



HAL
open science

Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation

Mohamed Mammeri

► To cite this version:

Mohamed Mammeri. Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation. Autre [cs.OH]. Université Paris Dauphine - Paris IX, 2013. Français. NNT : 2013PA090014 . tel-00915734

HAL Id: tel-00915734

<https://theses.hal.science/tel-00915734>

Submitted on 9 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ PARIS-DAUPHINE
École Doctorale de Dauphine (ED543)

Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de
Docteur en Informatique

Mohamed Lounes MAMMERI

**Une approche d'aide multicritère à la décision pour
l'évaluation du confort dans les trains**
Construction d'un modèle d'évaluation

Sous la direction de
Denis BOUYSSOU et Meltem ÖZTÜRK

Soutenue le 17 septembre 2013

Jury :

Marc PIRLOT :	Professeur à l'Université de Mons – Faculté Polytechnique
Vincent MOUSSEAU :	Professeur à l'École Centrale Paris
Alexis TSOUKIÀS :	Directeur de Recherche CNRS au LAMSADE
Denis BOUYSSOU :	Directeur de Recherche CNRS au LAMSADE
Meltem ÖZTÜRK :	Maitre de Conférences à l'Université Paris Dauphine
Corinne TALOTTE :	Manager à la SNCF
Cédric GALLAIS :	Chargé de Recherche à la SNCF

L'Université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses: ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Résumé

Les travaux de recherche menés dans cette thèse s'inscrivent dans deux champs disciplinaires que sont l'évaluation du confort et l'aide multicritère à la décision. L'objectif de la thèse est de construire un modèle pour évaluer des trains sur le point de vue du confort tel qu'il est perçu par les voyageurs. L'approche utilisée pour cela repose sur trois étapes principales de construction d'un modèle d'aide multicritère à la décision. La première consiste à définir et à formaliser les critères de confort du problème. Dans la deuxième étape, il s'agit de construire les échelles afin de pouvoir évaluer les trains sur chaque critère de confort considéré. La troisième étape consiste à agréger les critères de confort en utilisant des méthodes d'agrégation multicritère. Cette étape nécessite l'élicitation des préférences des décideurs afin de mettre en œuvre les méthodes d'agrégation.

Notre contribution est de formaliser une approche pour la construction d'un modèle d'évaluation du confort dans les trains. Cette approche peut être appliquée à d'autres problématiques que l'évaluation du confort. Elle présente deux particularités principales. La première est d'intégrer dans la construction du modèle des facteurs importants traduisant la perception du confort. Nous avons choisi pour cela un modèle hiérarchique comportant plusieurs niveaux. La deuxième particularité de l'approche est d'utiliser des méthodes d'agrégation pouvant être différentes d'un nœud à un autre du modèle. Elle présente également d'autres aspects plus spécifiques, notamment lors de l'élicitation des préférences où nous construisons des exemples d'apprentissage informatifs pour accélérer le processus d'élicitation.

Mots clés : aide multicritère à la décision, confort voyageurs, élicitation des préférences, recherche opérationnelle.

Table des matières

Introduction générale	7
1 L'aide multicritère à la décision	10
Introduction	10
1.1 Méthodologie d'aide à la décision	10
1.1.1 Processus de décision et aide à la décision	11
1.1.2 Les approches d'aide à la décision	11
1.1.3 Les étapes d'une méthodologie d'aide à la décision	13
1.2 L'aide multicritère à la décision	15
1.2.1 Actions et alternatives	16
1.2.2 La problématique	16
1.2.3 Critère et famille de critères	17
1.3 Échelles et signifiante	20
1.3.1 Échelle de mesure	20
1.3.2 La signifiante	22
1.4 Dépendances entre critères	23
1.4.1 Dépendances au sens des préférences	24
1.4.2 Dépendances au sens structurel	26
1.5 Les méthodes multicritères (procédure d'agrégation multicritère)	27
1.5.1 Les méthodes utilisant un critère unique de synthèse	27
1.5.2 Les méthodes de surclassement	34
1.5.3 Les méthodes à base de règles	41
1.6 L'élicitation des paramètres décisionnels	43
1.6.1 Les paramètres des méthodes utilisant un critère unique de synthèse	44
1.6.2 Les paramètres de la méthode ELECTRE TRI	53
Conclusion	54
Annexe	54

2	Le confort	55
	Introduction	55
2.1	Le concept de confort	55
	2.1.1 La différence de vision	56
	2.1.2 Le confort de l'utilisateur	58
	2.1.3 Le confort et ses frontières	61
2.2	Les outils d'analyse et d'évaluation du confort dans les trains . . .	62
	2.2.1 Les outils d'analyse du confort	62
	2.2.2 Les outils d'évaluation du confort global	65
2.3	Les caractéristiques du confort dans les trains	67
	Conclusion	69
3	Formalisation du processus d'aide à la décision	71
	Introduction	71
3.1	Description initiale du problème	71
3.2	Contexte et enjeux	72
3.3	Périmètre du problème	73
3.4	Analyse du processus de décision associé à l'achat ou à la rénovation d'un TGV	74
	3.4.1 Description du processus	75
	3.4.2 Les intervenants dans le processus	76
	3.4.3 Les données associées au processus	78
	3.4.4 Besoins et préoccupations par rapport à l'utilisation de l'outil	79
	3.4.5 Insertion de l'outil au sein du processus	81
3.5	L'approche utilisée	81
	3.5.1 Description de l'approche	81
	3.5.2 Avantages et inconvénients de l'approche	86
	Conclusion	87
4	Construction des critères	89
	Introduction	89
4.1	Les étapes suivies pour la construction du modèle conceptuel . . .	90
	4.1.1 Des besoins et préoccupations aux interrogations	90
	4.1.2 Quel type de modèle?	91
	4.1.3 Comment construire un tel modèle?	92
4.2	La perception du confort et de ses composantes dans les trains . . .	92
	4.2.1 Les interactions entre composantes physiques du confort . . .	93
	4.2.2 Le type d'activité pratiquée dans le train	95
	4.2.3 Les facteurs individuels	96
	4.2.4 La présence des autres voyageurs	96
	4.2.5 Le facteur temporel	97

4.3	Le modèle conceptuel	98
4.3.1	Premier niveau	99
4.3.2	Deuxième niveau : décomposition du confort assis, confort debout et de la qualité perçue	100
4.3.3	Troisième niveau : la variabilité interindividuelle	102
4.3.4	Quatrième niveau : les modalités de confort	104
4.3.5	La modalité acoustique	105
4.3.6	La modalité dynamique	107
4.3.7	La modalité thermique	108
4.3.8	La modalité Ambiance lumineuse	109
4.3.9	La modalité siège environné	109
4.3.10	La modalité tympanique	110
4.3.11	La modalité aménagement et services	111
4.4	Construction des échelles	112
4.4.1	Les échelles du modèle	112
4.4.2	Méthodologie de construction des échelles	113
4.4.3	Les échelles de critères de la modalité thermique	114
4.4.4	Les échelles de critères de la modalité siège environné	118
4.5	Discussion	121
4.5.1	Le modèle conceptuel de confort par fascicules	121
4.5.2	L'intégration de la variabilité interindividuelle dans le modèle	123
4.5.3	Sémantique associée aux critères	125
4.5.4	La décomposition par endroits	126
4.6	Construction des critères : bilan et perspectives	129
4.6.1	Construction du modèle conceptuel (définition et formalisation des critères)	129
4.6.2	Construction des échelles	131
	Conclusion	133
5	Agrégation des critères	135
	Introduction	135
5.1	Description de l'étape d'agrégation des critères	135
5.1.1	Choix des méthodes d'agrégation	136
5.1.2	Elicitation des préférences	139
5.2	Agrégation des critères de la modalité thermique	142
5.2.1	Niveau 3 : agrégation des dimensions	142
5.2.2	Niveau 2 : agrégation des critères <i>Absence de sensations désagréables</i> et <i>Absence de rupture</i>	148
5.2.3	Niveau 1 : agrégation des saisons	149
5.2.4	Synthèse et discussion	153

5.3	La modalité <i>siège environné</i>	153
5.3.1	Deuxième niveau : Agrégation des dimensions	154
5.3.2	Premier niveau : Agrégation des inconforts sur les parties du corps	156
5.3.3	Synthèse et discussion	160
5.4	Agrégation des critères : bilan et perspectives	161
5.4.1	Caractéristiques de l’approche à l’étape d’agrégation	162
5.4.2	État d’avancement et pistes envisagées	163
Conclusion		166
6	Validation du modèle d’évaluation	167
Introduction		167
6.1	Protocole de validation	167
6.1.1	Données d’entrée et protocole d’essai	168
6.1.2	Évaluation des configurations sur les dimensions	170
6.1.3	Formulation des suppositions	171
6.1.4	Correspondance entre les évaluations du modèle et celles des voyageurs	172
6.2	Validation de la modalité thermique	174
Conclusion		180
Annexe		182
7	Analyse critique et perspectives	184
Introduction		184
7.1	L’approche utilisée pour la construction du modèle d’évaluation	184
7.1.1	Caractéristiques générales du modèle d’évaluation	185
7.1.2	Arbitrage entre finesse du modèle et difficulté de sa mise en œuvre	187
7.1.3	Généralisation de l’approche utilisée	189
7.2	Interaction avec les intervenants	190
7.2.1	Interaction avec les experts en confort	191
7.2.2	Interaction avec les experts en matériel roulant (CIM)	193
7.3	Évolution de l’outil et du processus de décision	194
7.3.1	Intégration des évolutions et capitalisation des connaissances dans l’outil	194
7.3.2	Évolution du processus de décision	195
Conclusion		196
Conclusion et perspectives		198
Annexes		203

A Les échelles des modalités de confort	204
A.1 La modalité acoustique	204
A.1.1 Le bruit de fond	204
A.1.2 Les émergences	205
A.1.3 Le bruit des autres	207
A.2 La modalité dynamique	208
A.2.1 Le confort vibratoire	208
A.2.2 La cinétose	209
A.3 La modalité ambiance lumineuse	210
A.3.1 L'intensité d'éclairage	210
A.3.2 Le rendu des couleurs	212
A.3.3 La température de couleurs	212
A.3.4 Les gênes visuelles éventuelles	213
Glossaire	214
Bibliographie	216

Introduction générale

Le confort est un concept global, faisant intervenir de nombreux éléments liés à la personne qui le perçoit ainsi qu'à son environnement (habitat, lieu de travail, moyen de transport, etc.), ce qui en fait une notion complexe. Il suscite l'intérêt de nombreux secteurs économiques (hôtellerie, transport, textile, énergie, multimédia, électroménager) car il constitue un levier permettant de se démarquer de la concurrence. L'entreprise concernée, proposant le confort comme un élément de service, essaye de comprendre, à l'aide d'études et d'enquêtes, comment il est perçu par ses clients. Ces études sont utilisées ensuite pour agir sur l'environnement (construction d'un logement, construction d'un train, conception d'un produit). Pour cela l'entreprise sollicite généralement le constructeur ou le concepteur (également appelés ingénieur). Cependant, l'ingénieur n'a pas nécessairement la même vision du confort que la personne le percevant, il est donc important que l'entreprise dispose d'outils lui permettant de bien transmettre ses spécifications.

La SNCF, en tant qu'exploitant ferroviaire, cherche à améliorer de façon permanente le confort dans ses trains. Elle a mené pour cela plusieurs études et enquêtes afin de comprendre comment les voyageurs perçoivent le confort, l'objectif étant de pouvoir traduire les besoins en confort des voyageurs en un langage compréhensible par les constructeurs de trains, leur vision pouvant être différente de celle des voyageurs. Étant donné la complexité de la notion du confort, qui comporte de nombreux éléments subjectifs, la difficulté majeure lors de la traduction de ces besoins est d'arriver à « l'objectiver ». Pour cela, la SNCF utilise une méthodologie fondée sur la psycholinguistique et la psychophysique pour identifier les composantes du confort ainsi que la manière dont elles s'organisent dans la perception des voyageurs. Cette méthodologie est également utilisée pour déterminer les paramètres physiques (ainsi que leurs valeurs de références) dans un train qui influent sur ces composantes. Par exemple, la température, le niveau de vibration, le niveau de bruit et les dimensions du siège. Néanmoins, la SNCF ne dispose pas d'une vision globale du confort dans ses trains, alors que les études et enquêtes ont montré que le confort n'a du sens pour les voyageurs que dans sa globalité. Afin de disposer de cette vision globale, la SNCF a lancé le projet « Outil multicritère pour l'évaluation du confort » ayant pour objectif de construire un outil pour évaluer

les offres (trains) des constructeurs sur le point de vue du confort global lors d'un appel d'offres pour l'acquisition ou la rénovation d'un train.

Cette thèse s'inscrit dans ce projet et a pour objectif de développer une approche d'aide multicritère à la décision afin de construire un modèle d'évaluation du confort global tel qu'il est perçu par les voyageurs, pour juger les offres des constructeurs dans le cas d'un appel d'offres lors de l'acquisition ou de la rénovation d'un TGV. L'approche développée dans cette thèse sera également utilisée, dans le cadre de ce projet, pour construire des modèles d'évaluation du confort global pour d'autres types de trains (Transilien et TER).

Ce manuscrit de thèse comprend sept chapitres. Nous commencerons dans le premier par identifier les étapes d'une méthodologie d'aide à la décision en nous appuyant sur ce qui est proposé dans la littérature. Nous verrons ensuite quels sont les outils méthodologiques en aide multicritère à la décision qui permettront de construire un modèle d'évaluation.

Au chapitre 2, nous nous intéresserons au concept de confort de manière générale. Nous verrons également les différences de vision entre la personne l'expérimentant, l'ingénieur et l'exploitant, car ces différents acteurs sont concernés par notre modèle d'évaluation. Nous nous intéresserons également aux outils nous ayant permis d'identifier les critères de confort sur lesquels les offres seront évaluées et aux outils d'évaluation du confort global existant dans la littérature, afin d'identifier leurs limites et ainsi de montrer l'apport et la particularité de notre approche par rapport à l'évaluation du confort global. À la fin de ce chapitre nous tenterons d'identifier les caractéristiques du confort tel qu'il est perçu par les voyageurs dans les trains afin de pouvoir construire la famille de critères de notre modèle.

Le chapitre 3 sera consacré à la formalisation du processus d'aide à la décision associé à notre problème. Pour cela, nous nous intéresserons au processus de décision associé à l'achat et à la rénovation d'un TGV dont l'analyse nous permettra d'identifier les besoins et les préoccupations des différents intervenants. Nous discuterons des personnes avec qui il faut interagir et des données qui seront utilisées pour la construction du modèle. Nous présenterons, enfin, l'approche qui sera utilisée pour formaliser le processus d'aide à la décision et, plus particulièrement, pour construire le modèle d'évaluation. Pour cela, nous nous appuyerons sur la méthodologie présentée au chapitre 1. Les deux chapitres suivants seront consacrés aux étapes de notre approche correspondant à la construction du modèle d'évaluation (la définition des critères, la construction des échelles et l'agrégation des critères).

Au chapitre 4, nous nous intéresserons, tout d'abord, à la définition des critères du modèle d'évaluation. Pour cela, nous verrons en quoi les besoins et les préoccupations des intervenants par rapport à l'utilisation de l'outil ont affecté la construction du modèle de critères, sensé représenter, au mieux, la perception du confort par les voyageurs caractérisée au chapitre 2. Nous présenterons ensuite ce

modèle en étudiant si les conditions théoriques sur la construction d'une famille cohérente de critères sont vérifiées. Nous verrons, également dans ce chapitre, les étapes suivies pour la construction des échelles de critères. Nous verrons enfin comment nous avons construit les échelles correspondant à une partie des critères du modèle : les critères du confort thermique et du confort du siège.

Le chapitre 5 sera consacré à l'agrégation des critères et à l'élicitation des préférences. Nous présenterons une procédure permettant de choisir les méthodes d'agrégation utilisées dans notre modèle d'évaluation. Nous verrons, ensuite, comment nous avons agrégé les critères du confort thermique ainsi que ceux du siège, en montrant comment les préférences ont été élicitées.

Après la construction du modèle d'évaluation, nous verrons au chapitre 6 quelles sont les étapes principales d'une procédure de validation de ce modèle. La validation, dans notre cas, consiste à vérifier si les résultats fournis par le modèle représentent bien les évaluations des voyageurs. Nous montrerons, à titre d'exemple, comment nous avons appliqué cette procédure sur une partie du modèle d'évaluation qui est le confort thermique.

Le dernier chapitre est un chapitre de prise de recul sur l'approche utilisée pour la construction du modèle d'évaluation. Nous reviendrons dans un premier temps sur les caractéristiques générales du modèle d'évaluation. Nous verrons ensuite quels sont les choix que nous avons faits dans notre approche par rapport à la finesse du modèle d'évaluation. Puis, nous montrerons comment notre approche pourrait être généralisée à d'autres problèmes d'aide multicritère à la décision. Nous reviendrons également dans ce chapitre sur l'interaction que nous avons eue avec les différents intervenants du processus. Nous verrons enfin comment intégrer les nouvelles connaissances sur le confort dans un outil déjà opérationnel.

Chapitre 1

L'aide multicritère à la décision

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux outils méthodologiques qui seront utilisés dans la démarche d'aide multicritère à la décision constituant la base de notre approche qui sera présentée au chapitre 3. À la section 1.1, nous présenterons les étapes de la méthodologie d'aide à la décision qui sera utilisée pour formaliser le processus d'aide à la décision. À la section 1.2, nous nous intéresserons plus en détail à certaines étapes particulières de cette méthodologie dans le cas de l'aide multicritère à la décision. Nous présenterons ensuite les différents types d'échelles ainsi que la notion de signifiante à la section 1.3. Avant de présenter les méthodes multicritères (procédures d'agrégation multicritère) ainsi que les conditions de leur utilisation à la section 1.5, nous allons nous intéresser dans la section 1.4 à la notion de dépendances (interactions) entre critères qui peuvent être prises en compte par certaines méthodes multicritères. Enfin, la section 1.6 sera consacrée à l'élicitation des paramètres décisionnels (les poids, les fonctions d'utilité, les seuils) des méthodes multicritères.

1.1 Méthodologie d'aide à la décision

L'objectif de cette section est de présenter une méthodologie d'aide à la décision pouvant être appliquée dans le cas de notre problème. Nous commencerons, tout d'abord, par expliquer ce que nous entendons par une aide à la décision. Dans quel cadre peut-elle s'inscrire? Qui peut la solliciter? Nous verrons ensuite quels sont les types d'approche d'aide à la décision existant dans la littérature. Nous finirons cette section par présenter les étapes constituant cette méthodologie afin de pouvoir formaliser notre processus d'aide à la décision (cf. chapitre 3), en se fondant sur Tsoukiàs [90] et Roy [75].

1.1.1 Processus de décision et aide à la décision

L'aide à la décision est généralement sollicitée par des organisations dans le cas où elles sont confrontées à des problèmes complexes, par exemple, de planification, de localisation, d'allocation et de gestion de ressources, de dimensionnement de structure, de choix et d'évaluation, etc. Ces problèmes induisent une décision (ou une série de décisions) lourde(s) de conséquences, et que l'expérience et le bon sens, seuls, ne suffisent pas à éclairer. Cette série de décisions s'inscrit dans un processus appelé « **processus de décision** ». Dans la littérature, il est défini par A. Tsoukiàs [90] *comme étant un espace d'interaction, pouvant évoluer dans l'espace et dans le temps, dans lequel tous les intervenants partagent des préoccupations qui sont parfois contradictoires (améliorer l'approvisionnement, diminuer les coûts). L'existence d'un tel espace est justifiée par la présence d'un objectif (préoccupation) final.* Le fait que le processus de décision soit évolutif, nous laisse supposer que la préoccupation finale peut l'être également.

L'aide à la décision, sollicitée par les intervenants dans ce processus, doit aider à répondre, souvent indirectement, à cette préoccupation finale. Elle est définie par B. Roy [75] *comme étant « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se posent un intervenant dans un processus de décision ».* Le « celui » est généralement appelé « homme d'étude » [75] ou « analyste » [90], et l'intervenant est également appelé « décideur ». Cette définition confirme le fait que l'aide à la décision n'aide pas, nécessairement, à répondre directement à la préoccupation finale mais peut se limiter à certaines questions traduisant les préoccupations de certains intervenants. Cependant, nous pensons qu'il est important de s'assurer, en répondant à ces préoccupations, que nous apportons aussi des éléments de réponses à la préoccupation finale et que l'aide à la décision soit cohérente avec l'évolution de cette préoccupation.

1.1.2 Les approches d'aide à la décision

Nous avons vu que l'aide à la décision était une activité fondée sur des modèles représentant, de manière explicite ou formelle, la réalité. Dans cette section, nous allons nous intéresser aux types de modèles existants en aide à la décision et plus généralement aux approches fondées sur ces modèles. Il existe plusieurs types de modèles en aide à la décision, nous pouvons citer les *modèles normatifs*, les *modèles descriptifs* et les *modèles prescriptifs* [5], où le décideur ne joue pas un rôle central dans leur élaboration, mais aussi les modèles *constructifs* [76], où le décideur est sollicité tout au long de la mise en œuvre du modèle. A. Tsoukiàs généralise les types de modèles à des types d'approches d'aide à la décision en intégrant le processus suivi pour la mise en œuvre de ces modèles [90]. La définition des trois

premiers types de modèles (ou approches) peut prêter à confusion et être ainsi interprétée de différentes manières. Nous tenterons de lever cette ambiguïté en mettant en évidence les différences entre les quatre approches.

Approche normative

Les modèles construits dans une approche normative sont fondés sur une rationalité de type économique (voir [23, 51]). Le décideur est rarement sollicité pour la construction de tels modèles. La validité des résultats fournis par le modèle repose sur leur cohérence avec les axiomes de la rationalité économique. Par exemple, on cherche un modèle permettant d'ordonner (du meilleur au moins bon) des investissements selon leur rentabilité économique. Si un investissement a est plus rentable qu'un investissement b et l'investissement b plus rentable qu'un investissement c , alors l'investissement a doit être plus rentable que l'investissement c .

Approche descriptive

Dans une approche descriptive (voir [70, 37]), les modèles sont généralement fondés sur des données ou des comportements existants (observations). Ils servent donc à décrire des phénomènes déjà réalisés pouvant se reproduire dans les mêmes conditions. Le décideur n'est également pas directement sollicité pour la mise en œuvre de ces modèles. La validité des résultats fournis par ces modèles repose sur l'observation d'autres phénomènes de même nature.

Approche prescriptive

L'approche prescriptive (voir [6, 43]) se différencie des deux premières par le fait qu'elle ne repose sur aucune information existante (rationalité économique ou observations). L'analyste doit collecter et structurer ces informations afin de construire un modèle. L'intervention du décideur n'est donc pas nécessaire lors de la construction du modèle, néanmoins, il intervient pour sa validation. Par exemple un médecin qui questionne un malade (pouvant décrire correctement ses symptômes mais ne sait pas ce qu'il a) afin de lui prescrire un traitement.

Approche constructive

La particularité de cette approche (voir [25, 8]) est que le décideur est sollicité, à la fois, lors de la construction du modèle mais aussi lors de sa validation. Les modèles sont donc fondés sur les connaissances des décideurs. L'homme d'étude cherche à les expliciter ou à les formaliser. La validation de ces modèles s'effectue, à l'image de l'approche prescriptive, par le décideur. Par exemple, lorsque l'homme d'étude cherche à construire un modèle représentant les préférences d'un décideur.

Nous verrons au chapitre 3 que nous avons retenu cette approche pour construire le modèle.

1.1.3 Les étapes d'une méthodologie d'aide à la décision

Nous présenterons dans cette section les étapes, nous paraissant importantes, qu'un homme d'étude doit suivre afin de formaliser le « **processus d'aide à la décision** » associé à un problème posé dans un processus de décision. Pour cela, nous nous fonderons sur la méthodologie de formalisation d'un processus d'aide à la décision développée par A. Tsoukiàs [90]. Un processus d'aide à la décision est constitué de l'analyste et d'au moins un intervenant du processus de décision qui ont pour objectif de répondre, de manière formelle (par le biais d'un modèle), aux préoccupations correspondant à ce problème. La construction de ce modèle dépend des connaissances de l'homme d'étude et, selon l'approche considérée (normative, prescriptive, descriptive et constructive), des connaissances et de l'information fournie par le décideur [90]. Les étapes d'une méthodologie d'aide à la décision représentent le cheminement suivi pour la construction de ce modèle. Une fois le modèle construit, une dernière étape peut être nécessaire. Elle consiste à construire une recommandation à partir des résultats fournis par le modèle. Après avoir identifié une première description du problème sur lequel l'aide à la décision s'appliquera avec la personne ayant sollicité l'aide à la décision, le processus d'aide à la décision peut se dérouler selon les étapes suivantes.

1- Représentation du problème

Cette étape commence par l'analyse de processus de décision afin d'identifier :

- les intervenants concernés par l'aide à la décision,
- leur rôle au sein du processus,
- l'intervenant (les intervenants) avec qui l'homme d'étude va interagir (que nous appellerons dans ce chapitre « décideur » même s'il y a plusieurs intervenants),
- les préoccupations de chaque intervenant par rapport au problème posé.

Certaines de ces préoccupations peuvent être plus importantes que d'autres ou dépendantes les unes des autres. Pour cela, A. Tsoukiàs [90] propose d'identifier l'importance de chaque préoccupation ainsi que les éventuelles liens (dépendances) entre elles, afin que l'aide à la décision soit pertinente.

2- Formulation du problème

Lors de cette étape, on commence par identifier, avec le décideur, sur quoi va porter la décision (l'ensemble des actions possibles) ou *l'objet de la décision* selon

B. Roy [75]. Cet ensemble, noté A , peut être défini de manière explicite (défini en extension), par exemple, un ensemble de tracés d'une ligne TGV, un ensemble d'endroits pour construire un aéroport, un ensemble de réponses à un appel d'offre, etc., ou peut être défini de manière implicite (un sous ensemble de \mathbb{R}^n défini par des contraintes, si chaque action est représentée par n composantes x_1, \dots, x_n [78]). La forme de cet ensemble, pouvant évoluer avec le processus de décision, dépend fortement de la nature du problème et de la recommandation finale.

Une fois l'ensemble A déterminé, pas nécessairement de manière formelle, il s'agit d'identifier ce que le décideur souhaite en faire. Cela dépend souvent des préoccupations des différents intervenants, identifiées lors de l'étape précédente. En aide à la décision, A. Tsoukiàs propose trois types de traitements pouvant être effectués sur l'ensemble A [90] :

- a- Chercher uniquement à définir l'ensemble A de manière formelle sans évaluation (un problème de satisfaction de clauses logiques, par exemple).
- b- Construire un modèle afin de décrire un sous-ensemble d'actions dans un ensemble de points de vue dans le cas d'une approche descriptive (par exemple l'apprentissage en intelligence artificielle et en statistique).
- c- Partitionner l'ensemble A .

Le troisième traitement, également appelé *problématique* [75], est souvent utilisé en recherche opérationnelle et en aide multicritère à la décision. Il y a trois façons de partitionner l'ensemble A selon B. Roy [75] :

- choisir un sous ensemble d'action aussi restreint que possible, afin d'aider le décideur à choisir la meilleure action (problématique de choix),
- affecter des actions dans des catégories prédéfinies (problématique de tri),
- ranger les actions (ou un sous ensemble d'action) selon les préférences des décideurs, de la meilleure à la plus mauvaise par exemple (problématique de rangement).

Nous nous intéresserons plus en détail à ce troisième traitement à la section 1.2.2.

3- Construction du modèle d'évaluation

Après avoir déterminé l'ensemble des actions A ainsi que ce que le décideur veut en faire (traitement), l'homme d'étude cherche à construire le modèle sur lequel il va se fonder pour répondre au problème identifié et construire sa recommandation. Afin d'explicitier et de formaliser ces modèles d'évaluation, il a besoin de construire *les dimensions*, permettant de caractériser l'ensemble A , *les critères*, permettant d'évaluer A , et *les méthodes* ou les procédures permettant d'effectuer le traitement souhaité sur l'ensemble A .

- **Les dimensions** : elles représentent l'information disponible sur l'ensemble A . La collecte de l'information peut se faire, selon l'approche d'aide à la décision utilisée, avec ou sans le décideur. Cette information peut être utilisée

pour évaluer l'ensemble A . Les dimensions sont généralement codées sur des échelles pour obtenir une représentation formelle de A .

- **Les critères** : un critère est une dimension ou plus généralement une agrégation de dimensions traduisant un même point de vue et permettant d'évaluer les éléments de A sur ce point de vue. Dans le cas où le décideur est sollicité, la construction de ces critères prend en compte ses préférences.
- **Les méthodes d'évaluation** : elles représentent les outils permettant d'effectuer les traitements souhaités sur l'ensemble A afin de fournir une solution au modèle (par exemple des procédures d'agrégation multicritère ou bien un algorithme pour résoudre un programme mathématique). A l'image des critères et des dimensions, selon l'approche considérée, le décideur peut être sollicité pour la mise en œuvre de ces méthodes.

Selon le traitement effectué sur l'ensemble A (la problématique dans le cas du partitionnement), la construction du modèle ne nécessite pas nécessairement la construction des dimensions, des critères et des méthodes d'évaluation, à la fois. En effet, si nous cherchons uniquement à définir l'ensemble A , les méthodes d'évaluation ne sont pas forcément nécessaires. Si nous cherchons à construire un modèle décrivant un sous-ensemble d'actions dans le cadre d'une approche descriptive, la construction des critères n'est pas nécessaire. Si nous cherchons à partitionner l'ensemble A , il est souvent nécessaire de tout construire. Nous nous intéresserons dans les sections suivantes plus en détail à ces trois composantes du modèle d'évaluation en aide multicritère à la décision.

4- Construction de la recommandation finale

Bien que le résultat fourni par la méthode d'évaluation soit cohérent avec le modèle, cela ne veut pas dire qu'il l'est nécessairement avec les préoccupations des intervenants. Pour cela, et avant de fournir une quelconque recommandation, l'homme d'étude doit :

- s'assurer, par le biais d'une analyse de sensibilité, que le résultat fourni par la méthode d'évaluation n'est pas très sensible à des variations jugées non significatives des données utilisées pour la construction du modèle,
- être capable d'interpréter le résultat fourni par la méthode en tenant compte des hypothèses sur les données, sur le modèle et sur l'évolution du processus de décision, sous lesquelles il a été obtenu.

1.2 L'aide multicritère à la décision

Dans un processus d'aide à la décision, lors de la construction du modèle d'évaluation, il est rare d'aboutir uniquement à un seul critère correspondant à un point

de vue unique sur lequel le décideur exprimera ses préférences. Il est donc nécessaire de considérer plusieurs points de vue (coûts, ressources humaines, sécurité, environnement, etc.) dans la suite de la construction du modèle d'évaluation. La décision en présence de critères multiples est difficile car les critères sont souvent conflictuels. Pour cela, plusieurs méthodologies d'aide multicritère à la décision ont été développées [42, 75]. Dans ces méthodologies, les préférences du décideur sont d'abord élicitées sur chaque point de vue correspondant à un critère exprimé sur une échelle cardinale ou bien ordinale (cf. 1.3.1). Ces critères sont, ensuite, agrégés au moyen de méthodes d'agrégation multicritères. Pour cela, ces méthodologies offrent également plusieurs outils afin d'éliciter les préférences globales des décideurs pour paramétrer ces méthodes.

Nous avons vu à la section précédente qu'il y avait quatre étapes principales pour représenter de manière formelle un processus d'aide à la décision (cf. 1.1.3). Nous allons nous concentrer, dans cette section, sur les produits de ce processus dans le cas de l'aide multicritère à la décision : l'ensemble des actions A , la problématique, l'ensemble des dimensions (noté D), l'ensemble des critères (noté F) et l'ensemble des méthodes d'évaluation.

1.2.1 Actions et alternatives

Nous avons vu que l'action représentait l'objet de la décision, mais nous n'avons pas évoqué sa réalisabilité. Afin de différencier les actions réalisables de celles qui ne le sont pas, B. Roy [75] nomme *action potentielle* ou *alternative* une action réalisable, c.-à-d. une action dont la mise en œuvre en pratique est envisageable. En aide multicritère à la décision l'ensemble des alternatives A est généralement construit sous forme d'une liste : $A = \{a_1, a_2, \dots\}$.

1.2.2 La problématique

La problématique en AMCD est la manière dont l'aide à la décision doit être envisagée [75]. Nous avons vu à la section 1.1.3 qu'elle pouvait consister à partitionner l'ensemble des alternatives A . Elle peut également consister à construire l'ensemble A ou la famille de critères F . Nous pouvons donc distinguer quatre problématiques en aide multicritère à la décision [75] : les problématiques de choix, les problématiques de tri, les problématiques de rangement et les problématiques de description.

1.2.2.1 Problématiques de choix $P.\alpha$

Dans ce type de problématiques, l'aide à la décision est orientée de telle sorte à ce que le résultat soit une *sélection* d'un ensemble de « bonnes » alternatives

qui soit de plus petite cardinalité possible. Bien que l'alternative qui sera recommandée soit dans cet ensemble, cela ne veut pas dire que la procédure de sélection utilisée est orientée vers cette solution. Elle consiste plutôt à éliminer les mauvaises alternatives en les comparant. L'ensemble sélectionné contient des alternatives qui sont équivalentes ou incomparables entre elles, mais ne contient pas nécessairement que de bonnes alternatives.

1.2.2.2 Problématiques de tri $P.\beta$

Dans ce type de problématique, l'aide à la décision est orientée de telle sorte que chaque alternative soit placée dans une catégorie jugée « appropriée » parmi des catégories prédéfinies généralement ordonnées. Le choix de cette catégorie est justifié par le type de jugement que l'on voudrait porter sur les actions et par les traitements que l'on souhaiterait faire. Par exemple, définir des catégories de confort pour les offres (très inconfortable, inconfortable, confortable, très confortable) et préciser les recommandations nécessaires afin d'encourager les fournisseurs à passer à la catégorie supérieure.

1.2.2.3 Problématiques de rangement $P.\gamma$

Dans ce type de problématiques, l'aide à la décision est orientée de telle sorte à ce que l'on ait *un préordre partiel ou total* sur l'ensemble A (voir l'annexe de ce chapitre pour la définition de ces notions). Il est possible de considérer les classes d'équivalence induites par ce préordre comme des catégories ordonnées.

1.2.2.4 Problématiques de description $P.\delta$

Il n'est pas nécessaire que le résultat d'une aide à la décision soit une prescription (choix d'une ou d'un ensemble d'actions comme recommandation au décideur) mais il peut s'agir aussi de déterminer l'ensemble des actions potentielles A , une famille de critères F ou des valeurs possibles que peuvent prendre certains paramètres (seuil d'indifférence et de préférence, poids, niveau d'aspiration). Ce type de problématique est approprié lorsque le décideur rencontre des difficultés à définir le problème, à exprimer ses points de vues ou le type de résultat qu'il souhaiterait obtenir.

1.2.3 Critère et famille de critères

Un critère g est un outil permettant d'évaluer et de comparer des alternatives sur un point de vue bien défini. On note $g(a)$ la performance de a sur le critère g , elle représente en général un nombre réel qui prend ses valeurs dans X_g (l'ensemble des valeurs possibles de g) défini explicitement. Afin de pouvoir comparer deux

alternatives sur ce critère, il est nécessaire de définir un ordre total $<_g$ sur X_g (voir l'annexe de ce chapitre). Nous supposons sans perte de généralité que la valeur $g(a)$ augmente avec la performance de a sur le critère g . Le couple (g, X_g) est appelé *échelle* du critère g . Les éléments $x \in X_g$ sont appelés *échelons* de l'échelle. En AMCD, une échelle est soit de type ordinal, soit de type cardinal (voir section 1.3.1). Si X_g est de type nominal (les échelons ne sont pas ordonnés), alors g est appelé **attribut**.

Afin de pouvoir appliquer des méthodes d'aide multicritère à la décision pour agréger les performances des alternatives sur les critères et d'obtenir une évaluation globale, il est nécessaire de respecter certaines exigences théoriques lors de la construction des critères. Pour cela, il faudrait que chaque *intervenant* dans le processus de décision associé au modèle accepte le résultat de la comparaison entre les alternatives issu de chaque critère. Cela implique les remarques suivantes [7] :

- les points de vue associés aux critères doivent être compris et approuvés par tous les intervenants même si l'importance de chaque critère n'est pas nécessairement partagée. En pratique, cela revient à associer une échelle à chaque critère qui soit acceptée par tous les intervenants,
- les méthodes permettant de construire ces échelles doivent aussi être comprises et acceptées par tous les intervenants,
- la construction d'un critère doit prendre en compte la nature des données à partir desquelles elle s'est faite. En effet, tout élément d'incertitude, d'imprécision ou d'indétermination peut lourdement affecter la comparaison issue de ces critères.

Avant d'énoncer les propriétés que doit posséder *une famille de critères* F , nous allons nous intéresser au lien entre critères et dimensions en AMCD.

1.2.3.1 Conséquences élémentaires, dimensions et critères

Afin qu'une alternative soit complètement définie, il faudrait identifier toutes ses *conséquences élémentaires*. On définit *une conséquence élémentaire* comme étant tout aspect, effet ou attribut permettant de comparer ou d'évaluer une alternative [78].

Une dimension est une conséquence élémentaire à laquelle on associe une échelle. La procédure permettant d'évaluer une alternative sur cette dimension est appelée *indicateur d'état* [75]. Il est aussi possible d'associer à chaque dimension une *échelle de préférences* dont les valeurs reflètent l'impact réel de la conséquence sur l'évaluation globale.

Un critère permet de regrouper des conséquences élémentaires associées à un même *point de vue* afin de pouvoir éliciter les préférences du décideur sur ce point

de vue, ce qui nous évite d'évaluer directement les alternatives à partir des conséquences dont le nombre important rendrait la tâche difficile [7].

Il arrive parfois que l'on ne puisse pas associer directement un critère à un point de vue, notamment pour des problèmes complexes. Dans ce cas, il est possible de décomposer ce point de vue de manière hiérarchique (ou arborescente) [42], en plusieurs points de vue auxquels on associe *des sous critères* et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on arrive aux conséquences élémentaires. Pour plus de détails sur la construction de critères directement à partir des conséquences élémentaires, voir les chapitres 8 et 9 de [75].

1.2.3.2 Propriétés d'une famille de critères

Pour les raisons citées au début de la section 1.2.3, une famille de critères doit posséder certaines propriétés [78][75] : l'intelligibilité, l'opérationnalité et la cohérence.

Intelligibilité

Le nombre de critères constituant une famille doit être suffisamment petit pour pouvoir identifier la nature de l'information inter-critères (représentant les préférences globales du décideur) afin de choisir la procédure (ou méthode) d'agrégation appropriée. Bouyssou [7] suggère une douzaine de critères comme majorant.

Opérationnalité

La famille de critères doit constituer une base solide pour tous les décideurs afin que l'aide à la décision puisse se dérouler dans de bonnes conditions.

Cohérence

La majorité des méthodes d'agrégation multicritère fait l'hypothèse que F est cohérente, Pour cela, il faudrait qu'elle vérifie les propriétés suivantes.

a) L'exhaustivité :

La famille de critères doit couvrir l'ensemble des points de vue exprimés par les intervenants de manière exhaustive. Cela revient à ce qu'aucun critère décisif dans l'évaluation ne doit être oublié. De manière formelle, pour toute paire d'alternatives a et b dont les performances sur tous les critères sont égales, elles doivent être indifférentes pour le décideur :

$$\forall a, b \text{ et } \forall i \in F : g_i(a) = g_i(b) \Leftrightarrow a \sim b \quad (1.1)$$

où $a \sim b$ signifie que a et b sont indifférentes

b) La monotonie :

Les préférences partielles (établies sur chaque critère) doivent être en cohérence avec les préférences globales sur les alternatives. De manière formelle, si, pour le décideur, une alternative a est au moins aussi bonne qu'une alternative b (préférences globales), alors, si a' est une alternative dont les performances sont au moins aussi bonnes que a sur tous les critères (préférences partielles), alors a' doit être jugée au moins aussi bonne que b par le décideur.

$$\text{si } \forall a, b : a \succeq b \text{ et } \forall i \in F : g_i(a') \geq g_i(a) \text{ alors } a' \succeq b \quad (1.2)$$

où $a \succeq b$ signifie que a est au moins aussi bonne que b

c) La minimalité (non redondance) :

La famille de critères F ne doit pas contenir de critères superflus. Pour vérifier si un critère i est redondant, il suffit de le supprimer de F et vérifier ensuite si $F \setminus \{i\}$ satisfait toujours les propriétés d'exhaustivité et de monotonie.

Les deux premières exigences impliquent **l'isolabilité** (le résultat de la comparaison entre deux alternatives dont les évaluations ne diffèrent que sur un seul critère ne doit pas dépendre des valeurs prises par les autres critères) qui interdit une certaine forme de dépendances entre critères (voir la section 1.4).

Bien que les propriétés qui caractérisent une famille cohérente de critères soient intuitives et faciles à comprendre, il n'est pas évident de les vérifier en pratique et, plus particulièrement, la condition de monotonie. La non-vérification de ces hypothèses peut compliquer la modélisation de l'information inter-critères et rendre ainsi difficile le choix d'une méthode d'agrégation. Pour plus de détails sur les exemples de critères qui peuvent violer ces conditions, voir le chapitre 2 de [78].

1.3 Échelles et signifiante

Nous avons vu précédemment que les dimensions D et les critères F (cf. 1.1.3) d'un modèle d'évaluation dans un processus d'aide à la décision devaient être codés sur des échelles numériques afin que les traitements qui seront effectués par l'ensemble des méthodes soient signifiants. Nous allons voir dans cette section quels types d'échelles doivent être utilisés pour cela [55].

1.3.1 Échelle de mesure

Une échelle peut être définie comme étant le couple formé par (f, X_f) :

- X_f : Un ensemble de nombres (ensemble de valeurs possibles) susceptibles de représenter une codification d'une information relative à un ensemble d'actions A

- f : Une représentation numérique appropriée (r.n.a) qui applique A dans cet ensemble.

Les types d'échelles développés par Stevens [81], sont classés selon les caractéristiques suivantes.

- **Caractéristique d'ordre** : rangement par valeurs croissantes ou décroissantes des nombres constituant la série.
- **Caractéristique de distance** : rangement par valeurs croissantes ou décroissantes des différences entre tous les couples de nombres constituant la série.
- **Caractéristique d'origine** : rôle que joue le 0 vis-à-vis des nombres constituant la série (le 0 désigne l'absence de quantité).

A partir de ces caractéristiques, nous définissons les cinq types d'échelles suivants :

Échelle nominale : l'ensemble des nombres ne donne sens à aucune des trois caractéristiques.

Exemple : attribuer des nombres à des participants à un concours.

Échelle ordinale : l'ensemble des nombres donnant sens à la *caractéristique d'ordre*.

Il en découle que si f est une r.n.a de A , alors, toute transformation monotone Φ de f est une r.n.a de A .

Exemple : les indicateurs de la qualité de l'air sur une échelle de 1 (meilleure) à 10 (pire), vérifient la caractéristique d'ordre car un air de qualité n est meilleur qu'un air de qualité m , où $n, m \in \{1, \dots, 10\}$ et $n > m$ mais ne vérifient pas la caractéristique d'origine : un air de qualité 6 n'est pas nécessairement deux fois moins bon qu'un air de qualité 3, ni celle de distance : la différence de qualité entre un air de qualité 6 et un air de qualité 4 n'est pas nécessairement la même avec la différence de qualité entre un air de qualité 3 et un air de qualité 1.

Échelle d'intervalle : échelle ordinale à laquelle on donne sens à la *caractéristique de distance*. Il en découle que si f est une r.n.a de A , alors, toute transformation affine Φ de f ($\Phi \circ f = \alpha f + \beta$, où $\alpha > 0$) est une r.n.a de A .

Exemple : la température en degrés Celsius vérifie la caractéristique de distance car la différence de température entre T et $T + \alpha$ est la même qu'entre T' et $T' + \alpha$, mais ne vérifie pas la caractéristique d'origine car une température de 10° n'est pas le double d'une température de 5° .

Échelle de ratio : échelle d'intervalle à laquelle on donne sens à la *caractéristique d'origine*. Il en découle que si f est une r.n.a de A , alors toute transformation Φ de f telle que $\Phi \circ f = \alpha f$ est une r.n.a de A .

Exemple : La masse en kg vérifie la caractéristique d'origine : une masse de 20 kg est le quadruple d'une masse de 5 kg.

Échelle absolue : échelle ratio qui n'autorise qu'une seule r.n.a.

Exemple : le nombre d'habitants dans une ville vérifie la caractéristique d'origine : on peut dire qu'il y a trois fois plus d'habitants dans une ville que dans une autre mais toute transformation de ce nombre n'aurait aucun sens, contrairement à une masse ou à une longueur, où l'on peut changer d'échelle ($g \rightarrow \text{kg}$, $\text{cm} \rightarrow \text{m}$) sans perdre la signification de l'information (nous verrons cela plus en détail à la section suivante).

Remarque 1 *On dit d'une échelle qu'elle est cardinale si elle est au moins de type intervalle (la notion de distance a un sens).*

1.3.2 La signifiante

La notion de signifiante est issue de la théorie du mesurage [83]. Une proposition fondée sur un calcul utilisant les échelons d'une échelle est signifiante si sa véracité ne dépend pas de l'échelle choisie tant que cette dernière représente la même information. Afin d'illustrer cela, nous proposons deux exemples :

1. Supposons que l'on ait trois étudiants : a, b, c et soit la proposition : « l'étudiant a est meilleur que l'étudiant b qui est meilleur que l'étudiant c ». Cette information peut être représentée par la fonction :

$$\begin{aligned} f : A = \{a, b, c\} &\rightarrow \mathbb{R}^+ \\ f(a) = 4, f(b) = 3, f(c) &= 2. \end{aligned}$$

La proposition précédente est signifiante pour des échelles ordinales car, pour toute transformation monotone Φ de f , on a

$$\Phi(f(a)) > \Phi(f(b)) > \Phi(f(c))$$

Si on considère maintenant la proposition : « la différence de niveau entre l'étudiant a et l'étudiant b est la même que celle entre l'étudiant b et l'étudiant c » qui est fondée sur la représentation numérique précédente en remarquant que :

$$f(a) - f(b) = f(b) - f(c)$$

Cette proposition n'est pas signifiante pour des échelles ordinales car il existe une transformation monotone Φ de f avec $\phi(f(x)) = f(x)^2$ qui ne préserve

pas l'égalité entre les différences :

$$f(a)^2 - f(b)^2 = 7 \neq f(b)^2 - f(c)^2 = 5$$

Par contre, elle l'est pour des échelles d'intervalle car, pour toute transformation $\phi(f(x)) = \alpha f(x) + \beta$, l'égalité entre les différences est préservée. En effet, si :

$$f(a) - f(b) = f(b) - f(c)$$

alors :

$$\alpha(f(a) - f(b)) + \beta - \beta = \alpha(f(b) - f(c)) + \beta - \beta$$

Et on a donc :

$$(\alpha f(a) + \beta) - (\alpha f(b) + \beta) = (\alpha f(b) + \beta) - (\alpha f(c) + \beta)$$

- 2.** Dans le cas de la somme pondérée que nous verrons à la section 1.5.1.1, la signifiante de la proposition : « l'alternative a est préférée à b » repose sur la véracité de la relation :

$$aPb \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n k_i g_i(a) > \sum_{i=1}^n k_i g_i(b) \text{ où } k_i > 0 \quad (1.3)$$

La proposition précédente est signifiante si et seulement si la relation (1.3) est vraie. Cela est effectivement le cas si les critères g_i sont évalués sur des échelles d'intervalle à condition que les poids k_i subissent la transformation $\frac{k_i}{\alpha_i}$ correspondant à la transformation affine : $\Phi(g_i(a)) = \alpha_i g_i(a) + \beta_i$

La notion de signifiante est importante lorsqu'on est amené à effectuer des traitements (comme l'agrégation des critères) sur un ensemble de données. La pertinence de ces traitements, repose en grande partie, sur l'identification de la nature de ces données. En AMCD, cela consiste à identifier la nature des échelles de chaque critère avant de choisir une procédure d'agrégation.

1.4 Dépendances entre critères

Nous aborderons dans cette section la notion de dépendances (on dit aussi interactions) entre critères rencontrée en AMCD. Cet intérêt est dû au fait que nous avons été confronté à ce phénomène lors de l'étape d'agrégation des critères de notre approche. Il existe deux formes classiques de dépendances [77, 78, 75] en aide multicritère à la décision : les dépendances au sens des préférences et les dépendances structurelles.

1.4.1 Dépendances au sens des préférences

On dit qu'une sous famille d'au moins deux critères $J \subset F$ est dépendante au sens des préférences dans F , si la façon de comparer deux alternatives a et b vérifiant :

$$g_k(a) = g_k(b), \forall k \in F \setminus J$$

est susceptible d'être influencée par leurs performances sur les critères $k \in F \setminus J$ (qui sont les mêmes).

Afin d'illustrer cette forme de dépendance, nous prenons l'exemple cité dans [77].

Exemple 1

Supposons qu'un responsable ait retenu trois critères afin de sélectionner parmi un ensemble de candidats celui qu'il va embaucher :

- g_1 : niveau de formation initiale,
- g_2 : aptitude à une bonne intégration dans son équipe,
- g_3 : nombre d'années d'expérience professionnelle.

Soient a et b deux candidats qui ont le même nombre d'années d'expérience $g_3(a) = g_3(b)$, le candidat a a un niveau de formation meilleur que le candidat b ($g_1(a) > g_1(b)$) et le candidat b est jugé comme ayant plus d'aptitudes à une bonne intégration dans l'équipe ($g_2(a) < g_2(b)$). Si le nombre d'années d'expérience n'est pas significatif, le responsable pourrait donner plus d'importance au niveau de formation et il choisirait a . Par contre, si le nombre d'années d'expérience est considéré comme significatif, la formation initiale pourrait perdre de l'importance et le responsable choisirait b qui a de meilleures aptitudes d'adaptation. Dans ce cas, la sous famille $J = \{1, 2\}$ est dépendante des préférences dans F

Les dépendances au sens des préférences sont généralement difficiles à identifier et certaines méthodes (cf. 1.5.1.1) n'arrivent pas à les modéliser. Les méthodes permettant de les modéliser sont, généralement, fondées sur des modèles complexes et difficiles à mettre en œuvre. Pour cela, il faut au moins s'assurer de l'existence de ce type de dépendances avant de mettre en œuvre une méthode pouvant les prendre en compte. Une façon de faire, est par exemple d'identifier s'il y a des interactions entre critères (synergie positive, synergie négative et antagonisme).

1.4.1.1 Synergie positive

On dit qu'il y a *synergie positive* entre au moins deux critères si leur contribution à l'évaluation globale est supérieure à la somme de leurs contributions prises séparément. Les méthodes multicritères modélisant cette situation ont dû adapter la définition à leurs principes de fonctionnement. On parle de *complémentarité* [31] dans l'intégrale de Choquet (cf. 1.5.1.2) et *d'auto-renforcement* [77] dans les

méthodes ELECTRE (cf. 1.5.2.1) que nous verrons dans la prochaine section. Il est important de mentionner que ces deux types de dépendances sont différents car il sont associés à deux méthodes d'agrégation multicritères fondamentalement différentes.

- a) **Auto-renforcement** : on parle d'auto-renforcement entre deux critères g_i et g_j si, dès l'instant où il y a deux actions a et b pour lesquelles a est au moins aussi bonne que b sur les deux critères, alors, cela doit entraîner un renforcement de la contribution de ces derniers sur la validité de l'assertion a est au moins aussi bonne que b .
- b) **Complémentarité** : la différence avec l'auto-renforcement est que la synergie concerne uniquement les critères et non la manière dont se comparent deux actions sur des critères entre lesquels il y a synergie positive. L'évaluation globale concerne donc le score de l'action et non la validité de l'assertion « a est au moins aussi bonne que b ». Par contre, la complémentarité peut concerner plusieurs critères contrairement à l'auto-renforcement.

Exemple 2

Pour écrire une lettre, on a besoin d'un papier et d'un stylo. Si on a du papier mais pas de stylo, ou un stylo mais pas de papier, cela est équivalent à n'avoir ni stylo ni papier. Si le critère g_1 indique la présence d'un stylo et g_2 la présence d'un papier alors on peut dire qu'il y a synergie positive entre g_1 et g_2 .

1.4.1.2 Synergie négative

On dit qu'il y a *synergie négative* entre deux critères si leur contribution à l'évaluation globale est inférieure à la somme de leurs contributions prises séparément. Afin de modéliser cette situation, cette définition est adaptée à chaque méthode multicritère. On parle de *substitution* [31] dans l'intégrale de Choquet et d'*auto-affaiblissement* [77] dans les méthodes ELECTRE. Les définitions de *situation de critères substitutifs* et d'*auto-affaiblissement* sont respectivement analogues à celles de *critères complémentaires* et *auto-renforcement*.

Exemple 3

Supposons qu'il existe deux remèdes pour soigner une maladie et la présence d'un seul suffit. Si le critère g_1 représente la capacité du premier traitement à soigner la maladie et g_2 la capacité du deuxième traitement, on peut dire alors qu'il y a synergie négative entre g_1 et g_2 .

