabin Altitudes of 5,000 Feet and 8,000 Feet. *Aerospace Medicine*, 37(10), 1010-1013.
- Dietz, T. E. (2000). *Oxygen Saturations at Altitude*. High Altitude Medicine Guide. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.high-altitude-medicine.com/SaO2-table.html>.
- Editions Larousse. *Définition : confort - Dictionnaire Français Larousse*. Consulté le 24 mars 2011, tiré de <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/confort/18147>.
- Essig, M., & al., e. (2008). *Arterial Blood Gases*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.webmd.com/lung/arterialbloodgases>.
- FAA. (2001). Pressurized Cabins. In A. a. Space (Ed.), 25.841 (pp. 424-425): Office of the Federal Register National Archives and Records Administration.
- Feldman, J., & Zimmerman, L. (2003). *Alveolar-arterial Oxygen Gradient*. Intro to Arterial Blood Gases, Part 1. Consulté le 29 mars 2011, tiré de http://missinglink.ucsf.edu/lm/abg/abg1/a_a_gradient.html.
- Gendreau, A. M., & DeJohn, C. (2002). Responding to Medical Events during Commercial Airline Flights. *New England Journal of Medicine*, 346(14), 1067-1073.

- Grady, M. (2009). *Private Aviation: New Developments in Cabin Comfort*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.robbreport.com/Private-Aviation-New-Developments-in-Cabin-Comfort>.
- H.E.P.A. System (2005). Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.natech.ca/hepasystem.html>.
- Hackett, P. H., & Roach, R. C. (2001). High-Altitude Illness. *New England Journal of Medicine*, 345(2), 107-114.
- Hagan, M. J., & Lambert, S. M. (2008). A randomised crossover study of low-ankle-pressure graduated-compression tights in reducing flight-induced ankle oedema. *The Medical journal of Australia*, 188(2), 81-84.
- HEPA Filter Service. Consulté le 29 mars 2011, tiré de http://www.hepafilterservices.com/index_fr.html.
- Hinninghofen, H., & Enck, P. (2006). Passenger well-being in airplanes. *Autonomic neuroscience : basic & clinical*, 129(1-2), 80-85.
- Jurist, J. (2005). *Human factors in commercial suborbital flight: what do I breathe, and why?* Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.thespacereview.com/article/333/1>
- Kim, J. N., & Lee, B. M. (2007). Risk factors, health risks, and risk management for aircraft personnel and frequent flyers. *Journal of toxicology and environmental health. Part B, Critical reviews*, 10(3), 223-234.
- Lavoie C. et Pownall B. (mars 2011). Facteurs d'ambiance thermique dans une cabine d'avion. Communication personnel, Bombardier Aéronautique.
- Lillo, R. S., & al. (2002). Using animal data to improve prediction of human decompression risk following air-saturation dives. *Journal of Applied Physiology*, 93(1), 216-226.
- Lortie, P. (2010). *Charges*. ARE 2400 Structure Design. École Polytechnique. Montréal.
- Mayr, R. (1959). Comfort in railway travel. *The Railway Gazette*, 266-269.
- McFarland, R. A. (1971). Human factors in the relation to the development of pressurized cabins. *Aerospace Medicine*, 42, 1303-1318.
- McFarland, R. A. (1975). Air Travel across Time Zones. *American Scientist*, 63(1), 23-30.
- MedCalc3000 (1998). *A-a Gradient*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://medcalc3000.com/AAGradient.htm>.
- Metzger, P. (1994). *Komfortverstandis bei Kraftfahrern* (diplomarbeit an der Freien, Universitat Berlin, Berlin).
- Mieske, K., Flaherty, G., & O'Brien, T. (2010). Journeys to High Altitude-Risks and Recommendations for Travelers with Preexisting Medical Conditions. *Journal of Travel Medicine*, 17(1), 48-62.
- Mohr, L. C. (2008a). Hypoxia Altitude Simulation Test: An Increasingly Performed Test for the Evaluation of Patients Prior to Air Travel. *American College of Chest Physicians*, 133, 839-842.