1.4.1.3 Antagonisme

On parle d'antagonisme d'un critère g_i sur un critère g_j si l'impact qu'a g_j sur l'évaluation globale diminue avec l'augmentation de la performance sur g_i . Dans les méthodes ELECTRE (comparaisons par paires), on parle d'antagonisme [77] de g_i sur g_j s'il y a deux actions a et b telles que a est au moins aussi bonne que b sur le critère g_j et b est significativement préférée à a sur le critère g_i alors, la contribution de g_j à l'évaluation globale (la validité de l'assertion a est au moins aussi bonne que b) doit être moins importante que si b n'était pas significativement préférée à a .

Exemple 4

Supposons que l'on veuille évaluer le confort d'une offre et qu'on ait retenu les critères suivants : confort dynamique, confort postural, confort acoustique. Bien que le confort dynamique influence fortement le confort postural, on a décidé de ne pas le prendre en compte dans l'évaluation de ce dernier pour cause de redondance. Afin de ne pas perdre cette information, on pourrait supposer qu'il y ait un effet antagoniste du critère confort dynamique sur le critère confort postural (la dégradation du confort dynamique diminuant l'impact du confort postural sur l'évaluation globale bien que ce dernier soit bon) et on appliquerait une méthode d'agrégation qui prend en compte ce type d'interactions.

1.4.2 Dépendances au sens structurel

En pratique, c'est souvent cette forme de dépendances que le décideur évoque. Elle provient de facteurs susceptibles d'influencer conjointement plusieurs critères. Cette forme de dépendance peut être mise en évidence en examinant la construction des critères (données communes ou corrélées). Cependant, il est important de souligner que les éventuelles corrélations, mises en évidence par des outils statistiques, ne sont pas nécessairement pertinentes pour l'aide à la décision, c.-à-d. qu'il n'est pas nécessaire de les prendre en compte car les critères traduisent, par définition, des points de vue différents. L'exemple suivant, cité dans [77], illustre cela.

Exemple 5

Dans un problème de choix de tracé de lignes TGV, on peut considérer les critères : temps du trajet et coût du trajet. La longueur du trajet est un facteur qui influence les deux critères. Lors de la modélisation des préférences, on peut ignorer cela car les deux critères traduisent deux points de vue différents qui concernent deux parties prenantes (investisseurs et clients) différentes.

1.5 Les méthodes multicritères (procédure d'agrégation multicritère)

Dans cette section nous allons nous intéresser à la troisième composante d'un modèle d'évaluation dans le cas de l'aide multicritère à la décision : les méthodes d'agrégation. Dans la littérature, il existe deux grandes familles de méthodes multicritères. La première représente les méthodes utilisant un critère unique de synthèse dont le principe consiste à agréger les performances d'une alternative en un seul critère. Les principales méthodes constituant cette famille sont les méthodes *MAUT*¹. La deuxième famille représente les méthodes de *surclassement* dont le principe consiste à comparer les alternatives par paires. Nous allons présenter dans cette section les deux familles de méthodes en distinguant celles qui prennent en compte les dépendances entre critères de celles qui ne le font pas. Nous nous intéresserons ensuite à une autre famille de méthodes : *méthodes à base de règles*.

1.5.1 Les méthodes utilisant un critère unique de synthèse

Le principe de ces méthodes [42] consiste à rechercher une fonction g qui est le résultat de l'agrégation des performances : $g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)$ d'une alternative a telle que :

$$g(a) = V(g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a))$$

où V (dite **fonction d'agrégation**) [75] est définie à partir de *principes logiques* et *d'informations inter-critères* modélisant uniquement les situations :

- d'indifférence : $aIb \Leftrightarrow g(a) = g(b)$,
- de préférence : $aPb \Leftrightarrow g(a) > g(b)$.

Ces méthodes excluent donc *l'incomparabilité*, assurent toutes *les transitivités* des préférences ce qui donne une structure de *préordre total* sur A^2 qui est un résultat riche, facilement exploitable dans les diverses problématiques ($P.\alpha, P.\beta, P.\gamma$).

Nous nous intéresserons dans cette section, tout d'abord, aux méthodes *MAUT* ne prenant pas en compte les dépendances au sens des préférences (fondées sur des modèles additifs), puis aux méthodes *MAUT* prenant en compte les dépendances au sens des préférences.

1. Multi-Attribute Utility Theory

2. Un rangement de toutes les alternatives avec ex æquo possibles

1.5.1.1 Les méthodes ne prenant pas en compte les dépendances

La fonction d'agrégation V prend généralement la forme suivante :

$$g(a) = V(g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)) = \sum_{i=1}^n v_i(g_i(a)) \quad (1.4)$$

où chaque v_i est une *fonction d'utilité* [92][43] sur le critère i , elle « mesure » les préférences du décideur sur le critère i . Etant donné que $g_i(a)$ augmente avec la performance de l'alternative a sur le critère i , les fonctions v_i doivent être monotones et non décroissantes par rapport aux valeurs $g_i(a)$. Une fonction d'utilité v_i est rarement linéaire et représente mieux les préférences d'un décideur sur le critère i que la performance g_i , comme l'illustre l'exemple suivant.

Exemple 6

Soit v_i une fonction d'utilité qui représente la satisfaction (intensité de préférence) d'un joueur de Poker en fonction de son gain (voir la figure 1.1). L'intensité de sa satisfaction correspondant à un gain de 1 million est plus importante si sa fortune est de 0 \$ ($v_i(1) - v_i(0) = 20$) que si elle était de 100 millions ($v_i(101) - v_i(100) = 5$). Si on avait gardé g_i comme fonction d'utilité, ou toute autre transformation affine, elle ne représenterait pas, de manière pertinente, les préférences du décideur sur ce critère.

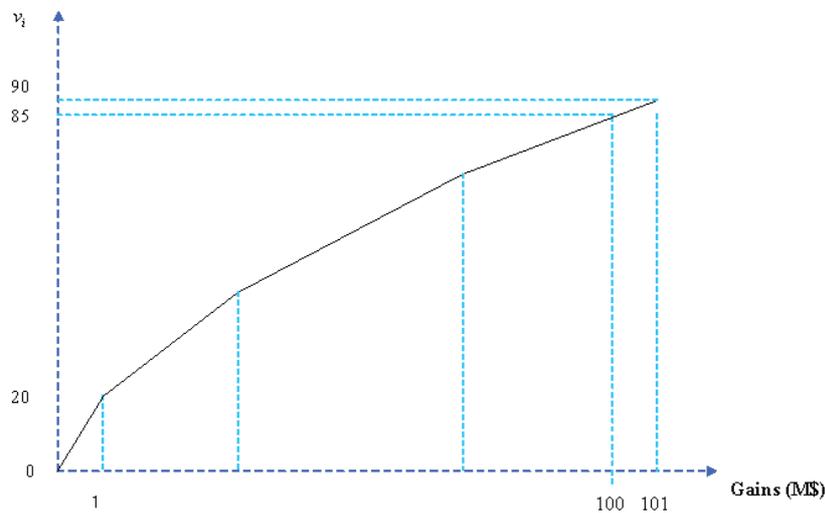


Figure 1.1 – La notion de fonction d'utilité

En pratique (1.4) est souvent exprimé sous la forme suivante :

$$g(a) = U(g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(g_i(a)) \quad (1.5)$$

où $k_i > 0$ (généralement $k_i \in]0; 1[$)

Le passage de (1.4) à (1.5) se fait facilement (voir cf. 1.6.1.1). Nous utiliserons cette dernière représentation dans la suite de ce chapitre, sauf mention contraire, en gardant les notations v_i et V au lieu de u_i et U . Les définitions suivantes des poids k_i sont équivalentes.

- L'utilité correspondant au passage de la performance (sur le critère i) d'une alternative jugée « neutre » à la performance d'une alternative jugée « satisfaisante, toutes choses égales par ailleurs » [4].
- L'utilité de l'action, dont toutes les performances sur les critères sont à leurs plus bas niveaux sauf pour le critère i , où la performance de l'action est à son meilleur niveau. [31]
- Les poids correspondent à des taux de substitution r_{ij} généralement donnés par $r_{ij} = \frac{k_j v'_j(g_j(\cdot))}{k_i v'_i(g_i(\cdot))}$ si les v_i admettent des dérivées $v'_i(g_i(\cdot))$. Ces taux représentent l'augmentation de l'utilité correspondant au critère i pour compenser la perte d'une unité (convenablement définie) d'utilité sur le critère j [75].

L'une des méthodes les plus simples et les plus utilisées parmi ces méthodes est **la somme pondérée** : le cas où $v_i(g_i(a)) = g_i(a)$. Le taux de substitution r_{ij} défini ci-dessus devient : $r_{ij} = \frac{k_j}{k_i}$

Bien que le résultat fourni par ce type de méthodes soit « riche », il faut néanmoins souligner que leurs conditions d'utilisation sont exigeantes [8] :

- **La compensation** : dans un modèle additif, les critères sont totalement compensatoires, ce qui n'est pas souvent le cas en pratique.
- **Les préférences du décideurs doivent correspondre à un modèle additif** : il existe plusieurs situations où les préférences du décideur ne peuvent pas être représentées par ce type de modèle (voir exemple 7). L'exemple 7 illustre un cas où tout modèle additif ne classe jamais une alternative, dont les performances sont équilibrées, avant une alternative dont les performances sont beaucoup plus contrastées.

Exemple 7

Un décideur doit choisir l'une des trois alternatives a, b, c évaluées sur deux

critères :

$$\begin{aligned}
 a &\rightarrow v_1(g_1(a)) = 1 \text{ et } v_2(g_2(a)) = 0 \\
 b &\rightarrow v_1(g_1(b)) = 0 \text{ et } v_2(g_2(b)) = 1 \\
 c &\rightarrow v_1(g_1(c)) = 0,4 \text{ et } v_2(g_2(c)) = 0,4
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

Avec un modèle additif, ce décideur ne pourra jamais choisir l'alternative c , dont les performances sont moins contrastées que celles des deux autres alternatives, car si : $g(c) > g(a)$ et $g(c) > g(b)$ alors on a :

$$\begin{aligned}
 0,4k_1 + 0,4k_2 &> k_1 \\
 0,4k_1 + 0,4k_2 &> k_2
 \end{aligned}
 \tag{1.7}$$

En additionnant les deux équations on obtient une contradiction ($0,8 > 1$) car $k_1 + k_2 = 1$.

- **L'indépendance au sens des préférences** : il ne doit pas exister une sous famille de critères $J \subset F$ qui soit dépendante au sens des préférences (voir la définition dans cf. 1.4.1)

1.5.1.2 Les méthodes qui prennent en compte les dépendances entre critères

Dans les modèles correspondant à ces méthodes, V n'est pas une simple combinaison linéaire des v_i . La complexité de ces modèles et la difficulté de leur mise en œuvre en pratique font qu'ils sont moins utilisés que les modèles additifs. Parmi les méthodes les plus connues et les plus utilisées, nous pouvons citer *l'intégrale de Choquet* et, à un degré moindre, *les GAI Nets* et *l'intégrale de Sugeno*, car ils sont plus difficiles à mettre en œuvre en pratique.

Remarque : on notera dans la suite de cette section a_i au lieu de $v_i(g_i(a))$ et $F = \{1, 2, \dots, n\}$

1.5.1.2.1 Le minimum et le maximum pondérés

Ces agrégateurs ont été développés par D. Dubois and H. Prade [17]

$$wmin(a) = \min_{i \in F} [\max \{(1 - k_i), a_i\}]$$

où $\max \{k_i\} = 1$. On retrouve *le minimum* en prenant $k_i = 1 \forall i \in F$

$$wmax(a) = \max_{i \in F} [\min \{k_i, a_i\}]$$

On retrouve le *maximum* en prenant $k_i = 1 \forall i \in F$

La particularité du *minimum pondéré* $wmin$ est de favoriser les alternatives dont tous les critères importants ont une bonne performance tandis que *Le maximum pondéré* $wmax$ favorise les alternatives dont le critère le plus important à une bonne performance, quelles que soient les performances des autres critères :

Exemple 8

Soient a et b deux alternatives caractérisées par leurs performances : $a = (0; 0, 5; 1)$ et $b = (0, 7; 0, 7; 0, 65)$ avec $k_1 = 0, 25$ $k_2 = 0, 3$ $k_3 = 0, 45$

Avec $wmin$, a est meilleure que b ($wmin(a) = 0, 7 > wmin(b) = 0, 5$) car l'alternative a a une excellente performance sur le critère le plus important ce qui n'est pas le cas de b bien que toutes ces performances soient bonnes.

Soient c et d deux autres alternatives avec $c = (0, 3; 0, 4; 0, 5)$ et $d = (1; 1; 0, 4)$

Avec $wmax$, c est meilleure que d ($wmax(c) = 0, 5 > wmax(d) = 0, 4$) car l'alternative c a une meilleure performance que d sur le critère le plus important, bien que les performances de d soient excellentes sur les deux premiers critères.

1.5.1.2.2 La moyenne pondérée ordonnée

Cet agrégateur a été développé par R. Yager [96] :

$$OWA(a) = \sum_{i=1}^n k_i a_{\sigma(i)}$$

où $\forall i : 0 \leq a_i \leq 1$, σ est une permutation de F t.q : $a_{\sigma(1)} \leq a_{\sigma(2)} \leq \dots \leq a_{\sigma(n)}$ et $\sum k_i = 1$. Les paramètres poids de cet agrégateur ne correspondent pas à l'importance des critères mais à leurs performances. Par exemple, on veut donner plus d'importance au maximum, minimum, quartile, médiane ou à n'importe quelle statistique d'ordre des valeurs des a_i .

Exemple 9

Soient a et b deux alternatives caractérisées par leurs performances : $a = (1; 0, 5; 0)$ et $b = (0, 5; 0, 5; 0, 5)$, si on pose $k_1 = 0, 25$ $k_2 = 0, 3$ $k_3 = 0, 45$, on aura tendance à favoriser les alternatives dont les performances sont excellentes sur un seul critère (on donne plus d'importance au maximum) :

$$OWA(a) = 0, 25 \times 0 + 0, 3 \times 0, 5 + 0, 45 \times 1 = 0, 6$$

aux alternatives dont les performances sont moyennes sur tous les critères :

$$OWA(b) = 0, 25 \times 0, 5 + 0, 3 \times 0, 5 + 0, 45 \times 0, 5 = 0, 5$$

1.5.1.2.3 L'intégrale de Choquet

L'intégrale de Choquet C_μ a été utilisée pour la première fois en aide multicritère à la décision par T. Murofushi and M. Sugeno à la fin des années quatre-vingt [82, 62]. Depuis, plusieurs études sur l'intégrale de Choquet en AMCD ont été menées pour l'axiomatisation [52, 48, 56]. L'intégrale de Choquet d'une alternative a est donnée par l'expression suivante :

$$C_\mu(a) = \sum_{i=1}^n [a_{\sigma(i)} - a_{\sigma(i-1)}] \mu(\sigma(i), \dots, \sigma(n)) \quad (1.8)$$

où $\forall i : 0 \leq a_i \leq 1$, σ est une permutation de F t.q : $a_{\sigma(1)} \leq a_{\sigma(2)} \leq \dots \leq a_{\sigma(n)}$ et les μ sont des paramètres décisionnels appelés *capacités*.

Remarque 2 (Commensurabilité des échelles) *L'expression 1.8 n'est valide que si les v_i , $i = \overline{1, \dots, n}$ sont commensurables. Nous verrons à la section 1.6.1.5 comment transformer les échelles g_i en des échelles v_i commensurables, si cela est possible. L'utilisation de l'intégrale de Choquet nécessite donc l'hypothèse de commensurabilité des échelles des fonctions d'utilité v_i , ce qui n'est pas le cas des méthodes fondées sur des modèles additifs. En effet, afin que l'opération de permutation σ , permettant d'ordonner les utilités a_i dans l'expression (1.8), soit significative, il faudrait s'assurer que pour un même niveau d'utilité v_0 sur tous les critères, indépendamment de leurs importances relatives, cette valeur procure au décideur la même satisfaction sur chaque critère.*

La valeur de la capacité $\mu(M)$, où $M \subseteq F$, dans une intégrale de Choquet correspond à l'utilité de l'action dont toutes les performances qui correspondent aux critères $i \in M$ sont à leurs meilleurs niveaux : $a_i = 1$ et les performances qui correspondent aux critères $i \in F \setminus M$ sont à leurs niveaux les plus bas : $a_i = 0$. Cette définition n'est autre qu'une généralisation de la deuxième définition des k_i à la section 1.5.1.1.

L'intégrale de Choquet offre plusieurs outils afin d'analyser l'information préférentielle comme la *valeur de Shapley* $\Phi_\mu(i)$ pour mesurer l'importance marginale des critères et l'indice d'interaction $I_\mu(S)$ pour mesurer le degré d'interaction entre les critères appartenant à $S \subset F$.

$$\Phi_\mu(i) = \sum_{T \subseteq F \setminus i} \frac{(n - |T| - 1)! |T|!}{(n)!} [\mu(T \cup i) - \mu(T)] \quad (1.9)$$

$$I_\mu(S) = \sum_{T \subseteq F \setminus S} \frac{(n - |T| - |S|)! |T|!}{(n - |S| + 1)!} \sum_{L \subseteq S} (-1)^{|S| - |L|} \mu(T \cup L) \quad (1.10)$$

L'intégrale de Choquet est une généralisation des agrégateurs présentés ci-dessus. Il permet donc de modéliser plus d'information préférentielle. Cependant, il

faut pour cela éliciter $2^n - 2$ paramètres (la capacité) en plus des fonctions d'utilité. Il existe, néanmoins, des variantes (k-additif) où l'on peut réduire ce nombre aux dépens de l'information inter-critères. L'élicitation de la capacité de l'intégrale de Choquet se fait, généralement, de manière indirecte (en passant par la transformée de Möbius de ces dernières).

Définition 1 (k-additivité) Une capacité μ de F est dite *k-additive* s'il n'y a aucune interaction entre les critères de chaque sous ensemble $S \subseteq F$ dont la cardinalité est supérieure à k ($1 \leq k \leq m$), ie., $\forall S \subseteq F$ s.t. $|S| > k$, $I_\mu(S) = 0$

Définition 2 (Transformée de Möbius d'une capacité) La transformée de Möbius d'une capacité μ de F est une fonction $M : \mathcal{P}(F) \mapsto \mathbb{R}$ définie comme suit :

$$M(S) = \sum_{K \subseteq S} (-1)^{|S \setminus K|} \mu(K) \quad \forall S \subseteq F \quad (1.11)$$

La capacité μ peut également être exprimée en fonction de sa transformée de Möbius :

$$\mu(S) = \sum_{K \subseteq S} M(K) \quad \forall S \subseteq F \quad (1.12)$$

L'expression de l'intégrale de Choquet en fonction de la transformée de Möbius de μ , est donnée par :

$$C_M(a) = \sum_{K \subseteq F} M(K) \times \min_{i \in K} a_i \quad \forall S \subseteq F \quad (1.13)$$

1.5.1.2.4 Les GAI-Net

Le modèle GAI (*Generalized Additive Independence*) a été introduit par P.C. Fishburn [23] et développé par P. Perny et C. Gonzales [29]. La construction de ce modèle consiste à associer à tout sous ensemble de critères $Z_j \in F$ en interaction, une fonction d'utilité, généralement non additive qui représente les préférences du décideur (I, P) sur ce sous ensemble. L'utilité globale d'une action $g(a)$ (si elle existe) est donnée par la somme de ces utilités.

Définition 3 (GAI-décomposition)

Soient Z_1, Z_2, \dots, Z_k des sous ensembles de F t.q $\bigcup_{i=1}^k Z_i = F$ et soit : $X_{Z_i} = \prod_{j \in Z_i} X_{g_j}$. On dit d'une fonction $g(\cdot)$ qui représente les préférences d'un décideur qu'elle est GAI-décomposable selon X_{Z_i} , s'il existe des fonctions $u_i : X_{Z_i} \mapsto [0, 1]$ pour tout $i \in \{1, \dots, k\}$ t.q :

$$g(a) = \sum_{i=1}^k u_i(g_{Z_i}(a))$$

Où $g_{Z_i}(a)$ est le vecteur composé des $g_j(a) : j \in Z_i$

P. Perny et C. Gonzales [29] ont proposé une représentation graphique de ce modèle (GAI-Net) afin de faciliter l'élicitation des fonctions d'utilité. Le graphe $G = (V, E)$ associé à cette décomposition est appelé *GAI-Network* où les sommets X_{Z_i} de V représentent les partitions Z_i et $X_{Z_i}X_{Z_j} \in E$ uniquement si $Z_i \cap Z_j \neq \Phi$. L'élicitation des fonctions d'utilité se fait par *une méthode de jugements par indifférences* (voir cf. 1.6.1.1) en exploitant la structure du graphe. La difficulté de cette tâche est au moins équivalente à celle des modèles qui ne prennent pas en compte les dépendances entre critères et elle augmente avec le nombre des sous ensemble Z_i .

1.5.1.2.5 L'intégrale de Sugeno

L'intégrale de Sugeno [73] peut être considérée comme une version ordinale de l'intégrale de Choquet, où seuls les opérateurs min et max sont utilisés :

$$S_\mu(a) = \max_{i \in F} [\min \{a_{\sigma(i)}, \mu(\sigma(i), \dots, \sigma(n))\}]$$

L'application de l'intégrale de Sugeno nécessite également la commensurabilité des échelles.

1.5.2 Les méthodes de surclassement

Le principe de ces méthodes consiste à comparer les alternatives par paires au moyen d'une relation de surclassement S . Puis d'exploiter cette relation afin de fournir un résultat répondant à l'une des trois premières problématiques (choix, tri, rangement) mentionnées à la section 1.2.2.

Définition 4 (Relation de surclassement - B. Roy [75])

On dit qu'une alternative a surclasse une alternative b et on note aSb si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire (vétos).

L'avantage de ces méthodes par rapport aux méthodes MAUT est qu'elles nécessitent une information moins riche et des hypothèses moins restrictives :

- les critères ne sont pas, nécessairement, totalement compensatoires,
- la transitivité des préférences n'est pas imposée,
- l'hétérogénéité des échelles n'est pas un problème (qu'elles soient ordinales, intervalles ou ratio) lors de l'agrégation des critères,

- l'incomparabilité, l'hésitation et l'indétermination sont prises en compte³.

Néanmoins, le résultat n'est pas nécessairement aussi riche qu'un préordre total car S n'est souvent pas *transitive* ni *complète*. La seule propriété qu'elle vérifie est la *réflexivité*. L'objectif de ces méthodes n'est pas de prescrire une solution au décideur mais plutôt d'éclairer son choix (quelles sont les solutions à écarter ? Quelles sont celles qui doivent être considérées comme bonnes ? Quelles sont celles qui rendent la comparaison avec les autres difficile ?).

Ces méthodes comprennent donc deux phases : celle de la construction de la relation de surclassement S et celle de la l'exploitation de cette dernière. La définition de S ainsi que les différentes possibilités de la construire et de l'exploiter ont donné lieu à plusieurs méthodes de surclassement. Nous pouvons citer deux grandes familles que sont ELECTRE et PROMETHEE.

1.5.2.1 Les méthodes ELECTRE

Dans ces méthodes, le surclassement de a sur b (aSb) repose sur deux principes : la *concordance*, dont le principe est le même que celui de la majorité dans un processus électoral (voir méthode de Condorcet en théorie du choix social [8, 9]) : il faut qu'une majorité de critères, représentés par leurs poids (le nombre de votants), soient en faveur de a , et la *non discordance*, fonctionnant comme un veto dans une élection (respect des minorités) : il ne faut pas qu'il y ait un critère qui s'oppose fortement au surclassement de a sur b . L'exemple suivant illustre ces deux principes :

Exemple 10

On veut comparer le confort d'un lieu de travail (bureau) a par rapport à un profil (alternative de référence) b en considérant comme critères : le confort thermique, le confort acoustique (bruit) et le confort du siège. Si l'alternative a a un meilleur confort acoustique et un meilleur confort du siège que b , alors, si le confort thermique de a est nettement inférieur à celui de b , bien qu'on ait une majorité de critères⁴ qui soient en faveur de a (principe de concordance), on ne pourrait pas affirmer que aSb , d'où la nécessité, dans ce cas là, d'un veto de la part du critère confort thermique sur l'assertion aSb .

Les principes de *concordance* et de *non discordance* sont formalisés dans les méthodes ELECTRE, en construisant des indices de concordance et de discordance de la manière suivante :

3. Ce qui permet donc de prendre en compte la situation d'*incomparabilité* aRb et de *préférence faible* aQb en plus de celles de *préférence* et d'*indifférence*

4. En considérant, sans perte de généralité, qu'ils ont la même importance

a) La concordance :

L'indice de concordance $c(a, b)$ représente l'importance de la coalition de critères qui sont en faveur de a au sens large. Sa forme la plus générale (prise en compte de la préférences faibles) est donnée par l'expression (1.17). Son expression la plus simple (sans prise en compte des préférences faibles) est la suivante :

$$c(a, b) = \sum_{i \in C(a, b)} w_i \quad (1.14)$$

où :

- $C(a, b) = \{i \in F/g_i(a) \geq g_i(b)\}$ est appelée *coalition concordante*,
- chaque poids w_i représente l'importance du critère i , il n'a pas la même signification que k_i à la section 1.5.1.1, il ne correspond pas à un taux de substitution mais plutôt à un nombre de voix associé au critère i , c.-à.-d. si une alternative a est préférée à b , alors le critère i est en faveur de a et le poids w_i lui est entièrement attribué sans tenir compte de l'intensité de cette préférence, ce qui limite l'impact d'une mauvaise évaluation de ce paramètre sur le résultat final.

b) La non discordance :

La non discordance représente le fait qu'il ne doit pas exister de critère où l'avantage de b sur a contredit l'affirmation aSb :

$$\forall i \in F/g_i(b) - g_i(a) \leq vt_i(g_i(a)) \quad (1.15)$$

où les vt_i sont appelés seuils de *véto*. On utilise généralement, dans les méthodes ELECTRE, un indice $d_i(a, b)$ indiquant si le critère i émet un veto sur le surclassement de a par rapport à b . L'expression la plus simple de cet indice est donnée par la formule suivante :

$$d_i(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_i(b) - g_i(a) > vt_i(g_i(a)) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.16)$$

L'expression plus générale de cet indice est donnée par l'équation (1.18)

Nous avons vu, dans les avantages des méthodes ELECTRE, que ces dernières pouvaient modéliser des aspects importants que l'on remarque chez un décideur lorsqu'il est interrogé sur ses préférences, qui sont *l'incomparabilité* et *les préférences faibles*

- **L'incomparabilité**

L'incomparabilité R entre deux alternatives a et b se traduit en terme de surclassement par le fait que $\neg aSb$ et $\neg bSa$.

– Les préférences faibles

Lorsque les performances $g_i(a)$ et $g_i(b)$ sont presque égales, il se peut que le décideur hésite entre l'indifférence ou bien la préférence de a par rapport à b . Cela est souvent dû à l'incertitude ou au manque d'information sur ses préférences. Afin de modéliser cela, on introduit les seuils *d'indifférence* $q_i(g_i(a))$ et de *préférence* $p_i(g_i(a))$ (voir la figure 1.2). L'équation (1.14) devient :

$$c^s(a, b) = \sum_{i \in F} w_i c_i(a, b) \quad (1.17)$$

où :

$$c_i(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_i(b) - g_i(a) \leq q_i(g_i(a)) \\ \frac{p_i(g_i(a)) - (g_i(b) - g_i(a))}{p_i(g_i(a)) - q_i(g_i(a))} & \text{si } q_i(g_i(a)) \leq g_i(b) - g_i(a) \leq p_i(g_i(a)) \\ 0 & \text{si } g_i(b) - g_i(a) \geq p_i(g_i(a)) \end{cases}$$

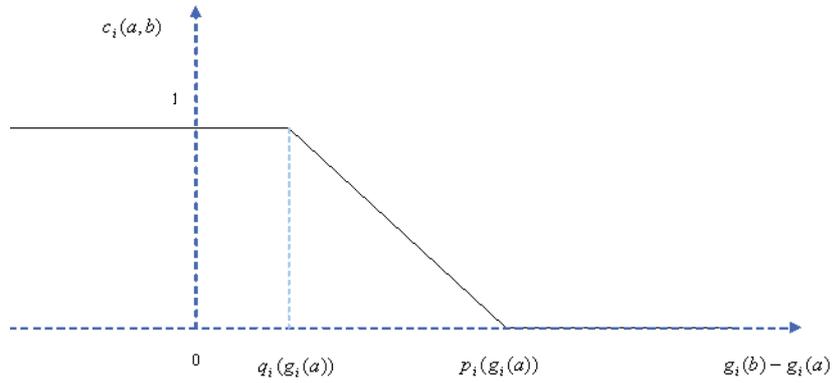


Figure 1.2 – Seuils de préférence et d'indifférence

et l'équation (1.16) devient :

$$d_i^s(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_i(b) - g_i(a) > vt_i(g_i(a)) \\ \frac{(g_i(b) - g_i(a)) - p_i(g_i(a))}{vt_i(g_i(a)) - p_i(g_i(a))} & \text{si } p_i(g_i(a)) \leq g_i(b) - g_i(a) \leq vt_i(g_i(a)) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.18)$$

Une fois la relation de surclassement déterminée, elle est exploitée pour répondre à l'une des problématiques citées à la section 1.2.2. Il existe au moins une version d'ELECTRE pour chacune des trois premières problématiques ($P.\alpha$, $P.\beta$, $P.\gamma$). Nous allons présenter certaines d'entre elles :

1.5.2.1.1 ELECTRE I (Problématique $P.\alpha$)

L'objectif de la méthode est de sélectionner un ensemble (réduit) A^* qui contient les meilleures alternatives parmi lesquelles se trouve celle que le décideur choisira. La relation de surclassement S , sans considérer les préférences faibles⁵, est définie comme suit :

$$aSb \Leftrightarrow c(a, b) \geq s \text{ et } \forall i \in F : d_i(a, b) = 0 \quad (1.19)$$

où s est le niveau exigé de concordance pouvant s'interpréter comme un niveau de majorité.

La procédure d'exploitation repose sur la recherche d'un noyau dans un graphe orienté $G = (V, E)$ où les sommets $V = \{x_{a1}, \dots, x_{am}\}$ représentent les alternatives et $(x_{ai}, x_{aj}) \in E \Leftrightarrow aiSaj$. Le lecteur intéressé par cette procédure peut se référer au chapitre 6 de [78].

1.5.2.1.2 ELECTRE Tri (Problématique $P.\beta$)

L'objectif de la méthode est d'affecter des alternatives à des catégories ordonnées et prédéfinies $Cl_k : k = \overline{1, \dots, c}$ dont les limites correspondent à des alternatives fictives appelées *profils* et qu'on note $b_k : k = \overline{1, \dots, c-1}$ où c est le nombre de catégories. Pour cela les alternatives sont comparées avec ces profils au moyen de la relation de surclassement S définie comme suit :

$$aSb_k \Leftrightarrow \sigma(a, b_k) \geq \lambda \quad (1.20)$$

où λ est appelé seuil de crédibilité et $\sigma(a, b_k)$ indice de crédibilité. Il est donné par l'expression (1.21)

$$\sigma(a, b_k) = c^s(a, b_k) \times \prod_{j/d_j^s(a, b_k) > c^s(a, b_k)} \frac{1 - d_j^s(a, b_k)}{1 - c^s(a, b_k)} \quad (1.21)$$

L'affectation d'une alternative a à une catégorie peut se faire avec l'une des deux procédures : *procédure optimiste* ou *procédure pessimiste*.

a- Procédure optimiste :

- l'alternative a est comparée successivement avec les profils b_k , en commençant par $k = 1$,
- cette procédure est arrêtée à la première valeur h telle que :

$$b_hSa \text{ et } \neg(aSb_h) \quad (1.22)$$

- si $\nexists k \in \{1, c-1\}$ pour lequel la relation (1.22) est vérifiée, alors l'alternative a est affectée à la catégorie Cl_c , sinon a est affectée à la catégorie Cl_h

5. Une version d'ELECTRE I, prenant en compte les préférences faibles, a été également proposée

b- Procédure pessimiste :

- l'alternative a est comparée successivement avec les profils b_k , en commençant par $k = c - 1$,
- cette procédure est arrêtée à la première valeur h telle que :

$$aSb_h \tag{1.23}$$

- si $\nexists k \in \{1, c - 1\}$ pour lequel la relation (1.23) est vérifiée, alors l'alternative a est affectée à la catégorie Cl_1 , sinon a est affectée à la catégorie Cl_{h+1}

Lors de la comparaison d'une alternative a avec un profil b_k , quatre cas sont possibles :

- 1) aSb_k et $\neg b_kSa$
- 2) b_kSa et $\neg aSb_k$
- 3) aSb_k et b_kSa
- 4) $\neg aSb_k$ et $\neg b_kSa$

Le résultat de l'affectation par les deux procédures ne diffère que dans le quatrième cas (incomparabilité avec un profil), l'alternative a est affectée à une catégorie supérieure avec la procédure optimiste.

1.5.2.1.3 ELECTRE III (Problématique $P.\gamma$)

L'objectif d'ELECTRE III [74] est de ranger les alternatives de la meilleure à la moins bonne avec incomparabilités possibles. Le principe consiste tout d'abord à construire une relation de surclassement évaluée, définie pour chaque paire d'alternative (a, b) . Cette relation est caractérisée par un l'indice de crédibilité du surclassement $\sigma(a, b)$ donné par l'expression (1.21). Cet indice est exploité ensuite pour le rangement des alternatives à l'aide de deux procédures (*distillation ascendante et descendante*).

1.5.2.2 Les méthodes PROMETHEE [10]

Le principe de ces méthodes repose sur la construction d'une relation de surclassement évaluée traduisant une *intensité de préférence*.

On commence par calculer des indices $P_i(g_i(a) - g_i(b))$ mesurant les intensités de préférence sur les critères i entre tout couple d'alternatives et pouvant prendre différentes formes. On peut citer certaines d'entre elles :

Si on pose $d_i = g_i(a) - g_i(b)$ alors

$$P_i(d_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \tag{1.24}$$

$$P_i(d_i) = \begin{cases} \frac{d_i - q_i}{p_i - q_i} & \text{si } q_i \leq d_i \leq p_i \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.25)$$

$$P_i(d_i) = 1 - e^{\frac{-d_i^2}{2s_i^2}} \quad (1.26)$$

Où q_i et p_i sont appelés aussi *seuils de préférence et d'indifférence* mais n'ont pas la même signification que dans ELECTRE, ils ne modélisent pas l'hésitation mais plutôt l'intensité de préférence.

Cet indice n'a pas la même signification que $S(a, b)$ dans ELECTRE III mesurant la crédibilité de l'assertion a surclasse b et non pas l'intensité de préférence de a sur b .

On calcule ensuite *les intensités de préférence multicritère* $\pi(a, b) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(d_i)$ et pour chaque alternative a , *les flux de surclassement* :

- **Sortant** : il exprime le caractère de surclassement de a face aux $m - 1$ autres alternatives, ou encore sa *force*. Il est d'autant plus grand que a surclasse fortement les autres alternatives.

$$\phi^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A \setminus \{a\}} \pi(a, x) \quad (1.27)$$

- **Entrant** : il exprime le caractère surclassée de a face aux $m - 1$ autres alternatives, ou encore sa faiblesse. Il est d'autant moins grand que a est peu surclassée.

$$\phi^-(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A \setminus \{a\}} \pi(x, a) \quad (1.28)$$

Toutes les phases d'exploitation se fondent sur les valeurs $\phi^+(a)$ et $\phi^-(a)$. Dans PROMETHEE I, on obtient un rangement partiel des alternatives car il se peut qu'il y ait des incomparabilités dues au fait que la condition pour laquelle une alternative a surclasse b est assez forte :

$$aSb \Leftrightarrow \begin{cases} \phi^+(a) \geq \phi^+(b) \\ \phi^-(a) \leq \phi^-(b) \end{cases} \quad (1.29)$$

On peut donc avoir $\neg aSb$ et $\neg bSa$. Par contre, dans PROMETHEE II, il ne peut pas y avoir d'incomparabilités, le rangement étant complet, il est obtenu en considérant *le flux net* :

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (1.30)$$

1.5.3 Les méthodes à base de règles

Les méthodes classiques, à base de règles, en aide multicritère à la décision, ont pour origine la théorie des ensembles approximatifs [67][68], dont l'objectif consiste à inférer un ensemble de règles $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ du type « *si <conditions> alors <décision>* » à partir d'exemples d'apprentissage fournis par le décideur. Ces exemples forment, généralement, un ensemble d'alternatives A évaluées sur un ensemble d'attributs $Q = \{q_1, \dots, q_m\}$ et pour lequel des décisions (affectation des alternatives de A dans des catégories $\{S_1, \dots, S_p\}$) ont été prises dans le passé par le décideur et qui se sont avérées pertinentes. La partie condition de la règle concerne l'ensemble des attributs et la partie décision concerne l'affectation des alternatives vérifiant les conditions correspondantes. L'inférence de ces règles est fondée sur l'approximation des catégories S_t par deux ensembles appelés *Lower approximation* : $\underline{P}(S_t)$ et *upper approximation* $\overline{P}(S_t)$, tel que :

$$\underline{P}(S_t) \subseteq S_t \subseteq \overline{P}(S_t)$$

$\underline{P}(S_t)$ et $\overline{P}(S_t)$ sont construits au moyen d'une relation d'indiscernabilité I sur $A \times A$ définie comme suit :

$$I = \{(a, b) \in A \times A / g_i(a) = g_i(b), \forall i \in F\}$$

Une fois cette relation définie, on construit les ensembles suivants pour toute alternative $a \in A$

$$I(a) = \{b \in A / g_i(a) = g_i(b), \forall i \in F\}$$

afin d'obtenir $\underline{P}(S_t)$ et $\overline{P}(S_t)$:

$$\underline{P}(S_t) = \{a \in A / I(a) \subseteq S_t\} \tag{1.31}$$

$$\overline{P}(S_t) = \{a \in A / I(a) \cap S_t \neq \emptyset\} \tag{1.32}$$

1.5.3.1 De la théorie des ensembles approximatifs aux méthodes à base de règles en AMCD

L'utilisation des approches fondées sur la théorie des ensembles approximatifs est appropriée uniquement lorsque F est une famille d'attributs (absence de caractéristique d'ordre), ces approches ne sont donc pas appropriées pour les problèmes d'aide multicritère à la décision où les attributs sont des critères. Pour cela, Greco, Mattarazzo et Slowinski ont proposé une approche analogue (DRSA) [32, 33] fondée sur la relation de *Pareto* dominance au lieu de la relation d'indiscernabilité et étant plus appropriée pour les problèmes d'AMCD. Dans cette approche, les attributs sont des critères, les catégories qu'on notera ici : $\{Cl_1, \dots, Cl_p\}$ sont ordonnées et les règles prennent la forme suivante :

- si $g_{i_1}(a) \geq r_{i_1}, g_{i_2}(a) \geq r_{i_2}, \dots, g_{i_l}(a) \geq r_{i_l}$ alors $a \in Cl_h^{\geq}$,
 - si $g_{i_1}(a) \leq r_{i_1}, g_{i_2}(a) \leq r_{i_2}, \dots, g_{i_l}(a) \leq r_{i_l}$ alors $a \in Cl_h^{\leq}$
- où $\{i_1, \dots, i_l\} \subseteq F, Cl_h^{\leq} = \bigcup_{t \leq h} Cl_t, Cl_h^{\geq} = \bigcup_{t \geq h} Cl_t$.

À l'image des approches classiques de la théorie des ensembles approximatifs, les méthodes d'inférence de ces règles sont fondées sur l'approximation de Cl_t^{\leq} par deux ensembles $\underline{P}(Cl_t^{\leq})$ et $\overline{P}(Cl_t^{\leq})$, et Cl_t^{\geq} par deux autres ensembles $\underline{P}(Cl_t^{\geq})$ et $\overline{P}(Cl_t^{\geq})$. Pour cela, on construit tout d'abord les ensembles :

$$D_F^+(a) = \{b \in A : bD_F a\} \text{ et } D_F^-(a) = \{b \in A : aD_F b\} \quad (1.33)$$

tel que :

$$aD_F b \Leftrightarrow \forall i \in F : g_i(a) \geq g_i(b)$$

Et on obtient ainsi :

$$\begin{aligned} \underline{P}(Cl_t^{\geq}) &= \{a \in A : D_F^+(a) \subseteq Cl_t^{\geq}\} \\ \overline{P}(Cl_t^{\geq}) &= \{a \in A : D_F^-(a) \cap Cl_t^{\geq} \neq \phi\} \end{aligned} \quad (1.34)$$

$$\begin{aligned} \underline{P}(Cl_t^{\leq}) &= \{a \in A : D_F^-(a) \subseteq Cl_t^{\leq}\} \\ \overline{P}(Cl_t^{\leq}) &= \{a \in A : D_F^+(a) \cap Cl_t^{\leq} \neq \phi\} \end{aligned} \quad (1.35)$$

1.5.3.2 Construction des règles avec le décideur

Dans certains cas, il est possible de construire des règles de décision directement avec le décideur, par exemple à l'aide d'une arborescence représentant l'ensemble des cas possibles. Ce type de méthodes est utilisé lorsque l'ensemble des alternatives potentielles : $X = \prod_i X_i$ et la famille de critère F ne sont pas de grande taille. Cependant, il est important de veiller à ce que ces règles vérifient certaines propriétés élémentaires que doit posséder toute procédure d'agrégation :

- **L'exclusivité** : Toute alternative a doit être affectée à, au plus, une seule catégorie Cl_t .
- **La monotonie** : La base de règle doit être cohérente avec le principe de dominance. En effet, pour toutes alternatives a, b t.q $aD_F b$, si b est affectée à une catégorie Cl_t , alors, a doit être affectée au moins à la catégorie Cl_t .
- **L'exhaustivité** : Toute alternative a doit être affectée à une catégorie par une règle.

Une approche a été développée dans [3] afin de vérifier si une base de règles satisfait les trois conditions précédentes à condition que ces règles aient une certaine forme. Cette approche consiste à transformer les règles représentées sous forme logique en règles équivalentes représentées sous forme algébrique puis de résoudre une série de programmes linéaires. Nous pouvons également identifier, avec cette approche, des alternatives qui ne sont pas couvertes par des règles satisfaisant ces propriétés.

1.5.3.3 Construction des règles avec le décideur et DRSA

La construction de règles avec le décideur nous permet d'obtenir des règles précises et faciles à interpréter. Cela n'est pas le cas de DRSA où les règles ne le sont pas souvent, ce qui rend difficile l'interprétation du résultat. En effet, dans DRSA, la partie condition des règles manque parfois d'intelligibilité et devient difficile à interpréter. De plus, le décideur doit fournir un grand nombre d'exemples d'apprentissage afin d'augmenter la précision des règles, c.-à-d. une règle affectant les alternatives dans une catégorie Cl_t au lieu de Cl_t^{\geq} ou Cl_t^{\leq} . D'autre part, quand X et F sont de grande taille, il devient difficile de construire avec le décideur une base de règles vérifiant les trois précédentes propriétés. Cependant, les deux approches peuvent traiter n'importe quel type d'information préférentielle (dépendance, veto), qui ne soit pas en contradiction avec le principe de dominance, et les critères peuvent être évalués sur des échelles (pouvant être hétérogènes) ordinales ou cardinales.

1.6 L'élicitation des paramètres décisionnels

Nous avons vu, à la section précédente, différentes méthodes d'agrégation, leurs conditions d'utilisation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Les modèles sur lesquels sont fondés ces méthodes dépendent de paramètres décisionnels (poids, seuils, profils, capacités) devant être élicités. L'élicitation consiste à déterminer les valeurs (ou un ensemble de valeurs) de ces paramètres à partir de l'information préférentielle fournie par le décideur. L'information préférentielle est soit de nature *directe* : le décideur attribue des valeurs directement à ces paramètres (poids, vetos, capacités, seuils, fonctions d'utilité), soit de nature *indirecte* : le décideur exprime un jugement global sur un sous-ensemble d'actions $A^R \subset A$ (par exemple, aPb ou l'intensité de préférence de a sur b est plus importante que celle de c sur d) et un sous ensemble de critères $F^R \subset F$ (par exemple, le critère i est plus important que le critère j). Ces deux types d'informations préférentielles ont donné lieu à deux types d'approches : directes et indirectes.

Les approches directes sont rarement utilisées pour les deux premières familles de méthodes multicritères (les méthodes *MAUT* et les méthodes de surclassement). Nous pouvons citer parmi ces approches, la méthode SRF [21] développée par B. Roy et J.R. Figueira pour l'élicitation des poids des méthodes ELECTRE. Pour ce qui concerne la construction de règles avec le décideur, elle se fait généralement de manière directe.

Les approches indirectes ont donné lieu à plusieurs méthodes d'élicitation qui sont fondées sur des procédures **d'agrégation/désagrégation**. Ce type de procédure est utilisé pour l'élicitation des paramètres des trois familles de méthodes

multicritères. Le principe de ces procédures est d'éliciter les paramètres de manière itérative comme suit.

- 1- Le décideur exprime un jugement global sur un sous-ensemble initial d'actions $A_0^R \subset A$ et un jugement sur un sous ensemble de critères $F_0^R \subset F$ (importance, synergie, compensation).
- 2- On cherche des valeurs (ensemble de valeurs) de paramètres décisionnels compatibles avec les préférences du décideur sur A_0^R et F_0^R en utilisant une méthode d'élicitation.
- 3- Si on n'arrive pas à trouver de valeurs, alors, la méthode d'agrégation n'est pas compatible avec les préférences du décideur et, dans ce cas, on doit soit changer de méthode d'agrégation, soit le décideur est prêt à modifier ses préférences exprimées sur A_0^R et F_0^R et on réitère la procédure à partir de la deuxième étape.
- 4- Si on arrive à trouver des valeurs des paramètres compatibles avec les préférences du décideur, alors on lui soumet les résultats que donne la procédure d'agrégation correspondante, à la fois sur A_0^R et F_0^R mais aussi sur d'autres actions. Ensuite, si ce résultat lui convient, alors on arrête la procédure, sinon, il modifie ses préférences sur A_0^R et F_0^R et on réitère la procédure.

Dans cette section, nous allons présenter quelques méthodes d'élicitation, souvent utilisées dans des procédures d'agrégation/désagrégation. Nous présenterons également deux procédures, fondées sur certaines de ces méthodes d'élicitation, que nous utiliserons pour éliciter la capacité d'une intégrale de Choquet lors de la phase d'agrégation des critères de notre approche.

1.6.1 Les paramètres des méthodes utilisant un critère unique de synthèse

La plupart des méthodes d'élicitation dans la littérature infèrent les fonctions d'utilité v_i , les poids k_i , et la capacité μ_i (pour l'intégrale de Choquet et de Sugeno).

1.6.1.1 Les méthodes fondées sur des jugements par indifférences

L'objectif de ces méthodes (voir [47, 93]) est d'éliciter les fonctions d'utilité $v'_i(g_i(a))$ correspondent au modèle additif suivant :

$$g(a) = \sum_i v'_i(g_i(a))$$

Où $v'_i(g_i(a)) = k_i v_i(g_i(a))$ On suppose que les X_{g_i} sont des intervalles de la forme $[\underline{g}_i, \bar{g}_i]$, où $v'_i(\underline{g}_i) = 0$.

La procédure commence par fixer les échelles sur un critère i_0 en posant $v'_{i_0}(\bar{g}_{i_0}) = 1$, on choisit un autre critère i_1 et on demande au décideur de fixer un point quelconque $x \in X_{g_{i_1}}$ de telle sorte à ce qu'il juge $(g_{i_0}, x)I(\bar{g}_{i_0}, g_{i_1})$ (c.-à-d. $v'_{i_0}(g_{i_0}) + v'_{i_1}(x) = v'_{i_0}(\bar{g}_{i_0}) + v'_{i_1}(g_{i_1})$) ce qui donne $v'_{i_1}(x) = 1$ et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on obtienne un nombre suffisant de points pour construire v'_{i_1} qui est souvent une fonction linéaire par morceaux. On réitère ensuite le processus pour chaque critère. On déduit enfin les valeurs des poids $k'_i = v'_i(\bar{g}_i)$, des fonctions d'utilité $v_i(g_i(a)) = \frac{v'_i(g_i(a))}{k'_i}$ et des poids normalisés $k_i = \frac{k'_i}{\sum k'_j}$.

Le problème qui peut se poser avec ces méthodes est l'apparition d'incohérences (si on choisit i_2 au lieu de i_0 pour construire v'_{i_1} , on obtient souvent une fonction différente).

1.6.1.2 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

La méthode [79] consiste à structurer le problème d'aide à la décision de manière hiérarchique (chaque critère peut être décomposé en sous critères). Un modèle additif est ensuite utilisé en chaque nœud pour l'agrégation des critères. Pour cela, en chaque nœud, on commence par comparer des alternatives, appartenant à A^R , par paires sur chaque critère de la manière suivante : on demande au décideur combien de fois l'alternative a est meilleure que b sur le critère i . Les réponses peuvent être formulées sur une échelle verbale ou bien numérique (voir tableau 1.1). Il y a cinq niveaux principaux sur l'échelle plus quatre niveaux intermédiaires 2, 4, 6, 8. Par exemple le niveau « modéré » correspond à une alternative qui est

Échelle verbale	égal	modéré	fort	très fort	extrême
Échelle numérique	1	3	5	7	9

Tableau 1.1 – Conversion de l'échelle verbale en une échelle numérique dans AHP

trois fois meilleure qu'une autre sur un critère. On obtient ainsi pour chaque critère une matrice carrée (α_i) d'ordre $m = |A|$ où $\alpha_i(a, b)$ représente l'importance relative de l'alternative a sur l'alternative b par rapport au critère i . Afin que les préférences soient cohérentes, les conditions suivantes doivent être vérifiées $\forall a, b, c \in A$:

$$\alpha_i(a, b) \times \alpha_i(b, c) \approx \alpha_i(a, c)$$

Et plus particulièrement :

$$\alpha_i(a, b) \approx \alpha_i(b, a)$$

Saaty propose de calculer, pour chaque matrice (α_i) , le vecteur propre qui correspond à la plus grande valeur propre et dont la somme des éléments est égale à

1. Les éléments de ce vecteur représentent les utilités v_i associées aux performances des alternatives $g_i(a)$. Ensuite, le même principe est appliqué afin de calculer les poids k_i , représentant l'importance des critères, en déterminant la matrice (α) où $\alpha_{i,j}$ représente l'importance relative du critère i sur le critère j .

1.6.1.3 La méthode MACBETH

L'objectif de MACBETH [4] est de construire des échelles d'intervalle pour les fonctions d'utilité v_i et les coefficients k_i d'un modèle additif (voir expression (1.36)), à partir d'information ordinaire et cardinale sur les préférences.

$$g(a) = \sum_i k_i v_i(g_i(a)) \quad (1.36)$$

où $k_i \in]0; 1[$

On commence par déterminer sur chaque critère deux niveaux de référence. Un niveau jugé satisfaisant et un niveau jugé neutre par le décideur, qu'on notera dans ce paragraphe respectivement : \bar{g}_i et \underline{g}_i . La procédure d'interrogation se fait sur un sous ensemble d'alternatives A_R où on demande au décideur pour chaque paire d'alternatives (a, b) , si a est préférée à b et quelle est l'intensité de cette préférence (très faible, faible, modérée, forte, très forte, extrême). On corrige ensuite d'éventuelles incohérences.

Remarque 3 *Les niveaux jugés neutres et satisfaisants sur chacun des critères ne correspondent pas nécessairement aux meilleures et aux moins bonnes performances. Pour plus de détails sur ces deux niveaux voir [4]*

Pour l'élicitation d'une fonction d'utilité v_i , cette procédure est appliquée sur l'ensemble A_{R_i} des actions où toutes les performances sont au niveau neutre sauf la $i^{\text{ème}}$.

$$A_{R_i} = \left\{ a \in A / \forall j \neq i \ g_j(a) = \underline{g}_j \text{ et } g_i(a) = x \in X_{R_i} \right\}$$

où X_{R_i} est un ensemble de points de référence qui appartiennent à X_{g_i} . Afin de fixer les échelles, on peut poser $v_i(\bar{g}_i) = 1$ et $v_i(\underline{g}_i) = 0$.

MACBETH utilise un programme linéaire afin de déterminer une fonction d'utilité v_i . Les contraintes correspondent à l'information cardinale et ordinaire deman-

dée au décideur et l'objectif est de maximiser un critère de robustesse.

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \sigma \\ t.q : \\ v_i(a) \geq v_i(b) + \sigma \quad \forall a, b \in A_{R_i} : a \succ b \\ v_i(a) = v_i(b) \quad \forall a, b \in A_{R_i} : a \sim b \\ v_i(a) - v_i(b) \geq v_i(c) - v_i(d) + \sigma \\ \quad \forall a, b, c, d \in A_{R_i} : (a \succ b) \succ (c \succ d) \\ v_i(\underline{g}_i) = 0 \\ v_i(\bar{g}_i) = 1 \end{array} \right. \quad (1.37)$$

Pour l'élicitation des poids k_i , il suffit de considérer les alternatives e_i définies comme suit :

$$g_i(e_i) = \bar{g}_i \text{ et } \forall j \in F \setminus \{i\} : g_j(e_j) = \underline{g}_j \quad (1.38)$$

On applique ensuite la procédure d'interrogation de MACBETH sur l'ensemble :

$$E = \{e_i / i = \overline{1 \dots n}\} \cup \{e_0\}$$

pour déterminer les valeurs $g(e_i)$. e_0 est l'alternative neutre sur tous les critères.

MACBETH utilise également un programme linéaire afin de déterminer les poids k_i . Les contraintes correspondent à l'information cardinale et ordinale demandée au décideur et l'objectif est de maximiser un critère de robustesse.

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \sigma \\ t.q : \\ g(e_i) \geq g(e_j) + \sigma, \quad \forall e_i, e_j \in E : e_i \succ e_j \\ g(e_i) = g(e_j) \quad \forall e_i, e_j \in E : e_i \sim e_j \\ g(e_i) - g(e_j) \geq g(e_k) - g(e_l) + \sigma \\ \quad \forall e_i, e_j, e_k, e_l \in E : (e_i \succ e_j) \succ (e_k \succ e_l) \\ \sum_{i=1}^n g(e_i) = 1 \end{array} \right. \quad (1.39)$$

1.6.1.4 La méthode UTA

UTA [39] est une méthode indirecte d'élicitation, celle-ci a pour but d'éliciter des fonctions d'utilité v_i (linéaires par morceaux) correspondant au modèle :

$$g(a) = \sum_i v_i(g_i(a))$$

Elle nécessite les données suivantes :

- les ensembles des valeurs possibles pour les performances X_{g_i} doivent être de la forme $[g_i, \bar{g}_i]$,
- pour chaque critère i , le nombre α_i de points de rupture de la fonction $v_i(g_i(a))$ formant des intervalles équidistants $[g_i^j, g_i^{j+1}]$,
- un sous ensemble A_R d'alternatives formant un préordre complet.

Les fonction d'utilité sont entièrement définies si on trouve les utilités des points de rupture $v_i(g_i^j)$. Le principe d'UTA consiste donc à résoudre un programme linéaire dont les variables sont ces utilités, les contraintes représentent le préordre complet défini par les alternatives de A_R et la fonction objectif, à minimiser, est la somme des variables indicatrices qui sont strictement positives lorsque les contraintes de préordre sont violées et, sinon, nulles. Si la valeur de la fonction objectif est nulle, alors, on obtient une fonction d'utilité globale V satisfaisant les préférences du décideur sur A_R , sinon, il n'existe aucune fonction d'utilité, avec les hypothèses ci-dessus, qui satisfasse les préférences du décideur. Dans ce cas là, il faut soit augmenter les points de rupture, soit changer de méthode.

Récemment, S. Greco, V. Mousseau et R. Slovinski ont proposé une variante de cette méthode (UTA-GMS) [34] afin d'en faire une version plus robuste pour répondre à la problématique de rangement ($P.\gamma$). Pour cela, la méthode propose deux types de rangement des alternatives :

- un rangement nécessaire (robuste) d'un sous ensemble d'alternatives de A_R , restant valide pour toutes les valeurs possibles des $v_i(g_i(a))$,
- un rangement possible pour les autres alternatives, c.-à-d. un rangement pour lequel il existe au moins une valeur possible pour chaque $v_i(g_i(a))$ compatible avec ce rangement.

1.6.1.5 Les paramètres des méthodes prenant en compte les dépendances entre critères

Les modèles additifs n'arrivent pas toujours à restituer les préférences des décideurs. Pour cela, certains chercheurs se sont intéressés à l'élicitation des paramètres des modèles non additifs (qui prennent en comptes les interactions entre critères). Étant donné la complexité de ces modèles, les méthodes d'élicitation correspondantes sont moins nombreuses que celles des modèles additifs et leur mise en œuvre reste difficile en pratique. On peut citer [30] pour les GAI-NETS, [73] pour l'intégrale de Sugeno.

Pour ce qui concerne l'intégrale de Choquet, la procédure utilisée pour l'élicitation des fonctions d'utilité v_i est fondée sur la méthode MACBETH. Afin d'assurer la commensurabilité des échelles des fonctions d'utilité, une condition supplémentaire doit être vérifiée. Il faut que tous les niveaux neutres ainsi que tous les niveaux

satisfaisants soient jugés commensurables. Cela implique :

$$\forall i, j \in F : v_i(\bar{g}_i) = v_j(\bar{g}_j) \text{ et } v_i(\underline{g}_i) = v_j(\underline{g}_j) \quad (1.40)$$

Pour l'élicitation de la capacité μ , il existe plusieurs méthodes partageant le même principe et qu'on utilise dans une procédure d'agrégation/désagrégation. Pour cela, on demande au décideur un ordre partiel sur :

- les alternatives de A^R ,
- les différences d'intensité de préférence des alternatives de A^R ,
- l'importance des critères,
- les interaction entre critères.

Cette information préférentielle est ensuite transformée en contraintes algébriques :

- $aPb \Rightarrow C_\mu(a) \geq C_\mu(b) + \delta_1$
- aPb plus que $cPd \Rightarrow C_\mu(a) - C_\mu(b) \geq C_\mu(c) - C_\mu(d) + \delta_1$
- le critère i est plus important que le critère $j \Rightarrow \Phi_\mu(i) \geq \Phi_\mu(j) + \delta_2$
- les critères i et j sont complémentaires $\Rightarrow I_\mu(ij) \geq \delta_3$

où δ_1 , δ_2 et δ_3 sont des seuils de préférences à fixer avec le décideur, $\Phi_\mu(i)$ est la valeur de Shapley et $I_\mu(ij)$ l'indice d'interaction entre le critère i et le critère j . Il est également possible, avec ces méthodes, de gérer le nombre de critères qui sont en interaction en fixant l'additivité de la capacité k (en modifiant le nombre de paramètres décisionnels à éliciter).

La plupart des méthodes d'élicitation dans la littérature [54, 45, 44, 58] utilisent un problème d'optimisation avec les contraintes précédentes afin d'identifier la capacité (les variables du problème). La fonction objectif est différente d'une méthode à une autre. Nous présenterons dans la suite deux procédures d'agrégation/désagrégation que nous avons utilisées dans la construction du modèle d'évaluation. La première est fondée sur la méthode *maximum split approach* [54], et la deuxième est fondée sur la méthode *TOMASO*⁶ [53]. Nous supposons que les fonctions d'utilité sont élicitées par la méthode de MACBETH.

La procédure fondée sur *maximum split approach* [54]

Dans cette procédure :

- 1- Nous construisons un ensemble d'apprentissage $AP(A^R)$, « bien choisi », constitué de comparaisons par paires d'actions de référence de A^R , également « bien choisies ». Nous entendons par « bien choisi » le fait que les actions proposées au décideur ont des performances contrastées sur les critères, l'objectif étant de minimiser le nombre d'itérations dans la procédure d'agrégation désagrégation.
- 2- Nous transformons les comparaisons par paires en contraintes linéaires, nous fixons l'additivité à 1 ($k = 1$) et nous appliquons l'algorithme 1 qui résout

6. *Tool for Ordinal Multi-Attribute Sorting and Ordering.*

successivement, en augmentant l'additivité k , des programmes linéaires dépendant de k , où la fonction objectif, à maximiser, correspond à la différence minimale entre les intégrales de Choquet des paires d'alternatives comparées (*maximum split approach*), jusqu'à ce que nous trouvons une capacité compatible avec les préférences des décideurs. Nous utilisons pour cela le module *linProgCapaIdent* implémenté dans DIVIZ⁷ et dans la librairie *kappalab* du langage R .

- 3- Si $\text{existCapa} = \text{vrai}$ (voir l'algorithme 1), alors il existe une capacité μ^* k -additive compatible avec les préférences du décideur. Nous lui présentons le résultat (l'intégrale de Choquet, correspondant à μ^* , de toutes les actions de A^R) et éventuellement d'autres actions. Si le résultat le satisfait, la procédure est arrêtée, sinon nous rajoutons les comparaisons par paires correspondant à ses nouvelles préférences à $AP(A_R)$ et nous revenons à l'étape (2-).
- 4- Si $\text{existCapa} = \text{faux}$ (voir l'algorithme 1), alors il n'existe pas de capacité compatible avec les préférences du décideur. Nous lui demandons s'il est possible de modifier ses préférences sur des exemples de $AP(A_R)$ dont la suppression permet de trouver une capacité compatible et nous revenons à l'étape (2-)

Remarque 4 Dans cette première procédure, nous pouvons également utiliser comme fonction objectif à minimiser, la distance de la capacité recherchée par rapport à la capacité uniforme (voir [45]), qui n'est pas linéaire. L'avantage de ce critère d'optimisation est que la capacité élicitée, minimisant cette fonction objectif, ne présente pas de fortes interactions non désirées entre critères qui sont la cause de la faible monotonie des capacités élicitées dans *maximum split approach*.

Définition 5 La capacité uniforme $\mu : \mathcal{P}(F) \mapsto [0, 1]$ t.q. :

$$\mu(S) = \frac{|S|}{|F|} \quad \forall S \subseteq F \quad (1.41)$$

est une capacité additive et symétrique (tous les critères ont la même importance)

La procédure fondée sur la méthode *TOMASO*

Nous utilisons cette procédure lorsque le décideur souhaite un résultat plus précis qu'une affectation dans une catégorie, c.-à-d. un rangement des alternatives se trouvant au sein d'une même catégorie. Cette procédure se déroule selon les étapes suivantes.

- 1- Nous construisons un ensemble d'apprentissage $AP(A^R)$ constitué d'actions de référence A^R , « bien choisies », que nous demandons au décideur d'affecter dans des catégories prédéfinies.

7. Une plateforme logicielle de méthodes multicritères <http://www.decision-deck.org/diviz/>

- 2- Nous transformons les exemples d'affectation de $AP(A^R)$ en comparaisons par paires. Nous avons donc pour chaque catégorie Cl_h , t.q. $h \neq p$

$$\forall a^R \in Cl_h, \forall b^R \in Cl_{h+1} : bPa \quad (1.42)$$

- 3- Nous transformons les comparaisons par paires en contraintes linéaires, nous fixons l'additivité à 1 ($k = 1$) et nous appliquons l'algorithme 1 qui résout, successivement, en augmentant l'additivité k , des programmes mathématiques dépendant de k où la fonction objectif, à minimiser, correspond à la distance de la capacité recherchée par rapport à la capacité uniforme. Ainsi, le programme linéaire (PL_k) de l'algorithme 1 est remplacé par le programme mathématique (PM_k) suivant :

$$(PM_k) \left\{ \begin{array}{l} \max f = \frac{1}{n} \sum_{i \in F} \sum_{S \subseteq F \setminus i} \sum_{T \subseteq S} (M(T \cup i) - \frac{1}{n})^2 \\ C_M(b^R) - C_M(a^R) \geq \delta \quad \forall Cl_h : h = \overline{1, \dots, p}, \quad \forall a^R \in Cl_h, \quad \forall b^R \in Cl_{h+1} \\ \sum_{T \subseteq S, |T| < k} M(T \cup i) \geq 0, \quad \forall i \in F, \quad \forall S \subseteq F \setminus i \\ \sum_{T \subseteq F, 1 \leq |T| \leq k} M(T) \geq 0 \end{array} \right. \quad (1.43)$$

Nous utilisons pour cela le module *minVarCapaIdent* implémenté dans DI-VIZ et dans la librairie *kappalab* du langage *R*.

- 4- Si $\text{existCapa} = \text{vrai}$ (voir l'algorithme 1), alors il existe une capacité μ^* k -additive compatible avec les préférences du décideur. Nous lui présentons le résultat comportant l'intégrale de Choquet correspondant à μ^* de toutes les actions de A^R et éventuellement d'autres actions, mais aussi les seuils $s\text{Inf}_h(\mu^*)$ et $s\text{Sup}_h(\mu^*)$ correspondant à la valeur inférieure et à la valeur supérieure de l'intégrale de Choquet délimitant chaque catégorie Cl_h .

$$s\text{Inf}_h(\mu^*) = \min_{b^R \in Cl_h} C_{\mu^*}(b^R) \quad \text{et} \quad s\text{Sup}_h(\mu^*) = \max_{a^R \in Cl_h} C_{\mu^*}(a^R) \quad (1.44)$$

Si le résultat le satisfait, la procédure est arrêtée, sinon nous rajoutons des exemples d'affectation correspondant à ses nouvelles préférences à $AP(A_R)$ et nous revenons à l'étape (2-).

- 5- Si $\text{existCapa} = \text{faux}$ (voir l'algorithme 1), alors il n'existe pas de capacité compatible avec les préférences du décideur. Nous lui demandons s'il est possible de modifier ses préférences sur des exemples de $AP(A_R)$ dont la suppression permet de trouver une capacité compatible et nous revenons à l'étape (2-)

Remarque 5 Dans cette procédure, nous utilisons comme fonction objectif, à minimiser, la distance de la capacité recherchée par rapport à la capacité uniforme car les capacités élicitées sont souvent de grande additivité et représentent donc des interactions possibles entre beaucoup de critères. Si nous utilisons la fonction objectif de maximum split approach comme dans la méthode TOMASO, cela augmente les chances de trouver des capacités représentant de fortes interactions non désirées.

Algorithme 1

ENTRÉES: $AP(A^R)$, F ,

SORTIES: μ^* , k , existCapa,

$k \leftarrow 0$, existCapa \leftarrow Faux,

tant que $k \leq |F|$ **et** \neg existCapa **faire**

$k \leftarrow k + 1$

Résoudre le programme linéaire (PL_k) :

$$(PL_k) \left\{ \begin{array}{l} \max f = \epsilon \\ C_M(a_1^R) - C_M(b_1^R) \geq \delta_1 + \epsilon \\ C_M(a_2^R) - C_M(b_2^R) \geq \delta_2 + \epsilon \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{T \subseteq S, |T| < k} M(T \cup i) \geq 0, \quad \forall i \in F, \forall S \subseteq F \setminus i \\ \sum_{T \subseteq F, 1 \leq |T| \leq k} M(T) \geq 0 \end{array} \right. \quad (1.45)$$

si (PL_k) a une solution (une transformée de Möbius M^*) **alors**

existCapa \leftarrow Vrai

$\mu^*(S) \leftarrow \sum_{T \subseteq S} M^*(T) \quad \forall S \subseteq F$

fin si

fin tant que

si existCapa **alors**

Retourner μ^* , existCapa, k

sinon

Retourner existCapa

fin si

1.6.2 Les paramètres de la méthode ELECTRE TRI

Dans la littérature, la plupart des méthodes indirectes d'élicitation ont été développées pour la procédure ELECTRE TRI : V. Mousseau et R. Slowinski [61] ont été les premiers à proposer une méthode d'élicitation pour tous les paramètres simultanément, fondée sur un programme mathématique. En 2001, V. Mousseau, J. Figueira, J.P. Naux [60] ont proposé une méthode fondée sur un programme linéaire pour éliciter les poids w_i , A. Ngo The et V. Mousseau [87] en 2002 pour l'élicitation des profils (les limites des catégories), L.C. Dias et V. Mousseau [14] pour l'élicitation des seuils de véto.

Les paramètres à éliciter dans les méthodes ELECTRE TRI sont donc : les poids w_i , les seuils de véto vt_i , les seuils de préférence p_i , les seuils d'indifférence q_i , le seuil de crédibilité s et les profils limitant les catégories b_i . Étant donné le nombre important de paramètres à éliciter, il est difficile d'éliciter simultanément tous ces paramètres de manière indirecte. Pour cela, en pratique, nous pensons qu'il est préférable de s'intéresser d'abord à l'élicitation directe de certains paramètres ayant un sens pour le décideur (les profils, les seuils de préférence et d'indifférence), puis d'éliciter ensuite de manière indirecte les autres paramètres. Les méthodes indirectes d'élicitation sont utilisées dans des procédures d'agrégation/désagrégation et sont fondées sur des programmes mathématiques. La complexité de ces programmes dépend du nombre de paramètres à éliciter simultanément. Si tous les paramètres doivent l'être, le programme mathématique est de grande taille, n'est pas linéaire et l'ensemble formé par les contraintes n'est pas convexe [61].

L'information préférentielle demandée au décideur pour éliciter les paramètres d'ELECTRE Tri est l'affectation des alternatives de A^R dans des catégories. L'affectation d'une alternative a à une catégorie Cl_k ($a \rightarrow Cl_k$) induit deux assertions : aSb_{k-1} et $\neg aSb_k$ avec lesquelles on peut construire deux ensembles S^+ et S^- :

$$S^+ = \{(a, b) : /aSb\}$$

$$S^- = \{(a, b) / \neg aSb\}$$

qui sont transformés en contraintes qu'utilisent les différentes méthodes dans des programmes mathématiques. Ces contraintes ont la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} S(a, b) \geq s, \quad \forall (a, b) \in S^+ \\ S(a, b) \leq s - \epsilon, \quad \forall (a, b) \in S^- \\ s \in [0.5, 1] \quad \forall i \in F \\ 0 \leq q_i \leq p_i \leq vt_i \quad \forall i \in F \\ \sum w_i = 1, \quad w_i \geq 0 \quad \forall i \in F \end{array} \right. \quad (1.46)$$

Conclusion

Nous avons vu, dans ce chapitre, les différents outils méthodologiques disponibles dans la littérature, qu'offre l'aide multicritère à la décision. Ces outils seront utilisés dans différentes étapes de notre approche. Nous utiliserons la méthodologie présentée à la section 1.1.2 pour formaliser le processus de décision associé à notre problème, les sections 1.2 et 1.3 pour construire les critères du modèle et la section 1.5 pour nous aider à choisir les méthodes d'agrégation que nous utiliserons en se fondant sur leurs conditions d'utilisation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Nous verrons aux chapitres suivants comment ont été appliqués ces outils dans les différentes étapes de notre approche.

Annexe

Relation binaire

Soit $X = \{x, y, z, \dots\}$, on appelle relation binaire sur X un sous ensemble $R \subseteq X^2$. On écrit xRy au lieu de $(x, y) \in R$ et $\neg xRy$ au lieu de $(x, y) \notin R$.

Propriétés de base d'une relation binaire

La relation R est :

- réflexive $\Leftrightarrow \forall x \in X : xRx$
- symétrique $\Leftrightarrow \forall x, y \in X : xRy \Rightarrow yRx$
- transitive $\Leftrightarrow \forall x, y, z \in X : xRy \text{ et } yRz \Rightarrow xRz$
- complète $\Leftrightarrow \forall x, y \in X : xRy \text{ ou } yRx$
- antisymétrique $\Leftrightarrow \forall x, y \in X : xRy \text{ et } yRx \Rightarrow x = y$

Ordre, préordre

Une relation binaire R est *un préordre* lorsqu'elle réflexive et transitive. C'est *un préordre total* lorsqu'elle est aussi complète. *Un ordre (ordre total)* est un préordre (préordre total) antisymétrique.

Chapitre 2

Le confort

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de montrer comment ont été identifiées les caractéristiques liées au confort des voyageurs dans les trains. Ceci est un préalable à la construction d'un modèle d'évaluation du confort. Pour cela, nous allons tenter de comprendre le concept de confort, de manière générale, avant de s'intéresser au confort dans les trains. A la section 2.1 nous allons commencer par montrer que le confort est un concept complexe du fait de son caractère global, subjectif et contextuel. On en proposera ensuite une définition. A la section 2.2, nous allons nous intéresser aux différents outils d'analyse développés dans les études menées à la SNCF pour caractériser le confort dans les trains. Nous nous intéresserons également dans cette section aux outils d'évaluation du confort dans les trains afin d'identifier leurs limites et montrer la nécessité d'une nouvelle approche. La section 2.3 sera consacrée aux caractéristiques du confort dans les trains, identifiées à partir des études menées à la SNCF et devant être prises en compte dans toute approche ayant pour objectif de l'évaluer.

2.1 Le concept de confort

Le mot confort apparaît au moyen-âge (XII^e siècle), il était alors principalement lié à l'idée d'espace ouvert à tous. Progressivement jusqu'au XIX^e siècle, une individualisation du confort apparaît : la possession de zones réservées à l'intimité [64] (la sédentarisation). A partir du XIX^e siècle, la notion de confort est associée au *progrès* comme l'illustre Le Goff dans [49] p. 28 : « *Ces deux notions sont intrinsèquement liées et il devient alors impossible de penser d'une part, le confort indépendamment du progrès* ». Ce progrès, étant une conséquence de l'avancée de la science et de la technologie, ne comprend pas seulement le bien être matériel,

accessible seulement, au départ, à une certaine classe sociale et souvent associé au luxe, mais il comprend aussi d'autres aspects concernant toutes les classes sociales comme la propreté, la tranquillité, le sentiment de sécurité, le gain de temps et d'argent, le moindre effort et l'accès aux soins. Ainsi, c'est à cette période que le confort a commencé à acquérir une certaine importance sociale devenant une préoccupation suscitant l'intérêt de plusieurs domaines et disciplines techniques et scientifiques. Enfin, dans les années soixante et soixante-dix, on parle du confort comme d'un droit.

Le confort est une notion complexe. Dans cette section, nous allons tout d'abord nous intéresser aux différences de visions que peuvent avoir les personnes concernées par le confort. Nous nous concentrerons ensuite sur une vision particulière qui est celle de la personne faisant l'expérience du confort, car l'objectif principal de l'approche, qui sera développée dans cette thèse (voir le chapitre 3), est de construire un modèle reflétant le confort des voyageurs dans un contexte que l'on définira. Cette vision est fortement liée à la perception. Ceci engendre d'une part, une variabilité inter-individuelle pouvant être de nature psychologique (expérience, humeur), socio-culturelle et anthropométrique, et d'autre part une variabilité selon le contexte dans lequel se trouve l'individu faisant l'expérience du confort.

2.1.1 La différence de vision

La différence de vision entre la personne qui « produit » le confort qu'on appellera *l'ingénieur* et celle qui le perçoit et qu'on appellera *l'utilisateur* (voir la figure 2.1), est mentionnée dans la thèse de G. Délepaut [18] : « *L'ingénieur s'attache à produire le confort et à procéder à des essais dans un domaine réduit, tandis que l'utilisateur consomme et subit le confort* ». L'exemple du confort thermique cité dans [49], illustre cette différence. Alors que l'utilisateur perçoit le confort thermique comme une expérience de bien-être sensoriel, une satisfaction personnelle qui dépend d'abord de son état thermique corporel puis des conditions ambiantes qui peuvent l'affecter, l'ingénieur doit décomposer cette ambiance thermique en plusieurs paramètres (température, vitesse de l'air, rayonnement des parois) qu'il pourra étudier et quantifier afin de caractériser ou normaliser une ambiance confortable. Cette différence de vision est liée aux différences qui existent entre *normalisation* et *subjectivité*. En effet, même si l'ingénieur tente, dans la mesure du possible, de prendre en compte une partie de cette subjectivité, il est difficile (voire impossible) pour lui de cerner la notion de confort dans sa globalité, car il en fait une représentation complètement différente de celle de l'utilisateur en la décomposant en disciplines d'étude, lui étant familières, sans intégrer *a priori* la vision de l'utilisateur. Ce contraste a été clairement montré lors d'une enquête (voir le tableau 2.1 tiré de [15]) en construisant deux types de questionnaires, le premier a été établi par des ingénieurs guidés par leurs connaissances et la possibilité de mesure physique, et le deuxième, réalisé

à partir de questions « ouvertes » posées à des voyageurs, était analysé par des psycholinguistes. Ce tableau montre, d'une part, que les voyageurs font référence à certaines catégories de confort similaires à celles de l'ingénieur mais formulées différemment en tenant compte de leurs expériences (par exemple : « le confort dynamique » et « la stabilité du train »), et d'autre part, que les voyageurs citent des catégories de confort qui ne sont pas considérées par l'ingénieur (par exemple : « la vue panoramique »). Cela montre également, en utilisant le premier questionnaire, que les voyageurs ne sont pas interrogés sur des catégories qui sont importantes pour eux et même si cela était le cas, ces catégories peuvent ne pas avoir le même sens pour eux que pour l'ingénieur.

Liste issue des enquêtes ingénieur	Liste issue des enquêtes ouvertes
- Le confort olfactif (odeur)	- La fonctionnalité du mobilier (tablette, support de verre, patère, repose pied)
- Le confort acoustique (le bruit)	- La place pour mettre les bagages
- Le confort lumineux (la lumière)	- La propreté
- Le confort thermique (la température)	- La qualité du fauteuil
- Le confort dynamique (les secousses, les vibrations)	- La décoration intérieure
- L'aménagement (la couleur de la moquette, des sièges, etc.)	- La stabilité du train
- Le confort tympanique (le mal aux oreilles dans les tunnels)	- La température ambiante
- Le confort physique (le siège, l'espace pour les jambes)	- La vue panoramique
	- Le calme
	- L'espace pour allonger les jambes
	- La décoration intérieure

Tableau 2.1 – *La différence de vision du confort entre l'ingénieur et l'utilisateur [15]*

Nous avons vu la différence de vision du confort entre *l'utilisateur* et *l'ingénieur*. Dans la plupart des situations dans lesquelles on se préoccupe de confort, un troisième acteur, qu'on appellera *l'exploitant*, doit bâtir un compromis entre les deux visions afin de traduire les besoins et demandes de l'un dans un langage compréhensible pour l'autre (voir la figure 2.1). Il a donc sa propre vision du confort qui est souvent guidée par l'intérêt économique que peut susciter le confort, le coût qu'il peut engendrer et les cibles du marché qu'il fixe. L'exploitant est considéré comme le trait d'union entre l'ingénieur et l'utilisateur. La première interaction (exploitant-client) se fait à travers des enquêtes et des études de tendances pour identifier les besoins des clients. Ensuite des études économiques et de marché permettent de

prioriser ces besoins (vision de l'exploitant) qui sont ensuite, traduits en cahiers des charges. La deuxième interaction (exploitant-ingénieur) se fait au moyen de ces cahiers des charges [63].

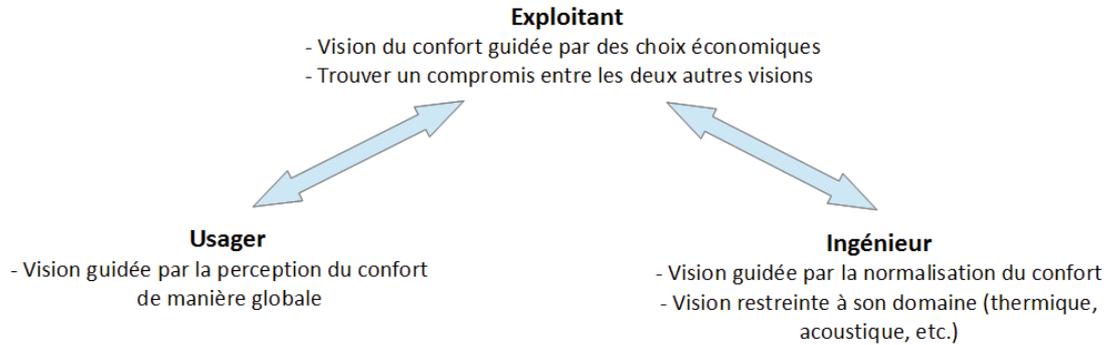


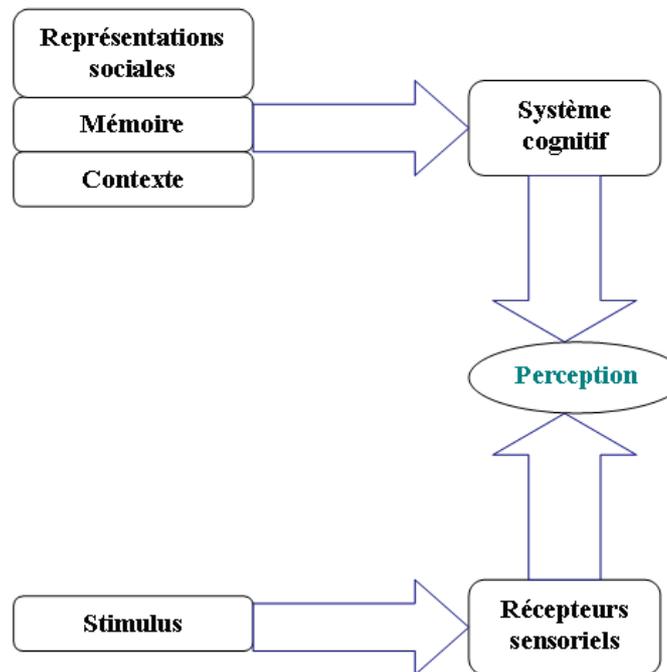
Figure 2.1 – *Trois différentes visions du confort*

2.1.2 Le confort de l'utilisateur

Dans cette section nous allons uniquement nous placer du point de vue de *l'utilisateur* et essayer d'illustrer, à travers les disciplines qui s'y sont intéressées, cette subjectivité liée à la perception, et donnant lieu à des différences interindividuelles ou entre groupes sociologiques. La perception est le rapport de l'utilisateur aux objets (ou environnements) perçus. Elle diffère de la sensation par le fait qu'elle prend en compte la nature de l'objet (de l'environnement) en contact avec l'utilisateur [94]. Elle n'est donc pas uniquement une réponse à des stimuli sensoriels mais elle est également très liée à des aspects cognitifs liés à l'utilisateur intégrant : le contexte, la mémoire (le vécu et la reconnaissance de l'objet ou de l'environnement) et les représentations socioculturelles (voir la figure 2.2). Nous allons, tout d'abord, nous intéresser aux aspects psychologiques liés à la mémoire ainsi qu'aux représentations sociales. Nous nous intéresserons ensuite au contexte et enfin à d'autres aspects pouvant affecter la perception.

2.1.2.1 La perception et les aspects psychologiques et socio-culturels

De nombreuses disciplines en sciences humaines et sociales, et en ergonomie se sont intéressées à la perception. En psychologie expérimentale on considère la perception comme étant un récepteur d'événements à travers les mécanismes sensoriels. La définition donnée par M. Richelle dans le dictionnaire de la psychologie [72] (« *une fonction de prise d'informations des événements du milieu extérieur*

Figure 2.2 – *Le processus perceptif*

ou du milieu interne par la voie des mécanismes sensoriels ») confirme cela. G. Delepaut mentionne dans sa thèse [18] (en psycholinguistique) que cette vision de la perception, prenant en compte uniquement les aspects sensoriels (phénomènes ascendants), reste « simpliste » car elle n'intègre pas certains aspects importants du système cognitif, appelés phénomènes descendants, comme :

- la mémoire des objets et des environnements déjà perçus dans le passé (le vécu) qui permet d'adapter un comportement à une situation,
- les représentations sociales intégrant la catégorie sociale à laquelle appartient l'utilisateur comme la première classe et la deuxième classe dans les avions et les TGV, mais aussi ses motivations comme un voyage pour affaire et un voyage loisir toujours dans le cas du train et de l'avion.

Elle mentionne : « *Percevoir ne consiste pas simplement dans la réception de stimuli sensoriels, mais comporte également des activités de mémorisation et de catégorisation utilisées dans la mise en place des représentations mentales d'une communauté* ». Elle conclut en affirmant que les deux phénomènes doivent être considérés afin d'analyser et d'évaluer le confort.

Remarque 6 *L'une des principales difficultés pour analyser ou évaluer le confort concerne la prise en compte des facteurs psychologiques car ils sont propres à*

chaque usager, alors que pour les représentations sociales, il est possible de catégoriser les usagers (catégories sociales). Par exemple : première et deuxième classe, voyageurs affaire et voyageurs loisir, etc.

2.1.2.2 La perception et le contexte

Le mot « contexte » peut englober plusieurs aspects. Dans cette section, nous essayerons de montrer comment certains de ses aspects peuvent affecter le confort perçu. On peut citer l’environnement (lieu de travail, habitat, transport), la présence d’autres personnes, l’époque (voir le début de la section 2.1), les pratiques, etc.

D’après des études menées sur le confort dans l’habitat [69], la présence d’éléments vivants constitue une source de confort alors que pour le confort au travail ou dans les transports en commun, elle est plutôt considérée comme une source d’inconfort. En effet, au travail, la présence des autres employés empêche la personne de se ménager un espace de retrait et a tendance à se replier sur elle-même à cause du regard d’autrui [22].

La présence d’autres personnes peut aussi jouer un rôle important dans la perception du confort dans un même environnement. En effet dans le cas des transports en commun, le confort perçu peut être affecté par l’affluence car la personne peut tenter de s’approprier un espace personnel, afin d’éviter un stress social causé par la promiscuité et des contacts non désirés, comme elle peut aller vers autrui, afin de faire des rencontres et discuter, selon ses motivations. Dans les deux cas, le rapport de l’usager à l’environnement est différent du cas où il n’y a pas d’affluence.

Dans le domaine des transports en commun, d’autres aspects, relevant du contexte, peuvent apparaître comme les activités pratiquées lors du voyage. En effet, pour les longs trajets, les activités pratiquées sont les principales caractéristiques du contexte dans les transports en commun qui affectent la perception du confort, c’est particulièrement le cas dans les trains, car le train constitue l’un des moyens de transport où le voyageur a le plus de liberté et de facilité dans ses actes et dans ses déplacements. Pour cela il évalue son confort en fonction des activités qu’il pratique. En effet, en prenant l’exemple de l’éclairage, le voyageur l’évalue différemment selon qu’il dort (il préfère une faible intensité d’éclairage) ou qu’il lit (il préfère une forte intensité d’éclairage).

2.1.2.3 Autres facteurs affectant la perception

Bien que la perception soit essentiellement affectée par les sens d’une personne et des aspects cognitifs (mémoire, représentations sociales et contexte), il existe des

situations où des facteurs *anthropométriques* peuvent affecter la perception. L'anthropométrie est une branche de *l'anthropologie physique* [59], elle en représente l'aspect quantitatif, elle concerne principalement la morphologie de l'organisme, sa composition, sa constitution et les relations réciproques qui existent entre les mensurations du corps humain et les dimensions de l'objet avec lequel la personne est en contact. L'anthropométrie est très utilisée en *ergonomie* [13] qui a pour but d'étudier l'interaction homme environnement afin de concevoir des systèmes qui optimisent le confort, la sécurité et l'efficacité de l'homme dans cet environnement.

2.1.3 Le confort et ses frontières

Le confort concerne, d'une part, tout ce qui est lié à la vie de l'utilisateur au moment présent, et d'autre part, les comparaisons et les attentes avec le vécu antérieur, éventuellement dans d'autres situations (d'autres contextes). Nous proposons dans cette section d'illustrer cela, à travers les différents termes qui lui sont associés (bien être, commodités, luxe, image de marque, qualité et absence d'inconfort) dans les définitions que l'on peut trouver dans la littérature [18]. La confrontation du confort avec ces différents termes nous permettra également de le définir et d'établir ses frontières.

- **L'image de marque** que véhicule l'exploitant est prise en compte dans la perception du confort et des services que propose son entreprise, à travers les représentations sociales que se font les usagers de cette dernière.
- **Le bien être** contribue au confort mais il est uniquement centré sur la personne alors que le confort est lié à l'interaction de l'utilisateur avec un objet ou un environnement. De plus, il y a certains domaines comme la santé et le sport qui sont concernés uniquement par le bien être.
- **La qualité** partage avec le confort certaines caractéristiques comme la prise en compte par l'utilisateur de son expérience et de ses attentes dans le jugement qu'il porte sur la qualité (ou le confort) d'un objet (ou d'un environnement).
- **Le luxe** se situe au delà du confort dans le sens où certains éléments du confort, proposés en sur-qualité, entraîneraient le luxe.
- **La commodité** est le terme qui se rapproche le plus du confort car il correspond à tout ce qui facilite la vie quotidienne. Il diffère du confort sur le fait qu'il concerne uniquement l'objet et pas l'individu.
- **L'absence d'inconfort** liée à des gênes ne constitue pas à elle seule le confort qui nécessite également l'amélioration de facteurs dits confortables. G. Délepaut dans sa thèse fait l'hypothèse que l'absence d'inconfort se situerait à un niveau de neutralité (niveau 0), l'inconfort à un niveau inférieur et le confort à un niveau supérieur. La question que nous nous posons est de savoir si l'absence de **tous** les éléments d'inconfort, dans une situation donnée, est nécessaire pour une sensation de confort ou alors s'il est possible

de ressentir du confort lorsqu'il y a seulement quelques éléments qui sont inconfortables, la majorité des autres éléments étant confortable.

La confrontation du confort avec ces différents termes nous a permis de délimiter ses frontières. Cela nous montre également qu'il est difficile d'en donner une définition dans l'absolu car elle dépend, d'une part, des visions des personnes le percevant (l'utilisateur) et le produisant ou le proposant (l'ingénieur et l'exploitant) et, d'autre part, du contexte qui comprend l'époque, la situation, les pratiques, etc. Le cadre de notre recherche concerne les transports en commun et plus précisément le confort dans les trains. Les concepts généraux mentionnés dans cette section sur le confort nous permettront de mieux comprendre la suite de ce chapitre où nous nous intéresserons aux outils d'analyse et d'évaluation du confort dans les trains afin d'en déterminer ses composantes et ses caractéristiques qui nous seront utiles pour la construction du modèle d'évaluation dans notre approche.

2.2 Les outils d'analyse et d'évaluation du confort dans les trains

Nous nous intéresserons, tout d'abord, dans cette section, aux outils d'analyse utilisés ou développés à la SNCF dont certains nous ont permis d'identifier les composantes et les caractéristiques du confort dans les trains. Nous présenterons ensuite quelques méthodes d'évaluation du confort dans les trains afin d'identifier leurs limites pour évaluer le confort tel que perçu par les voyageurs.

2.2.1 Les outils d'analyse du confort

Il existe plusieurs outils afin d'étudier et d'analyser le confort dans les trains, soit en considérant directement la vision de l'utilisateur (qu'on appellera **voyageur** dans le cadre du voyage en train), soit à travers celle de l'exploitant (opérateur ferroviaire). Ces outils sont généralement utilisés pour déterminer les composantes du confort, construire des indicateurs pour les composantes du confort, évaluer le confort et même pour développer des méthodologies d'exploration du confort.

2.2.1.1 Les mesures physiques

Les outils les plus utilisés, dans le domaine ferroviaire pour spécifier le confort, sont fondés sur des mesures physiques liées à certaines de ses composantes (la composante thermique, la composante acoustique, l'éclairage, la composante tympanique et la composante dynamique). Ces mesures sont ensuite utilisées dans des indicateurs physiques de confort correspondant à chacune de ces composantes et

intégrant certains paramètres perceptifs établis, dans la majorité des cas, dans des laboratoires dont les conditions d'expérimentation sont loin du contexte du voyage en train. Les indicateurs ainsi obtenus font l'objet de spécifications, par le biais de cahiers des charges ou de normes, par l'opérateur ferroviaire afin d'améliorer le confort global dans les trains.

L'utilisation des indicateurs physiques est primordiale pour l'opérateur ferroviaire car ils représentent un outil objectif pour spécifier, évaluer et améliorer le confort. Néanmoins, la prise en compte séparée de ces indicateurs, d'une part, et le fait qu'ils n'intègrent pas certains aspects importants de la perception comme le contexte et la variabilité interindividuelle, d'autre part, font qu'ils ne sont pas complètement pertinents pour rendre compte du confort réellement perçu par les voyageurs. Nous étudierons au chapitre 4 les indicateurs existants dans la littérature pour chacune des composantes physiques du confort afin de pouvoir les comparer avec notre modèle.

2.2.1.2 Les mesures physiologiques

Les mesures physiologiques ont pour objectif de quantifier les réactions mécaniques du corps humain à des phénomènes physiques. Elles peuvent être utilisées pour construire des indicateurs physiques du confort (la composante thermique, la composante acoustique, l'éclairage, la composante tympanique et la composante dynamique), elles représentent les paramètres sensoriels de ces indicateurs. L'inconvénient est qu'aucune corrélation n'a pu être déterminée entre le ressenti des voyageurs et les mesures physiologiques, comme le mentionne Suzuki [84] : « *up to the present, however, not any clear relationship has been found between the riding comfort and physiological indices* ». Cela confirme le fait que la perception du confort n'est pas uniquement une réaction à des stimuli (phénomènes physiques) mais dépend aussi des aspects subjectifs qu'il n'est pas possible de recueillir avec cette approche car les voyageurs ne sont pas interrogés. Même s'il est important pour les personnes étudiant le confort de comprendre les phénomènes physiologiques, leur mesure, seule, n'est pas un moyen d'accéder à l'évaluation du confort.

2.2.1.3 L'analyse psycholinguistique et l'analyse psychophysique

Pour les experts en confort de la SNCF, l'analyse psycholinguistique est considérée comme étant l'outil le plus pertinent pour déterminer les composantes du confort telles qu'elles sont perçues par les voyageurs afin de les analyser. Le principe de cette méthodologie est de partir de la perception du confort par les voyageurs (qui est globale) en les questionnant afin de constituer un corpus sur lequel sera effectué une analyse linguistique et cognitive. Cette analyse permettra ensuite d'identifier la conception du confort par les voyageurs. Une enquête exploratoire est

parfois nécessaire pour tester la pertinence du questionnaire. La seule hypothèse formulée lors de ces enquêtes est le choix des situations dans lesquelles elles seront effectuées qui sont supposées être contrastées perceptivement afin d'être le plus exhaustif possible dans l'identification des composantes du confort importantes pour les voyageurs.

L'analyse psychophysique [89] permet de réaliser des études détaillées sur des composantes du confort. Les conditions dans lesquelles sont réalisées les expériences doivent être définies (quels paramètres physiques à faire varier pour établir des seuils de confort ? quels sont les éléments du contexte à reproduire en laboratoires). Des questions fermées doivent être formulées sur ces composantes pour les personnes qui réalisent les expériences (les sujets). La pertinence de cette étude repose entièrement sur la façon dont les composantes du confort, sur lesquelles porte cette analyse, ont été identifiées. En effet, si ces composantes ont été identifiées par les voyageurs (avec leurs formulations), l'analyse des questionnaires fermés ainsi que la définition des conditions d'expérience seront pertinentes.

Pour cela, la SNCF a développé une méthodologie fondée sur ces deux outils (l'analyse psycholinguistique et l'analyse psychophysique) dans le cadre de la thèse de G. Delepaut [18] et du projet **ACONIT**¹ mené à la Direction de l'Innovation et de la Recherche de la SNCF. Cette méthodologie a été utilisée pour identifier les composantes du confort dans les trains grandes lignes ainsi que leurs interactions du point de vue des voyageurs par une analyse psycholinguistique, et pour développer une méthode de formulation de questions pour des questionnaires fermés afin d'étudier plus en détail, avec les outils de la psychophysique, les composantes du confort.

D'autres projets, plus spécifiques à certaines composantes du confort, ont également utilisé cette méthodologie. Nous pouvons citer, par exemple, les projets **Dyapos** sur le confort du siège, **Ambiances Lumineuses** sur le confort visuel, **Esther** sur le confort thermique, etc. Nous utiliserons les résultats de ces études afin de construire notre modèle d'évaluation du confort.

2.2.1.4 L'Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle a été développée initialement dans l'industrie agroalimentaire. Son utilisation s'est étendue ensuite aux cosmétiques et aux transports. Elle a pour objectif de déterminer, pour un produit, l'ensemble des caractéristiques perçues et évaluées par les sens (descripteurs). Pour cela, un panel d'experts est sollicité et formé, il lui est demandé ensuite de donner une échelle aux descripteurs afin d'établir un profil de ce produit. Afin de déterminer le meilleur profil (les

1. Approche globale des composantes du CONfort et de leurs InTeractions pour les trains grandes ligne

caractéristiques du meilleur produit), ces derniers sont mis en relation avec des évaluations faites par des usagers.

L'analyse sensorielle, à l'image de la psychophysique, utilise l'humain comme instrument de mesure. Comme cette dernière, c'est une méthode insuffisante pour comprendre le confort global mais pertinente pour objectiver des sensations. Elle représente donc, également, un outil pouvant être associé à la psycholinguistique pour étudier le confort.

2.2.1.5 L'éthologie humaine

L'éthologie humaine a pour objectif d'étudier le comportement individuel de l'homme. Cet outil a été utilisé à la SNCF pour étudier le comportement des voyageurs dans les TGV afin d'identifier des éléments de confort [40]. L'observation, tout au long d'un trajet, a porté sur les activités, les postures et la gestuelle afin de déterminer des seuils à partir desquels le confort des voyageurs commençait à se détériorer. L'inconvénient de cette approche est qu'il est impossible d'accéder au confort ressenti par les voyageurs ni ce qui a motivé leur comportement. Ceci donne peu d'éléments à l'opérateur ferroviaire afin d'améliorer le confort. L'éthologie représente néanmoins un outil complémentaire à la psycholinguistique pour comprendre le confort global. Il est en effet intéressant de croiser la perception déclarée et l'observation des comportements.

2.2.2 Les outils d'évaluation du confort global

Des études sur le confort global ont commencé à la SNCF dans les années 80. Ils ont mandaté des chercheurs de l'IRT CERNE² et de L'INRETS³ [20, 71] afin de construire des indicateurs de confort global en fonction d'indicateurs de certaines de ses composantes physiques. Pour cela, ils ont commencé par construire les indicateurs correspondant aux composantes physiques : thermique, acoustique et dynamique. Chacun de ces indicateurs a été construit à partir de mesures physiques et physiologiques, correspondant à la composante en question, et éventuellement d'indicateurs correspondant à d'autres composantes du confort (l'indicateur de confort acoustique dépendait également de l'indicateur de confort thermique). Une fois les indicateurs correspondant à ces trois composantes construits, les chercheurs ont utilisé une régression linéaire, à partir des évaluations données par chaque voyageur (questionné dans le train) sur son confort global et son confort sur chacune de ces composantes, afin de trouver une relation entre le confort global et le confort de chaque composante. Le confort global était donc exprimé comme une somme

2. Institut de Recherche des Transports. Centre d'Évaluation et de Recherche des Nuisances et de l'Énergie

3. Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité

pondérée de ses composantes physiques. Bien que ces études aient évoqué le fait que le confort ne dépendait pas uniquement de paramètres physiques et physiologiques mais qu'il était également lié à des facteurs psychologiques intégrant la mémoire et le contexte et à des facteurs socioculturels, ils n'avaient pas réussi à intégrer ces facteurs (ou une partie d'entre eux) dans leurs modèles. L.M. Cléon, chercheur à la SNCF, a constaté qu'il y avait d'autres facteurs, propres au voyage en train, pouvant affecter la perception de certaines composantes physiques [12]. Il a évoqué la durée du trajet qui pouvait créer des phénomènes de *fatigue* et d'*accoutumance*. Pour ce qui concerne les indicateurs de confort global, L.M. Cléon avait constaté que le confort global perçu ne pouvait pas être obtenu en additionnant, simplement, les niveaux de confort de ses composantes physiques.

D'autres part, les chercheurs japonais du RTRI⁴ ont utilisé le même type de méthodologie [91]. Ils ont considéré certaines composantes physiques et ont questionné ensuite les voyageurs sur leur importance afin d'en garder les quatre plus importantes : vibrations, bruit, luminosité et espace entre les places assises. Ils ont remarqué, néanmoins, qu'aucune des quatre composantes n'avait un taux d'apparition supérieur à 8% (aucune composante citée n'était commune à plus de 8% des personnes interrogées). Ils ont également souligné le fait que certaines composantes n'étaient pas prises en compte comme la température, l'ancienneté du matériel, le design et la variabilité interindividuelle.

Le principal inconvénient de ces modèles d'évaluation, mentionné dans la thèse de G. Délepaut, est qu'ils ne partent pas de la perception des voyageurs pour identifier les composantes du confort et la manière dont elles s'organisent (les dépendances) dans cette perception. En effet les composantes identifiées, dans ces études, sont issues des connaissances des ingénieurs et non pas d'un questionnaire ouvert où les voyageurs identifient, par eux même, ces composantes ainsi que la manière dont elles s'organisent. G. Délepaut propose donc une démarche partant du global pour identifier l'analytique : « *un simple listage des composantes d'un concept global ne renseigne pas sur la manière dont elles sont construites et évaluées car en effet, la perception est holistique et intégrée : une fois les catégories identifiées de manière analytique, on peut alors considérer l'organisation interne du confort en train par le biais de l'étude des relations entre ses propriétés* ». L'un des objectifs de notre approche (cf. chapitre 3) est de modéliser, au mieux, les composantes du confort ainsi que leurs dépendances, identifiées dans les études menées à la SNCF en utilisant une approche allant du global vers l'analytique (voir section 2.2.1.3). Pour cela, nous nous intéresserons d'abord à ces composantes dans la section suivante.

4. Railway Technical Research Institute

2.3 Les caractéristiques du confort dans les trains

Afin de construire un modèle d'évaluation représentatif du confort perçu par les voyageurs, il est nécessaire de connaître ses caractéristiques ainsi que ses composantes. Cependant nous avons constaté dans les sections précédentes que, selon la vision considérée, ces composantes, déterminées par les outils d'analyse, pouvaient être différentes. Les outils d'analyse les plus pertinents, rencontrés jusqu'à présent, pour déterminer les composantes du confort ainsi que leurs dépendances, **telle qu'elles sont perçues par les voyageurs**, sont les outils de l'analyse psycholinguistique couplés à ceux de l'analyse psychophysique car ils ne font aucune supposition, *a priori*, sur la perception du confort par les voyageurs et partent de la globalité du confort pour déterminer ses caractéristiques et ses composantes. Elles sont donc plus représentatives de la perception. Pour cela, nous allons considérer, dans notre modélisation, les composantes du confort ainsi que leurs caractéristiques identifiées lors des enquêtes et études menées à la SNCF utilisant la méthodologie présentée à la section 2.2.1.3.

Nous avons vu à la section 2.1 que le confort de l'utilisateur (le voyageur) dépend à la fois de l'environnement dans lequel il se trouve mais aussi de sa perception intégrant la mémoire, le contexte et les représentations sociales. Nous tenterons dans cette section de caractériser le concept du confort dans le cas du voyage en train (en identifiant les composantes du confort ainsi que la manière dont elles s'organisent dans la perception des voyageurs), à l'aide des études et enquêtes menées sur le confort global, afin de pouvoir le modéliser. La perception des composantes physiques du confort sera abordée au chapitre 4 afin de mieux comprendre la façon dont elles ont été modélisées dans notre approche.

Afin de caractériser le confort dans les trains, dans une optique de modélisation du confort des voyageurs, nous proposons de considérer trois types d'aspects synthétisant ce qui a été présenté sur la perception du confort dans ce chapitre et pouvant dépendre les uns des autres :

- les aspects liés au voyageur,
- le contexte du voyage en train,
- l'environnement physique du train,

et d'identifier ce que les études et enquêtes sur le confort global, menées à la SNCF ont révélé sur ces aspects.

1- Les aspects liés au voyageur Ces aspects ne sont pas des composantes du confort. Ils incluent la mémoire qui intègre les expériences du voyage en train, les informations, le prix des billets de train, l'accueil en gare. Ces aspects peuvent concerner également les représentations sociales intégrant le milieu socioculturel, les motivations du voyage (loisir, affaire) et l'image que

se font les voyageurs de la SNCF et du voyage. La plupart de ces aspects (surtout psychologiques) sont difficiles à intégrer dans un modèle d'évaluation car ils sont différents d'un voyageur à un autre et peuvent dépendre de facteurs externes au voyage en train. Néanmoins, certains aspects relevant des représentations sociales comme les motivations du voyage et les catégories socioculturelles, peuvent être utilisés pour définir des catégories consensuelles de voyageurs, afin de construire un modèle d'évaluation plus pertinent. Les expériences du voyage en train, liées à la mémoire et aux représentations sociales que les voyageurs se font, contribuent fortement, selon les études menées en analyse psycholinguistique, à l'identification des composantes du confort liées au contexte et à l'environnement physique. En plus des aspects psychologiques et socioculturels, il y a des aspects devant être considérés dans un modèle d'évaluation, comme l'anthropométrie, pouvant avoir un impact sur la perception du confort. En effet, une étude menée dans le projet Dyapos [35], a montré l'effet de la morphologie et de la forme de la colonne vertébrale sur la perception du confort du siège.

2- Le contexte du voyage en train Nous avons vu, précédemment, que la perception du confort par l'utilisateur dépendait fortement du contexte. Dans le cadre du voyage en train, la majorité des études et enquêtes menées, dans les projets mentionnés à la section 2.2.1.3, ont montré que la pratique des activités et la présence des autres voyageurs étaient les composantes principales du contexte. Dans les Trains à Grande Vitesse (TGV), les voyageurs évaluent le confort en fonction des activités qu'ils pratiquent (lire, travailler, ranger les bagages, se reposer, etc.). La présence des autres voyageurs affecte également la perception du confort principalement en forte affluence dans les trains régionaux car elle modifie le rapport du voyageur à son environnement. Ces deux composantes contextuelles ont également été identifiées comme étant des composantes du confort (voir la figure 2.3). Nous les appellerons « **composantes situationnelles** ». Il est donc important d'intégrer ces composantes qui affectent la perception du confort dans les trains, dans un modèle d'évaluation. En effet, elles représentent des caractéristiques importantes du voyage en train.