- Mohr, L. C. (2008b). Hypoxia during air travel in adults with pulmonary disease. *The American journal of the medical sciences*, 335(1), 71-79.
- Molenat, F., & Boussuges, A. (2002). Operation Everest III (Comex'97): Altitude-induced decompression sickness during a hypobaric chamber experiment. Necessity for circulating venous gas emboli monitoring for the investigators. *Chest*, 121(1), 173-177.
- Moses, S. (2007). *Arterial Blood Gas*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.fpnotebook.com/Renal/Lab/ArtrlBldGs.htm>
- Moses, S. (2008). *A-a Gradient*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.fpnotebook.com/renal/lab/agrdnt.htm>.
- Muehlberger, P. M., Pilmanis, A. A., Webb, J. T., & Olson, J. E. (2004). Altitude decompression sickness symptom resolution during descent to ground level. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 75(6), 496-499.
- Muhm, J. M., Rock, P. B., McMullin, D. L., Jones, S. P., Eilers, K. D., Space, D. R., et al. (2007). Effect of Aircraft-Cabin Altitude on Passenger Discomfort. *The New England Journal of Medicine*, 357, 18-27.
- Murphy, M. J. (2008). Measurement of physical environmental parameters and apparent ventilation rates aboard passenger aircraft. *Journal of ASTM International*, 5(5).
- Muza, S. R., Lyons, T. P., & Rock, P. B. (1999). Effect of Altitude Exposure on Brain Volume and Development of Acute Mountain Sickness. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 474, 414.
- Nagda, N. L., & Koontz, M. D. (2003). Review of studies on flight attendant health and comfort in airliner cabins. *Aviation, space, and environmental medicine*, 74(2), 101-109.
- Nicol, E., & al. (2007). Pneumopericardium and pneumomediastinum in a passenger on a commercial flight. *Aviation, space, and environmental medicine*, 78(4), 435-439.
- Oakes, D. (2008). *Clinical Practitioners Pocket Guide to Respiratory Care*. 7th edition.
- O'Brien, J. M. (2009). *Measurement of gas exchange*. Pulmonary disorders. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.merck.com/mmpe/sec05/ch046/ch046c.html>.
- Oborne, D. J. (1978). Passenger comfort - An overview. *Applied ergonomics*, 9(3), 131-136.
- OCDE, (2011). *OECD Health Data 2011 - Frequently Requested Data*: Organisation de Coopération et de Développement Économique. Consulté le 4 juillet 2011, tiré de http://www.oecd.org/document/60/0,2340,fr_2825_495642_32368700_1_1_1_1,00.html.
- Pilmanis, A. A., Webb, J. T., & Balldin, U. I. (2005). Partial pressure of nitrogen in breathing mixtures and risk of altitude decompression sickness. *Aviation, space, and environmental medicine*, 76(7), 635-641.
- Quehl, J. (2001). *Comfort studies on aircraft interior sound and vibration* (Doctorat, Carl Von Ossietzky Iniversitat Oldenburg, Oldenburg).
- Rayman, R. B. (1997). Passenger Safety, Health, and Comfort: A Review. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 68(5), 432-440.
- Richalet, J. P., & Rathat, C. (1991). *Pathologie et Altitude*. Paris: Masson.

- Ross, R. T. (1985). The random nature of cerebral mountain sickness. *Lancet*, 1, 990-991.
- Sampson, J. B., & al. (1983). Procedures for the Measurement of Acute Mountain Sickness. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 54(12), 1063-1073.
- Samuels, M. P. (2004). The effects of flight and altitude. *Archives of Disease in Childhood*, 89(5), 448-455.
- Santé Canada, (2007). *Humidité et moisissures dans l'air intérieur*. Consulté le 18 avril, 2011, tiré de <http://www.hc-sc.gc.ca/hl-vs/iyh-vsv/envIRON/air-fra.php>
- Savourey, G., & al. (1995). Evaluation of the Lake Louise Acute Mountain Sickness Scoring System in a Hypobaric Chamber. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 66(10), 963-967.
- Schacke, G., Scutaru, C., & Groneberg, D. A. (2007). Effect of aircraft-cabin altitude on passenger discomfort. *The New England journal of medicine*, 357(14), 1445-1446.
- Scheuring, R., Conkin, J., Jones, J. A., & Gernhardt, M. L. (2008). Risk assessment of physiological effects of atmospheric composition and pressure in constellation vehicles. *Acta Astronautica*, 63, 727-739.
- Sende, J. (2010). *Lire les gaz du sang*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.ednes.com/gaz/index>
- Shepherd, L., & Edwards, S. L. (2004). The effects of flying: processes, consequences and prevention. *British journal of nursing (Mark Allen Publishing)*, 13(1), 19-29.
- Singh, B. (2002). Sickness pattern among air travellers: review of 735 cases at the Oman airport. *Aviation, space, and environmental medicine*, 73(7), 684-687.
- Slater, K. (1985). *Human Comfort*. Springfield: Charles C Thomas.
- Space, D. R., & Nagda, N. L. (1999). *The airplane cabin environment; Past, Present and Future Research*. Paper presented at the Air quality and comfort in airliner cabins; Proceedings of the Symposium, New Orleans.
- Thomassen, O., & Skaiaa, S. C. (2007). High-altitude cerebral edema with absence of headache. *Wilderness and Environmental Medicine*, 18(1), 45-47.
- Tortora, G. J., & Grabowski, S. R. (2000). Principe d'anatomie et de physiologie. (version française), Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 844-855.
- Turner, M., Griffin, M. J., & Holland, I. (2000). Airsickness and aircraft motion during short-haul flights. *Aviation, space, and environmental medicine*, 71(12), 1181-1189.
- Varjavand, N., & al. (2000). *The Interaction Oxyhemoglobin Dissociation Curve*. Consulté le 29 mars 2011, tiré de <http://www.ventworld.com/resources/oxydisso/dissoc.html>.
- Varjavand, N., Kaye, J. M., Wang, S., & Primiano, F. P. (2000). *The interactive dissociation tool. in: The oxyhemoglobin dissociation curve*. Consulté le 24 mars 2011, tiré de <http://www.ventworld.com/resources/oxydisso/oxydisso.html> in : <http://www.ventworld.com/resources/oxydisso/dissoc.html#understand>.

- Webb, J. T., Pilmanis, A. A., Kannan, N., & Olson, R. M. (2000). The effect of staged decompression while breathing 100% oxygen on altitude decompression sickness. *Aviation, space, and environmental medicine*, 71(7), 692-698.
- West, J. B. (2004). The Physiologic Basis of High-Altitude Diseases. *Annals of Internal Medicine*, 141(10), 789-800.
- Wilkins, R. L., Stoller, J. K. & Kacmarek R. M. (2009), Egan's Fundamentals of Respiratory Care, Ninth edition, 246-257.