3- L'environnement physique et sensoriel du train Il est constitué de l'aménagement intérieur, des objets liés à l'usage ainsi que des caractéristiques physiques et sensorielles suivantes : les dimensions du siège, les paramètres de l'éclairage, les paramètres thermiques, les paramètres acoustiques et les paramètres dynamiques. Parmi les composantes du confort identifiées dans les TGV, lors d'une étude menée dans le projet ACONIT [65], on retrouve dans la figure 2.3 des composantes liées à l'environnement physique et formulées telles qu'elles ont du sens dans la perception des voyageurs comme :

le confort de l'assise (postural), les aspects sonores (acoustique), le confort des jambes, l'espace, les mouvements du train (dynamique), le rangement des bagages, la température (thermique) et les couloirs. On appellera ces composantes : « **les composantes physiques du confort** ». Cette étude s'est également intéressée aux dépendances entre les composantes du confort de manière générale. Elle a révélé des dépendances entre la perception de la composante acoustique et celle de la composante dynamique. Cela se traduit par le fait que le bruit du train est un indicateur de vitesse pour les voyageurs. Il doit être donc cohérent avec les mouvements du train ressentis. Néanmoins, cette dépendance n'a pu être formalisée. D'autre part, cette étude a révélé des dépendances de type causal entre les composantes physiques du confort et la pratique des activités. Le confort des composantes physiques affecte la pratique des activités (par exemple, la dynamique pour l'activité sur PC et l'écriture, l'éclairage pour le repos, etc.). D'autres projets plus spécifiques ont été menés afin d'explorer les composantes physiques du confort que nous verrons au chapitre 4, consacré à la construction de notre modèle d'évaluation.

Remarque 7 *La figure 2.3 représente les principales composantes du confort pour les voyageurs des TGV. Elle montre également pour chacune de ces composantes le nombre de voyageurs l'évaluant de manière positive et le nombre de voyageurs l'évaluant de manière négative dans les TGV.*

Conclusion

Nous avons tenté dans ce chapitre de comprendre le concept de confort de manière générale. Nous avons, tout d'abord, essayé de comprendre les différentes visions que l'on peut avoir du confort (usager, ingénieur, exploitant) car nous serons amenés, dans notre approche, à être confrontés à ces différents acteurs. Nous nous sommes particulièrement intéressés au confort de l'utilisateur et plus précisément à la perception et ce qu'elle englobe comme complexité. Cet intérêt est justifié par le fait que l'objectif principal de cette thèse est de construire un modèle d'évaluation qui représente cette perception afin de pouvoir évaluer les offres des constructeurs sur le point de vue du confort.

Nous avons vu également, dans ce chapitre, les différents outils utilisés à la SNCF, permettant d'analyser le confort dans les trains pour déterminer ses composantes ainsi que la manière dont elles s'organisent dans la perception afin de pouvoir spécifier des indicateurs correspondant à ses composantes, dans des cahiers des charges, et de pouvoir l'évaluer. Nous avons présenté, ensuite, les études menées pour l'élaboration d'indicateurs de confort global dans les trains ainsi que

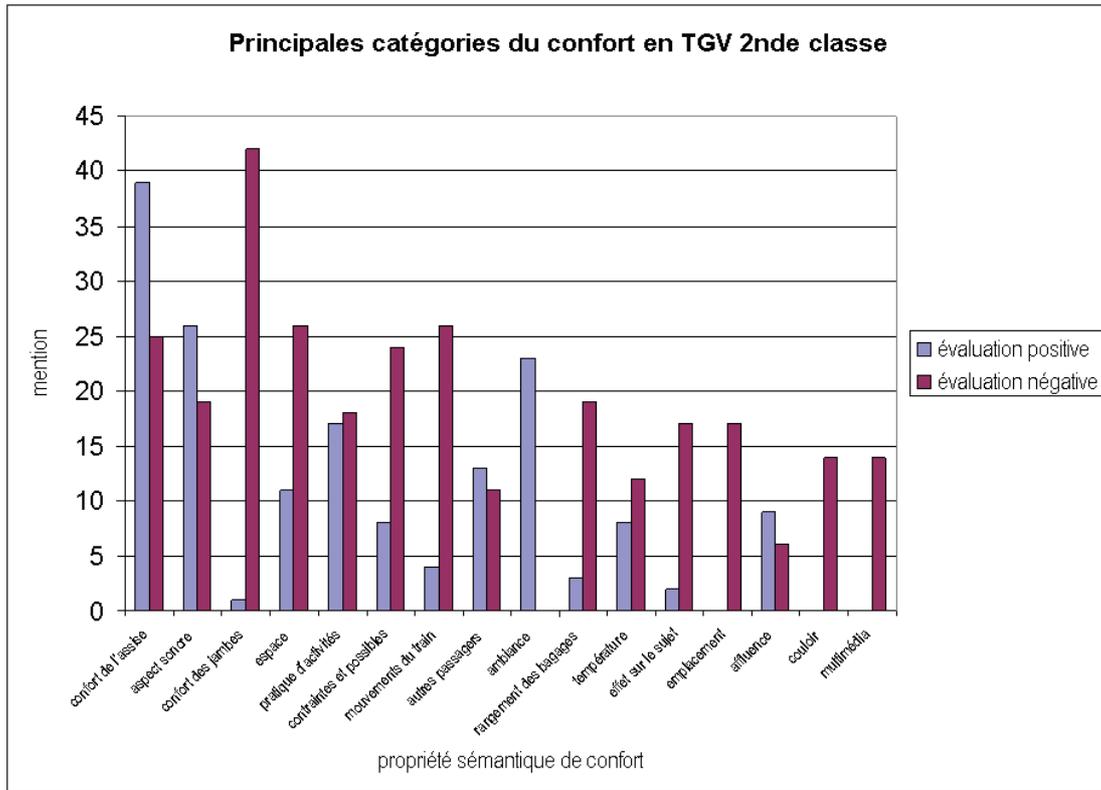


Figure 2.3 – Les principales composantes du confort en TGV [65]

leurs limites par rapport à la prise en compte de la perception et à la manière dont ils agrègent les composantes.

Dans la dernière section, nous avons tenté de caractériser le concept du confort dans les trains, à travers les études et enquêtes menées à la SNCF utilisant les outils d'analyse du confort, afin de faciliter la construction de notre modèle d'évaluation.

Chapitre 3

Formalisation du processus d'aide à la décision

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes que nous avons suivies pour formaliser le processus d'aide à la décision associé au problème qui nous a été posé. Pour cela, nous allons nous servir de la méthodologie présentée à la section 1.1.3 du chapitre 1. Avant de passer à cette formalisation, nous présenterons, tout d'abord, une description de ce problème (section 3.1) telle qu'elle nous a été présentée par les premiers intervenants rencontrés. Il a fallu, ensuite, comprendre les enjeux associés à l'aide à la décision pouvant être apportée à ce problème (section 3.2). Puis, nous avons déterminé avec les intervenants, les aspects de ce problème sur lesquels notre processus d'aide à la décision agira. La formalisation du processus d'aide à la décision a commencé par l'analyse du processus de décision (section 3.4) existant afin d'identifier les intervenants avec qui nous allons interagir (leurs rôles ainsi que leurs besoins et préoccupations par rapport à l'aide à la décision), le flux d'information qui circule ainsi que les étapes au cours desquelles l'aide à la décision sera nécessaire. Nous avons ensuite développé une approche, qui sera décrite à la section 3.5.1, afin de définir la problématique et construire le modèle d'évaluation. Le détail des différentes étapes de cette approche fera l'objet des chapitres suivants.

3.1 Description initiale du problème

Le confort est l'une des raisons principales pour laquelle les voyageurs aiment prendre le train, ce qui en fait une préoccupation pour un opérateur ferroviaire comme la SNCF. Cette préoccupation se traduit par des spécifications sur les caractéristiques physiques d'un train ayant un impact sur le confort, dans les cahiers

des charges destinés au lancement des appels d'offre pour l'acquisition ou la rénovation d'un matériel roulant (rames de train). Ces spécifications peuvent concerner les dimensions d'un siège, la température intérieure, le niveau de bruit, le niveau de vibration. L'inconvénient est que ces spécifications sont dispersées dans les différents fascicules constituant ces cahiers des charges et qu'il n'existe pas de vision globale du confort proposé par un constructeur dans son offre. Par conséquent, la SNCF voudrait posséder un outil permettant de juger les offres des constructeurs (matériels roulants), lors des réponses aux appels d'offres destinés à l'achat ou à la rénovation d'un train, sur le point de vue du confort global tel qu'il est perçu par les voyageurs à bord des trains. Un tel outil permettrait aussi de répondre à d'autres préoccupations que les différents intervenants pourraient avoir comme :

- aider les experts qui rédigent les cahiers des charges à spécifier les critères ayant un impact sur le confort,
- comparer les offres entre elles, c.-à-d. être capable de pouvoir dire si une offre est plus confortable qu'une autre, si des différences existent,
- situer le confort d'une offre par rapport à des niveaux de référence, c.-à-d. connaître le niveau de confort du point de vue des voyageurs dans un train,
- mesurer l'impact des modifications apportées à une offre sur le confort global,
- identifier les paramètres critiques d'une offre qui sont la cause d'un mauvais confort.

Avant de présenter plus en détail ces besoins et ces préoccupations (leur importance, les principales raisons et motivations correspondantes et les intervenants concernés) lors de l'analyse du processus de décision à la section 3.4.4, nous avons jugé utile de présenter le contexte et les enjeux pour un opérateur ferroviaire comme la SNCF de disposer d'un tel outil.

3.2 Contexte et enjeux

De nombreuses études et enquêtes ont été menées à la SNCF pour comprendre le confort des voyageurs. Le principe de ces études était de partir du jugement des voyageurs et de leur ressenti afin d'identifier les composantes du confort dans les trains et leurs interactions éventuelles (voir chapitre 2). Certaines de ces études portaient sur le confort global comme ACONIT [50] tandis que d'autres se sont concentrées sur certaines composantes comme Dyapos [35] (confort du siège), Esther [86] (confort thermique) et Ambiances Lumineuses [26] [27] (l'éclairage). Ces études avaient pour objectif de fournir des spécifications sur le confort afin qu'elles puissent être intégrées dans les cahiers des charges destinés au lancement des appels d'offre. Néanmoins, ces spécifications sont dispersées dans plusieurs fascicules composant un cahier des charges (le siège dans le fascicule aménagement intérieur, le thermique dans le fascicule climatique, l'acoustique dans le fascicule système train,

etc.) ce qui rend difficile, pour l'opérateur ferroviaire, d'avoir une vision globale du confort des offres proposées. La nécessité d'avoir une vision globale se justifie par le fait que le confort n'a de sens pour le voyageur que dans sa globalité et que le fait de traiter ses composantes séparément, sans se soucier de la vision globale, n'est pas forcément pertinent. De plus, lorsque les offres sont évaluées, les critères de confort sont agrégés, au moyen d'une somme pondérée, avec d'autres critères techniques, de maintenance et de sécurité. Certes, cette agrégation nous renseigne sur la qualité de l'offre mais pas sur son confort global. De plus, la somme pondérée, par son caractère totalement compensatoire, n'est pas nécessairement appropriée pour agréger les critères de confort (un inconfort important sur une composante ne peut être compensé par un très bon confort sur d'autres composantes).

Les principaux enjeux pour un opérateur ferroviaire comme la SNCF de disposer d'un outil permettant d'avoir une vision globale du confort des offres proposées, sont :

- se démarquer de la concurrence en proposant des trains confortables aux voyageurs et cela en aidant les experts qui rédigent les cahiers des charges à mieux spécifier les critères de confort, à retenir les offres avec de bons niveaux de confort et à négocier (discuter) avec les constructeurs quelles sont les modifications à apporter aux offres afin d'en améliorer le confort.
- proposer plusieurs gammes de confort adaptées à chaque voyageur telles que l'offre *Ouigo* (TGV *low cost*) et l'offre *TGV Family*.
- cibler le confort à atteindre en fonction des objectifs des décideurs et des contraintes économiques,
- développer une nouvelle approche utilisant d'autres méthodes d'agrégation que la somme pondérée pour construire un tel outil, qui pourrait être appliquée à d'autres domaines que le confort et qui pourrait même générer des préoccupations de recherche scientifique en aide multicritère à la décision.

3.3 Périmètre du problème

Bien que le confort des voyageurs reste une préoccupation dans tous les types de matériel roulant, on se concentrera uniquement sur le confort dans les Trains à Grande Vitesse (TGV) car ce type de matériel suscite beaucoup d'attente en terme de confort de la part des voyageurs. De plus, la majorité des études citées dans la section précédente ont été réalisées pour les TGV. Pour cela, nous nous intéresserons dans la section 3.4 au processus de décision associé à l'achat ou la rénovation d'un TGV, qui est différent de celui associé aux autres matériels roulants. Néanmoins, une étude similaire pour d'autres types de matériel roulant (TER et Transilien), utilisant la même méthodologie développée dans cette thèse et que nous verrons dans la suite, est en cours de réalisation.

Pour ce qui concerne la durée du trajet, qui est un facteur pouvant affecter la perception du confort (voir la section 4.2.5 du chapitre 4), la majorité des enquêtes ont été réalisées sur des trajets dont la durée était de deux à trois heures. Néanmoins, nous faisons l'hypothèse qu'un train confortable pour une longue durée, l'est également pour une durée plus courte.

Le confort est une notion complexe qui ne dépend pas uniquement de l'environnement physique dans lequel se trouve le voyageur, mais dépend également du contexte et de facteurs psychologiques (qui intègrent son vécu) et socio-culturels (voir chapitre 2). Il est difficile de prendre en compte certains aspects psychologiques dans un modèle d'évaluation du confort. De plus, l'objectif de l'outil est de juger les offres des constructeurs, nous n'allons donc pas considérer ce qui ne peut pas être amélioré par les constructeurs. Pour cela, nous avons jugé utile de ne pas considérer tout ce qui est externe au voyage en train comme le confort en gare, les retards et le prix du billet, bien que cela puisse affecter la perception du confort (voir la section 4.2 au chapitre 4).

Pour ce qui concerne la différenciation 1^{ère} et 2^{ème} classes, nous ne disposons pas d'information suffisante sur la perception pour prendre en compte cette différence, bien que tous les intervenants dans le processus en soient conscients. Néanmoins, comme nous l'avons déjà mentionné à la section 1.1 du chapitre 1, il est important que l'outil soit assez générique et évolutif afin que l'on puisse y intégrer, facilement, ces évolutions.

Il est difficile de prétendre, avec les hypothèses formulées ci-dessus, que l'évaluation globale du confort puisse refléter le confort d'un voyageur en particulier. Pour cela, on s'intéresse à une évaluation du confort global consensuelle, qu'on définira à la section 4.3 du chapitre 4 et non pas à celle d'un voyageur en particulier, car il n'est pas facile d'identifier les attentes et le vécu de chaque voyageur et que cela nécessiterait de les catégoriser en utilisant des caractéristiques qui pourraient poser des problèmes d'éthique.

3.4 Analyse du processus de décision associé à l'achat ou à la rénovation d'un TGV

L'analyse du processus de décision nous permettra de passer à une représentation formelle du problème décrit à la section 3.1. Ce qui correspond à la première étape de la formalisation d'un processus d'aide à la décision.

Nous avons vu à la section précédente que nous allons nous intéresser au confort dans les TGV. Pour cela, et afin de mener à bien notre démarche d'aide à la décision pour la construction de l'outil, nous avons essayé de comprendre le processus de décision associé à l'achat et à la rénovation d'un TGV (voir la figure 3.1). Nous

avons sollicité, pour cela, plusieurs intervenants dans ce processus afin d'identifier :

- leurs rôles ainsi que leurs préoccupations par rapport à un tel outil, conformément à la première étape de la méthodologie de formalisation d'un processus d'aide à la décision présentée à la section 1.1.3 du chapitre 1,
- le flux d'information, pour en extraire les données qui seront nécessaires à la structuration du problème,
- toutes les étapes du processus dans lesquelles l'outil sera utilisé.

Avant de présenter cela, nous avons jugé utile de décrire ce processus de décision.

3.4.1 Description du processus

La décision d'achat ou de rénovation d'un TGV est prise par **SNCF Voyages** qui par le biais de sa **direction Marketing** cible les besoins clients par des enquêtes et des études de tendances. Ces besoins sont ensuite formulés par une autre entité de SNCF Voyages, qui gère la flotte matériel, en Expressions Fonctionnelles de Besoins (EFB). Ces EFB sont une sorte de cahiers des charges non formalisés. Les études et enquêtes menées à **la direction de l'innovation et de la recherche** par les experts en confort peuvent également enrichir ces EFB.

Une fois les EFB rédigées, elles sont envoyées à **la direction du matériel** qui nomme un chef de projet afin de rédiger le cahier des charges qui sera le document officiel de lancement de l'appel d'offre. Pour cela, il sollicite les experts du **Centre d'Ingénierie du Matériel** (CIM) afin de rédiger les spécifications correspondant à leurs expertises (sécurité, maintenance, aménagement et confort) et qui constitueront le cahier des charges. Les EFB sont également transformées en spécifications plus formelles dans le cahier des charges. Les résultats d'études et enquêtes réalisées à la direction de l'innovation et de la recherche par les experts en confort viennent également enrichir ces spécifications. Après la rédaction du cahier des charges, l'appel d'offre est lancé par une autre entité de la direction du matériel qui est **le département des achats matériel**.

Les constructeurs répondent à l'appel d'offre en fournissant des Spécifications Techniques de Besoins (STB). Leurs offres sont ensuite dépouillées par la direction du Matériel représentée par le chef de projet qui sollicite les experts du CIM. Pour cela, les réponses des fournisseurs sont évaluées de la manière suivante.

- 1- Pour chaque spécification, la réponse du fournisseur est notée sur une échelle $\{0, 1, 2, 3\}$
- 2- Les notes correspondant à ces spécifications sont ensuite agrégées au moyen d'une somme pondérée (les poids représentent l'importance de ces spécifications). Puis, le résultat représentant la note de l'offre est normalisé sur une échelle $[0, 20]$.
- 3- L'offre ayant le plus grand score est celle qui est retenue.

Une fois le constructeur choisi, il y a souvent des modifications qui peuvent être apportées à l'offre. Ces modifications sont négociées par la direction du matériel ainsi que SNCF Voyages et elles peuvent porter sur des aspects économiques, de confort ou de maintenance.

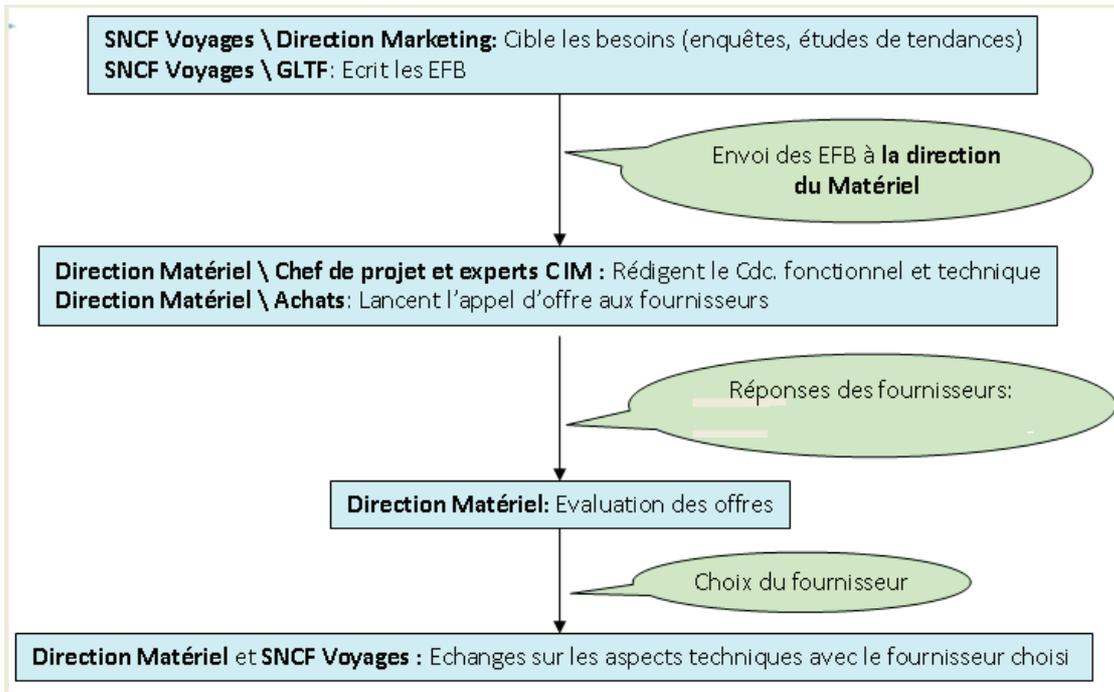


Figure 3.1 – Le processus de décision associé à l'achat et la rénovation d'un TGV

3.4.2 Les intervenants dans le processus

Après avoir analysé le processus de décision, nous avons identifié trois types d'intervenants : les décideurs, les futurs utilisateurs de l'outil ainsi que les experts en confort et en matériel roulant. Dans cette section, nous allons nous intéresser à leurs rôles, leurs préoccupations par rapport à l'outil et surtout avec qui nous allons interagir pour sa mise en œuvre.

3.4.2.1 Les décideurs

Nous avons vu dans la description du processus que SNCF Voyages est l'entité qui prend la décision d'acquérir un TGV, elle est également le financeur du projet associé. Ils ont mandaté les experts en confort de la direction de l'Innovation et

de la Recherche afin de conduire l'étude associée à la construction de l'outil. L'outil leur servira à formaliser les spécifications (qui affectent le confort) formulées dans les EFB. L'interaction avec les décideurs portera essentiellement sur la manière dont l'outil intègrera leurs spécifications, cela pourrait être considéré dans l'agrégation des critères.

3.4.2.2 Les utilisateurs de l'outil

Les personnes qui rédigent les cahiers des charges, qui évaluent les offres et qui négocient les modifications à apporter à l'offre, seront les personnes qui utiliseront l'outil. Les experts du CIM sont les seuls à être impliqués dans les trois tâches, ils seront potentiellement les plus grands utilisateurs de l'outil. SNCF Voyages pourrait, dans une moindre mesure, utiliser l'outil dans la phase de négociation. L'interaction avec les utilisateurs portera essentiellement sur les types de résultats que devra fournir l'outil en sortie, le format des données d'entrée qu'il nécessitera ainsi que son ergonomie.

3.4.2.3 Les experts

La construction de l'outil nécessite deux types d'expertise : une expertise en confort et une expertise en matériel roulant.

- Les experts en confort de la Direction de l'Innovation et de la Recherche sont ceux qui ont réalisé les études et enquêtes sur le confort des voyageurs. Ils sont également chargés de conduire le projet associé à la construction de l'outil et ils ont sollicité pour cela des membres du laboratoire du Lamsade en tant qu'experts en aide à la décision. Nous avons tenté d'identifier, avec eux, quelles pourraient être les préoccupations des utilisateurs de l'outil et des décideurs, lors de la description du problème (voir section 3.1). L'interaction avec ces experts est la plus importante. Ils interviendront, pratiquement, à toutes les étapes de la construction du modèle d'évaluation sur lequel sera fondé l'outil.
- Les experts en matériel roulant (experts CIM) sont les personnes qui rédigent les cahiers des charges et qui évaluent la conformité des réponses des fournisseurs par rapport aux spécifications de chaque fascicule. A chaque expertise correspond un fascicule qui peut contenir des spécifications ayant un impact sur le confort. Nous solliciterons uniquement les experts dont les fascicules contiennent des spécifications ayant un impact sur le confort, en l'occurrence : l'expert climatique pour le confort thermique, l'expert ambiances lumineuses pour l'éclairage, l'expert dynamique pour les vibrations et les mouvement du train, l'expert siège pour le confort postural et l'expert acoustique pour le bruit. Ils seront sollicités lors de la structuration du problème et plus préci-

sément sur la collecte et la construction du format des données ainsi que sur le choix des spécifications des cahiers des charges à intégrer dans l'outil pour l'évaluation des offres (voir section 3.5.1.4).

Remarque 8 *Dans la littérature, un décideur (en aide à la décision) est défini par B. Roy et D. Bouyssou [78] comme étant « l'entité intervenant dans le processus de décision que les modèles mis en œuvre cherchent à éclairer » ou alors « l'entité pour le nom de qui, ou au compte de qui, l'aide à la décision s'exerce ». Avec cette définition, tous les intervenants peuvent être considérés comme des décideurs.*

- *SNCF Voyages est l'entité pour le nom de qui, et au compte de qui, l'aide à la décision s'exerce.*
- *Les experts en confort et en matériel roulant sont les entités intervenant dans le processus de décision que les modèles mis en œuvre cherchent à éclairer.*

Afin d'éviter toute ambiguïté, nous désignerons, par décideur, SNCF Voyages car ils sont les premiers bénéficiaires de l'aide à la décision apportée par l'outil.

3.4.3 Les données associées au processus

L'objectif dans cette section, est d'identifier le type de données utilisées, à travers différents documents, dans le processus qui serviront à construire le modèle d'évaluation sur lequel sera fondé l'outil. On retrouve ces données dans les documents suivants : les EFB, les cahiers des charges, les normes, les STB et les rapports d'études et enquêtes.

- **Les EFB** : les spécifications des EFB ne sont pas assez formalisées pour être intégrées directement dans l'outil, néanmoins, elles pourront servir à fixer la cible confort, ce qui affectera la manière d'agrèger les critères dans le modèle sur lequel sera fondé l'outil.
- **Les cahiers des charges** : les constructeurs ne répondent qu'aux spécifications présentes dans les cahiers des charges, elles représentent les niveaux de performance sur chaque critère que les offres doivent atteindre (les valeurs de référence). Notre objectif est d'identifier parmi ces spécifications, celles qui relèvent du confort afin de construire et paramétrer le modèle sur lequel sera fondé l'outil. Cette identification sera le fruit d'une interaction avec les experts.
- **Les normes** : les cahiers des charges font parfois référence à des normes dans lesquelles on trouve des spécifications sur le confort avec les valeurs de référence à atteindre.
- **Les STB** : elles représentent les réponses des fournisseurs aux spécifications des cahiers des charges pouvant être différentes des valeurs de référence. L'outil évaluera le confort des offres sur les réponses fournies dans les STB.

Nous garderons uniquement celles qui correspondent aux spécifications des cahiers des charges retenues pour paramétrer le modèle.

- **Les rapports d'enquêtes et d'études réalisées sur le confort voyageurs** : les études et enquêtes réalisées par la direction de l'innovation et de la recherche (voir section 3.2) nous aideront à construire et paramétrer le modèle d'évaluation sur lequel sera fondé l'outil.

3.4.4 Besoins et préoccupations par rapport à l'utilisation de l'outil

Les besoins et préoccupations de chaque intervenant ont été identifiés lors de la première étape de la formalisation du processus d'aide à la décision, qui est la représentation du problème (voir section 1.1.3 du chapitre 1). Cette identification s'est faite au fur et à mesure des rencontres avec les différents intervenants. La première préoccupation, identifiée avec les représentants des décideurs (les experts en confort), était de construire un outil qui permet d'évaluer les offres des constructeurs du point de vue du confort. Ensuite, lors de notre rencontre avec les experts qui rédigent les cahiers des charges, nous avons vu que l'outil pouvait les aider à spécifier les critères (caractéristiques physiques des trains) ayant un impact sur le confort, mais aussi, à négocier les modifications à apporter à l'offre, avec le fournisseur choisi. Enfin, lors de notre rencontre avec les décideurs, nous avons vu que l'outil pouvait les aider à formuler leurs besoins afin de les prendre en compte dans l'évaluation des offres.

Après l'identification des besoins et des préoccupations de chaque intervenant, nous devons vérifier s'il y a des liens entre ces derniers afin d'identifier d'éventuelles redondances ou incohérences et de déterminer leurs importances. Pour cela, nous les avons classés dans trois catégories, selon leur apparition dans le processus de décision et les moyens à mettre en œuvre pour que l'outil puisse y répondre :

- des besoins et préoccupations d'aide à la spécification,
- des besoins et préoccupations d'aide à l'évaluation des offres,
- des besoins et préoccupations d'aide à la négociation avec le fournisseur choisi.

Dans cette section, nous présenterons ces trois catégories de besoins et préoccupations que nous avons identifiées, leur importance, les motivations associées ainsi que la manière dont l'outil doit y répondre.

3.4.4.1 Aide à la spécification

Lors de la rédaction des documents destinés au lancement des appels d'offre, plusieurs critères ayant un impact sur le confort peuvent faire objet de spécifications. Afin que les offres proposées par les constructeurs se rapprochent le plus

possible de la cible confort souhaitée, les valeurs spécifiées doivent traduire cette cible. Pour cela, l'outil peut constituer un moyen d'aide aux décideurs ainsi qu'aux experts qui rédigent les cahiers des charges. Cette aide consiste à :

- formaliser les besoins des décideurs en tant qu'exploitant ferroviaire. Ces besoins peuvent prendre la forme suivante : *on voudrait un train qui soit confortable pour les voyageurs réguliers pour motif professionnel, on voudrait un train confortable pour les voyageurs en famille, etc.*
- éclairer les experts qui rédigent les cahiers des charges lorsqu'ils fixent la cible confort souhaitée pour chaque spécification, en leur permettant de tester différentes combinaisons de valeurs cibles afin de spécifier celles qui produisent le meilleur confort,
- aider les experts à rédiger des spécifications qui incitent les constructeurs à donner des réponses plus précises afin qu'ils puissent être correctement évalués par un tel outil.

3.4.4.2 Aide à l'évaluation

Lors du dépouillement des offres, ces dernières sont évaluées sur plusieurs aspects et notées afin de choisir la meilleure. Nous avons vu précédemment que cette note ne reflétait aucunement le confort d'une offre. De plus, il est impossible de savoir quelle est l'offre la plus confortable. Pour cela, un outil qui permet de comparer les offres entre elles et surtout d'obtenir le niveau de confort (par rapport à des valeurs de références) de ces dernières, c.-à-d. une évaluation qui ne dépend pas des offres mais de leur niveau réel de confort, serait utile à cette étape. En effet, le confort, à lui seul, ne constitue pas un aspect déterminant lors du choix d'une offre car il y a beaucoup d'autres aspects d'ordre économique, liés à la sécurité ou de maintenance, qui entrent en compte dans l'évaluation d'une offre. Néanmoins, un tel outil permettrait, dans un premier temps, d'écarter les offres les moins confortables et de s'assurer que l'offre retenue ne présente pas un mauvais confort.

3.4.4.3 Aide à la négociation

Lorsque le fournisseur est choisi, il y a une étape de mise au point où certaines modifications peuvent être apportées à l'offre. Le fait de disposer d'un outil permettant d'identifier facilement les caractéristiques d'une offre qui sont la cause d'un mauvais confort et de mesurer l'impact des modifications pouvant être apportées à une offre (changement de dispositif de climatisation, d'éclairage, etc.) sur le confort global, faciliterait les échanges et la gestion des aléas, liés à ces modifications, entre les experts en matériel roulant et le fournisseur choisi. Ce qui en fait un moyen de négociation légitime pour améliorer le confort. La préoccupation d'aide à la négociation est la plus importante pour les experts en matériel roulant

qui seront les plus grands utilisateurs de l'outil.

3.4.5 Insertion de l'outil au sein du processus

Les catégories de besoins et préoccupations, que nous avons présentées à la section 3.4.4, nous aideront à mieux comprendre comment l'outil sera utilisé aux différentes étapes du processus de décision. Nous pouvons distinguer pour cela trois étapes :

- a- **Avant le lancement de l'appel d'offre** : à cette étape, il servira principalement d'outil d'aide à la spécification en formalisant les spécifications des EFB ayant un impact sur le confort et en aidant les experts du CIM à spécifier la cible confort (les valeurs de référence) dans les cahiers des charges afin que les réponses des constructeurs soient plus précises et exploitables par l'outil.
- b- **Après les réponses des fournisseurs et avant le choix final** à cette étape, il servira d'outil d'aide à l'évaluation. Il permettra de s'assurer que l'offre retenue est le plus proche possible de la cible confort.
- c- **Après le choix final et avant la sortie du matériel** : l'enjeu de disposer d'un tel outil lors de la phase de négociation s'est avéré plus important que dans les autres phases aux yeux des décideurs et surtout des utilisateurs de l'outil.

3.5 L'approche utilisée

Après avoir analysé le processus de décision afin de formaliser notre problème, nous allons décrire dans cette section les principales étapes de l'approche utilisée pour définir la problématique et construire le modèle d'évaluation sur lequel sera fondé l'outil. Les étapes de notre approche seront présentées en détail aux chapitres suivants. Nous présenterons également les avantages et les inconvénients de cette approche dans le cadre de ce processus de décision.

Nous avons utilisé une approche **constructive** (voir la section 1.1.2 du chapitre 1) car le modèle sur lequel sera fondé l'outil n'est pas connu à l'avance par les intervenants, il sera construit dans le processus d'aide à la décision associé au processus de décision. Cette approche nécessite une forte interaction avec les experts et les décideurs.

3.5.1 Description de l'approche

L'approche utilisée comporte six étapes. La première, consistait à déterminer la *problématique* (au sens donné dans la section 1.2.2 du chapitre 1) associée à

notre problème. La deuxième étape était consacrée à l'appropriation des enquêtes et des études ainsi que les données des cahiers charges, des normes et des EFB. Nous avons ensuite proposé un modèle d'aide multicritère à la décision comme modèle d'évaluation afin de construire l'outil. La troisième étape de l'approche consiste donc, à définir les critères de confort sur lesquels les offres seront évaluées. La quatrième, a conduit à construire les échelles de ces critères et la cinquième, à agréger ces critères afin d'obtenir une évaluation globale. La dernière étape de notre approche a pour objectif de mener une analyse de sensibilité et de robustesse de notre modèle d'évaluation.

3.5.1.1 Détermination de la problématique

Avant de construire le modèle d'évaluation, il a fallu déterminer *la problématique* associée à notre problème à partir des besoins et préoccupations formulés par les différents intervenants.

- L'aide à la spécification nécessite la connaissance du niveau de confort réel obtenu à partir d'une combinaison de valeurs correspondant aux spécifications, c.-à-.d. situer le niveau de confort correspondant aux valeurs spécifiées. Cela nous conduit à une problématique de tri dans des catégories prédéfinies de confort.
- L'aide à l'évaluation nécessite la connaissance du niveau de confort réel d'une offre si jamais elle est retenue (situer son niveau de confort par rapport à des niveaux de référence). Cela nous conduit à une problématique de tri dans des catégories prédéfinies de confort. Cette aide peut être de meilleure qualité, si le modèle d'évaluation arrive à différencier les offres qui sont dans une même catégorie de confort (lorsque cette différence existe). Cela nous conduit à une problématique de rangement des offres se trouvant au sein d'une même catégorie.
- L'aide à la négociation nécessite la connaissance du niveau de confort réel de l'offre retenue lorsque des modifications, ayant un impact sur le confort, sont apportées, c.-à-.d. situer le niveau de confort de l'offre correspondant à ces modifications. Cela nous conduit à une problématique de tri dans des catégories prédéfinies de confort.

Les trois types de besoins et préoccupations des intervenants nous ont conduits à une problématique de tri. Cependant, l'aide à la décision peut être de meilleure qualité pour l'aide à l'évaluation, si on arrive, en plus, à différencier les offres dans une même catégorie lorsque cette différence existe. Cela nous conduit à une problématique de tri et de rangement.

3.5.1.2 Appropriation des enquêtes, des études et des données

Cette étape consistait, tout d'abord, à s'approprier les enquêtes et les études qui ont été réalisées sur la perception du confort par les voyageurs à bord des TGV, au sein de la Direction de l'Innovation et de la Recherche, afin d'identifier les composantes du confort importantes pour les voyageurs, comment les voyageurs les perçoivent et quelles sont les dépendances entre ces composantes. Ce travail servira à la définition des critères sur lesquels les offres seront évaluées ainsi que leur structuration dans le modèle (étape 3).

D'autres études, que nous nous sommes appropriées (normes et études SNCF), concernaient la corrélation entre les mesures physiques et le ressenti des voyageurs. Ces études nous permettront de lier les caractéristiques physiques d'un train (fournies par les constructeurs) et les critères de confort du modèle identifiés à l'étape 3. Le lien entre les caractéristiques physiques et les critères nous permettra de construire les échelles de notre problème (étape 4) afin d'en déterminer les dimensions ainsi qu'à l'agrégation (étape 5) pour tester la robustesse et la pertinence des résultats fournis par l'outil.

Le troisième type de données, qu'il a fallu s'approprier, était les documents classiques d'un appel d'offre (cahiers des charges et STB) afin de pouvoir, à l'étape 4, dialoguer avec les experts en matériel roulant pour l'identification des spécifications à retenir pour la construction des échelles.

3.5.1.3 Définition des critères

La troisième étape de l'approche avait pour objectif de construire le modèle de critères sur lequel les offres seront évaluées. Pour les experts en confort, il s'agissait d'aboutir à une représentation des critères, sur lesquels les offres seront évaluées, prenant en compte la perception du confort et traduisant les besoins des intervenants de manière « conceptuelle » c.-à-d. sans notion de quantification (échelles et agrégation). Nous avons appelé cette représentation « Modèle conceptuel ».

Les études et enquêtes sur la perception des voyageurs, que nous nous sommes appropriées à l'étape précédente, nous ont permis d'identifier les composantes du confort, les dépendances entre elles, ainsi que les facteurs qui peuvent affecter cette perception. Cela a été nécessaire afin que le modèle de critère reflète, le plus possible, la perception du confort.

Bien que la première préoccupation, lors de cette construction, était que le modèle reflète le plus possible la perception du confort par les voyageurs, il devait également être construit de telle sorte à ce qu'il puisse prendre en compte les souhaits des décideurs formulés dans les EFB (pour l'outil d'aide à la spécification). Ce modèle devait, de plus, respecter des conditions théoriques sur la construction des critères (voir la section 1.2.3 du chapitre 1).

Cette étape a nécessité une forte interaction avec les experts en confort et dans une moindre mesure avec les experts en matériels roulants (CIM) et les décideurs. Elle s'est déroulée comme suit.

- 1- Identifier s'il y a des préoccupations propres à la construction de ce modèle :** la seule préoccupation identifiée, par rapport à la construction du modèle conceptuel, avait été formulée par les experts en confort. Ils ont participé à cette construction afin de s'assurer que le modèle conceptuel reflète bien la perception du confort par les voyageurs.
- 2- Identifier en quoi les besoins et préoccupations des intervenants, par rapport à l'utilisation de l'outil, peuvent affecter cette construction :** pour cela, il a fallu interroger les décideurs pour identifier quelle lecture (signification et sémantique de chaque critère) était la plus appropriée afin de pouvoir formaliser leurs besoins exprimés dans les EFB. Il a fallu, également, interroger les experts en matériel roulant afin de déterminer les caractéristiques que doit posséder le modèle pour construire un outil d'aide à la négociation.
- 3- Déterminer le type de modèle qui est le plus approprié pour représenter les critères de notre problème, ainsi que ses caractéristiques :** afin de répondre au mieux aux besoins précédents, nous avons choisi un *modèle hiérarchique* sous forme d'arborescence (voir la figure 4.1, la figure 4.2, la figure 4.3, la figure 4.4 et la figure 4.5 au chapitre 4) comme modèle conceptuel. Nous verrons au chapitre suivant les raisons pour lesquelles un modèle hiérarchique est approprié.
- 4- Identifier les étapes de construction de ce modèle :** une fois la nature du modèle déterminée, nous avons tenté de définir le cheminement de cette construction (que nous verrons plus en détail au chapitre 4) que nous avons résumé dans les points suivants :
 - déterminer les composantes du confort, leurs dépendances, ainsi que les facteurs pouvant les affecter afin de les intégrer dans le modèle conceptuel,
 - veiller à ce que la construction du modèle hiérarchique soit en adéquation avec la lecture souhaitée par les décideurs et les experts en matériel roulant afin que l'outil réponde à leurs préoccupations,
 - vérifier que le modèle hiérarchique respecte les exigences théoriques sur la construction des critères.

3.5.1.4 Construction des échelles

Cette étape a pour objectif de construire les échelles associées aux critères de notre problème. Une échelle est constituée d'un indicateur ainsi que les valeurs possibles associées (voir la section 1.3 du chapitre 1). Chacun de ces indicateurs mesure, en quelques sortes, le confort (ou l'inconfort) susceptible d'être ressenti sur

le critère correspondant. Les échelles dépendent des paramètres physiques (caractéristiques physiques des trains) comme les dimensions d'un siège, les niveaux de vibration, d'éclairage ou sonores, mais aussi de données perceptives comme les seuils de confort et d'inconfort correspondant à ces mesures dépendant de la perception des voyageurs. Afin de mener à bien cette construction, nous avons utilisé les spécifications des cahiers des charges et des normes ainsi que les études menées sur la corrélation entre mesures physiques et confort perçu par les voyageurs.

Dans une démarche classique d'aide multicritère à la décision, il est conseillé de construire les dimensions du problème (conséquences élémentaires + échelles) avant la famille de critères afin d'éviter de se retrouver avec des critères sans échelle. Dans notre approche, nous avons préféré commencer par construire la famille de critères car, bien que conscient de ce risque, les experts en confort, avec qui nous avons le plus interagi lors de la formalisation du processus d'aide à la décision, désiraient en priorité un modèle de critères qui représente la perception du confort par les voyageurs quitte à réaliser d'autres études pour construire les échelles manquantes. Une fois le modèle conceptuel construit, nous avons dû identifier les conséquences élémentaires correspondant aux critères se trouvant aux feuilles de l'arborescence (critères feuilles), puis construire les échelles associées afin d'obtenir les dimensions de notre problème.

Cette étape a nécessité une forte interaction avec les experts en matériels roulants (CIM) ainsi que les experts en confort car à chaque critère feuille lui est associé une expertise en confort à laquelle correspond une expertise en matériel roulant incluant le confort. On a donc les correspondances suivantes :

- le confort thermique et l'expertise en climatique,
- le confort acoustique et l'expertise en acoustique
- la confort dynamique et l'expertise en dynamique,
- le confort éclairage et l'expertise en éclairage,
- le confort tympanique et l'expertise en aérodynamique,
- le confort du siège et l'expertise en siège,
- le confort de l'aménagement et l'expertise en aménagement.

Nous avons construit les échelles, associées aux dimensions de chaque critère feuille de l'arborescence en collaboration avec l'expert en confort et l'expert en matériel roulant correspondant comme suit.

- 1- Identification des conséquences élémentaires associées au critère dans les cahiers des charges, puis validation avec l'expert en confort.
- 2- Construction et validation avec l'expert en confort des échelles correspondant aux conséquences élémentaires associées au critère, à partir des spécifications des cahiers des charges ou à partir des études qui ont été menées sur la corrélation entre mesures physiques et confort ressenti.
- 3- Validation des deux étapes précédentes avec l'expert en matériel roulant et

modification si nécessaire.

3.5.1.5 Agrégation des critères

La quatrième étape de l'approche consiste à agréger les critères de confort, afin d'obtenir une évaluation globale, en utilisant des méthodes d'agrégation multicritère présentées à la section 1.5 du chapitre 1. Cette étape nécessite une méthodologie, d'une part, pour le choix des méthodes d'agrégation à utiliser, mais aussi, pour l'élicitation des paramètres décisionnels associés à ces méthodes en utilisant l'information préférentielle fournie par le décideur.

La problématique à laquelle nous avons abouti, nous contraint à choisir des méthodes dont le résultat peut être exploité pour répondre à des problématiques de tri mais aussi de rangement au sein des catégories. De plus, avec la structure de note modèle conceptuel (modèle hiérarchique), nous devons utiliser à chaque nœud de l'arborescence une méthode d'agrégation qui n'est pas nécessairement la même pour tous les nœuds.

Cette étape a nécessité l'intervention des experts en confort et des décideurs pour l'élicitation des paramètres décisionnels des méthodes utilisées. Les experts en confort sont intervenus au niveau des nœuds qui correspondent à la perception des voyageurs et les décideurs, au niveau des nœuds représentant la formulation de leurs besoins. Nous avons commencé l'étape d'agrégation à partir des feuilles de l'arborescence. Pour chaque nœud, nous avons donc :

- 1- choisi la méthode d'agrégation selon :
 - la nature des échelles (ordinales, cardinales, hétérogènes, homogènes),
 - le nombre de critères devant être agrégés en même temps,
 - l'information intercritères (critères substitutifs, complémentaires, compensatoires, qui ont un pouvoir de véto).
- 2- élicité les préférences du décideur ou de l'expert. Cela consiste :
 - soit à déterminer, en utilisant l'information préférentielle, les paramètres décisionnels de la méthode d'agrégation en appliquant les procédures génériques d'élicitation des préférences présentées à la section 1.6 du chapitre 1, ou d'autres procédures plus spécifiques qui seront présentées au chapitre 5, si la méthode utilisée comprend des paramètres décisionnels,
 - soit à construire des règles de décision directement avec l'expert ou le décideur.

3.5.2 Avantages et inconvénients de l'approche

Bien que la mise en œuvre de l'approche présente certaines difficultés liées à la construction du modèle d'évaluation, que nous verrons plus en détail aux chapitres

suivants, ainsi qu'au temps nécessaire à la sollicitation et aux interactions avec les intervenants, l'approche offre plusieurs avantages.

- **Prise en compte de la perception** : nous verrons au chapitre 4 que le modèle de critères sur lequel sera fondé l'outil prend en compte des facteurs importants liés à la perception des voyageurs. Cette considération *a priori* des facteurs perceptifs dans le modèle le rendrait plus réaliste que les modèles d'évaluation du confort présentés au chapitre 2.
- **Modèle d'évaluation générique** : les connaissances acquises sur le confort peuvent être sujettes à évolution. Bien que certaines connaissances, qui seront acquises, ne pourront pas être insérées dans le modèle après la mise en œuvre de l'outil car il est difficile de prévoir à l'avance les évolutions pouvant arriver, certaines de ces connaissances pourront être insérées dans le modèle sans changer sa structure. Ces évolutions peuvent concerner les données perceptives mais aussi l'agrégation des critères de confort.
- **Construction collaborative avec les intervenants** : nous avons vu à la section précédente qu'il y avait une forte implication des intervenants dans toutes les étapes de notre approche. Cela minimise le risque de ne pas répondre aux bons besoins et donne donc plus de légitimité à l'approche et moins de controverse. En revanche, nous allons voir au chapitre 7 que cette forte implication des intervenants peut nécessiter beaucoup de temps dans l'organisation de réunions.

Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que le problème pour lequel l'aide à la décision a été sollicitée consiste à fournir aux intervenants du processus un outil qui permet d'avoir une vision globale du confort tel qu'il est perçu par les voyageurs dans les trains TGV proposés par les constructeurs lors des réponses à un appel d'offre. Il permettra également d'aider les intervenants à formuler leurs besoins et spécifier les critères de confort dans les documents destinés aux lancements des appels d'offres. Il servira enfin d'outil d'aide à la négociation avec le constructeur choisi afin d'apporter les meilleurs développements techniques à l'offre en terme de confort. L'analyse du processus de décision associé à l'achat et la rénovation d'un TGV a permis d'identifier :

- les différents intervenants avec qui nous allons interagir, leurs rôles ainsi que leurs préoccupations,
- les informations et données que nous allons utiliser,
- les étapes du processus dans lesquelles l'outil sera nécessaire,

Nous avons présenté dans la dernière section les principales étapes de l'approche adoptée afin de définir la problématique et construire le modèle d'évaluation sur

lequel sera fondé l'outil. Nous verrons aux chapitres suivants le détail de ces différentes étapes ainsi que les difficultés que nous avons rencontrées dans notre processus d'aide à la décision.

Chapitre 4

Construction des critères

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les étapes qui ont mené à la construction des critères de notre problème qui comprend la définition des critères (le modèle conceptuel) de confort sur lesquels seront évalués les trains ainsi que la construction des échelles, ce qui correspond à la troisième et à la quatrième étape de notre approche présentée au chapitre précédent. Ces deux étapes ont nécessité la collaboration des experts en confort, des experts en matériel roulant ainsi que les décideurs (voir section 3.4 au chapitre 3).

À la section 4.1, nous allons présenter les étapes que nous avons suivies pour la construction du modèle conceptuel en partant de deux préoccupations principales exprimées par les intervenants dans le processus : 1- Le modèle doit représenter le plus possible la perception des voyageurs. 2- Le modèle construit doit être conforme aux besoins exprimés par les intervenants par rapport à l'utilisation de l'outil. Nous allons voir à la section 4.2 en quoi consiste la prise en compte de la perception du confort dans notre modèle. À la section 4.3, nous présenterons le modèle conceptuel construit en mentionnant si les conditions théoriques sur la construction des critères sont vérifiées. Nous montrerons ensuite à la section 4.4 les étapes suivies pour la construction des échelles correspondant aux critères du modèle conceptuel. La section 4.5 est consacrée à la justification de certaines options que nous avons prises lors de ces deux étapes de notre approche, ainsi qu'aux améliorations possibles à ces étapes. Nous finirons ce chapitre par un bilan de ce qui a été réalisé sur la construction du modèle conceptuel et des échelles. Nous discuterons également des perspectives par rapport à ce qui reste à réaliser à ces deux étapes.

4.1 Les étapes suivies pour la construction du modèle conceptuel

La première préoccupation lors de la construction du modèle conceptuel est de veiller à ce qu'il représente le plus possible le confort tel qu'il est perçu par les voyageurs (voir la section 2.3 au chapitre 4). Cependant, les besoins formulés par les intervenants dans le processus de décision, auxquels doit répondre l'outil, peuvent affecter la structure de ce modèle (surtout dans la construction des critères). La difficulté est de veiller à ce que la prise en compte de ces besoins ne soit pas en contradiction avec cette préoccupation principale. Dans cette section, nous allons voir le cheminement suivi pour construire ce modèle. Pour cela, nous allons commencer par montrer comment nous sommes passés de ces besoins à des interrogations auxquelles nous devons répondre afin de construire un modèle conceptuel en s'assurant que les facteurs perceptifs les plus importants (traduisant la perception des voyageurs) sont pris en compte. Nous essayerons ensuite de déterminer le type de modèle que nous allons utiliser puis de présenter les tâches à accomplir afin de pouvoir le construire.

4.1.1 Des besoins et préoccupations aux interrogations

Afin d'identifier le type de modèle conceptuel que nous avons choisi et de le construire, nous avons dû identifier les interrogations auxquelles nous devons répondre, issues de deux types de besoins et préoccupations (pouvant être contradictoires) identifiés lors d'interactions avec les différents intervenants (décideurs, experts en confort et experts CIM) dans le cadre de l'analyse du processus de décision.

- **Les besoins par rapport à l'utilisation de l'outil :** posséder un outil d'aide à la décision qui permet de juger les offres (aide à l'évaluation), d'aider les experts à spécifier les critères qui ont un impact sur le confort dans les cahiers des charges ainsi que les décideurs lors de la rédaction des EFB (aide à la spécification), et d'aider les décideurs ainsi que les experts à négocier avec le fournisseur choisi les choix techniques à mettre en œuvre (aide à la négociation).
- **Prise en compte de la perception dans le modèle :** le modèle doit être construit à partir de la perception des voyageurs afin que l'évaluation globale fournie par l'outil soit représentative du confort ressenti par les voyageurs. La prise en compte de la perception dans notre modèle est justifiée par le fait que le confort n'est pas uniquement une simple addition (ou juxtaposition) de ses composantes physiques mais dépend aussi d'autres facteurs perceptifs (voir la section 2.2.2 au chapitre 2).

A partir de ces besoins et préoccupations, nous avons identifié les interrogations suivantes dont les réponses sont nécessaires à l'identification du type de modèle conceptuel ainsi qu'à sa construction.

- Quelles sont les composantes du confort global dans un TGV, du point de vue voyageurs et comment elles s'organisent (leurs dépendances) ?
- Comment caractériser et formaliser la perception des voyageurs dans un modèle conceptuel ?
- Quelle lecture (signification de chaque critère) veut-on avoir afin de pouvoir formaliser les besoins des décideurs exprimés dans les EFB ?
- Quelles caractéristiques doit posséder un tel modèle afin que l'outil correspondant puisse facilement servir à négocier avec le fournisseur choisi ?

Nous tenterons de répondre à ces questions dans la suite de ce chapitre.

4.1.2 Quel type de modèle ?

A partir des interrogations identifiées à la section précédente, nous avons déduit certaines caractéristiques que doit posséder un tel modèle afin d'en identifier le type. Ce modèle doit donc :

- associer à chaque critère et à chaque point de vue identifiés, une sémantique qui a un sens pour chaque intervenant concerné (décideurs, experts et utilisateurs de l'outil) par ce critère ou ce point de vue (voir la figure 4.1, la figure 4.2, la figure 4.3, la figure 4.4 et la figure 4.5),
- rendre visible la décomposition des critères en sous critères afin d'être évalués si cela s'avère nécessaire, car cela faciliterait l'identification des composantes critiques qui sont sources d'un mauvais confort dans la phase de négociation avec le fournisseur,
- permettre de représenter les liens (les dépendances entre critères de confort) entre les différentes composantes identifiées afin de pouvoir les évaluer,
- avoir une structure qui nous permettra d'agrèger les critères de confort identifiés,
- prendre en compte les facteurs affectant la perception du confort par les voyageurs (les activités, les aspects liés au voyageur, etc.) car l'évaluation du confort, par les voyageurs, en dépend.

Le type de modèle qui nous a semblé le plus approprié et qui possède ces caractéristiques est *un modèle hiérarchique* que nous définissons de la manière suivante : le sommet représente l'évaluation globale. Ce sommet est décomposé en plusieurs autres critères dans le niveau suivant et ainsi de suite jusqu'au dernier niveau. Nous appellerons les critères du dernier niveau (qui sont non décomposables) des **feuilles**. Les composantes de chaque critère de l'arborescence constituent une famille de critères (au sens donné dans le chapitre 1).

L'avantage d'un modèle hiérarchique est qu'il est toujours possible d'avoir une famille de critères *intelligible* (cf. 1.2.3.2), car, lorsque le nombre de critères est important, ils ne sont pas agrégés en même temps (dans un seul niveau). De plus, la famille de critères est *opérationnelle* (cf. 1.2.3.2) dans un modèle conceptuel car il possède des caractéristiques qui nous permettent de répondre aux besoins exprimés quant à l'utilisation de l'outil fondé sur ce modèle.

4.1.3 Comment construire un tel modèle ?

Une fois les interrogations posées et le type de modèle déterminé nous avons dû réaliser les tâches suivantes afin de répondre à ces interrogations et construire le modèle hiérarchique :

- identifier les composantes du confort à prendre en compte dans le modèle ainsi que leurs dépendances dans la perception des voyageurs (voir la section 2.3 au chapitre 2) à partir des connaissances acquises à la SNCF (enquêtes et études),
- déterminer les facteurs qui affectent la perception de ces composantes qui doivent être pris en compte dans le modèle ,
- veiller à ce que la construction du modèle hiérarchique soit en adéquation avec la lecture désirée par les décideurs afin que l'outil puisse intégrer leurs spécifications,
- vérifier que le modèle hiérarchique respecte les exigences théoriques de cohérence sur la construction des critères (voir section 1.2.3 au chapitre 1) car l'objectif est de pouvoir utiliser des méthodes d'agrégation multicritère qui nécessitent le respect de ces conditions par le modèle.

Nous verrons dans la suite, plus en détail, en quoi consistent ces tâches et comment nous les avons réalisées.

4.2 La perception du confort et de ses composantes dans les trains

Le caractère global et multidimensionnel du confort, les dépendances entre ses composantes physiques et situationnelles (contextuelles) et l'influence d'autres facteurs, tels que les facteurs psychologiques, physiologiques, socio-culturels et anthropométriques, sur sa perception, complexifient son évaluation. Nous avons vu au chapitre 2 que des études et des enquêtes sur la perception du confort par les voyageurs, notamment dans le projet ACONIT [18], ont montré que la majorité des travaux menés jusqu'à présent sur la recherche d'indicateurs de confort global directement à partir de ses composantes physiques (dynamique, acoustique,

thermique, visuel), dans le domaine ferroviaire, à l'image des travaux de l'INRETS [71], du CERNE [20] et du RTRI [84] n'étaient pas satisfaisants car ces modèles n'étaient pas fondés sur la perception des voyageurs (ils reposaient sur des hypothèses d'ingénieurs) et les composantes physiques considérées n'étaient pas exhaustives.

Pour cela, notre modèle sera construit de telle sorte à ce que l'évaluation du confort des offres se fasse à partir des composantes physiques identifiées par les voyageurs, et que leur agrégation puisse intégrer, au mieux, la perception du confort par les voyageurs. Nous proposons, tout d'abord, d'identifier les facteurs qui affectent cette perception afin de pouvoir la formaliser et l'intégrer dans notre modèle

Définition 6 (Les facteurs affectant la perception des composantes du confort)

On définit un facteur affectant la perception du confort comme étant tout ce qui peut rendre différente la perception des composantes du confort physiquement mesurables (acoustique, dynamique, éclairage, siège, espace).

Ces facteurs peuvent être le fruit de **dépendances** ou **interactions** entre composantes du confort [80, 16, 49, 63]. Par exemple l'influence de l'acoustique sur la dynamique ou la sensibilité au bruit selon le type d'activité. Mais, ils peuvent être, aussi, d'ordre psycho-sociologiques (la mémoire et les représentations sociales) ou concerner la morphologie des voyageurs, l'âge, le confort en gare et la régularité.

Dans cette section nous n'allons pas citer les composantes du confort que nous allons prendre en compte dans notre modèle, chose qui sera faite à la section 4.3, mais nous allons plutôt nous intéresser aux facteurs qui affectent leur perception :

- les interactions entre les composantes physiques du confort,
- le type d'activité pratiquée,
- le facteur temporel,
- les facteurs individuels,
- la présence des autres voyageurs.

La prise en compte de la perception dans notre modèle se traduira par la prise en compte des facteurs identifiés comme étant importants par les enquêtes.

4.2.1 Les interactions entre composantes physiques du confort

Dans sa perception du confort, le voyageur peut associer plusieurs composantes entre elles, par exemple, il associe le mouvement du train (dynamique) et son bruit (acoustique) comme un indicateur de la vitesse à laquelle il circule. La difficulté est que ces interactions dépendent de nombreux facteurs (contextuels et individuels) dont la nature est difficile à caractériser et à associer à des paramètres physiques. De nombreux travaux de recherche pour l'élaboration d'un indicateur de confort

global dont ceux menés par des chercheurs de l'INRETS [71] et du CERNE [20], ont étudié les interactions entre composantes physiques de manière analytique sans s'intéresser à leur nature dans la perception des voyageurs. Dans l'étude menée par les chercheurs de l'INRETS [71], ils avaient défini des groupes de situations mais en prenant en compte uniquement certains facteurs de l'ambiance sensorielle (thermique, dynamique et acoustique). Bien que cette variabilité considérée n'était pas exhaustive (les autres facteurs étant fixés), les interactions entre les composantes étaient significativement différentes. Ces interactions sont en général de type **effet de masque** et **synergie** (positive ou négative).

a) L'effet de masque

Ce type de dépendance apparaît lorsqu'une ou plusieurs composantes du confort se dégrade(ent) à un point où :

- elle(s) masque(ent) l'effet de toutes les autres composantes sur le confort global bien que leurs niveaux de confort soient excellents,
- elle(s) masque(ent) l'inconfort d'une (ou plusieurs) composante(s) physique(s), ce qui réduit la sensation d'inconfort de cette(ces) dernière(s) par rapport à une situation d'ambiance normale.

Exemple 11 *L'expression du confort global dans [71] pour la situation où seule la composante acoustique était dégradée, ne dépendait que de cette dernière. Et la situation où la composante thermique était dégradée, l'inconfort de la composante acoustique diminuait par rapport aux conditions normales*

b) La synergie

Le fait que les composantes du confort soient perçues simultanément crée une synergie entre ces dernières qui se traduit par le fait que le niveau de confort d'une composante physique à un instant t s'exprime parfois (pas nécessairement de manière exclusive) en fonction du niveau de confort d'autres composantes physiques [80]. L'exemple suivant [71] illustre une synergie entre les composantes acoustique et thermique.

Exemple 12 *Dans une étude menée par les chercheurs du CERNE [71], l'indicateur acoustique $I_{0_t}(Leq)$ à un instant t , dépend des paramètres de l'environnement acoustique : Leq et d'une synergie $S(PMV, Leq)$ traduisant leur interférence avec les paramètres de l'environnement thermique : PMV [19]*

$$S(PMV, Leq) = (1,6 - |PMV|) \frac{75 - Leq}{1,5Leq} \quad (4.1)$$

Nous pouvons remarquer dans l'expression de cette synergie (voir équation (4.1)) que, selon l'ambiance considérée ($Leq < (\geq)75$ et $|PMV| < (\geq)1,6$), elle peut être positive lorsque $(1,6 - |PMV|) \times (75 - Leq) > 0$, ou négative lorsque $(1,6 - |PMV|) \times (75 - Leq) < 0$.

Nous avons vu dans cette section les différentes interactions entre les composantes physiques du confort et surtout qu'elles constituaient un facteur qui affecte à la fois le confort des composantes physiques mais aussi le confort global. Pour cela, le modèle conceptuel doit être conçu de telle sorte à ce que ces interactions puissent être prises en compte dans la phase d'agrégation.

4.2.2 Le type d'activité pratiquée dans le train

Le terme *activité* comprend tout ce que peut faire le voyageur dans le train (dormir, lire, admirer le paysage, se déplacer, etc.). Le type d'activité pratiquée est l'un des facteurs qui affecte le plus la perception (et donc l'évaluation des composantes physiques du confort) car les voyageurs évaluent le confort **en fonction de ce qu'ils font dans le train** et non pas de manière **absolue**.

Nous pouvons citer quelques exemples de variation de la perception des composantes physiques selon le type d'activité.

a) La composante acoustique

Les voyageurs sont plus sensibles aux bruits (du train ou des autres passagers) lorsqu'ils *se reposent* ou *dorment* que lorsqu'ils *discutent*, comme le confirme Mzali (2002) [63] : « *l'évaluation du confort acoustique par les personnes ne se limite pas à la simple prise en compte des sensibilités de l'oreille humaine en tant que récepteur acoustique mais s'établit dans un cadre plus complexe, intégrant les activités des personnes voyageant, les significations et objets en mémoire* ».

b) La composante posturale

Le confort du siège est jugé en fonction de l'activité pratiquée comme le montrent les résultats des enquêtes menées dans le projet ACONIT. En effet, chaque activité nécessite une posture qui est parfois très différente de la posture classique pour laquelle on demande habituellement aux voyageurs d'évaluer le confort du siège. Ce qui a conduit récemment à orienter les questionnaires sur l'évaluation du confort du siège selon les postures correspondant aux activités pratiquées, à l'image des chercheurs de l'université de Pohang en Corée du Sud [41] et plus récemment le projet Dyapos à la SNCF [35].

c) La composante éclairage

Les enquêtes menées dans le projet AL [26][27] ont montré que l'évaluation de *l'éclairage* était systématiquement associée à une activité : « *lumière trop forte pour dormir* », « *pas assez forte pour lire* ».

Le même type de remarques peut être fait sur les composantes *dynamique* et *thermique*.

4.2.3 Les facteurs individuels

Nous avons vu au chapitre 2 que les aspects liés à l'individu, ayant un impact sur la perception du confort dans les trains, regroupaient les facteurs psychologiques et socioculturels, la morphologie et l'âge des voyageurs.

- **Les facteurs psychologiques** : la perception n'est pas uniquement une réaction à des stimuli mais dépend également de facteurs psychologiques intégrant la mémoire. Bien que ces facteurs soient importants, il est difficile de les prendre en compte car ils varient d'un individu à un autre.
- **Les représentations sociales** : le confort est perçu différemment selon les motifs du voyages : professionnel ou loisir mais aussi selon les catégories sociales : première classe et deuxième classe. Il y a également d'autres facteurs culturels difficiles à caractériser.
- **La morphologie et l'âge** : le facteur *morphologie* affecte particulièrement l'évaluation du *confort postural*. Il concerne essentiellement *la taille et le poids*. En effet, un siège peut très bien convenir à un groupe morphologique et pas à un autre

Exemple 13 *Pour un siège dont la hauteur de l'assise est de x cm, peut convenir à une grande personne, alors qu'une petite n'arriverait même pas à poser ses pieds. Pour le même siège, l'espace pour les jambes disponible peut convenir à une petite personne alors que cela peut ne pas être le cas pour une grande.*

Pour ce qui concerne *l'âge* des voyageurs, peu de travaux ont été réalisés jusqu'à présent pour étudier l'évolution de la perception du confort avec l'âge. Il est probable, d'après les experts en confort, que la modification des capacités physiques et cognitives des personnes vieillissantes affectent la plupart des composantes du confort.

4.2.4 La présence des autres voyageurs

Ce facteur peut être considéré à l'image du facteur *type d'activité pratiquée*, comme étant l'un des facteurs qui affecte le plus la perception du confort. Le type de matériel proposé par les constructeurs peut jouer un rôle sur ce facteur en proposant des aménagements qui peuvent réduire l'inconfort (*le bruit des autres, la promiscuité et les gênes lors des déplacements*), ou améliorer le confort (*possibilité de discuter avec les autres*). Parmi les composantes du confort qui peuvent être affectées par ce paramètre, nous pouvons citer *l'acoustique, l'espace et les déplacements*.

a) L'acoustique

Le bruit des autres passagers est la source principale du confort et de l'inconfort acoustique, d'après les enquêtes menées dans le projet ACONIT, phase

2 [65] et plus récemment dans les projets Ambiances Lumineuses [26][27] et Esther [28].

b) L'espace

La présence des autres voyageurs provoque une gêne qui se traduit par la difficulté ou même l'impossibilité de maintenir ses distances et qui empêche le voyageur de construire sa zone vitale ce qui peut constituer une vraie source d'inconfort pouvant empêcher le voyageur de mener à bien ses activités comme *le repos, la lecture et le travail*.

c) Les déplacements

Les déplacements dans le train peuvent être fortement affectés par la présence des autres voyageurs. Cela peut se voir notamment lors de l'accès au train, lorsque le voyageur assis coté fenêtre quitte sa place (il est gêné par celui qui est assis coté couloir) ou lors des déplacements dans le couloir.

4.2.5 Le facteur temporel

Nous avons vu au chapitre 2 que la durée d'exposition à un stimuli peut avoir un effet cumulatif qui peut se traduire soit par une **hypersensibilité** (fatigue) vis-à-vis des composantes physiques, soit par un phénomène **d'accoutumance** [12]. Par ailleurs, la perception du confort à un instant dépend d'une part des réactions subjectives aux divers stimuli à cet instant (avec prise en compte de l'effet cumulatif pour chaque stimulus) et d'autre part, des réactions qui les ont précédées aux mêmes (ou à d'autres) stimuli (**effet mémoire**) [20].

Remarque 9 *Nous avons vu dans cette section les facteurs qui affectent (ou qui affecteraient selon les experts) la perception des composantes du confort de manière générale. La prise en compte de ces facteurs, dans le modèle conceptuel, constitue la principale particularité de notre approche par rapport aux autres modélisations. Néanmoins, nous n'allons pas prendre en compte l'intégralité de ces facteurs dans notre modèle, pour les raisons suivantes*

- a- La famille de critères issue de cette modélisation doit être conçue pour **juger les offres des constructeurs**. Par conséquent tout facteur qui ne permet pas de différencier les offres ne peut être pris en compte (les retards, le confort en gare, le choix de la place, le personnel) car sinon on violerait l'une des conditions théoriques de construction des critères (la minimalité).*
- b- Ces facteurs doivent être communs au moins à une catégorie de voyageurs pouvant être caractérisée afin de construire des évaluations consensuelles des composantes physiques du confort : en effet certains facteurs psychologiques comme la mémoire intégrant l'expérience du voyage en train peuvent influen-*

cer l'évaluation des composantes physiques. Le fait de prendre en compte tous ces paramètres reviendrait à évaluer le confort de chaque individu.

- c- Il n'est pas facile de déterminer ou de caractériser la nature des influences de **tous** les facteurs (manque d'information). A titre d'exemple on pourrait citer l'interaction entre l'acoustique et la dynamique dont on ne connaît pas, pour l'instant la nature.

D'autre part, il existe des facteurs qui affectent la perception d'une composante de confort en particulier (comme les saisons pour le confort thermique). Nous avons jugé utile de présenter ces facteurs dans la section 4.3.4 avec les composantes du confort associées, afin de mieux comprendre leur influence.

4.3 Le modèle conceptuel

Nous avons vu à la section précédente les facteurs qui affectent la perception du confort par les voyageurs afin de comprendre comment ils seront intégrés dans le modèle conceptuel. Le modèle conceptuel doit tout d'abord refléter la perception du confort par les voyageurs, cela revient à identifier les composantes du confort à prendre en compte, la nature de leurs dépendances et leurs interactions mais surtout à être capable d'identifier, puis d'intégrer dans le modèle, les facteurs perceptifs importants. La deuxième préoccupation lors de la construction de ce modèle est de s'assurer qu'il soit capable de formaliser les spécifications des décideurs (EFB) en terme de confort afin que l'évaluation globale fournie par l'outil corresponde à la cible désirée. En plus de ces deux préoccupations, la construction de ce modèle nécessite la vérification des conditions théoriques sur la construction des critères (voir chapitre 1).

La construction de ce modèle s'est faite en interaction avec les experts en confort, les décideurs ainsi que les experts en matériel roulant. A l'issu des premières discussions avec les experts en confort et les décideurs, nous avons construit un modèle hiérarchique qui représente au mieux la perception des voyageurs et qui prend en compte les souhaits des décideurs. Nous avons ensuite présenté ce modèle aux experts en matériel roulant (qui seront également les principaux utilisateurs de l'outil), qui ne l'ont pas trouvé approprié pour en faire un outil d'aide à la négociation (voir la section 4.5.1 pour plus de détails). Pour cela, ils ont demandé à changer la structure du modèle afin qu'il leur soit plus approprié (voir la section 4.5.1), cependant, ce changement aurait été effectué aux dépens d'une bonne représentation de la perception du confort par les voyageurs, qui est une préoccupation principale. Nous avons quand même apporté certaines modifications afin que l'outil réponde au mieux à leur préoccupation.

Nous présenterons dans cette section les différents niveaux du modèle obtenu (voir tableau 4.2 pour une vision synthétique) en précisant pour chaque nœud si

les conditions sur la construction des critères sont vérifiées.

4.3.1 Premier niveau

La décomposition du confort global s'est faite à partir du déroulement classique d'un voyage dans un train. Pour des raisons d'intelligibilité, nous avons séparé les aspects qui relèvent plutôt de facteurs individuels (qui sont beaucoup moins consensuels) de ceux qui sont plutôt liés au contexte. Lors du premier contact, le voyageur est intéressé par l'aspect extérieur et intérieur du train (couleurs, forme des objets, sentiment de propreté, matériau, sentiment de vétusté) dont le jugement reste plus lié aux représentations sociales et culturelles qu'à l'usage et à la pratique. Nous avons choisi comme sémantique, pour nommer ces aspects : *la qualité perçue* qu'on verra plus en détail à la section 4.3.2.2. Pour ce qui concerne les aspects qui sont plutôt liés au contexte et à l'expérience du voyage en train (la pratique des activités dans le train), ils apparaissent lorsque le voyageur est soit assis, soit debout dans le train. Cela engendre une préoccupation de *confort assis* et de *confort debout* en s'affranchissant de *la qualité perçue* pour garder cette intelligibilité qui est importante pour les experts en confort afin qu'ils puissent exprimer leurs préférences.

Les trois grandes composantes du confort global dans les TGV (voir la figure 4.1) sont donc, *le confort assis*, *le confort debout* et *la qualité perçue*. Elles forment une famille cohérente de critères car elles sont exhaustives par construction (les trois critères sont représentatifs du déroulement classique d'un voyage en TGV), minimales car si on supprime l'une de ces composantes la famille n'est plus exhaustive, et monotones car l'augmentation du confort de l'une des trois composantes ne peut pas détériorer l'évaluation globale. La composante la plus importante reste le confort assis car les voyageurs passent la majorité de leur temps assis. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes plus concentrés sur la construction et l'agrégation des critères du confort assis. Pour le confort debout, nous avons appliqué la même méthodologie avec C. Thierry [88] pour construire la partie du modèle conceptuel correspondante.

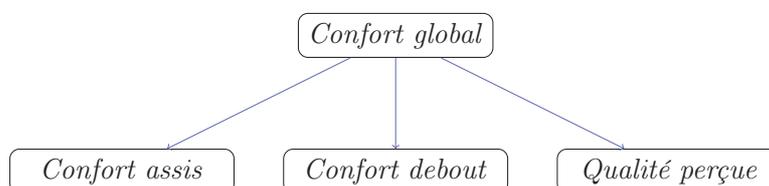


Figure 4.1 – Premier niveau de la hiérarchie du modèle conceptuel de confort global

4.3.2 Deuxième niveau : décomposition du confort assis, confort debout et de la qualité perçue

Le deuxième niveau comprend les composantes du confort assis, du confort debout et de la qualité perçue.

4.3.2.1 Le confort assis et le confort debout

Nous avons décomposé le confort debout et le confort assis en type d'activités que les voyageurs pratiquent. Cette décomposition est justifiée par la fait que :

- sous réserve de les avoir toutes identifiées, elles sont une représentation exhaustive de ce que font les voyageurs assis ou debout dans un train,
- la perception des composantes physiques du confort (voir section 4.2.2) est différente, selon les activités pratiquées, car ces activités constituent **le contexte** du voyage en TGV,
- elles constituent un bon indicateur de confort car les voyageurs interrogés lors des enquêtes qui arrivaient à mener à bien leurs activités donnaient une bonne évaluation de leur confort (assis et debout), et inversement, les voyageurs qui donnaient une bonne évaluation de leur confort arrivaient à mener à bien leurs activités,
- lors de la formulation des EFB et afin de cibler les clients, le type de voyageurs peut être caractérisé par les activités qu'ils pratiquent. En effet, les voyageurs en famille sont plus amenés à discuter entre eux que les voyageurs seuls. Les voyageurs pour un motif professionnel sont plus amenés à travailler que les voyageurs pour loisir. Selon la cible choisie par les décideurs, l'outil pourra gérer l'importance des activités afin que l'évaluation globale reflète bien le confort perçu par la cible.

On associe donc à chaque activité un critère qu'on nommera : **Le confort dans la pratique de l'activité** qui dépendra des autres composantes du confort. Le confort assis et le confort debout dépendront du confort dans la pratique de ces activités.

Les activités du confort assis et du confort debout considérées dans le modèle conceptuel (voir la figure 4.2 et la figure 4.3) ont été identifiées avec les experts en confort à partir des résultats d'enquêtes puis validées par les décideurs.

Pour le confort assis, nous avons retenu cinq types d'activités : *Lire, Travailler sur PC, Discuter, Se reposer/Dormir/Admirer le paysage* et *Manger/Boire*, théoriquement elles ne sont pas exhaustives mais elles représentent plus de 80% des activités pratiquées, les autres activités sont marginales et n'ont pas été considérées.

Les activités du confort debout ne sont pas exhaustives non plus, car nous n'avons pas considéré les activités *toilettes* et *confort dans le bar* par volonté des

décideurs de se concentrer sur la salle voyageurs et par manque de connaissances sur la perception des voyageurs pour construire un modèle. Les activités que nous avons considérées pour le confort debout sont : *Se déplacer*, *Ranger les bagages*, *Accessibilité* et *Téléphoner/S'informer/Discuter*.

La condition d'exhaustivité n'est pas vérifiée en théorie pour les activités du confort assis et du confort debout mais elle est vérifiée en pratique. Pour ce qui concerne les deux autres conditions (minimalité et monotonie), elles restent vérifiées.

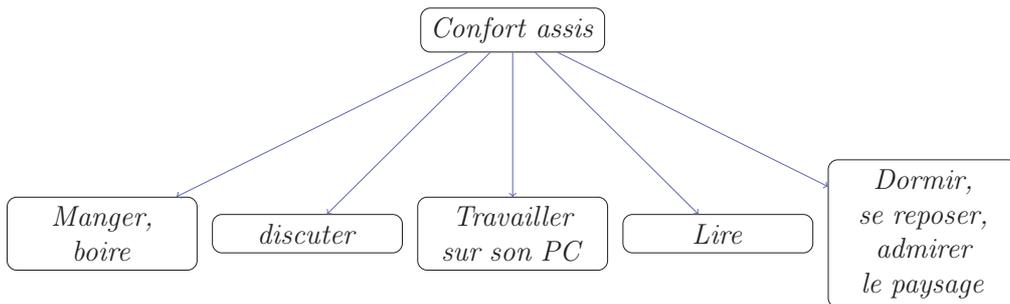


Figure 4.2 – Deuxième niveau de la hiérarchie du modèle conceptuel de confort global : les activités du confort assis

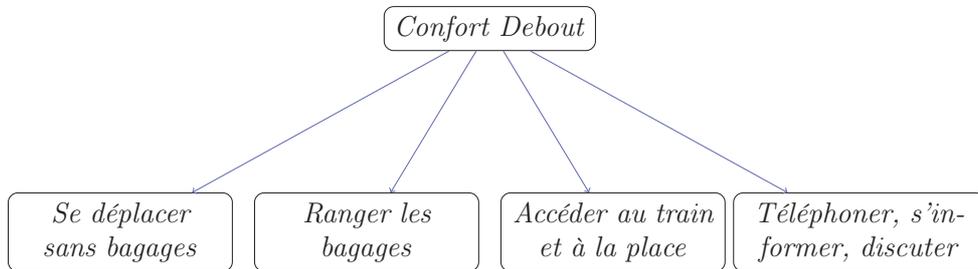


Figure 4.3 – Deuxième niveau de la hiérarchie du modèle conceptuel de confort global : les activités du confort debout

4.3.2.2 La qualité perçue

La qualité perçue est tout ce qui peut affecter le sentiment du voyageur lors de son premier contact avec le train, cela comprend entre autres les couleurs, l'éclairage, les formes des objets, le tactile, les sentiments de vétusté et de propreté. La qualité perçue intervient également au cours du voyage lorsque le voyageur regarde

ou touche des éléments de son environnement (tissus de l'appui-tête, finitions du siège, etc.) ou, lorsqu'il utilise des équipements (ouvrir la porte de la salle, déplier la tablette). Pour certains de ces aspects (les formes, les couleurs, l'éclairage) il n'existe pas de critères objectifs car la perception des composantes de la qualité perçue fait appel à des facteurs psychologiques et socioculturels difficiles à identifier et qui sont différents d'une personne à une autre, les offres des constructeurs seront donc comparées par rapport à la demande des décideurs à l'aide d'outils comme les images photoréalistes où des angles de vue doivent être précisés. Les experts noteront ensuite la conformité de ces images avec la demande, ce qui servira d'échelle pour ces aspects. Tandis que pour d'autres aspects comme la vétusté et la propreté, il existe des critères objectifs dans les cahiers des charges qui serviront d'échelle. La cohérence de la famille de critères composant la qualité perçue n'a pas encore été vérifiée.

4.3.3 Troisième niveau : la variabilité interindividuelle

Comme nous l'avons mentionné au début de cette section, le troisième niveau concerne uniquement la décomposition du confort assis car nous n'avons pas traité dans la thèse la décomposition du confort debout ainsi que la qualité perçue.

La perception du confort est différente d'un individu à un autre, il est donc important de prendre en compte cette différence dans le modèle bien que l'objectif ne soit pas d'évaluer le confort de chaque individu. Nous avons décidé d'intégrer la variabilité interindividuelle à ce niveau du modèle en considérant des groupes de voyageurs de telle sorte à ce que les voyageurs qui appartiennent à un même groupe partagent la même perception des composantes du confort. La méthode de construction de ces groupes consiste à les caractériser à partir des facteurs individuels (cf. 4.2.3), qui affectent la perception des composantes du confort, nous avons vu qu'ils pouvaient être psychologiques, socioculturels, morphologiques et liés à l'âge. Afin d'effectuer cette caractérisation il est important de connaître l'influence de chaque facteur considéré dans la perception d'au moins une composante du confort, ce qui n'est pas facile pour les facteurs psychologiques.

Compte tenu des connaissances actuelles en confort, les études réalisées [35] ont pu caractériser ces groupes, uniquement avec le facteur « morphologie » qui affecte les composantes *postural* et *espace* en considérant **la taille, l'IMC**¹ (l'indice de masse corporelle) et **la forme de la colonne vertébrale**. Trois groupes morphologiques disjoints (qui couvrent 81% de la population) ont été obtenus, tel que les personnes d'un même groupe partagent la même perception du *confort postural* et de *l'espace à la place* (voir tableau 4.1) et un quatrième groupe (« Les autres ») qui ne peut pas être pris en compte dans notre modèle car les personnes

1. $IMC = \frac{Poids (kg)}{Taille^2 (m)}$

le constituant ne partagent pas la même perception.

L'avantage de la prise en compte de la variabilité interindividuelle est de permettre d'avoir une lecture cohérente avec les souhaits des décideurs c.-à-d. le modèle permet d'obtenir le confort perçu par un voyageur appartenant à un groupe donné, dans la pratique d'une activité. Alors que si cette variabilité était prise en compte dans des niveaux inférieurs du modèle, on perdrait cette information. D'autres raisons que nous verrons à la section 4.5, nous ont également incités à prendre en compte la variabilité interindividuelle à ce niveau.

Groupes	Taille (cm)	IMC
Petits	[150; 163, 5]	[15; 25]
Moyens]163, 5; 176, 5]	[18; 40]
Grands]176, 5; 200]	[18; 40]

Tableau 4.1 – *Caractérisation des groupes morphologiques à partir de la taille et de l'IMC [35]*

Nous obtenons donc à ce niveau, pour chaque activité, trois critères correspondant aux trois groupes morphologiques (voir la figure 4.4) tel que chaque critère G_i représente *le confort d'une personne appartenant à G_i , dans la pratique d'une activité* et l'évaluation du confort dans la pratique d'une activité est obtenu à partir du confort dans la pratique de cette activité par les voyageurs appartenant à ces trois groupes. La famille de ces trois critères n'est pas exhaustive car il y a 19% des voyageurs qui ne sont représentés par aucun de ces groupes. Néanmoins, nous avons considéré avec les décideurs que ce pourcentage n'était pas significatif mais qu'il constituait également une limite à ne pas dépasser. La famille de critères est donc minimale. Elle est également monotone car on peut considérer que l'amélioration du confort d'un groupe dans la pratique d'une activité ne détériore pas l'évaluation du confort de celle-ci.

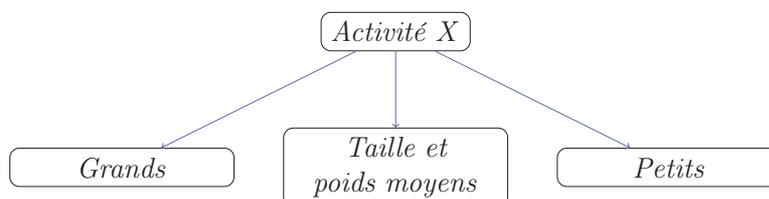


Figure 4.4 – *Troisième niveau de la hiérarchie du modèle conceptuel de confort global : les groupes morphologiques*

4.3.4 Quatrième niveau : les modalités de confort

Le quatrième niveau est constitué des composantes physiques et sensorielles qui affectent le confort dans la pratique des activités du *confort assis* (voir la figure 2.3 au chapitre 2). La dépendance entre les composantes physiques du confort et les activités pratiquées, dans la perception des voyageurs, a été démontrée dans le projet ACONIT (lien de « cause à effet » entre les composantes physiques et le confort dans la pratique des activités). L'évaluation du confort d'un groupe dans la pratique d'une activité se fera donc à partir de ces composantes, dont l'importance et les échelles associées (type d'échelle ou valeurs des données perceptives) peuvent varier selon l'activité.

Nous avons regroupé les composantes du confort en modalités pour les raisons suivantes :

- la sémantique de chaque modalité fait référence soit à une expertise de confort pour faciliter l'élicitation de l'information préférentielle auprès des experts en confort, soit à une expertise matériel (correspondant à un fascicule du cahier des charges) afin de faciliter la mise en œuvre d'un outil d'aide à la négociation,
- l'intelligibilité : nous avons regroupé ces composantes en sept modalités afin d'éviter d'avoir plus d'une douzaine de critères à agréger sur un même niveau.

Les sept modalités de confort (voir la figure 4.5) que nous verrons plus en détail à la section suivante sont : *le confort du siège environné, l'acoustique, la dynamique, l'ambiance lumineuse (éclairage), le thermique, le tympanique et l'aménagement et services*. L'avantage d'intégrer ces modalités sur un même niveau est de pouvoir prendre en compte les interactions mentionnées à la section 4.2.1 lors de la phase d'agrégation.

La famille de critères composée des sept modalités est exhaustive car ces modalités regroupent toutes les composantes physiques du confort identifiées avec les experts en se basant sur le projet ACONIT. Par contre, il n'est pas facile de vérifier si cette famille est monotone et minimale car les interactions entre les composantes du confort sont complexes et ne sont pas toutes connues, ce qui nous empêche de vérifier ces conditions avec les connaissances actuelles.

Nous verrons dans la suite de cette section les derniers niveaux de notre modèle hiérarchique, qui correspondent aux composantes de chaque modalité. Nous nous sommes servi, avec les experts, d'études plus spécifiques à chaque modalité afin d'identifier ces composantes : Dyapos [35] pour la modalité siège environné, Esther [86] pour la modalité thermique, Ambiances Lumineuses [85] pour la modalité ambiance lumineuse. Nous avons sollicité également les experts en matériel roulant afin de compléter certaines composantes. D'autre part, nous saisissons l'occasion pour présenter les modèles d'évaluation et méthodes de spécifications associés à chaque modalité, et qui existent dans la littérature, afin d'illustrer la particularité

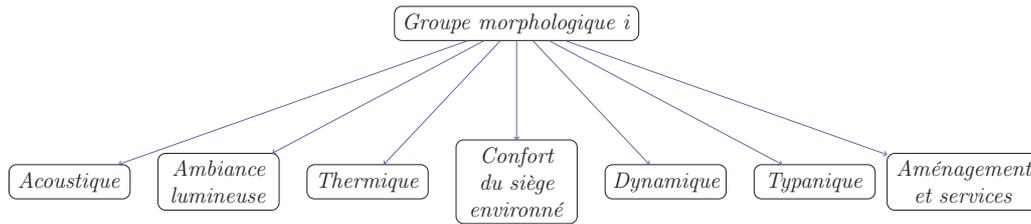


Figure 4.5 – Quatrième niveau de la hiérarchie du modèle conceptuel de confort global : les modalités de confort associées aux activités du confort assis

de notre modèle.

Les exigences théoriques sur la construction des critères sont vérifiées sauf mention contraire.

4.3.5 La modalité acoustique

Dans la littérature, il existe plusieurs indicateurs acoustiques pour mesurer le niveau de bruit. L'indicateur le plus utilisé en pratique est le niveau de pression acoustique en dBA. Cet indicateur est essentiellement utilisé pour des spécifications de santé. En confort, le niveau de bruit perçu est différent selon les fréquences dans lesquelles il est émis par une source. L'oreille humaine se caractérise par une très large capacité d'audition en fréquence (de 20 à 20 000 Hz). Pour cela, d'autres indicateurs ont été développés afin de prendre en compte la sensibilité différenciée de l'oreille selon les fréquences. Ces indicateurs sont généralement construits à partir des niveaux de bruit pondérés par les fréquences. La pondération la plus utilisée est la pondération *A*. L'indicateur correspondant est le niveau de pression acoustique équivalent *Leq* mesuré en dBA. Pour ce qui est du confort acoustique dans les trains, des études ont montré que d'autres indicateurs, comme *la sonie* [24], étaient plus appropriés que le *Leq* [95].

Une étude qui a été menée à la SNCF sur la perception du confort acoustique [63] dans les trains, a montré qu'au delà du niveau sonore d'une source et des fréquences dans lesquelles ce bruit est émis, la perception du confort acoustique dépend de **la nature** de cette source (portes, crissement, bruit des autres voyageurs, bruit du train). Cette étude ainsi que le projet ACONIT ont tenté d'identifier ces sources ainsi que leur importance dans la perception.

Dans notre modèle, la modalité acoustique regroupe les différents types de bruits pouvant être une source de gêne auditive pour les voyageurs, identifiés dans les études précédentes. Ces types de bruit sont : le bruit des autres voyageurs, le bruit de fond et les émergences. D'un point de vue expert acoustique, il y a deux types d'émergences : fréquentielles et temporelles, nous avons donc décidé

	Niveau 1	Niveau 2 : les activités	Niveau 3 : les groupes	Niveau 4 : les modalités de confort
Le confort global	Le confort assis	Manger, boire	Grands, Moyens et Petits	- Acoustique - Ambiances lumineuses - Thermique - Confort du siège environné - Dynamique - Tympanique - Aménagement et service
		Discuter	Grands, Moyens et Petits	- Acoustique - Ambiances lumineuses - Thermique - Confort du siège environné - Dynamique - Tympanique - Aménagement et service
		Travailler sur PC	Grands, Moyens et Petits	- Acoustique - Ambiances lumineuses - Thermique - Confort du siège environné - Dynamique - Tympanique - Aménagement et service
		Lire	Grands, Moyens et Petits	- Acoustique - Ambiances lumineuses - Thermique - Confort du siège environné - Dynamique - Tympanique - Aménagement et service
		Dormir, se reposer, admirer le paysage	Grands, Moyens et Petits	- Acoustique - Ambiances lumineuses - Thermique - Confort du siège environné - Dynamique - Tympanique - Aménagement et service
	Le confort debout	Non traité dans la thèse		
	La qualité perçue	Non traitée dans la thèse		

Tableau 4.2 – Les quatre premiers niveaux du modèle conceptuel de confort

de décomposer le critère *émergences* en *émergences temporelles* et *émergences fréquentielles* (voir la figure 4.6) mais l'inconvénient de cette décomposition est que la famille composée de ces deux critères peut être redondante (non minimale) car nous verrons dans l'annexe A.1.2 qu'une source de bruit (porte, climatisation) peut émerger en fréquentiel et en temporel à la fois (dans ce cas l'émergence sera comptabilisée deux fois). D'autre part, le fait de prendre en compte qu'un seul type d'émergences rendrait la famille non exhaustive, ce qui est plus problématique car

l'information peut être perdue.

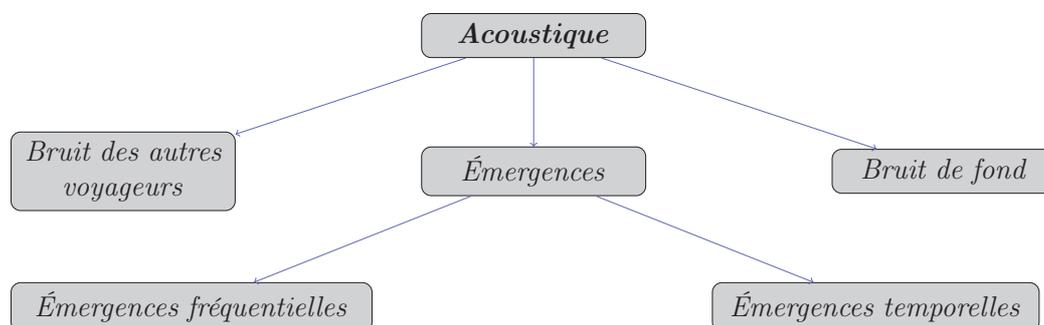


Figure 4.6 – Les composantes de la modalité Acoustique

Remarque 10 La particularité de notre modèle par rapport aux modèles existants est de différencier les sources de bruit (voir les sources émergentes dans l'annexe A.1.2) afin de permettre aux experts de pouvoir exprimer leurs préférences lors de la phase d'agrégation en donnant plus ou moins d'importance à une source.

4.3.6 La modalité dynamique

Les indicateurs de confort dynamique, ont pour objectif de mesurer l'inconfort occasionné par les vibrations. A l'image de la perception du bruit, la perception des vibrations dépend des fréquences dans lesquelles elles apparaissent. Ils dépendent également des directions de ces vibrations (horizontales, verticales et transversales) et du point d'entrée (assise, dossier et plancher). Les vibrations peuvent avoir un effet sur *le confort vibratoire* (secousses) à des fréquences entre 0,5 et 80 Hz, mais aussi sur la perception de la *cinétose* (mal des transports) entre 0,1 et 0,5 Hz [38].

Les indicateurs les plus utilisés pour évaluer le confort vibratoire sont le Nmv et le Nva [11]. Le Nmv est actuellement utilisé à la SNCF pour spécifier le confort dynamique. Il est calculé à partir des accélérations longitudinales, transversales et horizontales pondérées par les fréquences et mesurées sur le plancher. En revanche, pour le calcul du Nva , ces accélérations sont mesurées sur le plancher et sur le siège. Il rend donc mieux compte de la perception du confort vibratoire lorsque le voyageur est assis. Cependant, cet indicateur n'est pas spécifié actuellement dans les cahiers des charges. Pour ce qui concerne la cinétose, l'indicateur utilisé est le $MSDV_z$ [38]. Il ne dépend que des accélérations verticales mesurées en basses fréquences, car le mal des transports apparaît uniquement à ces fréquences. Ces indicateurs (Nmv , Nva et $MSDV_z$) ne dépendent pas uniquement du matériel roulant, ils dépendent également de la qualité de la voie. En pratique, les mesures

sont effectuées sur des voies qui ne sont pas nécessairement les voies sur lesquelles les trains circulent.

Dans notre modèle, la modalité dynamique regroupe les types d'inconfort générées par les vibrations et les mouvements du train qui correspondent aux gênes mentionnées dans la littérature, en l'occurrence, les vibrations et la cinétose (voir la figure 4.7).

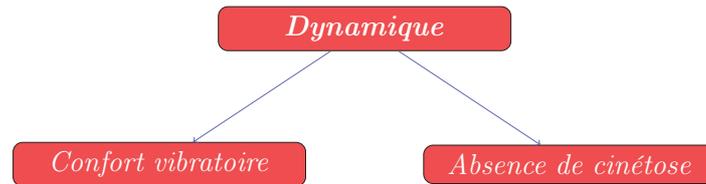


Figure 4.7 – Les composantes de la modalité Dynamique

4.3.7 La modalité thermique

Dans la littérature, le modèle le plus connu et le plus utilisé pour l'évaluation du confort thermique est le modèle de Fanger [19]. Ce modèle n'est valable que dans les situations statiques, dans des conditions climatiques constantes (les conditions climatiques ne doivent pas varier au cours du temps) et pour des activités constantes. Par conséquent il ne peut pas être utilisé pour l'évaluation du confort thermique dans les trains.

Un résumé bibliographique sur les précédentes études qui ont été réalisées sur la perception et l'évaluation du confort thermique, a montré qu'il y avait des données perceptives qui sont importantes pour l'évaluation du confort thermique et qui ne peuvent pas être prises en compte dans le modèle de Fanger :

- la perception du confort thermique peut changer d'une saison à une autre,
- la perception peut être différente d'un individu à un autre, alors qu'il n'est pas possible de prendre en compte cette variabilité dans le modèle de Fanger bien que ce dernier arrive à l'estimer.

D'autres études [66] [57] ont également montré expérimentalement que les prédictions de ce modèle ne reflétaient pas le confort ressenti en train.

D'autres part, les études menées dans le projet Esther [86] ont montré expérimentalement que le confort thermique était perçu différemment par les voyageurs selon les saisons (hiver, été et mi-saison). Il correspond à une absence de sensations désagréables des conditions thermiques liées à la température et aux vitesses d'air (il faut qu'il ne fasse ni trop chaud ni trop froid) ainsi qu'à une absence de rupture de ces conditions comme les courants d'air et les changements brusques de

températures intérieures. Nous nous sommes fondés sur ces études récentes pour construire les critères de la modalité thermique (voir la figure 4.8).

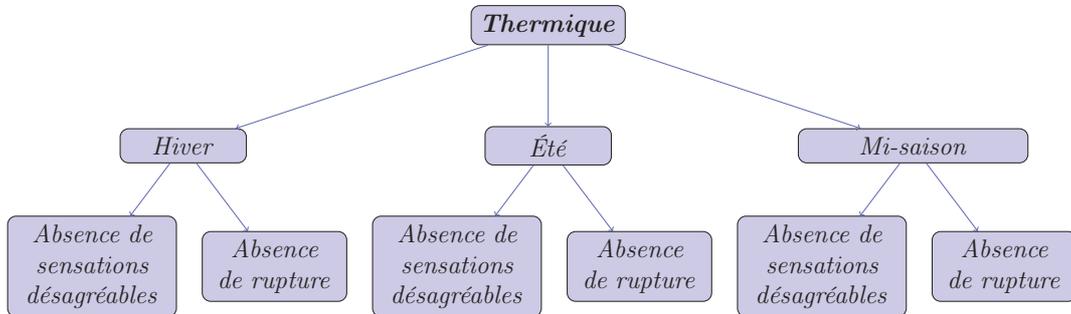


Figure 4.8 – Les composantes de la modalité thermique

Remarque 11 Bien que l'on n'ait pas introduit de variabilité interindividuelle liée au confort thermique dans les groupes (voir section 4.3.3) car nous ne disposons pas de données perceptives qui nous permettent de caractériser de tels groupes, cela pourrait être effectué sans modifier la structure du modèle.

4.3.8 La modalité Ambiance lumineuse

Cette modalité regroupe les aspects de l'éclairage pouvant être des sources d'inconfort ou de confort. Dans la littérature [1, 2], une ambiance lumineuse est caractérisée par plusieurs facteurs : l'intensité d'éclairement mesurée en lux, la température de couleurs en degrés Kelvin, l'éblouissement dont l'indicateur le plus utilisé est l'UGR et le rendu des couleurs dont l'indicateur utilisé est le R_a mesurant la capacité d'une source lumineuse à rendre les couleurs d'une surface. Ces aspects sont évalués séparément, c.-à-d. ils ne sont pas agrégés pour évaluer une ambiance lumineuse globale.

Dans notre modèle, ces aspects sont regroupés dans quatre critères : l'éclairement qui mesure la capacité de l'offre à fournir un éclairage idéal pour chaque activité, l'éblouissement qui est une source de gêne, le rendu des couleurs ainsi que la température de couleur (voir la figure 4.9).

4.3.9 La modalité siège environné

Le siège est la composante la plus importante du confort assis. De nombreuses études se sont intéressées au confort du siège essentiellement dans l'automobile, le mobilier du bureau et, depuis peu, le ferroviaire. Ces études avaient pour objectif

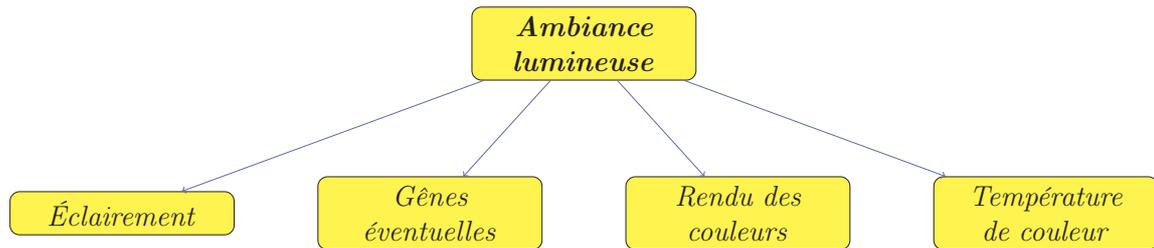


Figure 4.9 – Les composantes de la modalité *Ambiance lumineuse*

soit de spécifier des valeurs idéales pour les caractéristiques physiques d'un siège, soit d'évaluer le confort du siège à partir de ses caractéristiques.

Les approches généralement utilisées pour l'évaluation du confort du siège à partir de certains de ses paramètres physiques, sont des approches statistiques, comme dans [46] où ils ont utilisé une régression linéaire et les réseaux de neurones (dans l'automobile). Pour ce qui concerne la spécification des valeurs idéales [41], ils utilisent des approches expérimentales où ils font varier les paramètres physiques sur un prototype de siège, et ils recueillent ensuite les évaluations des sujets. Ce type d'approche a été utilisé lors d'une étude menée à la SNCF dans le projet Dyapos (voir [35]).

Les études menées dans le projet Dyapos ont montré que le siège idéal devait, non seulement, s'adapter à toutes les morphologies ainsi qu'à toutes les postures correspondant aux activités pratiquées, mais devait aussi être conçu en prenant en compte son environnement (l'espace, la tablette, l'encombrement).

Pour cela, dans notre modèle, nous avons pris en compte, non seulement les caractéristiques physiques du siège mais aussi celles de son environnement afin d'en évaluer le confort. La modalité siège environné (voir la figure 4.10) regroupe donc :

- l'espace à la place qui mesure le confort apporté par l'espace sur la tablette et l'espace disponible pour les jambes ainsi que la liberté de mouvement du voyageur et le fait qu'il puisse avoir sa zone d'intimité afin d'éviter la promiscuité,
- l'encombrement généré par la présence d'objets autour du siège,
- le confort postural qui représente la capacité du siège à s'adapter et à maintenir une bonne posture pour l'activité, sans zones d'inconfort locales.

4.3.10 La modalité tympanique

La compression des tympans lors du passage d'un train dans un tunnel peut constituer une source de gêne pour le voyageur. Cette compression est due aux

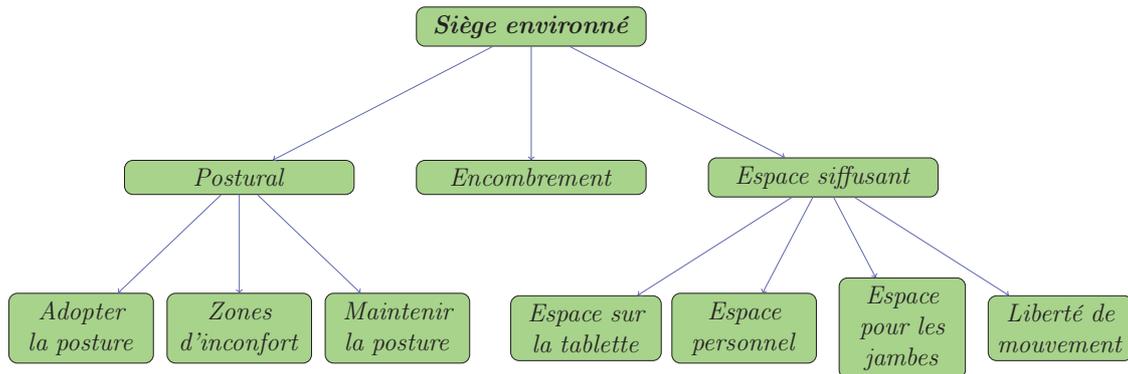


Figure 4.10 – Les composantes du siège environné

variations de pressions entre l’extérieur et l’intérieur d’un train. La pression extérieure peut être affectée par le gabarit du tunnel, le gabarit et la vitesse du train. Pour ce qui concerne la pression intérieure, elle est affectée par l’étanchéité du train aux variations de pressions extérieures (avant et après l’entrée dans un tunnel).

L’étanchéité du train [36] est généralement le paramètre qui est spécifié pour le confort tympanique, elle est mesurée par *la constante de temps de fuite* qui représente le temps nécessaire pour que la différence entre la pression intérieure (dans le train) et la pression extérieure en Pa soit ramenée d’une valeur ΔP_1 à une valeur ΔP_0 , t.q. $\Delta P_1 > \Delta P_0$. Plus ce temps est élevé, plus le train est étanche et mieux c’est pour le confort. Les valeurs généralement spécifiées pour les TGV sont de 10 à 60 s pour des différences de pression $\Delta P_1 = 2718$ Pa et $\Delta P_0 = 1000$ Pa. Néanmoins, aucune expérimentation n’a été réalisée pour fixer des seuils de confort.

Cette modalité n’a pas été identifiée à partir des enquêtes, mais les experts ont jugé utile de l’introduire dans le modèle comme modalité de confort.

4.3.11 La modalité aménagement et services

La modalité *aménagement et services* regroupe tout ce qui peut favoriser (ou empêcher) le confort assis ou la pratique d’une activité et qui n’a pas été pris en compte dans les autres modalités (voir la figure 4.11). Elle regroupe l’ergonomie d’usage des équipements favorisant la pratique d’une activité (comme la prise électrique pour l’activité travailler sur PC), les rangements favorisant le confort assis (comme la poubelle pour se débarrasser des déchets, le porte-revues) et la surveillance des bagages à la place (est-ce que l’aménagement de la voiture permet au voyageur de surveiller ses bagages?).

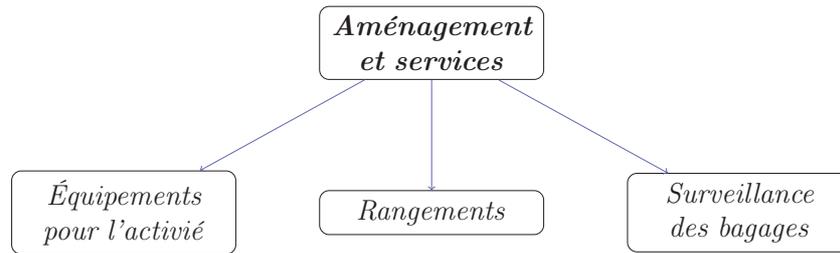


Figure 4.11 – Les composantes de la modalité Aménagement et services

4.4 Construction des échelles

Une fois le modèle conceptuel établi, la quatrième étape de notre approche consiste à construire les échelles associées aux conséquences élémentaires des critères qui se trouvent aux feuilles de l'arborescence (le dernier niveau), afin d'obtenir *les dimensions* (voir section 1.2.3.1 au chapitre 1) de notre problème. Un critère peut donc avoir une ou plusieurs dimensions associée(s) et par conséquent une ou plusieurs échelles associée(s). Dans cette section nous nous intéresserons, tout d'abord, aux caractéristiques des échelles de notre modèle. Nous verrons, ensuite, quelle est la méthodologie de construction de ces échelles. Enfin, nous terminerons par deux exemples sur la construction des échelles de la modalité thermique et de la modalité siège environé. Le lecteur intéressé par le détail de la construction des échelles correspondant aux critères des modalités acoustique, dynamique et ambiance lumineuse pourra consulter l'annexe A

4.4.1 Les échelles du modèle

Pour rappel, une échelle correspondant à une dimension est constituée d'un indicateur d'état et de l'ensemble des valeurs possibles de cet indicateur qu'une alternative peut prendre. L'une des conditions théoriques sur la construction des critères en aide multicritère à la décision exige que ces indicateurs soient monotones.

Dans notre modèle nous avons construit deux types d'échelles. Dans le premier type, l'indicateur d'état ne dépend que des caractéristiques de l'offre (les paramètres physiques du train). Dans le deuxième type, l'indicateur dépend à la fois des caractéristiques de l'offre et des données perceptives pouvant constituer des niveaux de confort dont les valeurs dépendent souvent de l'activité et/ou du groupe. Elles peuvent dépendre aussi d'autres facteurs perceptifs propres à la modalité considérée. Concernant les caractéristiques de l'offre, elle peuvent être différentes d'un endroit à un autre du train. Le confort perçu peut donc être différent pour

un même voyageur pratiquant la même activité à deux endroits différents. Pour l'instant, on considère que les indicateurs d'état sont calculés à partir des caractéristiques d'une offre à un endroit e . Cette endroit peut être aussi petit qu'une place assise ou aussi grand qu'une rame entière. Nous verrons à la section 4.5.4 comment on peut décomposer « efficacement » une offre en plusieurs endroits. Ces indicateurs seront notés dans la suite comme suit :

$$fMod^{CE}(e, \bar{p}) \quad (4.2)$$

Où Mod est l'une des sept modalités, CE une conséquence élémentaire, e est un endroit d'une offre et \bar{p} est un vecteur dont chaque composante représente un paramètre correspondant à un facteur perceptif (activité, groupe, saisons, etc.)

4.4.2 Méthodologie de construction des échelles

La méthode générale de construction des échelles s'est déroulée pour chaque critère feuille, selon les étapes suivantes.

1- Définition des conséquences élémentaires : il s'agissait, tout d'abord de s'appropriier les données des cahiers des charges, des études menées sur la corrélation entre paramètres physiques et la perception des voyageurs et des normes, afin d'extraire les spécifications, ayant un impact sur le critère feuille, qui ont servi à la construction des échelles. Dans le cas où il n'y a qu'une seule spécification identifiée, nous définissons une conséquence élémentaire associée et nous veillons, à l'étape suivante, à ce que l'échelle construite à partir de cette spécification soit monotone. Par contre, dans le cas où plusieurs spécifications sont identifiées, il se peut qu'il y ait des dépendances entre ces dernières pour ce qui est de leur impact sur l'évaluation du critère feuille. Pour cela nous définissons, tout d'abord, une conséquence élémentaire associée aux spécifications dépendantes avant de construire l'échelle correspondante.

2- Construction des indicateurs d'état : cette étape s'est déroulée avec les experts en confort. Nous avons construit autant d'indicateurs d'état qu'il y a de conséquences élémentaires associées à un critère feuille. Dans le cas où plusieurs indicateurs d'état sont associés à un critère feuille, ces derniers ne sont pas agrégés à cette étape de l'approche, ils le sont à l'étape d'agrégation (voir chapitre 5). De plus, toujours dans ce cas, d'un point de vue théorique, il n'est pas nécessaire que ces indicateurs soit monotones car les conséquences élémentaires ne sont pas des critères, par contre le résultat de leur agrégation, représentant une échelle pour le critère feuille, doit l'être. Néanmoins, nous essayons, tant que cela reste possible, de construire des indicateurs monotones car la plupart des méthodes d'agrégation multicritères disponibles

dans la littérature font l'hypothèse de monotonie. Dans le cas où un seul indicateur d'état est associé au critère feuille, ce dernier doit être monotone. D'autre part, lors de la construction de ces indicateurs, nous avons veillé à ce qu'ils soient compréhensibles par les experts, afin de pouvoir établir des seuils de confort qui seront utiles dans la phase d'agrégation.

3- Validation des échelles : Une fois les échelles construites, nous les avons présentées aux experts en matériel roulant (CIM) correspondant à la modalité du critère feuille. Ces échanges pouvaient donner lieu à des modifications de ces échelles mais aussi à des ajouts ainsi qu'à des suppression d'échelles.

Pour la modalité *Tympanique*, nous avons construit et validé l'échelle directement avec l'expert aérodynamique en matériel roulant, car nous n'avons pas eu d'interlocuteur en confort. Pour ce qui concerne la modalité *Aménagement et service*, la méthode de construction a nécessité, en plus, l'intervention des décideurs représentés par la Direction Marketing, qui ont contribué à la construction ainsi qu'à la validation des échelles

Le fait d'avoir regroupé les composantes du confort dans des modalités qui représentent à la fois des expertises en confort et en matériel roulant, nous a permis de faciliter le dialogue entre les différents experts à cette étape.

4.4.3 Les échelles de critères de la modalité thermique

Nous avons vu que pour les voyageurs, le confort thermique était une *absence de sensations désagréables* et une *absence de rupture* liées aux vitesses d'air et aux températures dans un train. Il est également important de rappeler que la perception du confort thermique est différente selon l'été, l'hiver ou la mi-saison. Nous avons donc jugé utile avec les experts d'évaluer le confort thermique pour chaque saison (voir la figure 4.8). Les critères *absence de sensations désagréables* et *absence de rupture* sont donc des feuilles de l'arborescence. Nous allons voir dans la suite quelles échelles nous avons construit pour ces feuilles. Pour une vision synthétique de ces échelles voir le tableau 5.1 au chapitre 5.

4.4.3.1 Absence de sensations désagréables

Ce critère mesure la capacité de l'offre à fournir des conditions thermiques (vitesses d'air et températures) idéales pour les voyageurs pour une saison donnée. En parcourant les cahiers des charges, nous avons retenu avec les experts en confort cinq spécifications qui peuvent servir à la construction des échelles pour ce critère :

- l'écart maximal $\Delta T_{imTic_{max}}$ entre la température intérieure moyenne (T_{im}) et la température de référence (T_{ic}) pour des valeurs $p \in T_{em}$ de températures extérieures, où T_{em} est l'ensemble de ces valeurs qui sont généralement

- comprises entre -20 °C et $+35$ °C (On notera la réponse du fournisseur à cette spécification par $\Delta TimTic(e, p) \forall p \in Tem$),
- l'écart maximal entre les températures minimales et maximales ΔTim_{max}^{hrz} mesurées sur une section horizontale à 1m10 du sol pour des valeurs $p \in Tem$ de températures extérieures, où Tem est l'ensemble de ces valeurs qui sont généralement comprises entre -20 °C et $+35$ °C (On notera la réponse du fournisseur à cette spécification par $\Delta Tim^{hrz}(e, p) \forall p \in Tem$),
- l'écart maximal entre les températures minimales et maximales mesurées sur une section verticale (ΔTim_{max}^{vrt}) pour des valeurs $p \in Tem$ de températures extérieures, où Tem est l'ensemble de ces valeurs qui sont généralement comprises entre -20 °C et $+35$ °C (on notera la réponse du fournisseur à cette spécification par $\Delta Tim^{vrt}(e, p) \forall p \in Tem$),
- l'écart maximal $\Delta TimParoi_{max}$ entre la température intérieure moyenne (Tim) et la température des parois ($TParoi$) pour des valeurs $p \in Tem$ de températures extérieures, où Tem est l'ensemble de ces valeurs qui sont généralement comprises entre -20 °C et $+35$ °C (on notera la réponse du fournisseur à cette spécification par $\Delta TimParoi(e, p) \forall p \in Tem$),
- la courbe de référence des vitesses d'air en fonction de la température intérieure (voir la figure 4.12. La réponse des fournisseurs est également une courbe du même type).

Après avoir identifié ces spécifications, nous avons construit les échelles correspondantes en veillant à ce que les indicateurs d'état soient compréhensibles pour les experts afin de pouvoir mener à bien la phase d'agrégation. Ces indicateurs sont à minimiser.

- 1- La moyenne pondérée des écarts entre les températures intérieures moyennes et les températures de références en °C sur toutes les valeurs de $p \in Tem(S)$, où $Tem(S)$ est l'ensemble des températures extérieures correspondant à une saison S

$$fT^{TimTic}(e, S) = \sum_{p \in Tem(S)} w_p \times \Delta TimTic(e, p) \quad (4.3)$$

Où $S = \{S1, S2, S3\}$, w_p est le rapport du nombre de jour pour lesquels la température $p \in Tem(S)$ est enregistrée dans la saison considérée et le nombre total de jours d'une saison. On a donc : $\sum_{p \in Tem(S)} w_p = 1$.

- 2- La moyenne pondérée des écarts entre les températures minimales et maximales sur une section horizontale, mesurées à 1m10 du sol, en °C sur toutes les valeurs de $p \in Tem(S)$.

$$fT^{hrz}(e, S) = \sum_{p \in Tem(S)} w_p \times \Delta Tim^{hrz}(e, p) \quad (4.4)$$

- 3- La moyenne pondérée des écarts entre les températures minimales et maximales mesurées sur une section verticale (tête, buste et pieds) en °C, sur

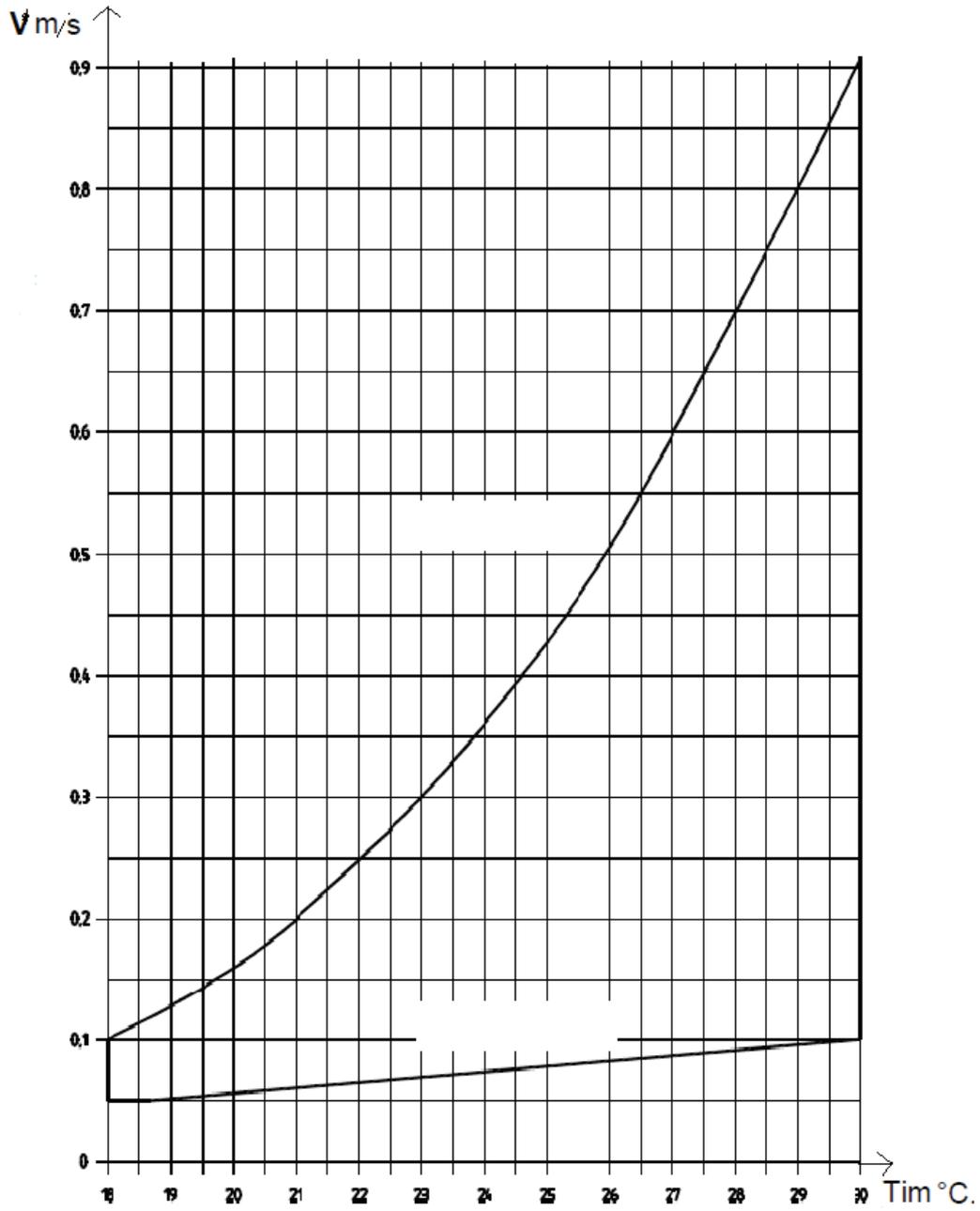


Figure 4.12 – La courbe de référence des vitesses d'air en fonction de la température intérieure

toutes les valeurs de $p \in Tem(S)$.

$$fT^{vrt}(e, S) = \sum_{p \in Tem(S)} w_p \times \Delta T_{im}^{vrt}(e, p) \quad (4.5)$$

- 4- La moyenne pondérée des écarts entre les températures de paroi et les températures intérieures moyennes en °C, sur toutes les valeurs de $p \in Tem(S)$.

$$fT^{paroi}(e, S) = \sum_{p \in Tem(S)} w_p \times \Delta TimParoi(e, p) \quad (4.6)$$

- 5- L'écart relatif par rapport à la courbe de Fig 4.12. Nous avons choisi un écart relatif (qui également un indicateur monotone) pour deux raisons principales : la première est que l'écart spécifié dans les cahiers des charges est un écart relatif et la deuxième raison est que la valeur d'un écart par rapport à une vitesse d'air de 0,1 m/s n'a pas la même importance qu'un écart par rapport à une vitesse d'air de 0,9 m/s.

$$fT^V(e, S) = \sum_{p \in Tim(S)} \frac{\max \{V(p, e) - V_{\max}(p), V_{\min}(p) - V(p, e), 0\}}{V_{\max}(p) - V_{\min}(p)} \quad (4.7)$$

Où $Tim(S)$ est l'ensemble des températures intérieures moyennes correspondant à la saison S , $V(p, e) : p \in Tim(S)$ sont les valeurs des vitesses d'air de la courbe proposée par le constructeur, $V_{\max}(p)$ et $V_{\min}(p)$ sont les valeurs minimales et maximales des courbes de Fig 4.12.

4.4.3.2 Absence de rupture

Ce critère mesure la capacité de l'offre à maintenir les conditions thermiques (vitesses d'air et températures) tout au long d'un trajet ainsi qu'à fournir des conditions thermiques initiales (au moment où les voyageurs entrent dans le train) qui diminuent la rupture causée par la différence de température avec l'extérieur. Après avoir consulté les experts, nous avons retenu deux spécifications dans les cahiers des charges à partir desquelles les échelles correspondant à ce critère seront construites :

- la vitesse maximale $VTicTem_{\max}$ de variation de la température intérieure par rapport à la température extérieure en °C/h (On notera la réponse des fournisseurs par $VTicTem(e, S)$ pour chaque saison),
- l'écart maximal $\Delta TimTic0_{\max}$ de la température intérieure moyenne et de la température de référence à la fin du dernier cycle de réfrigération ou de préchauffage (lorsque les voyageurs entrent dans le train), pour des valeurs $p \in Tem$ de températures extérieures (On notera la réponse des fournisseurs $\Delta TimTic0(e, p)$).

Les indicateurs d'état correspondant à ces spécification sont à minimiser.

- 1- La vitesse de variation de la température intérieure par rapport à la température extérieure pour chaque saison en °C/h

$$fT^{TicTem}(e, S) = VTicTem(e, S) \quad (4.8)$$

- 2- La moyenne pondérée des écarts entre la température intérieure moyenne et la température de référence à la fin du dernier cycle de réfrigération ou de préchauffage en °C.

$$fT^{\text{pre}}(e, S) = \sum_{p \in \text{Tem}(S)} \Delta T_{\text{imTic0}}(e, p) \quad (4.9)$$

4.4.4 Les échelles de critères de la modalité siège environné

La construction des critères de la modalité siège environné était la plus difficile même en fixant l'activité et la morphologie. Cela a donné lieu à plusieurs tentatives de modélisation avec l'expert en confort du siège. Cette difficulté est due à la forte interaction entre les éléments du siège (tablette, accoudoirs, dossier, assise, repose pieds, appui-tête) affectant l'évaluation du confort et au fait qu'il faille construire ces critères de telle sorte à ce que ces interactions puissent être prises en compte lors de l'étape d'agrégation. Pour cela, nous avons tenté de séparer les éléments du siège n'étant pas en interaction, en décomposant la modalité siège environné en trois sous critères traduisant des points de vue différents : *le confort postural*, *l'absence d'objet encombrant* et *la présence d'un espace suffisant*. La construction des échelles ainsi que l'évaluation des deux derniers sous-critères a fait l'objet du stage de Charlotte Thierry [88] et ne seront pas présentées dans cette section. En ce qui concerne le sous-critère confort postural, il regroupe la majorité des grandeurs caractérisant les interactions entre les éléments du siège (distance dossier tablette, angle dossier assise). La modalité *siège environné* comprend :

- une adoption de la posture idéale pour l'activité,
- le maintien de cette posture tout au long du voyage,
- l'absence de zones d'inconfort sur le siège.

Nous présenterons dans cette section uniquement les échelles du critère feuille *Absence de zones d'inconfort*.

Absence de zones d'inconfort

Nous avons identifié plusieurs spécifications (voir tableau 4.3), issues des cahiers des charges et des connaissances de l'expert en confort du siège, à partir desquelles nous pouvons construire des échelles pour mesurer les inconforts locaux liés à la dureté, aux points durs et à la compression des membres du corps. Cependant, le nombre de ces spécifications est tellement important qu'il est difficile de les agréger directement. De plus, certaines d'entre elles (en astérisque (*) dans le tableau 4.3) ne sont pas, actuellement, dans les cahiers des charges.

Dans notre modélisation, nous avons décidé de regrouper ces spécifications selon leur impact sur les parties du corps (voir tableau 4.4) comme suit :

Spécification	Intitulé
<i>DistAcot</i> en mm	Distance entre les accotoirs
<i>DAppTet</i> *	Le critère de dureté de l'appui-tête doit être satisfait
<i>PDrAppTet</i>	Il ne doit pas y avoir de points durs sur l'appui-tête
<i>DDos</i> *	Le critère de dureté du dossier doit être satisfait
<i>PDrDos</i>	Il ne doit pas y avoir de points durs sur le dossier
<i>DAc</i> *	Le critère de dureté de l'accoudoir doit être satisfait
<i>PDrAc</i>	Il ne doit pas y avoir de points durs sur l'accoudoir
<i>PDrGlb</i>	Il ne doit pas y avoir de points durs sur le galbe du dossier
<i>DAss</i> *	Le critère de dureté de l'assise doit être satisfait
<i>PDrAss</i>	Il ne doit pas y avoir de points durs sur l'assise
<i>PAss</i>	La profondeur de l'assise
<i>HAss</i> en mm	La hauteur de l'assise
<i>MoelAss</i>	Le moelleux de l'assise
<i>DistPhNa</i> en mm	La distance entre le point H est le nez de l'assise
<i>PSousSg</i> en mm	La profondeur sous le siège
<i>DistNaDos</i> en mm	La distance entre le nez de l'assise et le dossier
<i>DistGnDos</i> en mm	La distance genou dossier

Tableau 4.3 – Les spécifications ayant un impact sur l'évaluation des zones d'inconfort dans un siège

- la tête et le cou, qui sont affectés par l'appui-tête,
- le buste, qui est affecté par le haut du dossier et les accoudoirs
- le bassin et les lombaires, qui sont affectés par le bas du dossier
- les fesses, les cuisses et le creux poplité, qui sont affectés par l'assise
- les jambes, qui sont affectées par l'espace devant le siège

Les membres, cités ci-dessus, sont plus ou moins sollicités selon le type d'activité pratiquée. En effet, pour l'activité *se reposer*, il est important de ne pas avoir de zones d'inconfort au niveau de la tête, alors que cela n'est pas le cas pour l'activité *Travailler sur PC*. Un tel regroupement rend donc opérationnel la famille de critères pour l'élicitation des préférences.

Étant donné les dépendances entre certaines spécifications identifiées dans l'évaluation du critère *Absence de zones d'inconfort* dans une partie du corps, il est difficile de construire, dans ces cas, des indicateurs d'état monotones correspondant à chaque spécification indépendamment des autres. Pour cela, nous les avons tout d'abord identifiées avec l'expert siège afin de définir une conséquence

Membres	Spécifications	Réponse du fournisseur
La tête et le cou	$DistAcot$ $DApTet$ $PDrApTet$	$DistAcot(e)$ $DApTet(e)$ $PDrApTet(e)$
Le buste	$DDos$ $PDrDos$ $Dacd$ $PDrAcad$	$DDos(e)$ $PDrDos(e)$ $Dacd(e)$ $PDrAcad(e)$
Le bassin et les lombaires	$PDrGlb$ $DDos$ $PDrDos$	$PDrGlb(e)$ $DDos(e)$ $PDrDos(e)$
Les fesses, les cuisses et le creux poplité	$DAss$ $PDrAss$ $PAss$ $HAss$ $MoelAss$	$DAss(e)$ $PDrAss(e)$ $PAss(e)$ $HAss(e)$ $MoelAss(e)$
Les jambes	$DistPhNa(G)$ $PSousSg$ $DistNaDos$ $HAss$ $DistGnDos(G)$	$DistPhNa(e, G)$ $PSousSg(e)$ $DistNaDos(e)$ $HAss(e)$ $DistGnDos(e, G)$

Tableau 4.4 – Regroupement des spécifications ayant un impact sur l'évaluation des zones d'inconfort dans un siège

élémentaire, regroupant les spécifications dépendantes, dont l'indicateur d'état est monotone (voir tableau 4.5).

- **Les fesses, les cuisses et le creux poplité** : nous avons identifié : la profondeur de l'assise $PAss$ et la hauteur de l'assise $HAss$ indiquant si le creux poplité est compressé, et avons défini ensuite la conséquence élémentaire : *compression du creux poplité* dont l'échelle correspondante est la suivante :

$$fSEZICrPop(e, G) = \begin{cases} 1 & \text{si } PAss(e) \in [PAss_1(G); PAss_2(G)] \text{ et } HAss(e) \geq HAss_{\min}(G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où $PAss_1(G)$, $PAss_2(G)$ et $HAss_{\min}(G)$ sont des seuils qui dépendent du groupe morphologique G

- **Les jambes** : nous avons identifié : la distance entre le point H et le nez de l'assise $DistPhNa$, la profondeur sous le siège $PSousSg$, la hauteur de l'as-

sisse $HAss$ et la distance entre le nez de l'assise et le dossier $DistNaDos$ et avons défini la conséquence élémentaire : *compression des jambes en position relaxée* dont l'échelle correspondante est la suivante :

$$fSEZIJmbRel(e, G) = \begin{cases} 1 & \text{si } JmbRel(e, G) < JmbRel_{\min}(G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où $JmbRel(e, G) = DistPhNa(e, G) + \sqrt{HAss(e)^2 + DistNaDos(e)^2} + PSousSg(e)$ représente (approximativement) l'espace disponible pour les jambes et $JmbRel_{\min}(G)$ un seuil qui dépend du groupe morphologique G

Les indicateurs d'état correspondant aux autres spécifications sont également présentés dans le tableau 4.5

4.5 Discussion

Dans cette section, nous tenterons tout d'abord de justifier deux décisions critiques que nous avons prises lors de cette phase de notre approche qui concernent l'abandon d'un modèle conceptuel par fascicules et la prise en compte de la variabilité interindividuelle. Nous attirerons ensuite l'attention du lecteur sur la sémantique des critères afin de mieux comprendre la décomposition du modèle conceptuel. Nous aborderons enfin les avantages d'une décomposition de l'offre par endroits afin d'améliorer la précision de notre modèle.

4.5.1 Le modèle conceptuel de confort par fascicules

Nous avons vu à la section 4.1.1 qu'il y avait deux préoccupations principales auxquelles devait répondre le modèle conceptuel (les besoins des exploitants et la perception des voyageurs) qui peuvent être conflictuelles. En effet, les experts en matériel roulant (CIM) désiraient initialement un modèle conceptuel par fascicules (voir la figure 4.13) où le confort global est décomposé en confort associés à des fascicules d'un cahier des charges (le siège, l'acoustique, la dynamique, le thermique, l'éclairage) afin qu'il puisse servir de base pour un outil d'aide à la négociation avec les constructeurs. Il est apparu en effet plus facile pour chaque expert de négocier les modifications apportées aux éléments du train correspondant à son fascicule en ayant un outil qui mesure l'impact de ces modifications sur un confort associé exclusivement à ce fascicule que sur un confort qui dépend aussi des éléments d'autres fascicules. Néanmoins, il est important de noter qu'il est difficile d'obtenir une évaluation du confort global qui représente la perception des voyageurs, directement à partir des confort de chaque fascicule pour les raisons suivantes :

Membres	Spécifications	Échelles (à minimiser)
La tête et le cou	$DistAcot$	$fSEZI^{DistAcot}(e, G) = \begin{cases} 1 & \text{si } DistAcot(e) < DistAcot_{\min}(G) \\ & \text{(la tête est compressée)} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$DAPtet$	$fSEZI^{DAPtet}(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } DAPtet(e) \text{ est vérifié} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$PDrAPtet$	$fSEZI^{PDrAPtet}(e) = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a des points durs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
Le buste	$DDos$	$fSEZI^{DDos}(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } DDos(e) \text{ est vérifié} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$PDrDos$	$fSEZI^{PDrDos}(e) = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a des points durs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$DACd$	$fSEZI^{DACd}(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } DACd(e) \text{ est vérifié} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$PDrAcad$	$fSEZI^{PDrAcad}(e) = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a des points durs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
Le bassin et les lombaires	$PDrGlb$	$fSEZI^{PDrGlb}(e) = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a des points durs sur le galbe} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$DDos$	$fSEZI^{DDos}(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } DDos(e) \text{ est vérifié} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$PDrDos$	$fSEZI^{PDrDos}(e) = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a des points durs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
Les fesses, les cuisses et le creux poplité	$DAss$	$fSEZI^{DAss}(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } DAss(e) \text{ est vérifié} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$PDrAss$	$fSEZI^{PDrAss}(e) = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a des points durs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$PAss$ $HAss$	$fSEZI^{CrPop}(e, G) = \begin{cases} 1 & \text{si } PAss(e) \in [PAss_1(G); PAss_2(G)] \\ & \text{et } HAss(e) \geq HAss_{\min}(G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$MoelAss$	$fSEZI^{MoelAss}(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } MoelAss(e) > MoelAss_{\min} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
Les jambes	$DistPhNa(G)$ $PSousSg$ $DistNaDos$ $HAss$	$fSEZI^{JmbRel}(e, G) = \begin{cases} 1 & \text{si } JmbRel(e, G) < JmbRel_{\min}(G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
	$DistGnDos(G)$	$fSEZI^{DistGnDos}(e, G) = \begin{cases} 1 & \text{si } DistGnDos(e, G) > 0 \text{ (les genoux} \\ & \text{ne touchent pas le siège de devant)} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

Tableau 4.5 – Les échelles du critère Absence de zones d'inconfort

- cette construction ne correspond pas à la perception du confort par les voyageurs d'après les experts en confort,

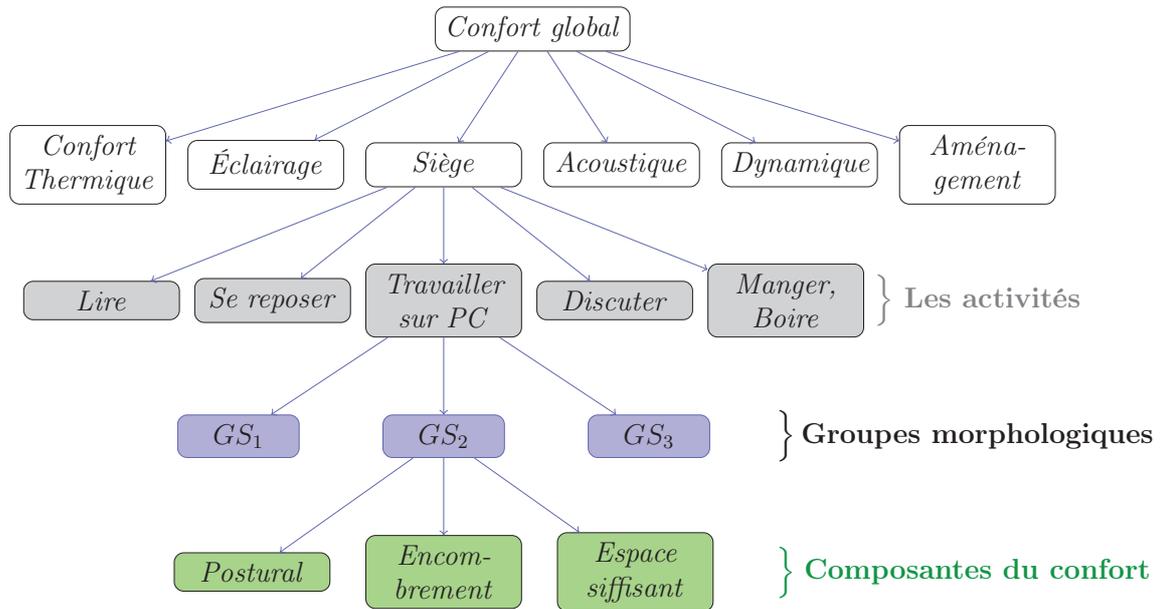


Figure 4.13 – Le modèle conceptuel de confort par fascicules

- la prise en compte des interactions entre modalités (composantes physiques en particulier) devient difficile voire impossible si on veut évaluer le confort global car le contexte et la variabilité interindividuelle ne sont pas fixés à ce niveau,
- l’intégration de la variabilité interindividuelle en dessous des modalités présente des inconvénients que nous verrons à la section 4.5.2.

Afin de convaincre les experts en matériel roulant, nous leur avons montré que les modalités de confort de notre modèle représentaient bien leurs expertises et qu’ils pourront négocier les modifications apportées à l’offre correspondant à leurs expertises aussi facilement qu’avec un modèle par fascicules. Nous avons également attiré leur attention sur le fait qu’un modèle par fascicules ne représentait pas la perception des voyageurs.

4.5.2 L’intégration de la variabilité interindividuelle dans le modèle

Nous avons vu à la section 4.3 que la variabilité interindividuelle avait été intégrée au troisième niveau (en dessous des activités et au dessus des modalités de confort). Nous tenterons dans cette section de justifier les raisons de ce choix. Certains intervenants ont proposé de l’intégrer dans chaque modalité qui est sus-

ceptible de la créer (le postural pour la morphologie, l'acoustique pour l'âge, etc.) alors que d'autres ont proposé de la sortir du modèle conceptuel et de la fixer comme paramètre afin d'évaluer le confort global de chaque groupe d'individus. Afin de justifier notre choix nous tenterons de répondre à deux interrogations.

- 1- *Pourquoi n'a-t-on pas intégré la variabilité interindividuelle directement dans les indicateurs d'état associés aux modalités qui sont concernées ?* Comme le facteur *morphologie* dans la modalité postural, le facteur *âge* dans la modalité acoustique, le facteur *sexe* dans le modalité thermique, etc. La réponse est qu'on risque d'aboutir à une évaluation biaisée par le fait qu'un individu peut se retrouver dans plusieurs groupes. Nous pouvons illustrer cela par l'exemple suivant.

Exemple 14 *On suppose qu'il y a trois composantes physiques du confort : confort postural, confort acoustique et confort thermique qui contribuent à l'évaluation de la possibilité de pratiquer une activité, et que l'évaluation de chacune de ces composantes se fait à partir du confort de chaque groupe morphologique pour le confort postural, de chaque tranche d'âge pour le confort acoustique, et de chaque sexe pour le confort thermique. Si le confort de chaque composante physique est très bon pour une majorité de groupes et assez mauvais pour une minorité qui ne concerne pas nécessairement les mêmes voyageurs dans chaque composante physique, alors il est naturel que les décideurs donnent une bonne évaluation pour les trois composantes physiques considérées et par conséquent une bonne évaluation pour la possibilité de pratiquer l'activité. Cette bonne évaluation de l'activité risque de ne pas refléter la perception réelle des voyageurs, qui serait plutôt mauvaise (d'après les experts en confort) car on pourrait avoir une majorité de voyageurs qui éprouveraient un inconfort uniquement sur une composante, qui peut masquer le confort des autres composantes (voir la figure 4.14 et la figure 4.15).*

- 2- *Pourquoi les facteurs interindividuels n'ont pas été considérés comme données d'entrée du modèle ? c.-à-d. sortir les groupes du modèle afin d'obtenir une évaluation du confort pour chaque groupe.* Bien que l'idéal serait d'obtenir une évaluation du confort correspondant à chaque individu appartenant à un groupe G_i , il n'est pas facile d'arriver à un tel objectif avec les informations dont nous disposons sur la variabilité interindividuelle. En effet, afin qu'un tel modèle ait un sens il nécessiterait au moins l'information sur le temps passé par le voyageur dans la pratique de chaque activité lors d'un trajet. L'autre difficulté majeure qui peut se rajouter à cela est le nombre exponentiel de groupes qui pourrait être obtenu en fonction de la quantité de cette information et la difficulté à les caractériser. Néanmoins, il est toujours possible d'adapter (facilement) le modèle actuel afin d'obtenir un modèle de confort global pour chaque groupe si jamais un besoin se manifestait.

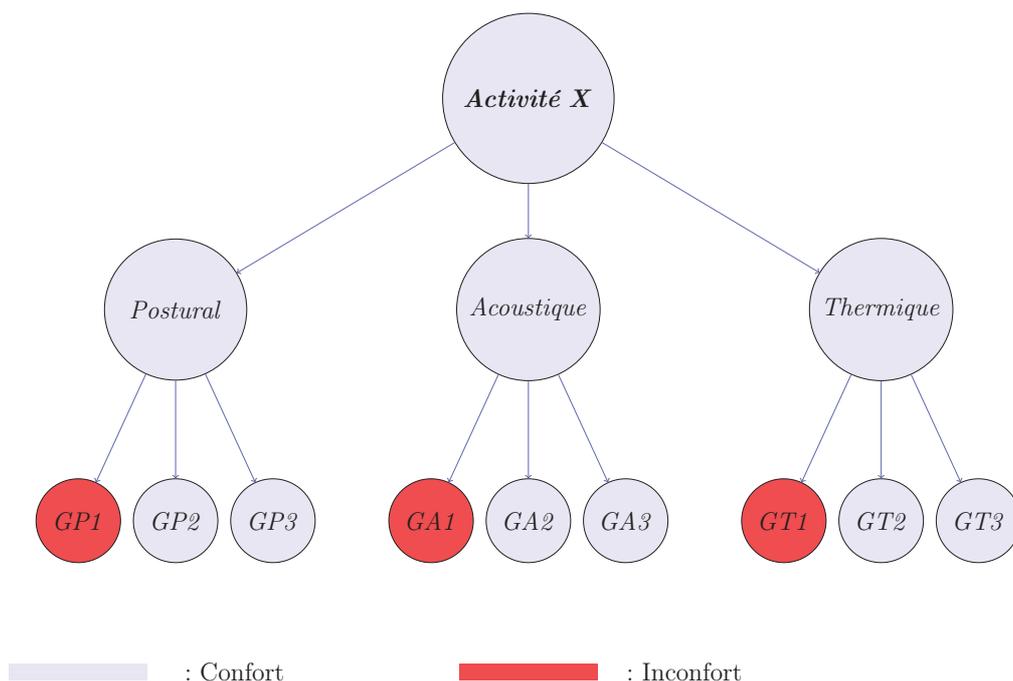


Figure 4.14 – Intégration des facteurs interindividuels dans chaque modalité

4.5.3 Sémantique associée aux critères

Il est difficile d'évaluer le confort de manière absolue. Il est donc nécessaire de le contextualiser et de le catégoriser. Pour cela, nous nous sommes fondés sur ce que représente le confort pour les voyageurs et pas uniquement sur la représentation classique qui est celle des sciences de l'ingénieur. Il peut donc apparaître au lecteur (ou même à l'utilisateur de l'outil) que les dénominations associées à certains critères ne représentent pas nécessairement du confort (au sens classique). Cela n'est évidemment pas le cas car la sémantique associée à la dénomination d'un critère représente un aspect du confort pour les voyageurs. Par exemple, en s'appuyant sur une partie du modèle conceptuel (voir la figure 4.16 et la figure 4.8) :

- le critère *Lire* signifie : le confort des voyageurs assis dans la pratique de l'activité lire,
- le critère *Grands* signifie : le confort d'un voyageur assis, appartenant à la catégorie **des grands**, dans la pratique de l'activité lire
- le critère *Été* signifie : le confort thermique, **en été** d'un voyageur assis, appartenant à une catégorie *G* et pratiquant une activité *A*
- le critère *Absence de sensations désagréables* signifie : l'inconfort, lié **aux sensations désagréables** causées par la température et les vitesses d'air dans un train, ressenti par un voyageur assis, appartenant une catégorie *G*

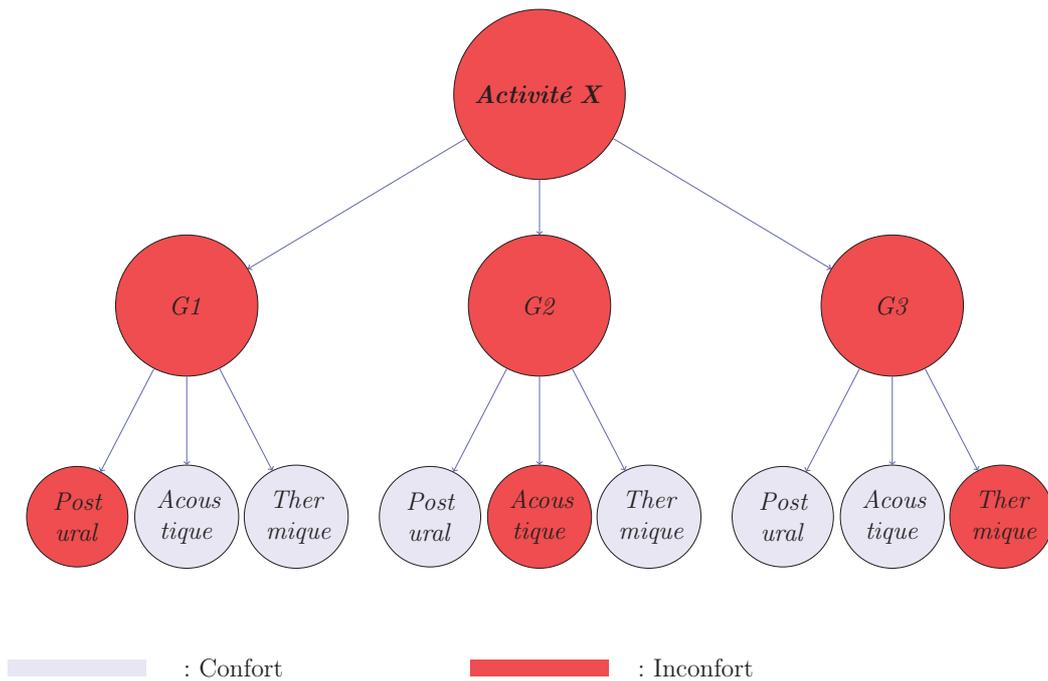


Figure 4.15 – Intégration des facteurs interindividuels dans chaque activité

et pratiquant une activité A

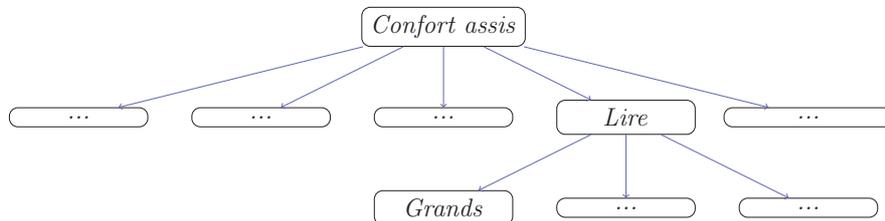


Figure 4.16 – Dénomination des critères de confort

4.5.4 La décomposition par endroits

La perception des composantes du confort est différente d'un lieu du train à un autre car les caractéristiques physiques d'un train le sont également. Pour cela nous proposons dans notre modélisation d'évaluer le confort² dans un endroit du train fixé. Si cette décomposition s'avère difficile, l'endroit peut être assimilé à une

2. Le confort assis essentiellement

rame (pas de décomposition). Plus cette décomposition est fine et plus l'évaluation du confort est précise car les échelles (indicateurs d'état) le sont aussi.

Le principe est de décomposer l'offre (dans le cas d'acquisition d'un nouveau matériel) en plusieurs endroits ou offres fictives (voir, par exemple, la figure 4.17), d'évaluer le confort de ces endroits (voir, par exemple, le tableau 4.6), puis d'agréger ces évaluations afin d'obtenir le confort de l'offre réelle (voir, par exemple, la figure 4.18).

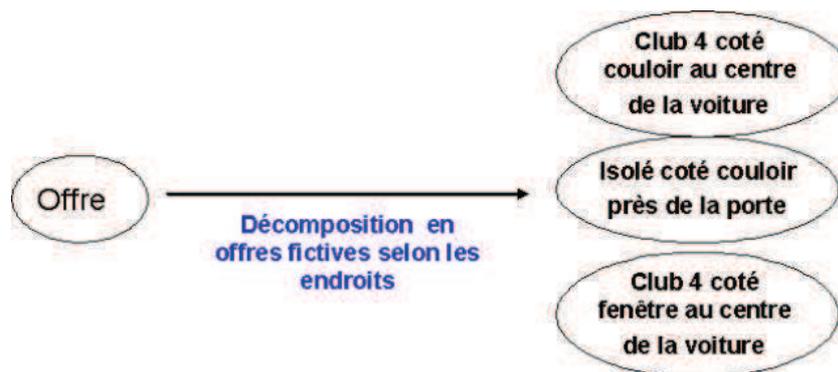


Figure 4.17 – Décomposition d'une offre par endroits

	Endroit 1	Endroit 2	Endroit 3
Évaluation du confort assis	moyen	mauvais	Très bon
Nombre de places	25	34	50
Pourcentage de places	23%	31%	46%

Tableau 4.6 – Niveau de confort et nombre de places des endroits d'une offre

Cette décomposition s'avère pertinente pour *le confort assis* car les enquêtes menées dans les différents projets à la SNCF ont révélé que c'est en position assise que les différences de perception des composantes du confort sont les plus significatives : *les voyageurs admirent mieux le paysage et sont plus gênés par la ventilation coté fenêtre, ils sont plus gênés par le bruit des portes et les courants d'air coté portes, etc..* Pour *le confort debout*, la prise en compte des endroits est plus implicite car l'évaluation de la possibilité de pratiquer les activités du *confort debout* se fait à un endroit donné : *le bar, les toilettes, le compartiment à bagages, le couloir*, néanmoins il est possible d'envisager une telle décomposition si cela s'avèrerait nécessaire.

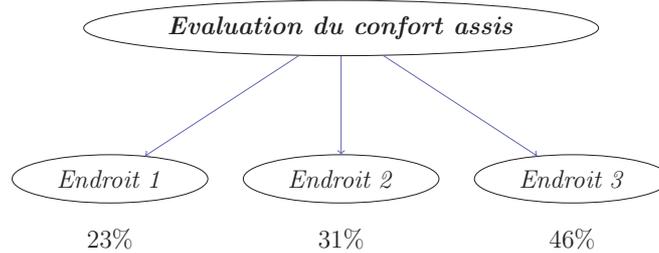


Figure 4.18 – *Évaluation du confort assis d’une offre à partir des évaluations des niveaux de confort de ses endroits*

L’intérêt de cette décomposition est d’obtenir un modèle plus précis et plus réaliste en terme d’évaluation des offres. En effet, l’évaluation du confort est plus pertinente avec des échelles qui sont fonction des caractéristiques (température, niveau d’éclairage, vibrations) d’un endroit donné de l’offre au lieu d’utiliser une moyenne de ces caractéristiques sur tous les endroits ou n’importe quelle autre agrégation qui n’est pas réaliste et avec laquelle on risque de perdre de l’information qui peut être utile pour différencier les offres (voir l’exemple 15).

Exemple 15 *La température moyenne ou la vitesse d’air moyenne dans une voiture nous renseignent moins bien sur le confort thermique des voyageurs qu’en décomposant la voiture en plusieurs endroits avant d’en évaluer le confort thermique à partir de ces deux grandeurs mesurées à chaque endroit.*

Bien que notre principal objectif soit de construire le modèle d’évaluation du confort, la décomposition par endroit reste pour nous une préoccupation importante. Pour cela, lors de la construction des échelles nous avons considéré que les paramètres physiques correspondaient à un endroit. Lorsqu’il est possible de décomposer l’offre, il suffit d’appliquer le modèle d’évaluation à chaque endroit puis d’agrèger ces évaluations pour obtenir le confort assis (voir la figure 4.18). Cette agrégation, qui ne sera pas traitée dans cette thèse, doit prendre en compte la proportion de places assises correspondant à chaque endroit. En revanche lorsque cette décomposition n’est pas possible parce que les réponses des fournisseurs ne sont pas précises, il suffit de considérer l’offre comme un seul endroit, puis d’appliquer le modèle d’évaluation.

4.6 Construction des critères : bilan et perspectives

La construction du modèle conceptuel (identification et formalisation des critères de confort) a été effectuée à partir des résultats d'études et enquêtes sur le confort voyageurs dans les TGV et des connaissances des experts en confort. Afin de pouvoir juger les offres des constructeurs sur ces critères, il a fallu construire pour chaque critère non décomposable (critère feuille) une (des) échelle(s). Elle(s) permet(tent) de mesurer la performance d'une offre sur ce critère de confort.

La construction des critères a porté principalement sur le confort assis. Néanmoins, l'approche utilisée dans cette thèse a été appliquée pour la construction des critères du confort debout, dans le cadre du projet « Outil multicritère pour l'évaluation globale du confort ». En ce qui concerne la qualité perçue, une réflexion avec les différents experts ainsi que les décideurs a été entamée pour définir les critères.

Nous dresserons pour chacune des deux étapes de la construction des critères un bilan de ce qui a déjà été effectué sur le confort assis. Nous mettrons aussi en évidence les raisons pour lesquelles nous n'avons pas terminé. Ces raisons sont souvent liées au :

- caractère constructif de l'approche, nécessitant la participation de différents intervenants, et rendant souvent difficile l'organisation des réunions dans un court laps de temps,
- manque de connaissances sur le confort, rendant difficile la définition des critères ainsi que l'élicitation des préférences dans la phase d'agrégation.

Nous proposerons également des perspectives sur ce qui reste à réaliser pour terminer cette construction.

4.6.1 Construction du modèle conceptuel (définition et formalisation des critères)

À cette étape, nous devons construire un modèle conceptuel permettant de prendre en compte la perception des voyageurs ainsi que les besoins des intervenants par rapport à l'utilisation de l'outil en s'assurant qu'il est possible de lier le modèle conceptuel à des paramètres physiques afin de pouvoir juger les offres. Étant donné le nombre important de critères identifiés et leurs dépendances, nous avons utilisé un modèle hiérarchique.

Après avoir identifié les critères de confort grâce aux études et enquêtes ainsi qu'aux connaissances des experts, leur formalisation a été réalisée à l'aide d'un modèle hiérarchique. Nous nous sommes placés du point de vue des voyageurs en partant du confort dans sa globalité que nous avons décliné en *confort debout*,

confort assis et qualité perçue.

Nous avons décomposé *le confort assis* en types d'activités. L'évaluation du *confort assis* repose donc sur l'évaluation du confort dans la pratique des activités (lire, se reposer, travailler sur PC, discuter et manger). En plus d'être fondée sur la perception des voyageurs, cette décomposition constitue un moyen de formaliser les besoins des décideurs par rapport à la cible confort (affaires et loisirs, par exemple). Le confort dans la pratique d'une activité est le résultat de l'agrégation des confort correspondant à des groupes de voyageurs dans la pratique de cette activité. Les voyageurs appartenant à un même groupe partagent la même perception des composantes physiques du confort. Nous avons décomposé ensuite le confort d'un groupe dans la pratique d'une activité en **modalités** de confort regroupant les composantes physiques et sensorielles du confort.

La décomposition de chaque modalité repose également sur la perception des voyageurs. Nous nous sommes fondés pour cela sur des études plus spécifiques sur la perception des composantes physiques et sensorielles correspondant à cette modalité. Cette décomposition des critères s'arrête dès qu'il est possible d'associer une ou plusieurs échelles à un critère feuille, à partir des spécifications d'un cahier des charges.

La formalisation des critères correspondant à chaque modalité a nécessité, généralement, la validation des experts CIM car les modalités, en plus de représenter des expertises en confort, représentent également des expertises en matériel roulant. Pour la modalité *aménagement*, la validation des décideurs a également été nécessaire. Ce processus interactif, que nous verrons à la section 7.2 du chapitre 7, ainsi que le manque de connaissances sur le confort peuvent retarder la formalisation des critères. En effet, pour certaines modalités, plusieurs réunions étaient nécessaires pour la formalisation des critères, et la validation n'était pas immédiate (il a fallu parfois reconstruire le modèle de critères). Alors que pour d'autres modalités, il était difficile de formaliser les critères par manque de connaissances sur leurs dépendances ou par notre incapacité à les relier avec des paramètres physiques. Afin d'illustrer cela, nous avons choisi de présenter les modalités *aménagement* et *siège environné* dont la formalisation des critères a pris le plus de temps.

- **La modalité *aménagement et services*** : les études et enquêtes réalisées sur la perception du confort ne nous permettaient pas d'identifier les critères de cette modalité, ni la manière dont ils sont évalués par les voyageurs. Nous nous sommes fondés, dans un premier temps, uniquement sur les connaissances des experts afin de formaliser les critères. La validation a nécessité, contrairement aux autres modalités, l'intervention des décideurs. Ils ont demandé certaines modifications car le modèle ne prenait pas en compte certains équipements individuels ayant un impact sur le confort assis. Ils

nous ont faits remarquer également que de nouveaux équipements, pouvant favoriser le confort assis, ne pouvaient pas être pris en compte par le modèle. En tenant compte de cela, nous avons proposé de considérer des catégories d'équipements au lieu de les énumérer comme suit :

- pour les équipements liés aux activités : une catégorie d'équipements indispensables pour l'activité, une catégorie d'équipements utiles pour l'activité et une catégorie d'équipements pouvant constituer un « bonus » pour l'activité.
- pour les équipements liés au confort assis mais pas aux activités (range-ments) : une catégorie d'équipements indispensables pour le confort assis et une catégorie d'équipements utiles pour le confort assis.
- **La modalité *siège environné*** : le nombre important de critères constituant cette modalité, leurs dépendances ainsi que la difficulté de les relier aux paramètres physiques d'un siège, a retardé leur formalisation. En effet, le siège environné est la modalité la plus complexe car elle comprend la relation entre le siège et son environnement. Cette relation peut affecter la perception du confort liée à l'intimité d'un voyageur, à l'espace nécessaire à son aisance et à l'encombrement d'objets tels que la poubelle et le repose-pieds. Cette modalité comprend également la dépendance entre les différentes composantes d'un siège (dossier, assise, tablette et appui-tête). Cette dépendance peut affecter le confort dans l'adoption et le maintien d'une posture, et l'inconfort lié à la dureté ainsi qu'à la présence de points durs dans un siège. De plus, d'après les experts en confort du siège, il existe des dépendances entre certains critères de cette modalité qu'il est difficile de formaliser par manque de connaissances, notamment entre *l'adoption de la posture* et *le maintien de la posture*. La structure actuelle du modèle ne permet pas de les prendre en compte. En plus de ces dépendances, pour certains critères il était difficile d'associer des paramètres physiques comme le critère *maintien de la posture* et les paramètres physiques d'un galbe de dossier

4.6.2 Construction des échelles

Après la construction du modèle conceptuel, et avant l'agrégation des critères nous avons dû trouver un moyen d'évaluer les performances d'une offre sur chaque critère feuille. Pour cela, nous avons tout d'abord identifié pour chaque critère feuille les spécifications des cahiers des charges et les normes pouvant avoir un impact sur le critère en question. En effet, les fournisseurs répondent uniquement à ces spécifications lors d'un appel d'offres. C'est donc le seul moyen de pouvoir les évaluer. Ensuite, nous avons construit à partir de ces spécifications une ou plusieurs échelles correspondant à chaque critère feuille afin d'obtenir les dimensions.

Cette étape a nécessité l'appropriation des données des cahiers des charges et

des normes ainsi que le langage utilisé par les experts en matériel roulant. D'autre part, l'identification des spécifications de confort dans un cahier des charges était difficile car elles sont dispersées dans plusieurs fascicules qu'il fallait parcourir. Nous avons construit, au total, 60 échelles (indicateurs) environ pour les modalités du confort assis. Ce nombre doit être multiplié par le nombre d'activité, le nombre de groupe et éventuellement par le nombre de facteurs perceptifs propres à chaque modalité comme les saisons pour la modalité *Thermique*, si l'on veut obtenir le nombre de dimensions.

Pour les modalités : *Thermique*, *Dynamique*, *Acoustique*, *Ambiance lumineuse*, *Siège environné* et *Tympanique*, les échelles construites dépendent soit des paramètres physiques de l'offre seulement (par exemple, la vitesse de variation de la température intérieure d'un train par rapport à la température extérieure, pour la modalité thermique), soit des paramètres physiques et perceptifs à la fois (par exemple, la moyennes des écarts entre les températures intérieures et les températures de référence). Les valeurs des paramètres perceptifs peuvent dépendre des activités, de la variabilité interindividuelle mais aussi d'autres facteurs propres à chaque modalité comme les saisons pour la modalité thermique.

Les principales difficultés, ayant retardé la construction des échelles, étaient dues aux dépendances entre les spécifications associées à un même critère et à la construction d'échelles qualitatives. Nous pouvons illustrer cela avec les modalités *Aménagement* et *Siège environné*.

- **La modalité *Aménagement et services*** : En ce qui concerne cette modalité, nous avons construit uniquement des échelles qualitatives, où chaque échelon représente une note possible pouvant être attribuée par les entités chargées d'évaluer les offres à l'aide de maquettes virtuelles. En effet, il est difficile d'évaluer les performances d'une offre sur les critères d'aménagement uniquement avec des paramètres physiques. Il reste à valider la construction des échelles avec les décideurs et les utilisateurs de l'outil. Cela nécessite plus de temps que pour les autres modalités car il faudrait d'une part identifier les documents relatifs aux réponses des fournisseurs à partir desquels ces notes seraient attribuées, et d'autre part trouver un consensus entre les différents intervenants afin de définir pour chaque échelon une sémantique avec un minimum d'ambiguïté.
- **La modalité *Siège environné*** : pour cette modalité, il reste à construire les échelles correspondant au critère *maintenir la posture* car, avec les connaissances actuelles, nous n'arrivons ni à construire une échelle permettant d'évaluer la performance d'un galbe pour le maintien de la posture, ni à formaliser la dépendance entre le galbe et d'autres paramètres physiques associés au maintien de la posture (la profondeur de l'appui-tête, par exemple).

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes que nous avons suivies pour construire les critères de notre modèle. Cette construction a nécessité une forte interaction avec les experts en confort, les experts en matériel roulant et dans une moindre mesure, avec les décideurs. En effet cette construction devait répondre à deux préoccupations principales qui pouvaient donner lieu à des contradictions. Elles consistaient à représenter au mieux la perception des voyageurs et à prendre en compte les besoins et les avis des différents intervenants.

La première préoccupation a nécessité l'identification des facteurs qui affectent la perception du confort. Deux facteurs principaux ont guidé notre modélisation :

- **le contexte** qui est caractérisé dans les TGV par **les activités** pratiquées,
- **la variabilité interindividuelle** caractérisée par des groupes de voyageurs qui partagent la « même » perception des composantes du confort.

La deuxième préoccupation a nécessité plusieurs itérations avec les différents intervenants afin de modifier ou réajuster la structure du modèle.

La construction des critères s'est déroulée en deux étapes : l'identification des critères (le modèle conceptuel) et la construction des échelles associées. Le modèle conceptuel auquel nous avons abouti est de nature *hiérarchique* où le sommet représente le confort global, et chaque nœud représente un critère qui est décomposable en sous critères sauf les feuilles (qui sont des critères non décomposables). Sa construction a nécessité l'appropriation des études et enquêtes sur la perception du confort ainsi qu'une forte interaction avec les experts en confort afin de représenter au mieux cette perception. Nous verrons plus en détail, au chapitre 7, comment s'est déroulé l'interaction avec les experts en confort pour la construction du modèle conceptuel. Ce modèle devait également respecter certaines exigences théoriques sur la construction des critères car l'application de la plupart des méthodes d'agrégation nécessite le respect de ces exigences, ce qui n'a pas été nécessairement le cas pour chaque nœud, soit parce que nous ne disposons pas de connaissances suffisantes pour construire des critères qui vérifient ces exigences, soit parce que nous devons aboutir à un modèle trop complexe pour qu'il puisse être utilisé. D'autres part, nous avons identifié des facteurs perceptifs qui peuvent être importants et que nous n'avons pas pris en compte dans le modèle par manque de connaissances. L'identification de ces facteurs servira à formuler les hypothèses sous lesquelles le modèle sera valide. Pour ce qui concerne les échelles, leur construction a nécessité l'appropriation des données des cahiers des charges ainsi qu'une forte interaction avec les experts en confort et en matériel roulant. Nous verrons plus en détail, au chapitre 7, comment s'est déroulée cette interaction. L'avantage de la structure de notre modèle est qu'elle n'est pas dépendante des échelles utilisées tant que les conséquences élémentaires correspondantes restent les mêmes. En effet, ces échelles ont été construites à partir de spécifications

qui peuvent être sujettes à des modifications ou à des remplacements parce que des études futures pourraient montrer que les spécifications actuelles ne sont pas pertinentes ou une décision politique pourrait exiger l'utilisation d'une spécification au lieu d'une autre, etc. Cela donne à notre modèle un certain avantage quant à la généralité de l'outil par rapport à des évolutions possibles du processus de décision.

Nous avons proposé comme amélioration possible, de décomposer par endroits (où les caractéristiques physiques sont plus ou moins homogènes) les offres proposées par les constructeurs. Cela permet d'affiner le modèle et d'obtenir une évaluation plus précise du confort des offres afin de pouvoir les différencier. Néanmoins, cette décomposition peut s'avérer inutile si le constructeur ne fournit pas des données plus précises sur les caractéristiques physiques.

À la fin de ce chapitre, nous avons dressé un bilan de ce qui a été réalisé pour la construction des critères. Nous avons également mentionné les principales difficultés ayant retardé cette construction et ce qui reste à réaliser pour les modalités *aménagement et services* et *siège environné*.

Chapitre 5

Agrégation des critères

Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'agrégation des critères que nous avons construits lors des deux précédentes étapes de notre approche. Cette étape constitue la dernière phase de construction du modèle d'évaluation du processus d'aide à la décision. Les critères construits au chapitre précédent ont une structure arborescente (modèle hiérarchique). Nous avons associé à chaque critère, se trouvant au dernier niveau de l'arborescence, une ou plusieurs dimensions (conséquences élémentaires et échelles). Dans ce chapitre, nous décrirons tout d'abord l'étape d'agrégation. Nous présenterons ensuite, à titre d'exemple, comment nous avons agrégé les critères des modalités *thermique* et *siège environné* qui correspondent à une partie du modèle conceptuel. Nous terminerons ce chapitre par un bilan de ce qui a été réalisé et proposerons des perspectives sur ce qui reste à faire à cette étape.

5.1 Description de l'étape d'agrégation des critères

A l'image de l'étape de construction du modèle conceptuel, nous nous sommes posés les mêmes questions concernant les besoins et préoccupations des intervenants :

- est-ce que les besoins et préoccupations par rapport à l'utilisation de l'outil peuvent affecter l'agrégation des critères ?
- y'a-il des préoccupations spécifiques à prendre en compte lors de l'étape d'agrégation ?

Nous avons répondu à la première question lors de la première étape de notre approche qui est la définition de la problématique. En effet, la problématique a été définie à partir des besoins et préoccupations par rapport à l'utilisation de l'outil. Cela nous incite donc à utiliser des méthodes d'agrégation qui répondent à des

problématiques de tri ou, idéalement, à des problématiques de tri et de rangement au sein d'une même catégorie. En ce qui concerne la deuxième question, nous tenterons d'y répondre dans cette section.

L'étape d'agrégation des critères a commencé par l'agrégation des dimensions de chaque critère feuille afin d'obtenir une évaluation sous forme d'une échelle unique. Ensuite, nous avons agrégé les critères de chaque nœud père à partir de ses nœuds fils déjà évalués. Et cela, jusqu'au premier niveau du modèle. Nous avons utilisé pour cela une méthode d'agrégation pour chaque nœud. Ces méthodes peuvent être différentes d'un nœud à l'autre, contrairement à AHP où la même méthode est utilisée à chaque nœud (un modèle additif). En plus du choix de la méthode en chaque nœud, nous avons élicité les préférences des intervenants concernés afin de mettre en œuvre les méthodes d'agrégation. L'élicitation des préférences a été faite avec les experts en confort pour ce qui est des nœuds correspondant aux modalités et leurs sous critères. Elle se fera avec les décideurs pour ce qui est des nœuds correspondant aux groupes et aux activités.

Nous tenterons dans cette section d'expliquer la méthodologie utilisée pour choisir un type de méthode d'agrégation en chaque nœud. Nous nous intéresserons ensuite aux procédures d'élicitation des préférences correspondant aux méthodes utilisées.

5.1.1 Choix des méthodes d'agrégation

Les méthodes utilisées, pour l'agrégation des critères de notre problème, ont été choisies parmi les méthodes d'agrégation présentées au chapitre 1. Ce choix était guidé par les points suivant :

- la problématique d'aide à la décision,
- la finesse du résultat souhaité,
- la conformité de la nature des échelles (ordinales ou cardinales, hétérogène ou homogène) et de l'information préférentielle avec les conditions d'utilisation de la méthode,
- l'intelligibilité de la méthode par rapport à sa mise en œuvre et à l'interprétation du résultat obtenu,
- la capacité de la méthode à modéliser l'information intercritères (compensation, interactions, véto, etc.).

Étant donné le nombre important de méthodes multicritères, il n'est pas possible de toutes les considérer dans une procédure de choix de méthode pour agréger les critères d'un nœud. Pour cela, nous avons tout d'abord déterminé, en se fondant sur les points cités ci-dessus, un minimum de méthodes potentielles à utiliser avant d'appliquer une procédure de choix. Nous avons retenu trois méthodes représentatives des trois familles, présentées au chapitre 1.

- **Les méthodes à base de règles** : parmi ces méthodes, nous avons retenu la construction de règles avec le décideur, car elle fournit un résultat exploitable et facile à interpréter pour un intervenant, dans le cadre de notre problème. En effet, il est important que le résultat soit une affectation exclusive des offres, et que les règles de décision soient intuitives et faciles à interpréter. Cela n'est pas le cas des méthodes *DRSA*.
- **Les méthodes utilisant un critère unique de synthèse** : nous avons retenu l'intégrale de Choquet car cette méthode est appropriée pour modéliser les interactions entre critères (souvent rencontrées dans l'étape d'agrégation). Elle a été préférée aux autres méthodes utilisant un critère unique de synthèse car, sous réserve de commensurabilité des échelles, elle prend en compte plus d'information préférentielle que les méthodes fondées sur des modèles additifs, de *minimum*, de *maximum* et de *OWA*. Cependant, nous avons vérifié à chaque fois si les méthodes fondées sur des modèles additifs ou des modèles de type *minimum* permettaient de restituer les préférences de l'intervenant.
- **Les méthodes de surclassement** : nous avons retenu ELECTRE TRI car c'est la principale méthode de surclassement permettant d'obtenir un résultat sous forme de tri.

Les trois méthodes retenues (construction de règles, l'intégrale de Choquet et ELECTRE TRI) sont assez complémentaires sur leurs conditions d'utilisation et sur leur capacité à modéliser l'information intercritères. Ces méthodes sont également les plus utilisées en AMCD.

Procédure de choix d'une méthode d'agrégation dans un nœud

La procédure de choix d'une méthode pour agréger les critères dans un nœud est fondée sur la finesse du résultat souhaitée par l'intervenant ainsi que sur l'intelligibilité de la méthode par rapport à sa mise en œuvre (cela dépendait généralement du nombre de critères et de l'ensemble des valeurs possibles dans ce nœud). En pratique, nous demandons d'abord à l'intervenant s'il souhaite différencier les alternatives au sein d'une même catégorie. Si cela est le cas, nous utilisons l'intégrale de Choquet. Sinon, nous utilisons l'une des deux autres méthodes selon le nombre de critères à agréger et l'ensemble des valeurs possibles. De manière plus formelle, la procédure est décrite par les quatre étapes suivantes.

- 1- Si l'intervenant ne souhaite pas différencier les alternatives d'une même catégorie, nous nous intéressons au nombre de critères et aux ensembles de leurs valeurs possibles :
 - si le nombre de critères n'est pas important (en général, pas plus de quatre) ou l'ensemble des valeurs possibles de ces critères n'est pas de grande taille nous construisons une base de règles avec l'intervenant car, dans ce cas,

- sa mise en œuvre est facile, elle permet de prendre en compte tout type d'information intercritères et n'exige aucune condition sur les échelles,
- sinon, la mise en œuvre d'une base de règles devient difficile, nous utilisons donc ELECTRE TRI qui préserve l'avantage de n'avoir aucune exigence sur la nature des échelles, mais qui ne prend pas en compte les dépendances au sens des préférences.
- 2- Si l'intervenant souhaite un résultat plus précis (différencier les alternatives d'une même catégorie) alors nous vérifions si :
- il est possible de transformer les échelles de critères avec une procédure de type MACBETH (voir section 1.6 dans la chapitre 1), de telle sorte à les rendre commensurables,
 - il n'y a pas d'incomparabilités, ni d'intransitivités dans ses préférences, en lui faisant comparer des alternatives d'apprentissage par paires,
- Pour ce qui est du cas où les deux conditions précédentes ne sont pas satisfaites, il ne s'est pas encore présenté. Nous pensons qu'il est peu probable qu'il se présente. En effet, lorsqu'un expert souhaite un résultat précis, ses préférences sont rarement incomplètes.

Discussion sur la procédure de choix

Nous avons considéré dans cette procédure uniquement trois types de méthodes car nous avons privilégié l'intelligibilité du modèle d'évaluation. En effet, dans une approche constructive où l'intervenant est sollicité pour l'élicitation des préférences, il est important que ce dernier s'approprie le principe des méthodes utilisées. De plus, étant donné le nombre important de nœuds, il est préférable d'un point de vue pratique de minimiser le nombre de méthodes et d'éviter les méthodes difficiles à mettre en œuvre. D'autres part, nous avons formulé dans cette procédure une hypothèse sur la commensurabilité des échelles pouvant être restrictive. Nous aurions pu utiliser d'autres méthodes de type *MAUT* (par exemple les méthodes fondées sur des modèles additifs) ne nécessitant pas cette hypothèse et avec lesquelles il est possible d'obtenir un résultat aussi précis. Cependant, ce choix peut être justifié par le fait que dans la majorité des nœuds il y ait des interactions entre critères ne pouvant pas être prises en compte par des méthodes fondées sur des modèles additifs.

Cette procédure de choix ne prend pas en compte le cas où l'intervenant souhaite un résultat plus précis qu'une affectation dans des catégories s'il y a des incomparabilités ou s'il n'est pas possible de rendre les échelles commensurables. Nous n'avons pas été confronté à ce cas dans notre problème. Deux solutions peuvent être envisagées : soit le souhait de l'intervenant est revu à la baisse, dans quel cas nous utilisons l'une des deux autres méthodes, soit nous pouvons dans un premier temps utiliser l'une des deux méthodes et dans un deuxième temps utiliser

une méthode qui fournit un préordre partiel sur les alternatives se trouvant au sein d'une même catégorie.

5.1.2 Elicitation des préférences

Nous avons constaté, lors de notre expérience, que les procédures d'élicitation des préférences associées à une méthode d'agrégation pouvaient nous influencer en tant qu'homme d'étude sur le choix de la méthode. En effet, la mise en œuvre de certaines méthodes nécessite l'élicitation de nombreux paramètres décisionnels de différentes natures ou la détermination de règles complexes. Ceci peut demander beaucoup de temps et d'effort à un intervenant n'en disposant pas nécessairement. Ce phénomène (beaucoup de temps et d'effort) est souvent rencontré lorsque les procédures d'élicitation sont directes et parfois même lorsqu'elles sont indirectes et qu'elles nécessitent une forte interaction (dialogue avec l'intervenant). Les procédures indirectes, souvent fondées sur des procédures d'agrégation/désagrégation, ont été utilisées pour l'élicitation des paramètres décisionnels d'ELECTRE TRI et de l'intégrale de Choquet. Nous avons utilisé des procédures directes pour l'élicitation des profils d'ELECTRE TRI et pour construire des règles de décision. Nous allons revoir, dans la suite, pour chacune des trois méthodes d'agrégation, comment ces procédures d'élicitation ont été utilisées et si d'autres procédures auraient pu être plus appropriées.

Elicitation des paramètres d'ELECTRE TRI

Bien que le principe de cette méthode soit intuitif et facile à s'approprier, elle comporte de nombreux paramètres décisionnels de différentes natures devant être élicités. Dans notre approche, pour les nœuds où cette méthode a été utilisée, nous avons élicité séparément les profils, les poids et les seuils de véto. Cela a pour avantage de permettre aux experts de s'approprier la signification de ces paramètres décisionnels et de pouvoir interpréter les valeurs élicitées. Les profils ont été élicités de manière directe. Leurs valeurs, représentant des niveaux (références) de confort, ont une signification particulière pour les experts en confort (voir l'exemple du confort thermique à la section 5.2.1). Nous avons vu que les attentes des voyageurs évoluaient dans le temps et que cela pouvait avoir un impact sur les seuils (niveaux) de confort. Pour cela, nous avons préféré laisser la possibilité aux experts en confort de modifier les profils en gardant leur signification. L'inconvénient avec cette liberté est que les valeurs attribuées aux profils peuvent ne pas être en adéquation avec la signification des profils dans ELECTRE TRI, lorsque l'expert ne s'est pas bien approprié le principe.

Pour l'élicitation des poids des critères, nous avons utilisé une procédure indirecte nécessitant un dialogue avec les experts. Nous avons identifié les coalitions

minimales et avons utilisé une méthode permettant de trouver un jeu de poids compatible en fixant le seuil de concordance à $2/3$. L'inconvénient est que la phase de dialogue peut prendre beaucoup de temps si le nombre de critères est important.

Enfin, pour ce qui est des seuils de véto, nous avons également utilisé une procédure indirecte nécessitant la présence de l'expert. Nous avons utilisé pour cela des exemples d'apprentissage représentant les moins bonnes alternatives d'une catégorie, pour lesquelles nous diminuons progressivement les performances sur l'un des critères n'appartenant pas à la coalition jusqu'à ce que l'alternative modifiée n'appartienne plus à la catégorie. Les valeurs élicitées avec ces exemples d'apprentissage risquent cependant d'être trop sévères pour des seuils de véto.

L'élicitation séparée des paramètres décisionnels d'ELECTRE TRI peut être en contradiction avec « son principe ». La raison principale pour laquelle ce choix a été fait est de pouvoir intégrer le fait que le confort soit évolutif en laissant la possibilité aux experts de modifier les valeurs des profils et éventuellement des seuils de véto tout en gardant à l'esprit la signification de ces paramètres. Ceci n'est pas possible avec une procédure indirecte d'élicitation simultanée des paramètres décisionnels. De plus, avec une telle procédure il est possible de trouver des valeurs pour les profils et les poids difficiles à interpréter pour un expert dans le cadre de notre problème. Elle présente cependant l'avantage de ne pas nécessiter un effort cognitif aussi important pour l'élicitation.

Elicitation des capacités de l'intégrale de Choquet

L'intégrale de Choquet, souvent utilisée en AMCD pour obtenir un rangement, nécessite l'élicitation d'une capacité. Les procédures utilisées pour cela sont de nature indirectes et sont fondées sur des procédures d'agrégation/désagrégation car il est difficile d'attribuer des valeurs de manière directe à une capacité. Dans notre approche, nous l'avons utilisée une seule fois (voir la section 5.2.3) pour obtenir un rangement en utilisant une procédure fondée sur la méthode *maximum split approach* présentée au chapitre 1. En revanche, nous l'avons souvent utilisée pour du tri et du rangement au sein d'une même catégorie avec une procédure fondée sur la méthode *Tomaso* présentée au chapitre 1.

Dans les deux cas, nous avons utilisé des exemples d'apprentissage représentant des comparaisons par paires d'alternatives et des affectations d'alternatives. Notre expérience a confirmé que le choix des alternatives d'apprentissage était très important dans une procédure d'agrégation/désagrégation car l'apprentissage des préférences se faisait plus rapidement. Ceci pouvait diminuer sensiblement le temps d'interaction avec l'intervenant. Bien que le nombre d'exemples d'apprentissage soit important, le fait que l'ensemble de ces exemples soit informatif l'est encore davantage. Dans notre approche, nous avons tenté d'identifier ce qu'était un ensemble d'exemples d'apprentissage informatif. Notre expérience, avec l'utilisation

de l'intégrale de Choquet, nous a montré que lorsque ces ensembles représentaient des exemples d'affectation, ils étaient plus informatifs lorsqu'ils représentaient des bornes de catégories (les meilleures et les moins bonnes alternatives d'une catégorie). En pratique, la détermination de tels exemples nécessite une phase de dialogue avec l'intervenant afin de s'assurer qu'ils représentent bien des bornes de catégories. Une fois cet ensemble construit, la détermination des capacités se faisait, au plus, au bout de deux itérations dans la procédure d'agrégation/désagrégation. La deuxième itération n'était nécessaire que si nous n'arrivons pas à trouver une capacité compatible avec l'information préférentielle.

Il est possible de montrer pour n'importe quelle méthode de tri, qu'un ensemble d'exemples d'apprentissage représentant des exemples d'affectation constituant des bornes de catégorie, est plus informatif qu'un ensemble quelconque à partir duquel il a été obtenu si la fonction d'appartenance à une catégorie est croissante avec chacune des performances des alternatives. La détermination d'un tel ensemble n'est évidemment pas envisageable sans dialogue avec un intervenant. Mais, ne vaut-il pas la peine de fournir un effort cognitif un peu plus important pour un gain de temps significatif dans l'elicitation des préférences ?

Elicitation des préférences pour la construction de règles

Dans la majorité des cas où cette méthode est utilisée, les règles sont construites de manière directe à partir d'un dialogue avec l'intervenant sans méthodologie particulière car elle est utilisée lorsque le nombre de critères et la cardinalité de l'ensemble des valeurs possibles sont de petite taille. Nous vérifions ensuite si la base de règles est cohérente (exhaustive, exclusive et monotone). Néanmoins, ce mode de fonctionnement peut ne pas s'avérer pertinent lorsqu'il s'agit de prendre en compte les préférences de plusieurs intervenants (ce qui sera le cas pour la modalité *aménagement*), ou si nous sommes contraints d'utiliser cette méthode bien que le nombre de critères soit important. Pour cela, nous pensons que l'utilisation d'exemples d'affectation avec des alternatives constituant des bornes de catégories, peut faciliter la construction de règles car les valeurs sur lesquelles portent les conditions représentent les performances d'alternatives constituant des bornes de catégories. Par exemple, une règle de type :

$$\text{si } g_{i_1}(a) \geq r_{i_1}, g_{i_2}(a) \geq r_{i_2}, \dots, g_{i_l}(a) \geq r_{i_l} \text{ alors } a \in Cl_h$$

peut être obtenue à partir de l'alternative a^- constituant une borne inférieure de la catégorie Cl_h et dont les performances sont données par le n-uplet :

$$(\underline{g}_1, \underline{g}_2, \dots, r_{i_1}, r_{i_2}, \dots, r_{i_l}, \dots, \underline{g}_n)$$

où les \underline{g}_i représente les pire performance sur les critères i et les r_j , t.q. $j \in \{i_1, \dots, i_l\}$, représentent les performances des critères sur lesquels porte la condition.

5.2 Agrégation des critères de la modalité thermique

Nous allons voir, dans cette section, comment nous avons agrégé les critères de la modalité thermique pour une activité et un groupe fixés. Ces critères représentent une partie du modèle conceptuel. Pour l'instant, les experts en confort ne sont pas en mesure de caractériser l'effet de la pratique des activités ou de l'âge des voyageurs sur la perception du confort thermique bien qu'ils soient persuadés de cela. Les méthodes d'agrégation utilisées, qui seront présentées dans cette section, sont les mêmes pour chaque activité et chaque groupe. Néanmoins, les paramètres décisionnels élicités auraient pu être différents, si l'effet des activités et de l'âge avaient été caractérisés, chose qui pourrait être faite dans le futur car la structure du modèle conceptuel nous le permet.

Les critères de la modalité thermique forment trois niveaux (voir le tableau 5.1). Les deux premiers correspondent au cinquième et au sixième niveau du modèle conceptuel (voir la figure 4.8) et le troisième niveau correspond aux dimensions (échelles) voir la section 4.4.3 du chapitre 4. L'agrégation commence à partir des dimensions. Une fois les nœuds de chaque niveau évalués, on passe au niveau supérieur, jusqu'à l'évaluation de la modalité thermique.

Dans cette section, nous allons présenter pour chaque nœud, comment nous avons procédé pour choisir la méthode d'agrégation et éliciter les préférences des intervenants.

5.2.1 Niveau 3 : agrégation des dimensions

À ce niveau, nous avons utilisé deux types de méthodes : ELECTRE TRI pour agréger les cinq dimensions de *Absence de sensations désagréables* et le *minimum* pour agréger les deux dimensions de *Absence de rupture* et cela pour chaque saison. La différence entre les saisons, à ce niveau, réside dans les valeurs de référence des températures et des vitesses d'air.

5.2.1.1 Agrégation des dimensions de *Absence de sensations désagréables*

Dans ces nœuds, nous avons cinq dimensions ($|F| = 5$, vérifiant les conditions de cohérence) dont les échelles sont cardinales et les indicateurs correspondants, à minimiser, sont : $fT^{\text{TimTic}}(e, S)$, $fT^{\text{hrz}}(e, S)$, $fT^{\text{vrt}}(e, S)$, $fT^{\text{paroi}}(e, S)$, $fT^V(e, S)$. L'expert en confort thermique n'ayant pas exprimé de souhait sur la précision du résultat, nous avons vérifié s'il était possible de transformer les échelles en une échelle d'intervalle commune. Cela n'a pas pu être possible car il était difficile de construire des échelles de confort commensurables correspondant à cinq critères évalués sur des échelles hétérogènes. Nous avons donc abandonné l'idée

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3 : les dimensions
La modalité thermique	La saison $S1$	Absence de sensations désagréables	$fT^{\text{TimTic}}(e, S)$ $fT^{\text{hrz}}(e, S)$ $fT^{\text{vrt}}(e, S)$ $fT^{\text{paroi}}(e, S)$ $fT^{\text{V}}(e, S)$
		Absence de rupture	$fT^{\text{TicTem}}(e, S)$ $fT^{\text{pre}}(e, S)$
	La saison $S2$	Absence de sensations désagréables	$fT^{\text{TimTic}}(e, S)$ $fT^{\text{hrz}}(e, S)$ $fT^{\text{vrt}}(e, S)$ $fT^{\text{paroi}}(e, S)$ $fT^{\text{V}}(e, S)$
		Absence de rupture	$fT^{\text{TicTem}}(e, S)$ $fT^{\text{pre}}(e, S)$
	La saison $S3$	Absence de sensations désagréables	$fT^{\text{TimTic}}(e, S)$ $fT^{\text{hrz}}(e, S)$ $fT^{\text{vrt}}(e, S)$ $fT^{\text{paroi}}(e, S)$ $fT^{\text{V}}(e, S)$
		Absence de rupture	$fT^{\text{TicTem}}(e, S)$ $fT^{\text{pre}}(e, S)$

Tableau 5.1 – Les critères de la modalité thermique

d'utiliser l'intégrale de Choquet. Nous avons ensuite demandé, à cet expert et à l'expert en matériel roulant (spécialiste en climatique), quelles sont les dimensions les plus importantes et si elles peuvent se compenser. Ils ont affirmé que la première dimension ($fT^{\text{TimTic}}(e, S)$) et la dernière dimension ($fT^{\text{V}}(e, S)$) étaient les plus importantes et ne pouvaient pas être compensées par les autres pour réduire la sensation d'inconfort. Nous avons demandé ensuite aux experts quels pourraient être les niveaux de confort de référence pour le critère *Absence de sensations désagréables* afin de pouvoir choisir une méthode de tri. L'expert en confort a jugé suffisant, étant donné l'information dont il dispose, de considérer trois niveaux de référence : *inconfort*, *inconfort léger* et *absence d'inconfort* pour l'évaluation du critère *Absence de sensations désagréables*. Cela convenait également à l'ex-

pert en climatique car les spécifications de son fascicule, à partir desquelles nous avons construit ces dimensions, sont formulées en utilisant deux seuils à ne pas dépasser qui pourraient servir à la caractérisation des trois niveaux de référence. Nous avons codé ces niveaux (catégorie) de confort sur une échelle ordinale (voir le tableau 5.2). On notera dans la suite de cette section $g_j(a)$ t.q. $j \in \{1, \dots, 5\}$,

Niveau de confort	Échelle ordinale
Absence d'inconfort	3
Inconfort léger	2
Inconfort	1

Tableau 5.2 – Codage des catégories de confort

les cinq dimensions du critère *Absence de sensations désagréables* ($fT^{\text{TimTic}}(e, S)$, $fT^{\text{hrz}}(e, S)$, $fT^{\text{vrt}}(e, S)$, $fT^{\text{paroi}}(e, S)$, $fT^V(e, S)$).

Compte tenu de cela, nous avons choisi ELECTRE TRI avec trois catégories, en utilisant la procédure pessimiste et sans considérer les préférences faibles, pour agréger les dimensions du critère *Absence de sensations désagréables*. Les paramètres décisionnels de la méthode ont été élicités avec l'expert en confort comme suit.

- 1- Les profils b_1 et b_2 ont été déterminés directement avec l'expert en confort car il est le plus amené à connaître la signification des échelles en terme de niveau de confort (voir Tab 5.3). Les valeurs de ces deux profils seront spécifiées dans le fascicule climatique du cahier des charges. Le raisonnement

	$fT^{\text{TimTic}}(e, S)$	$fT^{\text{hrz}}(e, S)$	$fT^{\text{vrt}}(e, S)$	$fT^{\text{paroi}}(e, S)$	$fT^V(e, S)$
b_1	2 °C	2,5 °C	5 °C	15 °C	20%
b_2	1 °C	1,5 °C	3 °C	10 °C	0%

Tableau 5.3 – Les profils des catégories de Absence de sensations désagréables

de l'expert pour l'élicitation des valeurs des profils est fondé, de manière générale, sur des essais (questionnement de voyageurs) réalisés lors d'une étude sur le confort thermique. En effet, pour toute dimension i , $b_1(i)$ représente la plus grande valeur, telle que les voyageurs jugent, en moyenne, aussi confortable les configurations a et a^* telles que $g_i(a) = b_1(i)$ et $g_i(a^*) = 0$ (situation idéale), et $b_2(i)$ représente la plus grande valeur, telle que les voyageurs jugent, en moyenne, aussi confortable les configurations a et a^* telles que $g_i(a) = b_2(i)$ et $g_i(a^*) = b_1(i) + \epsilon$, toutes choses égales par ailleurs.

2- Les poids des critères (dimensions) w_i ont été élicités en identifiant tous les sous ensembles minimaux de coalitions de critères (dimensions) $\underline{F} \subseteq F$ en faveur d'une alternative, tels que l'alternative soit au moins aussi bonne que le profil sans prendre en compte (dans un premier temps) le pouvoir de veto des critères (voir exemple 16). En fixant le seuil de concordance à $2/3$, nous avons résolu le système suivant, correspondant aux conditions de concordance, pour obtenir les valeurs des poids :

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall \underline{F} \subseteq F : \\ \sum_{i \in \underline{F}} w_i \geq \frac{2}{3} \\ \sum_{i \in \underline{F} \setminus \{j\}} w_i < \frac{2}{3} \quad \forall j \in \underline{F} \\ \sum_{i \in F} w_i = 1 \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Remarque 12 La détermination des coalitions minimales \underline{F} revient à identifier l'ensemble des « moins bonnes » actions $A^-(p)$ de chaque catégorie $p+1$ (tel que $p = \{1, 2\}$), défini comme suit :

$$A^-(p) = \{a \in A / \forall \underline{F} \subseteq F : (\forall i \in \underline{F} \ g_i(a) = g_i(b_p) \text{ et } \forall j \in F \setminus \underline{F} \ g_j(a) = g_j(b_p) + \delta)\}$$

où $\delta \in \mathbb{R}^+$ est une valeur très petite (ne pouvant pas constituer un seuil de veto), puis d'utiliser ces actions comme exemples d'affectation pour éliciter les poids au moyen d'un programme linéaire avec les contraintes correspondant aux relations suivantes :

$$a \in Cl_h \Leftrightarrow aSb_{h-1} \text{ et } \neg(aSb_h) \quad \forall h = \overline{2, \dots, c} \quad (5.2)$$

L'utilisation de telles actions comme exemples d'affectation, peut diminuer le nombre d'itérations dans une procédure d'agrégation/désagrégation.

Exemple 16 Dans le modèle, nous avons identifié trois coalitions minimales : $\underline{F}_1 = \{1, 5\}$, $\underline{F}_2 = \{1, 2, 3, 4\}$ et $\underline{F}_3 = \{2, 3, 4, 5\}$ et avons ensuite

résolu le système suivant

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 + w_5 \geq \frac{2}{3} \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 \geq \frac{2}{3} \\ w_2 + w_3 + w_4 + w_5 \geq \frac{2}{3} \\ w_1 + w_2 + w_3 < \frac{2}{3} \\ w_1 + w_2 + w_4 < \frac{2}{3} \\ w_1 + w_3 + w_4 < \frac{2}{3} \\ w_2 + w_3 + w_4 < \frac{2}{3} \\ w_3 + w_4 + w_5 < \frac{2}{3} \\ w_2 + w_3 + w_5 < \frac{2}{3} \\ w_2 + w_4 + w_5 < \frac{2}{3} \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1 \end{array} \right. \quad (5.3)$$

Nous avons trouvé les valeurs suivantes : $w_1 = \frac{1}{3}$, $w_2 = \frac{1}{9}$, $w_3 = \frac{1}{9}$, $w_4 = \frac{1}{9}$ et $w_5 = \frac{1}{3}$

- 3- Une fois les poids déterminés, nous avons considéré les « moins bonnes » actions A^R des catégories 2 et 3, comme exemples d'apprentissage.

$$A^R = A^-(1) \cup A^-(2)$$

Nous nous sommes concentrés ensuite sur les actions $a \in A^R$ pour lesquelles on fixe une dimension $j \in F \setminus \underline{F}$ et on diminue progressivement la performance du critère j (on augmente $g_j(a)$) jusqu'à ce que l'assertion aSb_p ne soit plus valide. Soit g_j^* la plus petite valeur telle que aSb_p ne soit plus valide. Le seuil de véto du critère j est donc donné par :

$$vt_j(g_j(b_p)) = g_j^* - g_j(b_p) \quad (5.4)$$

La même procédure est répétée pour tous les critères de $F \setminus \underline{F}$ et pour toute coalition \underline{F} jusqu'à ce que tous les seuils de vétos soient déterminés (voir Tab 5.4).

Remarque 13 *L'utilisation des « moins bonnes » alternatives, pour l'élicitation des seuils de véto maximise la possibilité que ces valeurs soient les plus petites possibles. En effet si nous avons élicité les seuils de véto à partir d'alternatives meilleures que celles considérées, nous aurions pu trouver des valeurs supérieures à celles élicitées (moins « sévères ») qui ne seraient pas valables pour les alternatives de A^R .*

Les coalitions \underline{E}	Profils	Exemples d'apprentissage de A^R	$F \setminus \underline{E}$	Seuils de véto
$\underline{E} = \{1, 5\}$	$p = 1$	$(2; 2, 5 + \delta; 5 + \delta; 15 + \delta; 20)$	$j = 2$	pas de seuils de véto
			$j = 3$	pas de seuils de véto
			$j = 4$	pas de seuils de véto
	$p = 2$	$(1; 1, 5 + \delta; 3 + \delta; 10 + \delta; 0)$	$j = 2$	$vt_2(g_2(b_2)) = 1^\circ\text{C}$
			$j = 3$	$vt_3(g_3(b_2)) = 2^\circ\text{C}$
			$j = 4$	$vt_4(g_4(b_2)) = 5^\circ\text{C}$
$\underline{E} = \{1, 2, 3, 4\}$	$p = 1$	$(2; 2, 5; 5; 15; 20 + \delta)$	$j = 5$	$vt_5(g_5(b_1)) = 10\%$
	$p = 2$	$(1; 1, 5; 3; 10; 0 + \delta)$	$j = 5$	$vt_5(g_5(b_2)) = 10\%$
$\underline{E} = \{2, 3, 4, 5\}$	$p = 1$	$(2 + \delta; 2, 5; 5; 15; 20)$	$j = 1$	$vt_1(g_1(b_1)) = 0.5^\circ\text{C}$
	$p = 2$	$(1 + \delta; 1, 5; 3; 10; 0)$	$j = 1$	$vt_1(g_1(b_2)) = 0.5^\circ\text{C}$

Tableau 5.4 – *Elicitation des seuils de véto*

Cette procédure d'élicitation n'est qu'une heuristique. Les valeurs élicitées peuvent être différentes si nous avons utilisé une procédure où les paramètres sont élicités simultanément. Cependant le resultat de l'affectation obtenu semblait satisfaire les décideurs. On notera $CIT^{\text{NoSsDes}}(e, S)$ la catégorie de confort dans laquelle l'offre e sera affectée pour le critère *Absence de sensations désagréables*, pour la saison S (voir le tableau 5.5)

	g_1 (°C)	g_2 (°C)	g_3 (°C)	g_4 (°C)	g_5 %	$CIT^{\text{NoSsDes}}(e, S)$
a_1	2, 3	0	3	0	25	Inconfortable (1)
a_2	2, 5	0	0	0	0	Inconfortable (1)
a_3	1, 5	2, 4	3	8	25	Inconfort léger (2)
a_4	0.5	2, 4	4	12	0	Absence d'inconfort (3)

Tableau 5.5 – *Exemples d'affectation pour le critère Absence de sensations désagréables*

5.2.1.2 Agrégation des dimensions de *Absence de rupture*

Dans ce nœud, nous avons deux dimensions dont les indicateurs d'état correspondants, à minimiser, sont de type cardinal : $fT^{\text{TicTem}}(e, S)$ et $fT^{\text{pre}}(e, S)$. Étant donné le nombre limité de critères, nous avons pensé à utiliser une méthode d'agrégation simple comme une base de règles. Il s'est avéré que ces règles, inférées avec l'expert en confort, pouvaient être représentées par le *minimum*. En effet, dans le raisonnement de l'expert, chacune des deux dimensions, a deux seuils (s_1^{TicTem} et s_2^{TicTem} pour $fT^{\text{TicTem}}(e, S)$ et s_1^{pre} et s_2^{pre} pour $fT^{\text{pre}}(e, S)$) séparant les trois niveaux (catégories) de confort du tableau 5.2. Soient $CIT^{\text{TicTem}}(e, S)$ et $CIT^{\text{pre}}(e, S)$ les transformations de $fT^{\text{TicTem}}(e, S)$ et $fT^{\text{pre}}(e, S)$ en terme de niveau de confort

$$\text{CIT}^{\text{TicTem}}(e, S) = \begin{cases} 3 & \text{si } fT^{\text{TicTem}}(e, S) \leq s_1^{\text{TicTem}} \\ 2 & \text{si } s_1^{\text{TicTem}} < fT^{\text{TicTem}}(e, S) \leq s_2^{\text{TicTem}} \\ 1 & \text{si } fT^{\text{TicTem}}(e, S) > s_2^{\text{TicTem}} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\text{CIT}^{\text{pre}}(e, S) = \begin{cases} 3 & \text{si } fT^{\text{pre}}(e, S) \leq s_1^{\text{pre}} \\ 2 & \text{si } s_1^{\text{pre}} < fT^{\text{pre}}(e, S) \leq s_2^{\text{pre}} \\ 1 & \text{si } fT^{\text{pre}}(e, S) > s_2^{\text{pre}} \end{cases} \quad (5.6)$$

La résultat de l'affectation d'une alternative étant dans une catégorie $Cl_1 : Cl_1 \in \{1, 2, 3\}$ pour la première dimension et dans $Cl_2 : Cl_2 \in \{1, 2, 3\}$ pour la seconds, sera juste le *minimum* de Cl_1 et Cl_2 (voir le tableau 5.6).

$$\text{CIT}^{\text{NoRup}}(e, S) = \min \{ \text{CIT}^{\text{TicTem}}(e, S), \text{CIT}^{\text{pre}}(e, S) \} \quad (5.7)$$

	$\text{CIT}^{\text{TicTem}}(e, S)$	$\text{CIT}^{\text{pre}}(e, S)$	$\text{CIT}^{\text{NoRup}}(e, S)$
a_1	2	3	Inconfort léger (2)
a_2	3	3	Absence d'inconfort (3)
a_3	2	1	Inconfortable (1)
a_4	3	1	Inconfortable (1)

Tableau 5.6 – Exemples d'affectation pour le critère Absence de rupture

5.2.2 Niveau 2 : agrégation des critères *Absence de sensations désagréables* et *Absence de rupture*

Une fois l'évaluation de *Absence de sensations désagréables* et *Absence de rupture* effectuée pour chaque saison, ces deux critères ($\text{CIT}^{\text{NoSsDes}}(e, S)$ et $\text{CIT}^{\text{NoRup}}(e, S)$), qui sont évalués sur une même échelle ordinale $\{1, 2, 3\}$ car les catégories ont la même sémantique, sont agrégés afin d'évaluer le confort thermique pour chaque saison. Nous avons donc trois nœuds à ce niveau. Nous avons utilisé une base de règles pour l'agrégation de ces deux critères. Pour cela, nous avons, tout d'abord, questionné l'expert en confort thermique sur l'importance des deux critères. Il a affirmé que le critère *Absence de sensations désagréables* était le plus important. Notre deuxième préoccupation était de savoir si l'inconfort global dans une saison

est plus grand que le maximum des inconforts provenant de $CIT^{\text{NoSsDes}}(e, S)$ et $CIT^{\text{NoRup}}(e, S)$ (synergie positive). L'expert a affirmé que ce n'était pas le cas. De plus, il a affirmé que l'inconfort global était assez proche du maximum des deux inconforts (la plus petite des deux catégories).

Sur la base de cette information préférentielle, nous avons pensé qu'il était judicieux de garder le même nombre de catégories (l'inconfort ne diminuant pas) comme échelle pour l'évaluation du confort thermique en chaque saison $CIT^{\text{saison}}(e, S)$. Le principe de la base de règles utilisée est d'affecter une alternative à la catégorie la moins bonne parmi les catégories auxquelles elle a été affectée lors de son évaluation sur les deux critères $CIT^{\text{NoSsDes}}(e, S)$ et $CIT^{\text{NoRup}}(e, S)$, sauf lorsque l'alternative est dans la catégorie 3 pour *Absence de sensations désagréables* et la catégorie 1 pour *Absence de rupture*, dans quel cas elle est affectée à la catégorie 2 (voir le tableau 5.7). Cette base de règles peut être résumée dans la formule suivante :

$$CIT^{\text{saison}}(e, S) = \begin{cases} 2 & \text{si } Cl^{\text{NoUnplSns}}(e, S) = 3 \text{ et } Cl^{\text{NoDisc}}(e, S) = 1 \\ \min\{Cl^{\text{NoUnplSns}}(e, S), Cl^{\text{NoDisc}}(e, S)\} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.8)$$

	$CIT^{\text{NoSsDes}}(e, S)$	$CIT^{\text{NoRup}}(e, S)$	$CIT^{\text{saison}}(e, S)$
a_1	1	2	Inconfortable (1)
a_2	1	3	Inconfortable (1)
a_3	2	1	Inconfortable (1)
a_4	3	1	Inconfort léger (2)

Tableau 5.7 – Exemples d'affectation pour le critère Confort thermique pour une saison

5.2.3 Niveau 1 : agrégation des saisons

Une fois l'évaluation de la modalité thermique sur les trois saisons, qu'on notera $S1$, $S2$ and $S3$, effectuée, nous avons utilisé l'intégrale de Choquet afin d'agréger les confort thermique de chaque saison $CIT^{\text{saison}}(e, S)$, $\forall S \in \{S1, S2, S3\}$ car les trois critères étaient évalués sur la même échelle de type cardinal n'étant pas difficile à transformer en une échelle d'intervalle. Avant de penser à l'intégrale de Choquet nous avons tenté d'utiliser des agrégateurs moins complexes comme *le minimum* ou une base de règles affectant les alternatives à des catégories prédéfinies mais il s'est avéré que :

- le minimum ne pouvait pas restituer les préférences de l'expert. Par exemple O_7PO_9 alors que $\min(O_7) = 0$ et $\min(O_9) = 0.5$ (voir la figure 5.1),

- les modèles additifs ne restituaient pas, non plus, les préférences de l’expert,
- la définition des catégories de confort n’était pas intuitive pour l’expert en confort thermique.

L’utilisation de l’intégrale de Choquet nécessite l’éllicitation des fonctions d’utilité et de la capacité. Pour cela, nous avons procédé de la manière suivante :

Elicitation des fonctions d’utilité

Les fonctions d’utilité, correspondant aux critères $CLT^{\text{saïson}}(e, S)$ pour les trois saisons, que nous devons éliciter sont notées $v_S(CL^{\text{saïson}}(e, S))$. Nous avons vu à la section 1.6.1.5 du chapitre 1 que les fonctions d’utilité d’une intégrale de Choquet devaient être commensurables. Cette condition nous conduit à mettre $v_S(1) = 0$ (la pire valeur) et $v_S(3) = 1$ (la meilleure valeur). Nous avons ensuite mis $v_S(2) = 0.5$ après s’être assuré que les différences d’intensité de préférence, $v_S(2) - v_S(1)$ et $v_S(3) - v_S(2)$, étaient équivalentes pour tout $S \in \{S1, S2, S3\}$. Nous avons obtenu donc :

$$v_S(CL^{\text{saïson}}(e, S)) = \begin{cases} 1 & \text{si } CL^{\text{saïson}}(e, S) = 3 \\ 0.5 & \text{si } CL^{\text{saïson}}(e, S) = 2 \\ 0 & \text{si } CL^{\text{saïson}}(e, S) = 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

Il est important de noter à cette étape que l’éllicitation des fonction d’utilité n’était pas difficile car les critères étaient évalués sur des échelles homogènes et l’ensemble des valeurs possibles de chacun des trois critères était petit. Dans le cas général, cette étape peut s’avérer beaucoup plus complexe.

Elicitation de la capacité

L’éllicitation de la capacité s’est déroulée selon les étapes suivantes.

1- Recueil de l’information préférentielle : nous avons demandé, à l’expert, un ordre sur l’importance des critères (les saisons) afin de construire un ensemble d’apprentissage pertinent $AP(A^R)$ constitué de comparaisons par paires (voir *PreorderConstraints* à la figure 5.1) que nous avons choisies dans un ensemble d’actions $A^R = \{O_1, \dots, O_{14}\}$ (voir la figure 5.1). La pertinence de cet exemple d’apprentissage se traduit par le fait que les comparaisons choisies soient, *a priori*, difficiles. Nous avons, ensuite, demandé à deux experts en confort thermique d’effectuer ces comparaisons. La quasi totalité de ces comparaisons étaient identiques.

2- Détection d’interactions entre critères : nous avons transformé ensuite l’ensemble des comparaisons par paires en contraintes linéaires et avons tenté de trouver une capacité additive ($k = 1$). Ce qui correspond à un modèle additif. En résolvant un programme linéaire avec ces contraintes, nous n’avons

pas trouvé de solution. Cela nous a laissé supposer qu'il y avait des interactions entre critères car il n'y avait pas de modèle additif qui pouvait restituer les préférences des experts.

3- Utilisation d'une procédure d'agrégation/désagrégation : afin de trouver une capacité qui restitue les préférences des experts, nous avons utilisé une procédure d'agrégation/désagrégation fondée sur la méthode *maximum split approach* [54]. Le principe de cette méthode est de résoudre un programme linéaire où la fonction objectif, à maximiser, correspond à la différence minimale entre les intégrales de Choquet des paires d'alternatives comparées. Ce programme linéaire a la forme suivante :

$$(PL) \left\{ \begin{array}{l} \max f = \epsilon \\ C_\mu(a_1) - C_\mu(b_1) \geq \delta_1 + \epsilon \\ C_\mu(a_2) - C_\mu(b_2) \geq \delta_2 + \epsilon \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu(\emptyset) = 0 \\ \mu(F) = 1 \\ \mu(S) \leq \mu(T), \forall S \subseteq T, \forall T \subseteq F \end{array} \right. \quad (5.10)$$

Les deux premières contraintes correspondent aux comparaisons par paires (a_1 avec b_1 et a_2 avec b_2) et les trois dernières contraintes correspondent à la définition d'une capacité.

En résolvant le programme linéaire, nous avons trouvé une solution représentant une capacité additive de l'intégrale de Choquet. Nous avons demandé ensuite aux experts si le rangement des alternatives obtenu à partir de l'intégrale de Choquet correspondant à cette capacité, était cohérent avec leurs préférences. La réponse était négative car :

- il y avait des alternatives étant dominées par d'autres alors qu'elles avaient la même évaluation globale,
- il y avait des alternatives (sur lesquelles les experts n'ont pas été questionnés pour exprimer leurs préférences) ayant des évaluations globales différentes pour les experts alors qu'elles étaient équivalentes dans le modèle.

Une fois les incohérences détectées, nous avons ajouté les contraintes correspondantes et résolu un nouveau programme linéaire. La capacité obtenue (2-additive) a donné lieu à un nouveau rangement des alternatives qui était, cette fois, en cohérence avec les préférences des experts (voir la figure 5.1).

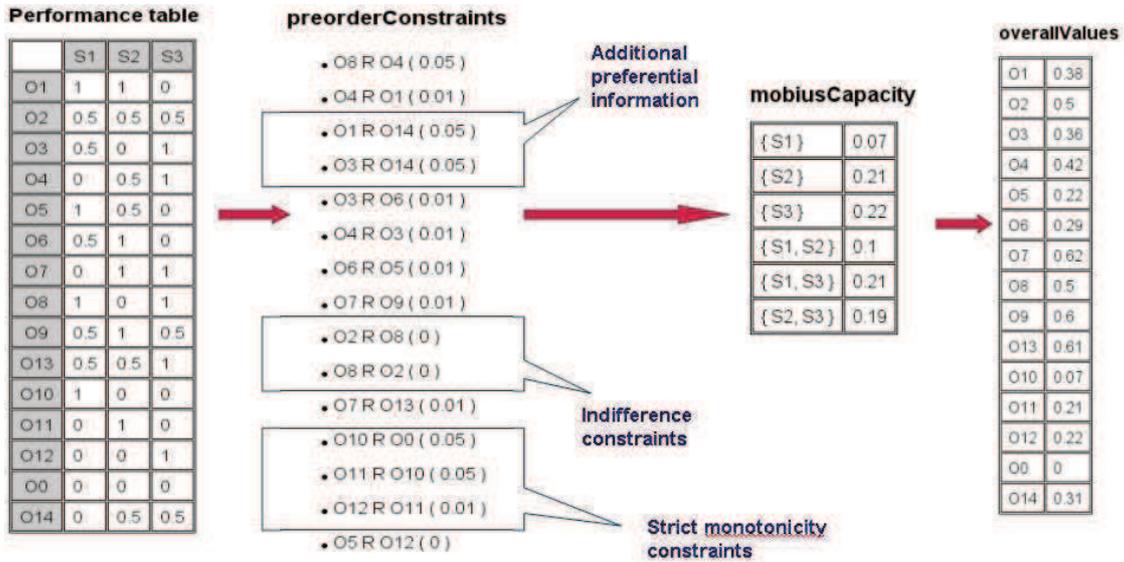


Figure 5.1 – La deuxième étape de la procédure d’agrégation/désagrégation

Après avoir déterminé une capacité compatible avec l’information préférentielle, nous avons mené une analyse de l’information préférentielle en calculant l’*indice d’interaction* I_μ et la *valeur de Shapley* Φ_μ , afin de mieux comprendre la nature des interactions entre critères et d’avoir une idée sur l’importance de chaque critère. Pour cela, nous pouvons remarquer au tableau 5.8 que tous les indices d’interaction sont positifs. Cela signifie que les critères sont plutôt complémentaires (synergie positive). Nous allons voir, dans la suite, que cela est le cas dans la majorité des nœuds. Nous pouvons également voir que la saison $S3$ est la plus importante et que $S1$ est beaucoup moins importante que $S2$ et $S3$.

Indices d’interaction		Valeurs de Shapley	
Les paires de critères	Valeurs	Les critères	Valeurs
{S1, S2}	0, 1	S1	0,22
{S1, S3}	0, 21	S2	0,36
{S2, S3}	0, 19	S3	0,42

Tableau 5.8 – Les indices d’interaction et les valeurs de Shapley

Remarque 14 Afin d’obtenir une évaluation de la modalité thermique, nous avons utilisé l’intégrale de Choquet. L’exploitation classique du résultat obtenu avec cet

agrégateur est effectuée pour répondre à une problématique de rangement. Cependant, nous pouvons considérer que les alternatives ayant une même valeur d'intégrale de Choquet sont dans une même classe d'équivalence. Nous pouvons justifier cela par le fait qu'il n'était pas possible, à ce moment là, pour les experts en confort, de définir des catégories de confort pour la modalité thermique car elle est évaluée à partir de confort à différentes périodes (différentes saisons).

5.2.4 Synthèse et discussion

Nous avons présenté, dans cette section, le cheminement suivi pour l'agrégation des critères de la modalité thermique car il est représentatif des cheminements suivis pour l'agrégation des critères de la majorité des autres modalités. La mise en œuvre des méthodes utilisées a nécessité une forte interaction avec les experts en confort surtout pour l'élicitation des paramètres décisionnels d'ELECTRE TRI. Pour ce qui concerne la construction des règles, nous avons dû comprendre d'abord le raisonnement de l'expert avant de construire les règles, ce qui n'a pas été le cas pour l'élicitation des capacités de l'intégrale de Choquet car les experts ne pouvaient pas les exprimer de manière directe. Pour cela, nous avons utilisé une procédure d'élicitation leur permettant d'apprendre sur leurs préférences. La principale difficulté rencontrée à cette étape est de n'avoir pas pu définir des catégories ayant un sens pour les experts. Cela pourrait rendre difficile l'agrégation de la modalité thermique avec les autres modalités (évaluées dans des catégories) au quatrième niveau du modèle conceptuel. Il serait donc utile de déterminer des niveaux de référence bien qu'il soit difficile de leur associer une sémantique.

5.3 La modalité *siège environné*

La modalité *siège environné* est l'une des plus importantes et plus complexes des modalités du confort assis. L'agrégation de ses critères dépend des activités mais aussi des groupes morphologiques : bien que les méthodes d'agrégation utilisées soient généralement les mêmes pour chaque activité et chaque groupe, les préférences de l'expert, censées représenter la perception des voyageurs, peuvent varier.

Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'agrégation des critères correspondant à une partie de cette modalité : la partie « *Absence de zones d'inconfort* » mesurant les inconforts locaux causés par un siège sur le voyageur. Pour des raisons d'intelligibilité, nous avons regroupé, après concertation avec l'expert siège, les dimensions de ce critère selon leur influence sur les parties du corps susceptibles d'être exposées à des inconforts locaux (voir section 4.4.4 au chapitre 4).

Les sous critères correspondant à *Absence de zones d'inconfort* forment donc

deux niveaux (voir le tableau 5.9) : le premier niveau correspond aux critères correspondant aux inconforts locaux dans chaque partie du corps considérée et le deuxième niveau, aux dimensions de ces critères. Nous allons, dans un premier temps, expliquer comment nous avons agrégé les dimensions afin d'évaluer les inconforts locaux dans chaque partie du corps. Nous verrons ensuite comment nous avons agrégé les inconforts dans chaque partie du corps afin d'évaluer les inconforts locaux causés par un siège.

	Niveau 1	Niveau 2 : les dimensions
Absence de zones d'inconfort	La tête et le cou	$fSEZI^{\text{DistAcot}}(e, G)$ $fSEZI^{\text{DApTet}}(e)$ $fSEZI^{\text{PDrApTet}}(e)$
	Le buste	$fSEZI^{\text{DDos}}(e)$ $fSEZI^{\text{PDrDos}}(e)$ $fSEZI^{\text{DAcd}}(e)$ $fSEZI^{\text{PDrAcd}}(e)$
	Le bassin et les lombaires	$fSEZI^{\text{PDrGlb}}(e)$ $fSEZI^{\text{DDos}}(e)$ $fSEZI^{\text{PDrDos}}(e)$
	Les fesses, les cuisses et le creux poplité	$fSEZI^{\text{DAss}}(e)$ $fSEZI^{\text{PDrAss}}(e)$ $fSEZI^{\text{CrPop}}(e, G)$ $fSEZI^{\text{MoelAss}}(e)$
	Les jambes	$fSEZI^{\text{JmbRel}}(e, G)$ $fSEZI^{\text{DistGnDos}}(e, G)$

Tableau 5.9 – Les sous critères de Absence de zones d'inconfort

5.3.1 Deuxième niveau : Agrégation des dimensions

Nous avons utilisé, dans ce niveau, des règles de décision construites en collaboration avec l'expert en confort du siège pour l'agrégation des dimensions. En effet, l'affectation des offres dans des catégories de confort constituait un résultat suffisant pour l'évaluation des critères du premier niveau (les parties du corps) car, d'une part, l'expert ne jugeait pas utile de différencier les alternatives se trouvant dans une même catégorie, et d'autre part, le nombre de critères en chaque nœud (≤ 4) ainsi que l'ensemble des valeurs possibles ($\{0; 1\}$) n'étaient pas importants.

La définition des catégories de confort était plus explicite que celle de la modalité thermique car avant de définir les niveaux de confort correspondant aux

catégories, nous avons, tout d'abord, identifié, à partir des dimensions, les types d'inconfort pouvant apparaître sur une partie du corps considérée, par exemple, pour la partie du corps *Fesses, cuisses et creux poplité*, nous avons identifié les types d'inconfort suivants :

- la compression du creux poplité,
- l'inconfort causé par la présence de points durs sur l'assise,
- l'inconfort causé par la dureté de l'assise (assise trop rigide),
- la compression des cuisses à cause d'une assise trop moelleuse.

Nous avons ensuite défini quatre catégories (strictement ordonnées de la moins bonne à la meilleure) de confort $\{1, 2, 3, 4\}$ avec les sémantiques suivantes :

- **1 (Très inconfortable)** : le creux poplité du voyageur est compressé et il y a des points durs sur l'assise.
- **2 (Inconfortable)** : soit le creux poplité du voyageur est compressé sans points durs, soit il y a des points durs sur l'assise.
- **3 (Inconfort léger)** : le creux poplité du voyageur n'est pas compressé, il n'y a pas de points durs sur l'assise et, soit l'arrière des cuisses du voyageur est compressé à cause du moelleux, soit, l'assise est dure.
- **4 (Absence d'inconfort)** : il n'y a aucune gêne.

Une fois la sémantique de chaque catégorie définie, il est plus facile de construire des règles de décision avec l'expert en déterminant, pour chaque catégorie, l'ensemble correspondant des combinaisons de valeurs des indicateurs d'état (voir le tableau 5.10). Nous pouvons facilement vérifier, à partir du tableau 5.10, que la base de règles est monotone, exclusive et exhaustive.

Catégorie	$fSEZICrPop$	$fSEZIPDrAss$	$fSEZIDAss$	$fSEZIMoelAss$
1	1	1	/	/
2	1	0	/	/
	0	1	/	/
3	0	0	1	0
	0	0	0	1
	0	0	1	1
4	0	0	0	0

Tableau 5.10 – Agrégation des dimensions du critère Les fesses, les cuisses et le creux poplité

Le même principe, concernant la définition de la sémantique des catégories ainsi que la construction des règles de décision, a été appliqué pour l'agrégation des dimensions des quatre autres critères : *tête et cou, buste, bassin et lombaires* et *jambes*. Les catégories de ces critères sont données au tableau. 5.11

Tête et cou	Buste	Bassin et lombaires	Fesses, cuisse et creux poplité	Jambes
1 (Inconfortable)	1 (Inconfortable)	1 (Très Inconfortable)	1 (Très Inconfortable)	1 (Très Inconfortable)
2 (Inconfort léger)	2 (Inconfort léger)	2 (Inconfortable)	2 (Inconfortable)	2 (Inconfort léger)
3 (Absence d'inconfort)	3 (Absence d'inconfort)	3 (Inconfort léger)	3 (Inconfort léger)	3 (Absence d'inconfort)
/	/	4 (Absence d'inconfort)	4 (Absence d'inconfort)	/

Tableau 5.11 – *Évaluation des inconforts locaux dans les parties du corps*

Les catégories des cinq critères au tableau 5.11 sont codées sur une échelle allant de 1 (moins bonne) à 3 (meilleure) ou de 1 à 4, selon le nombre de catégories. Nous pouvons constater que les différents critères n'ont pas les mêmes échelles (catégories). En effet, les critères **Tête et cou** et **Buste** ont trois catégories (Inconfortable, Inconfort léger et Absence d'inconfort), alors que les critères **Fesses, cuisse et creux poplité** et **Buste** ont quatre catégories. Le critère **Jambes** a trois catégories mais pas la même échelle que les deux premiers critères (la catégorie 1 correspond à Très inconfortable et non pas à Inconfortable).

5.3.2 Premier niveau : Agrégation des inconforts sur les parties du corps

Une fois les critères correspondant aux inconforts des parties du corps évalués, nous les avons agrégés afin d'obtenir une évaluation du critère *absence de zones d'inconfort* pour un groupe et une activité fixés. L'impact de certaines parties du corps sur l'évaluation est différente selon le type d'activité considéré, par exemple, le buste et la tête sont plus importants pour dormir que pour lire. L'information préférentielle intercritères est donc différente selon l'activité considérée.

Nous nous sommes intéressés, tout d'abord, à la précision du résultat souhaitée par l'expert en confort du siège. Afin de rester dans la logique du deuxième niveau et de la problématique de décision, nous avons défini des catégories de confort auxquelles nous voulions associer des sémantiques permettant d'obtenir plus d'information sur l'évaluation d'une offre et de la rendre plus intelligible. Cela n'a pas pu être le cas pour toutes les catégories, car le nombre de critères ainsi que l'ensemble des valeurs possibles étaient trop grands pour cela et il fallait faire ce travail pour chaque activité. Nous avons donc considéré cinq catégories de confort. Pour la meilleure et la plus mauvaise, nous avons pu définir une sémantique (un description de la catégorie).

- **Absence d'inconfort** : tous les critères sont à leur meilleur niveau (absence d'inconfort) sauf *la tête* et *le buste*, qui, pour certaines activités, peuvent être en inconfort léger. Les jambes peuvent être éventuellement en inconfort léger.
- **Extrêmement inconfortable** : il suffit que les critères *Bassin et lombaires*, *Fesses, cuisse et creux poplité* et *jambes* soient, en même temps, dans la

catégorie très inconfortable

En ce qui concerne les catégories intermédiaires, nous n'avons pas pu leur associer une sémantique intelligible pour l'expert en confort du siège. Afin de caractériser ces catégories, nous nous sommes servis d'exemples d'affectation. Après la construction de ces exemples, l'expert a jugé nécessaire de différencier les alternatives se trouvant dans une même catégorie, étant donné les dominances dues au nombre important de critères et des valeurs possibles. En suivant la procédure de choix, nous avons utilisé l'intégrale de Choquet. Pour cela, nous avons tout d'abord vérifié s'il n'y avait pas d'incomparabilité entre les alternatives utilisées comme exemples d'affectation, et s'il était possible de rendre les échelles commensurables. Ce travail a été réalisé pour chaque activité. Le tableau 5.12 représente les exemples d'affectation identifiés avec l'expert siège afin de caractériser les catégories de confort pour l'activité *Travailler sur PC*. Chaque alternative est représentée par un vecteur où chaque composante représente sa performance sur l'un des cinq critères. Le tableau 5.13 représente la transformation des échelles des cinq critères, en utilisant la procédure Macbeth, afin de les rendre commensurables pour toutes les activités.

Catégories	Limite basse	Limite haute
Extrêmement inconfortable	/	(3 3 1 1 1)
Très inconfortable	(1 1 1 2 2) (1 1 2 1 1)	(3 3 3 3 1) (2 2 3 1 2) (3 3 1 4 3) (1 1 4 2 1)
Inconfortable	(1 1 3 4 1) (1 1 4 3 1) (1 1 2 2 2) (2 2 4 1 2)	(3 3 2 4 3) (2 2 3 2 2) (3 3 4 4 1) (3 1 4 4 3)
Inconfort léger	(1 2 3 3 2) (3 2 4 2 3)	(3 3 3 4 3) (2 2 4 4 3)
Absence d'inconfort	(3 2 4 4 3) (1 3 4 4 3) (3 3 4 4 2)	/

Tableau 5.12 – Exemples d'affectation représentant des bornes de catégorie - Activité Travailler sur PC

Critère	Échelle initiale	Transformation
Tête et cou	{1; 2; 3}	{0; 0, 5; 1}
Buste	{1; 2; 3}	{0; 0, 5; 1}
Bassin et lombaires	{1; 2; 3; 4}	{0; 0, 3; 0, 7; 1}
Fesses, cuisses et creux poplité	{1; 2; 3; 4}	{0; 0, 3; 0, 7; 1}
Jambes	{1; 2; 3}	{0; 0, 7; 1}

Tableau 5.13 – Transformation des échelles en utilisant Macbeth

Choix des exemples d'affectation

Les exemples d'affectation utilisés ne sont pas des exemples quelconques. Ils représentent des bornes de catégories. En effet, notre expérience nous a montré que

lorsque les exemples d'affectation représentaient les meilleures et les moins bonnes alternatives de chaque catégorie, il était, d'une part, plus facile de caractériser ces dernières, et d'autre part, l'apprentissage des préférences avec ces exemples d'affectation, en utilisant une procédure d'agrégation/désagrégation, était plus rapide.

Une alternative a appartient à la limite haute Cl_k^+ (qui contient les meilleures alternatives de la catégorie) d'une catégorie Cl_k , si l'augmentation de sa performance $g_i(a)$ sur n'importe quel critère i la fait passer à une catégorie Cl_h : $h > k$ meilleure que Cl_k , ou alors, dans le cas d'une hésitation de l'intervenant, entre les catégories Cl_k et Cl_{k+1} . D'une manière analogue, on dira qu'une alternative a appartient à la limite basse Cl_k^- (qui contient les moins bonnes alternatives de la catégorie) d'une catégorie Cl_k , si la diminution de sa performance $g_i(a)$ sur n'importe quel critère i la fait passer à une catégorie Cl_h : $h < k$ moins bonne que Cl_k , ou alors, dans le cas d'une hésitation de l'intervenant, entre les catégories Cl_k et Cl_{k-1} .

Les alternatives utilisées comme exemples d'affectation appartiennent donc à Cl_k^+ et Cl_k^- pour $1 \leq k \leq p$, où p est le nombre de catégories. Cela implique les conséquences suivantes :

- il n'y a pas de dominance (au sens de Pareto) entre les alternatives de Cl_k^+ , ni entre celles de Cl_k^-
- pour toute alternative a^- appartenant à Cl_k^- , il existe une alternative a^+ appartenant à Cl_k^+ qui la domine, et pour toute alternative a^+ appartenant à Cl_k^+ , il existe une alternative a^- appartenant à Cl_k^- , qu'elle domine.

En pratique, la détermination d'alternatives appartenant aux limites hautes et basses de chaque catégorie n'est pas évidente, car, comme elles constituent des bornes, l'expert hésite à les affecter dans la catégorie Cl_k ou la catégorie Cl_{k+1} (Cl_{k-1}). Pour cela, nous ne considérons pas les alternatives que l'expert hésite à affecter. La procédure, généralement utilisée pour déterminer de telles alternatives, nécessite un dialogue avec l'expert. Lorsqu'il n'est pas possible de déterminer de telles alternatives de manière directe, nous identifions d'abord une alternative quelconque a appartenant à une catégorie Cl_k , pour laquelle nous augmentons progressivement les performances $g_i(a)$, critère par critère, jusqu'à l'obtention d'une alternative a^+ constituant une limite haute de la catégorie Cl_k (le même raisonnement est appliqué pour l'obtention d'une alternative a^- en diminuant les performances). Plusieurs alternative a^+ et a^- peuvent être obtenues à partir de a en changeant l'ordre des critères i pour lesquels nous augmentons progressivement les performances.

Elicitation d'une capacité à partir des exemples d'affectation

Après avoir déterminé l'ensemble des exemples d'affectation et rendu les échelles des cinq critères commensurables, nous avons élicité une capacité de l'intégrale de

Choquet en utilisant les exemples d'affectation comme ensemble d'apprentissage A^R . Afin de caractériser une catégorie Cl_k après l'élicitation de la capacité, on dira qu'une alternative b appartient à une catégorie Cl_k si et seulement si son intégrale de Choquet $C_\mu(b)$ est comprise entre $\min_{a^- \in \hat{Cl}_k^-} C_\mu(a^-)$ et $\max_{a^+ \in \hat{Cl}_k^+} C_\mu(a^+)$ (voir la relation (5.11))

$$b \in Cl_k \Leftrightarrow \min_{a^- \in \hat{Cl}_k^-} C_\mu(a^-) \leq C_\mu(b) \leq \max_{a^+ \in \hat{Cl}_k^+} C_\mu(a^+) \quad (5.11)$$

où $\hat{Cl}_k^+ = A^R \cap Cl_k^+$ et $\hat{Cl}_k^- = A^R \cap Cl_k^-$

Nous avons utilisé la procédure d'agrégation/désagrégation fondée sur la méthode *Tomaso* (voir section 1.6.1.5 du chapitre 1) pour l'élicitation de la capacité. La forme générale des programmes mathématiques utilisés pour cela est la suivante :

$$(PM_k) \left\{ \begin{array}{l} \max f = \frac{1}{n} \sum_{i \in F} \sum_{S \subseteq F \setminus i} \sum_{T \subseteq S} (M(T \cup i) - \frac{1}{n})^2 \\ C_M(b^-) - C_M(a^+) \geq \delta \quad \forall Cl_h : h = \overline{1, \dots, p-1}, \quad \forall a^+ \in \hat{Cl}_h^+, \quad \forall b^- \in \hat{Cl}_{h+1}^- \\ \sum_{T \subseteq S, |T| < k} M(T \cup i) \geq 0, \quad \forall i \in F, \quad \forall S \subseteq F \setminus i \\ \sum_{T \subseteq F, 1 \leq |T| \leq k} M(T) \geq 0 \end{array} \right. \quad (5.12)$$

où C_M représente l'expression de l'intégrale de Choquet avec la transformée de Möbius M de la capacité μ , et k représente l'additivité de la capacité à éliciter.

Nous avons considéré dans un premier temps des capacités additives qui n'étaient pas compatibles avec les exemples d'affectation. Cela était également le cas pour des capacités 2 et 3-additives. Finalement, il a fallu une capacité 4-additive pour restituer l'information préférentielle pour l'activité *Travailler sur PC*, cela est dû à sa complexité : par exemple, l'alternative (3 3 1 1 1) dans le tableau 5.12 qui a les meilleures performances possibles sur les deux premiers critères et qui est quand même affectée à la plus mauvaise catégorie. Pour les autres activités, il a fallu une capacité au moins 3-additive pour restituer l'information préférentielle. En ce qui concerne les autres activités, pour *Manger*, *Se reposer* et *Discuter* il a fallu une capacité 4-additive, alors que pour l'activité *Lire*, une capacité 3-additive était suffisante pour modéliser l'information préférentielle.

La procédure d'agrégation/désagrégation s'est déroulée en deux itérations (une seule modification des préférences), au plus, pour chaque activité. La deuxième itération était nécessaire uniquement lorsqu'il n'y avait pas de capacité compatible avec les préférences. Dans ce cas, nous essayons de trouver un minimum d'exemples d'affectation à modifier afin de trouver une capacité compatible avec l'information

préférentielle. La capacité élicitée nous permet de calculer l'intégrale de Choquet de n'importe quelle alternative afin de pouvoir l'affecter dans l'une des cinq catégories et de pouvoir la comparer avec d'autres alternatives. Les limites de chaque catégorie pour l'activité *Travailler sur PC* sont données par Tab 5.14. Elles sont différentes d'une activité à une autre

Catégories	$\min_{a^- \in \hat{C}_k^-} C_\mu(a^-)$	$\max_{a^+ \in \hat{C}_k^+} C_\mu(a^+)$
Extrêmement inconfortable	0	0,04
Très inconfortable	0,05	0,27
Inconfortable	0,28	0,59
Inconfort léger	0,60	0,79
Absence d'inconfort	0,80	1

Tableau 5.14 – *Limites des catégories - Activité Travailler sur PC*

L'analyse de l'information préférentielle, après l'élicitation de la capacité, a confirmé le sentiment de l'expert siège sur l'importance des critères ainsi que la nature des interactions entre ces critères. En effet, les valeurs de Shapley au tableau 5.15 montrent que les critères *BassinLombaire* et *Jambes* sont les plus importants. Ce qui est cohérent avec le « sentiment » de l'expert en confort. En ce qui concerne les indices d'interaction, ils sont, pour la majorité, positifs (voir le tableau 5.16). Cela signifie qu'ils sont plutôt complémentaires.

Les critères	Valeur de Shapley
TêteCou	0,03
Buste	0,13
BassinLombaire	0,32
FessesCuissesCreuxpoplité	0,23
Jambes	0,30

Tableau 5.15 – *Les valeurs de Shapley*

5.3.3 Synthèse et discussion

Nous avons vu dans cette section comment nous avons agrégé les critères de *absence de zones d'inconfort* qui est, lui même, un critère de la modalité *Siège environné*. La partie du modèle conceptuel correspondant à ce critère est constituée de deux niveaux, le premier niveau représente les critères correspondant aux inconforts locaux dans les parties du corps, et le deuxième niveau représente les dimensions. Pour l'agrégation des dimensions (deuxième niveau), nous avons, tout

Les paires de critères	Indices d'interaction
{TêteCou , Buste}	-0,04
{TêteCou , BassinLombaire}	0,03
{TêteCou , FessesCuissesCreuxpoplité}	0
{TêteCou , Jambes}	-0,01
{Buste , BassinLombaire}	0,16
{Buste , FessesCuissesCreuxpoplité}	0,13
{Buste , Jambes}	0,12
{BassinLombaire , FessesCuissesCreuxpoplité}	0,22
{BassinLombaire , Jambes}	0,15
{FessesCuissesCreuxpoplité , Jambes}	0,1

Tableau 5.16 – Les indices d'interaction

d'abord, défini des catégories avec des sémantiques de confort pour les critères correspondant aux parties du corps afin de donner plus de précision sur l'évaluation d'une alternative sur ces critères. Ces sémantiques ont également facilité la construction des règles de décision, avec l'expert, pour l'agrégation des dimensions correspondantes. En ce qui concerne l'agrégation des critères correspondant aux parties du corps (premier niveau), nous avons utilisé l'intégrale de Choquet car l'expert en confort du siège souhaitait un résultat plus précis qu'une affectation dans une catégorie. La procédure utilisée pour l'élicitation des capacités est différente de celle utilisée pour la modalité thermique, car l'ensemble des exemples d'apprentissage représente des exemples d'affectation et non pas des comparaisons par paires. De plus, cet ensemble est construit en collaboration avec les experts, ce qui demande un effort cognitif supplémentaire, alors que les exemples d'apprentissage construits pour la modalité *thermique* ne le sont pas. Cet effort cognitif supplémentaire peut être justifié par un gain de temps dans la procédure d'agrégation/désagrégation.

5.4 Agrégation des critères : bilan et perspectives

L'objectif de cette section est de synthétiser ce qui a été réalisé à l'étape d'agrégation et de proposer des pistes afin de pouvoir aborder ce qui reste à réaliser pour terminer cette étape. Nous allons, dans un premier temps, rappeler ce qui caractérise notre méthodologie à cette étape. Nous présenterons ensuite l'état d'avancement pour chaque niveau du modèle ainsi que les pistes envisagées pour les niveaux non encore traités.

5.4.1 Caractéristiques de l'approche à l'étape d'agrégation

Étant donné la structure hiérarchique du modèle, nous avons utilisé une procédure d'agrégation en chaque nœud en commençant par les dimensions. L'une des particularités de notre approche est d'avoir considéré différents types de méthodes pouvant potentiellement être utilisées en chaque nœud selon la finesse du résultat souhaité, l'intelligibilité, la conformité avec les conditions d'utilisation de la méthode et la nature de l'information intercritères.

- **La finesse du résultat souhaité** : étant donnée la problématique de décision, la question est de savoir si le tri est un résultat suffisant ou alors s'il est nécessaire de différencier les offres se trouvant dans une même catégorie. En effet, certaines méthodes d'agrégation ne nous permettent pas d'obtenir un résultat aussi précis. La réponse à cette question nous éclaire donc sur le choix de la méthode, par exemple, au niveau du nœud correspondant à l'agrégation des sous critères de la modalité *absence de zones d'inconfort* (voir section 5.3), où l'expert avait jugé nécessaire de pouvoir différencier les offres se trouvant dans une même catégorie.
- **L'intelligibilité** : par rapport à la procédure d'élicitation des préférences et l'interprétation du résultat obtenu. En effet, dans certains cas, les procédures d'élicitation des préférences correspondant à une méthode d'agrégation peuvent s'avérer difficiles à mettre en œuvre. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, la construction de règles et la vérification de leur cohérence lorsque le nombre de critères et la cardinalité de l'ensemble des valeurs possibles sont importants, ou alors le temps et l'effort cognitif nécessaires pour un intervenant n'ayant pas suffisamment de connaissances lors de la mise en œuvre d'ELECTRE TRI, étant donné le nombre important de paramètres décisionnels à déterminer.
- **La conformité avec les conditions d'utilisation de la méthode** : elle concerne la nature des échelles et l'information préférentielle. En effet, la mise en œuvre de certaines méthodes nécessite des hypothèses telles que la commensurabilité des échelles pour l'intégrale de Choquet, la compensation des critères pour les modèles additifs, et la transitivité des préférences pour les méthodes MAUT. Cela nous permet de rejeter certaines méthodes.
- **La nature de l'information intercritères** : certaines méthodes sont plus appropriées pour modéliser les préférences intercritères comme la compensation, la complémentarité, la substitution, le veto. La connaissance de la nature de l'information inter-critères peut également nous éclairer sur le choix de la méthode.

Nous avons utilisé trois types de méthodes d'agrégation dans notre modèle : la construction des règles de décision, ELECTRE TRI et l'intégrale de Choquet. Elles sont assez complémentaires dans leurs conditions d'utilisation. Elles recouvrent les

différents types d'information intercritères et la dernière permet de différencier les alternatives se trouvant au sein d'une même catégorie.

Une fois la méthode choisie, nous avons élicité les préférences de l'expert ou du décideur concerné soit pour construire une base de règles, soit pour déterminer des valeurs pour les paramètres décisionnels en utilisant une procédure directe ou une procédure d'agrégation/désagrégation avec des exemples d'apprentissage. Les procédures indirectes ont plus souvent été appréciées que les procédures directes surtout lorsque le nombre de critères est de grande taille, car elles nécessitent moins d'effort cognitif de la part de l'intervenant. D'autre part, notre expérience nous a montré que le choix des exemples d'apprentissage lors d'une procédure d'agrégation/désagrégation était important. Cela pouvait diminuer le nombre d'itérations dans ce type de procédures. Lorsque ces exemples d'apprentissage représentent des exemples d'affectation, il est préférable d'utiliser des actions représentant des « bornes » de catégorie (c.-à-d. les meilleures ou les moins bonnes d'une catégorie).

5.4.2 État d'avancement et pistes envisagées

Nous allons présenter l'état d'avancement et les pistes envisagées niveau par niveau en commençant par les modalités.

5.4.2.1 Les sous-critères des modalités de confort

Pour les niveaux se trouvant en dessous des modalités de confort, l'étape agrégation s'est déroulée avec les experts en confort. Nous avons terminé l'agrégation des critères correspondant aux modalités : *Thermique*, *Dynamique*, *Acoustique*, *Ambiance lumineuse*, et *Tympanique*. Les modalités *Siège environné* et *Aménagement* n'ont pas encore été achevées car les étapes de formalisation des critères et de construction des échelles ont pris du temps. Nous allons présenter dans la suite ce qui reste à réaliser pour ces deux modalités

La modalité *Siège environné* : elle est composée de *l'espace suffisant*, *l'encombrement*, *l'adoption de la posture* et *le maintien de la posture*. L'agrégation des critères correspondant aux trois premières composantes a été achevée. En ce qui concerne la dernière composante, nous avons vu à la section 4.6 du chapitre 4 que l'une des principales difficultés résidait dans notre incapacité à évaluer le galbe d'un dossier si ce dernier était différent du galbe idéal pour le maintien d'une posture. Nous proposons pour cela de considérer un ensemble de galbes assez hétérogènes ainsi que les évaluations du confort voyageurs correspondant, de mesurer la similarité entre le galbe proposé par les fournisseurs et l'ensemble des galbes considérés, et de supposer que ce dernier est dans la même catégorie de confort que le galbe le plus similaire. Cela nécessite la détermination de cet ensemble de galbes, la

construction d'une fonction mesurant la similarité et le recueil des évaluations des voyageurs.

La modalité *Aménagement* : l'agrégation des critères de cette modalité n'a pas encore commencé. Pour la majorité des nœuds, le nombre réduit de critères et de l'ensemble des valeurs possibles ainsi que le manque de connaissances en confort peut nous inciter à construire des règles de décision pour affecter les alternatives dans des catégories de confort. L'une des difficultés que nous pourrions rencontrer lors de l'agrégation des critères de cette modalité est d'arriver à prendre en compte les préférences de plusieurs intervenants (experts en confort et décideurs) pouvant être contradictoires. Nous devons arriver dans ce cas à trouver un compromis.

5.4.2.2 Agrégation des modalités (le confort d'un groupe dans la pratique d'une activité)

C'est la partie la plus difficile et la plus intéressante de la phase d'agrégation. Pour l'élicitation des préférences, nous utiliserons les connaissances des experts en confort ainsi que les études et enquêtes sur le confort global. À cette étape, les préférences de plusieurs experts, qui risquent d'être contradictoires et différentes d'une activité à une autre, doivent être prises en compte. De plus, nous avons un nombre important de critères (sept) et, pour certains critères, un ensemble de valeurs possibles assez grand. Ceci peut, d'après notre expérience, inciter les experts à vouloir un résultat plus précis que des catégories de confort (différencier des offres se trouvant au sein d'une même catégorie). Nous pourrions donc utiliser l'intégrale de Choquet, d'autant plus que les études sur le confort ont montré qu'il y avait des interactions entre les modalités. Cela peut se traduire en aide multicritère à la décision par une complémentarité entre critères.

Pour l'élicitation des préférences, il serait donc possible d'utiliser des exemples d'affectation qui doivent être déterminés lors d'une réunion avec l'ensemble des experts en confort. À l'image des autres nœuds où cette méthode a été utilisée, nous tenterons de construire un ensemble d'exemples qui est le plus informatif possible en choisissant des alternatives représentant des bornes de catégorie. Pour cela, nous commencerons par déterminer des alternatives dont chacune est affectée dans la même catégorie par tous les experts. Nous augmenterons ensuite progressivement les performances de chaque alternative a appartenant à une catégorie Cl_t , jusqu'à l'obtention d'une alternative a^+ constituant une limite haute pour tous les experts. Puis, nous augmenterons de la même manière les performances de a^+ jusqu'à l'obtention d'une alternative a_7^+ qui, pour au moins un expert, est toujours dans la catégorie Cl_t . Le même raisonnement sera appliqué en diminuant les performances de a pour l'obtention des alternatives a^- et a_7^- . Nous utiliserons la procédure fondée sur la méthode *Tomaso* pour l'élicitation des capacités avec les exemples

d'affectation « flous » suivants :

$$a^+ \in Cl_t, a^- \in Cl_t, a_?^+ \in FCl_t \text{ et } a_?^- \in FCl_{t-1}$$

où FCl_t représente une catégorie « floue » qui contient des alternatives que certains experts affectent à la catégorie Cl_t , alors que d'autres l'affectent à la catégorie Cl_{t+1} .

Lors de l'élicitation des préférences, il est possible de ne pas trouver une capacité compatible avec les préférences des experts. Cela peut être dû au fait que les critères sont évalués sur des échelles bipolaires (confort et inconfort), alors que nous avons utilisé la version classique de l'intégrale de Choquet. Une autre difficulté à laquelle nous pourrions être confrontés en utilisant l'intégrale de Choquet est de s'assurer de la commensurabilité des échelles ou de les rendre commensurables car les évaluations des modalités ont été construites avec des experts différents.

5.4.2.3 Le confort dans la pratique d'une activité

Une fois les modalités évaluées pour chaque groupe et pour chaque activité, nous devons agréger le confort au sein de chaque groupe afin d'évaluer le confort dans la pratique d'une activité. Pour cela, il est possible de se fonder sur la répartition des voyageurs dans chaque groupe. À cette étape l'intervention des décideurs sera probable lors de l'élicitation des préférences. En effet, l'agrégation des groupes pourrait dépendre de leur politique : minimiser la proportion de voyageurs inconfortables dans un train, maximiser le nombre de voyageurs confortables, etc. Étant donné le nombre réduit de critères, nous pensons construire une base de règles traduisant la politique des décideurs afin d'affecter des offres à des catégories de confort. Néanmoins, il est important que cette base de règles soit dépendante du nombre de groupes à agréger car ce nombre pourrait évoluer en fonction des caractéristiques interindividuelles considérées. D'autre part, il est important de souligner que les catégories de confort à ce niveau, ainsi que les niveaux au dessus, n'auront pas la même signification que les catégories de confort correspondant aux critères des niveaux en dessous. Elles représentent des niveaux de confort correspondant à tous les voyageurs et non pas à une catégorie de voyageurs partageant la même perception.

5.4.2.4 Le confort assis

L'agrégation des activités nous permettra d'obtenir le niveau de confort assis dans un TGV. Elle dépendra des préférences des décideurs, pouvant varier d'un appel d'offre à un autre. En effet, les activités représentent un moyen pour eux de formaliser leurs besoins par rapport à la cible voyageurs. Il est donc important d'utiliser une méthode d'agrégation qui puisse facilement intégrer les préférences

comme données d'entrée en vue de construire un outil d'aide à la spécification. Pour cela nous proposons :

- soit d'utiliser des méthodes d'agrégation où il est possible d'attribuer de manière directe des valeurs aux paramètres décisionnels à partir de l'information préférentielle. Par exemple, on pourrait, après transformation des échelles, utiliser un modèle additif où les taux de substitution dépendraient de la proportion du temps passé par les voyageurs dans la pratique d'une activité,
- soit d'établir *a priori* un ensemble de *scénarii* de préférences représentant les besoins potentiels des décideurs, et d'éliciter les paramètres décisionnels (ou de construire une base de règles) pour chaque scénario. Ainsi, à chaque scénario correspondra un jeu de paramètres décisionnels (ou une base de règles).

Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre quelle était la méthodologie adoptée pour agréger les critères du modèle. La particularité de cette méthodologie réside dans la possibilité d'utiliser différentes méthodes d'agrégation dans chaque nœud du modèle hiérarchique. Nous avons tout d'abord choisi l'ensemble des méthodes potentielles de telle sorte à ce qu'elles soient complémentaires sur leurs conditions d'utilisation et sur leurs capacités à modéliser l'information intercritères. Nous avons défini ensuite une procédure de choix d'une méthode (parmi les méthodes potentielles) dans un nœud, fondée sur la précision du résultat souhaitée par l'intervenant, l'intelligibilité dans la mise en œuvre de la méthode et les conditions de son utilisation. Nous nous sommes intéressés ensuite aux procédures d'élicitation des préférences utilisées correspondant aux trois méthodes d'agrégation choisies. Nous avons vu également quels étaient leurs avantages, leurs inconvénients et les difficultés rencontrées lors de leur mise en œuvre.

Afin d'illustrer la méthodologie utilisée pour le choix de la méthode et l'élicitation des préférences, nous avons pris l'exemple de la modalité *thermique* ainsi qu'un critère de la modalité *siège environné*, constituant une partie du modèle conceptuel.

Nous avons présenté enfin ce qui a été réalisé jusqu'à présent à l'étape d'agrégation, et les pistes que nous proposons pour ce qui reste à faire. Nous avons vu également les intervenants sollicités à cette étape. Plus de détails seront donnés au chapitre 7 sur le déroulement de l'interaction avec ces intervenants lors de la phase d'agrégation.

Chapitre 6

Validation du modèle d'évaluation

Introduction

Nous avons vu aux chapitres précédents la méthodologie suivie pour la construction du modèle d'évaluation. Ce modèle est fondé sur les connaissances des experts en confort, supposées représenter la perception des voyageurs. Nous proposons, dans ce chapitre, de définir un protocole afin de vérifier si le modèle d'évaluation utilisé pour la formalisation de ces connaissances est compatible avec les évaluations des voyageurs. Pour cela, nous allons tout d'abord définir ce protocole dans le cas général en identifiant ses étapes. Nous verrons ensuite comment nous l'avons appliqué pour la modalité thermique.

6.1 Protocole de validation

La validation du modèle d'évaluation peut porter sur n'importe quel critère (une composante, une modalité, un groupe, une activité et même sur le confort global). Elle consiste à vérifier la correspondance entre les évaluations par le modèle et par les voyageurs d'un ensemble de trains¹. Les évaluations de ces configurations par le modèle se font à partir de leurs paramètres physiques, alors que leurs évaluations par les voyageurs sont obtenues à partir d'enquêtes. Dans le cas où les évaluations des voyageurs et celles du modèle ne sont pas en parfaite correspondance, il est possible de reparamétriser le modèle. Cela consiste, soit à changer les valeurs des paramètres perceptifs (dans les échelles), soit à introduire de nouvelles préférences pour éliciter les paramètres décisionnels ou construire de nouvelles règles. En revanche, dans le cas où ces évaluations divergent complètement,

1. qu'on appellera dans ce chapitre configurations, car l'ensemble des configurations peut représenter un même train où les paramètres physiques ont été modifiés

il faudrait revoir toute l'information préférentielle ou alors changer de procédure d'agrégation.

Afin de mener à bien la validation du modèle sur un critère, nous devons tout d'abord identifier les données d'entrée nécessaires. Il faut ensuite évaluer les configurations sur chacune des dimensions correspondant à ce critère, à l'aide des indicateurs d'état du modèle d'évaluation. Une fois les dimensions construites, nous sommes souvent amenés à formuler des suppositions sous lesquelles la correspondance sera vérifiée. Ces suppositions sont dues au fait que certaines mesures, nécessaires à la construction des dimensions, n'ont pas pu être effectuées, ou alors parce que les voyageurs interrogés ne remplissent pas les conditions désirées. Nous allons voir dans cette section en quoi consiste ces différentes étapes.

6.1.1 Données d'entrée et protocole d'essai

La validation du modèle d'évaluation sur un critère doit porter sur un ensemble de configurations noté A^V , de telle sorte que pour chaque configuration :

- les voyageurs donnent une note de confort (correspondant au critère à valider) sur une échelle au moins ordinale (échelle qualitative possible),
- on mesure les paramètres physiques permettant d'évaluer chaque configuration sur les dimensions correspondant au critère.

Remarque 15 *Afin d'obtenir une évaluation de chacune des configurations représentative des notes données par les voyageurs, il est nécessaire d'appliquer sur ces notes des opérateurs tels que la moyenne, la médiane, le minimum ou le maximum. Il est important de souligner qu'aucun de ces opérateurs ne peut être appliqué sur des échelles nominales. Pour cela, ces échelles doivent être au moins ordinales.*

En pratique, la mise en œuvre d'un protocole d'essai pour la collecte de ces données (notes des voyageurs et mesures physiques) est souvent difficile. En effet, cela nécessite une maîtrise des conditions d'expérimentation :

- les capteurs permettant de mesurer les paramètres physiques doivent être placés aux mêmes endroits et aux mêmes moments où les voyageurs ont été interrogés sur leur confort
- les paramètres physiques, mesurés lors de l'enquête, doivent être de même nature que les paramètres physiques représentant les réponses des fournisseurs (c.-à-d. qu'il est toujours possible, à partir des paramètres physiques mesurés, de se ramener à des grandeurs pouvant être prises en compte dans les indicateurs d'état),
- les voyageurs interrogés doivent être dans des conditions faisant abstraction de tout facteur externe pouvant influencer leurs évaluations. Par exemple, il faut éviter d'interroger des voyageurs dans un train en retard ou pendant les grèves.

De plus, afin de ne pas biaiser la validation, il est important que ces conditions d'expérimentation soient en adéquation avec les hypothèses sous lesquelles le modèle d'évaluation a été construit. Nous allons voir dans la suite, pour chaque « type » de critère (modalité, groupe, activité ou confort assis) à valider, quelles peuvent être les principales précautions à prendre en compte sur les conditions d'expérimentation.

Validation des modalités de confort et des groupes

Lorsque le critère à valider représente une modalité de confort ou une composante de cette modalité qui dépend des activités et des groupes, il est important de vérifier que les voyageurs appartiennent bien à l'un des groupes considérés et pratiquent l'une des activités considérées. De plus, d'autres précautions propres à chaque modalité doivent être prises en compte.

- **La modalité *thermique*** : il faudrait prendre en compte la saison en mesurant les températures extérieures. De plus, afin d'évaluer le critère correspondant à cette modalité il est nécessaire de réaliser les expérimentations pour chaque saison et d'interroger ensuite les voyageurs sur leur confort en considérant dans leurs évaluations les trois saisons à la fois. Ceci est très difficile à mettre en œuvre.
- **La modalité *dynamique*** : les essais doivent être réalisés sur des voies aux conditions contrôlées et qui doivent être les mêmes pour toutes les configurations.
- **La modalité *acoustique*** : le bruit des autres voyageurs doit être le même pour toutes les configurations car l'indicateur d'état utilisé (une fonction du temps de réverbération) dans le modèle pour mesurer le bruit des autres ne dépend pas de ce dernier. En effet, moins le temps de réverbération est important et plus le bruit des voyageurs est atténué. Cependant, si le temps de réverbération mesuré dans une configuration *a* est moins important que celui mesuré dans une configuration *b*, les voyageurs peuvent quand même juger que le bruit des autres dans la configuration *b* est moins important que dans la configuration *a*.
- **La modalité *siège environné*** : les voyageurs doivent donner leur poids, leur taille et l'activité pratiquée au moment où ils évaluent cette modalité,
- **La modalité *ambiance lumineuse*** : les essais doivent être réalisés sans lumière du jour et chaque voyageur doit renseigner l'activité qu'il pratique.

En ce qui concerne la validation de chaque critère correspondant au confort d'un groupe dans la pratique d'une activité, il est important de s'assurer que les voyageurs interrogés remplissent les caractéristiques du même groupe auquel ils appartiennent. Par exemple, si le groupe est caractérisé par des valeurs de taille, d'IMC et d'âge, il faut vérifier que les voyageurs remplissent ces caractéristiques.

Validation des activités et du confort assis

Les évaluations du confort dans la pratique des activités et du confort assis seront fondées sur la politique des décideurs et non pas sur celles des experts en confort, contrairement aux autres critères. Dans le cas où cette politique ne serait pas censée traduire la perception des voyageurs, la validation de ces critères par des enquêtes voyageurs n'aura aucun intérêt.

D'autre part, il serait possible d'évaluer (et donc de valider) le confort assis d'un groupe donné en reliant directement les modalités aux activités (en sortant les groupes du modèle, voir la figure 6.1). La validation, dans ce cas, ne serait pertinente que si les voyageurs de ce groupe passent le même temps dans la pratique de chacune des activités au cours du trajet durant lequel ils ont été interrogés.

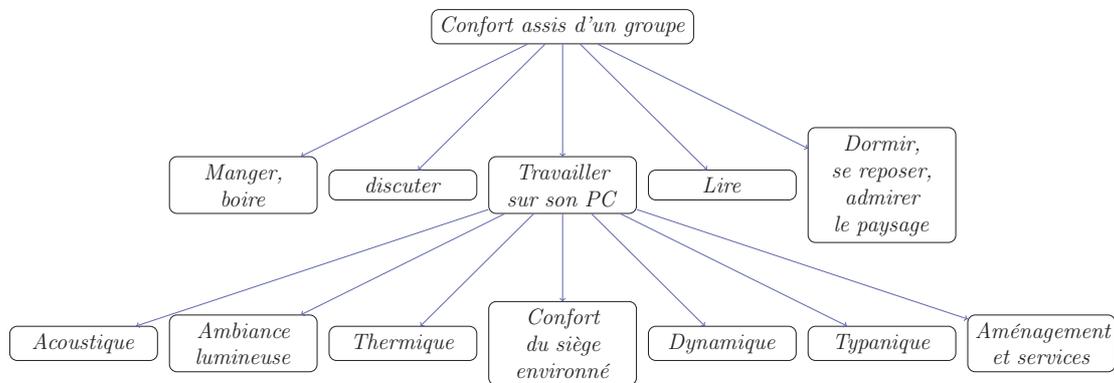


Figure 6.1 – Le confort assis d'un groupe

6.1.2 Évaluation des configurations sur les dimensions

Les indicateurs d'état correspondant aux dimensions, construits dans le modèle d'évaluation, dépendent des grandeurs physiques représentant les réponses des constructeurs, et non pas des paramètres mesurés lors des essais. Nous avons vu à la section précédente qu'il était important pour la validation que les paramètres physiques mesurés puissent être intégrés dans tous les indicateurs d'état afin d'évaluer les configurations sur chacune des dimensions. Ce travail représente la partie la plus délicate d'un protocole de validation. Il peut engendrer de nombreuses suppositions restrictives sous lesquelles la validation sera pertinente. L'idéal étant de réduire ce nombre.

Le passage des paramètres physiques mesurés à des paramètres physiques pouvant être pris en compte par les indicateurs d'état n'est pas aussi simple. En effet, certaines manipulations sont nécessaires (voir section 6.2) pour calculer des

grandeurs se rapprochant le plus possible des réponses des constructeurs. Par exemple, afin d'obtenir la température intérieure moyenne dans un train (réponse du constructeur), nous devons récupérer toutes les mesures de température effectuées dans une voiture pendant toute la durée de l'expérience, et en calculer la moyenne. Une fois ces grandeurs déterminées, il est possible de calculer les indicateurs d'état correspondant aux dimensions. Néanmoins, il peut arriver qu'une grandeur nécessaire à l'évaluation des configurations sur une dimension ne puisse pas être calculée car les mesures nécessaires n'ont pas été effectuées. Dans ce cas, il faudrait formuler des suppositions par rapport aux performances des différentes configurations sur les dimensions. Pour plus de détails sur cette étape voir la section 6.2.

6.1.3 Formulation des suppositions

Une fois les différentes configurations de A^V évaluées sur les dimensions correspondant au critère à valider, il est souvent nécessaire de formuler des suppositions. Cela est souvent dû au non respect du protocole d'essai :

- certains paramètres physiques, nécessaires pour l'évaluation des configurations sur les dimensions, n'ont pu être mesurés,
- les voyageurs interrogés ne répondent pas aux conditions désirées sur la variabilité interindividuelle ou sur les activités pratiquées (cela est souvent le cas lorsque le nombre de sujets est réduit),

La première raison du non respect du protocole d'essai peut induire des suppositions sur l'évaluation des configurations par le modèle. En effet, s'il n'est pas possible d'évaluer les configurations sur les dimensions d'un sous-critère (correspondant au critère à valider), il faudrait supposer que ces configurations prennent certaines valeurs jugées réalistes sur ces dimensions (voir l'exemple 17).

Exemple 17 *On voudrait valider la modalité acoustique, mais il n'est pas possible d'évaluer les configurations sur l'indicateur d'état permettant de mesurer la capacité d'un train à atténuer le bruit des autres voyageurs (fA^{Tr}) car le temps de réverbération Tr n'a pas pu être mesuré. Cela nous oblige à formuler une supposition sur le sous-critère « bruit des autres » qui dépend de la dimension correspondant à cet indicateur sur laquelle les configurations n'ont pas pu être évaluées. Cette supposition peut consister, par exemple, à considérer que toutes les configurations ont la même performance sur cet indicateur (qui peut être la meilleure, la moyenne ou la moins bonne). Il est également possible d'effectuer une analyse de sensibilité en considérant, à la fois, les différents scénarios possibles sur le critère bruit des autres.*

Pour ce qui est de la deuxième raison du non respect du protocole d'essai, elle peut induire la supposition que la moyenne (la médiane, le minimum, le maximum, etc.)

des évaluations des voyageurs interrogés représente bien le confort d'un groupe partageant la même perception.

Le non respect du protocole d'essai pour la validation peut ne pas être uniquement dû au manque de ressources pour effectuer les mesures nécessaires et sélectionner les sujets appropriés. Il peut être également lié au fait que ce protocole était destiné à d'autres fins que la validation.

6.1.4 Correspondance entre les évaluations du modèle et celles des voyageurs

Quand peut-on affirmer que les évaluations fournies par le modèle représentent bien celles des voyageurs? Avant de répondre à cette question nous devons, sous les suppositions formulées à l'étape précédente, évaluer le confort de chaque configuration $a \in A^V$:

- avec le modèle, sur le critère à valider g , après l'avoir évalué sur les dimensions correspondantes à g ,
- en prenant la moyenne (la médiane, le minimum, le maximum ou le minimum) M des évaluations des voyageurs interrogés dans cette configuration.

Remarque 16 *Théoriquement, les voyageurs interrogés pour la validation d'un critère sont supposés partager la même perception. Le choix de la moyenne, de la médiane, du minimum ou du maximum ne devrait donc pas avoir d'importance. Cela n'est évidemment pas le cas en pratique. Une attention particulière doit être accordée à ce choix. Étant donné le caractère pilote de la validation, nous ne pouvons pas prodiguer de conseil pertinent par rapport à ce choix. Les experts en confort utilisent souvent la moyenne pour la validation des modèles physiques. Ils utilisent également la médiane lorsqu'ils disposent d'un petit échantillon ou pour atténuer l'effet des extrêmes. Cependant, quel que soit ce choix, sa pertinence repose également sur le choix de l'échelle sur laquelle les voyageurs donnent leur note de confort et sur la formulation des questions qui leur sont posées.*

Critère de correspondance

Les échelles de g et M ne sont pas nécessairement identiques. Dans ce cas, il n'est pas possible de comparer les deux évaluations $g(a)$ et $M(a)$ sur une seule configuration a . L'une des conséquences de cela est que la validation ne peut pas se limiter à une seule configuration. Pour cela, nous pensons qu'il est plus intéressant de fonder l'évaluation (ou le jugement) de la correspondance entre g et M sur plusieurs configurations (sur l'ensemble A^V). Dans ce cas, on dira que les évaluations des configurations de A^V par le modèle représentent bien (ou sont conformes avec)

les évaluations de ces configurations par les voyageurs lorsque les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- si les experts en confort jugent significative (par exemple, en se fondant sur des tests statistiques) la différence des notes de confort de deux configurations a et b , alors cette différence doit également apparaître dans le modèle,
- si deux configurations a et b sont jugées significativement différentes par le modèle (par exemple, elles sont dans deux catégories différentes), alors les experts en confort doivent juger significative la différence des notes de confort de a et b .

Cela peut se traduire de manière formelle par l'expression (6.1) :

$$\forall a, b \in A^V : a \succ_g b \Leftrightarrow a \succ_M b \quad (6.1)$$

où :

- la relation $a \succ_g b$ signifie que a est jugée significativement meilleure que b par le modèle. Cela peut se traduire soit par le fait que a est dans une catégorie de confort meilleure que b (dans le cas où l'évaluation représente uniquement une affectation dans une catégorie), soit par le fait que la différence $g(a) - g(b)$ est significative (équivalente à l'amplitude d'une catégorie dans le cas où l'évaluation représente un score),
- la relation $a \succ_M b$ signifie que les experts en confort jugent significative (par exemple, sur la base de tests statistiques) la différence $M(a) - M(b)$ en terme de confort.

Analyse de la correspondance

Lorsque M est supposée être une bonne représentation des évaluations voyageurs, la relation 6.1 peut nous aider à déceler si l'évaluation par le modèle n'est pas assez « précise » (souvent lorsque g est évalué sur une échelle comportant un nombre réduit d'échelons). En effet, si on identifie plusieurs couples de configurations (a, b) telles que :

$$a \succ_M b \text{ et } a \sim_g b \quad (6.2)$$

ou

$$a \sim_M b \text{ et } a \succ_g b \quad (6.3)$$

où $a \sim_g b$ (resp. $a \sim_M b$) signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les évaluations $g(a)$ et $g(b)$ (resp. $M(a)$ et $M(b)$), alors il faudrait s'interroger sur la précision de l'évaluation par le modèle.

D'autre part, une attention particulière doit être accordée aux suppositions formulées à l'étape précédente lorsque deux configurations a et b sont telles que :

$$a \succ_M b \text{ et } b \succ_g a \quad (6.4)$$

Si ces suppositions n'arrivent pas à expliquer cette divergence d'évaluation, il faudrait revoir les préférences sur lesquelles le modèle est fondé. La révision des préférences peut consister à modifier des seuils représentant des paramètres perceptifs dans des échelles, ou alors, à éliciter de nouveau les paramètres décisionnels ou construire des règles de décision.

Il pourrait être intéressant, dans le cas où la correspondance n'est pas parfaite, de définir un indicateur I permettant de mesurer cette correspondance, comme : le cardinal de l'intersection des préordres P_{\succ_M} et P_{\succ_g} engendrés respectivement par \succ_M et \succ_g , sur le cardinal du préordre engendré par \succ_M (voir l'équation 6.5)

$$I = \frac{|P_{\succ_M} \cap P_{\succ_g}|}{|P_{\succ_M}|} \quad (6.5)$$

où $P_{\succ_M} = \{(a, b) \in A^V \times A^V : a \succ_M b\}$ et $P_{\succ_g} = \{(a, b) \in A^V \times A^V : a \succ_g b\}$

Lorsque les échelons de g représentent des catégories de confort, il est intéressant pour les décideurs ou les experts en confort de savoir, approximativement, à quelles valeurs de M correspond une catégorie Cl . Cela est possible si la correspondance entre les évaluations données par g et celles données par M est parfaite (ou presque parfaite). Ce qui nous donne la relation suivante :

$$g(a) = Cl \Leftrightarrow \min_{\{b \in A^V : g(b) = Cl\}} M(b) \leq M(a) \leq \max_{\{c \in A^V : g(c) = Cl\}} M(c) \quad (6.6)$$

où $\min_{\{b \in A^V : g(b) = Cl\}} M(b)$ (resp. $\max_{\{c \in A^V : g(c) = Cl\}} M(c)$) représente la meilleure (resp. la moins bonne) évaluation par les voyageurs correspondant à une configuration affectée à la catégorie Cl par le modèle.

6.2 Validation de la modalité thermique

Nous avons présenté à la section précédente une procédure permettant de valider le modèle d'évaluation sur un critère quelconque du modèle conceptuel. L'objectif est d'évaluer la correspondance (ou la conformité) entre les évaluations d'un ensemble de configurations A^V par le modèle, que nous avons construit, et par les voyageurs. Nous allons tenter dans cette section d'appliquer cette procédure aux critères *confort thermique dans une saison*, qui sont des sous-critères de la modalité thermique. Nous allons utiliser pour cela des données issues d'un projet de recherche sur le confort thermique (Esther). Les paramètres physiques et les évaluations des voyageurs recueillies dans cette étude n'avaient pas pour finalité la validation de la modalité thermique. Elles ne sont donc pas exhaustives pour l'évaluation des configurations par le modèle sur chacune des dimensions de la modalité thermique. Pour cela, certaines suppositions pouvant être restrictives ont été

formulées lors de la procédure de validation. Nous allons donc présenter uniquement une application de cette procédure. Afin que le critère soit validé, il faudrait disposer de la totalité des paramètres physiques nécessaires à sa validation.

1- Données d'entrée et protocole de mesure

Nous avons considéré neuf configurations (TGV), représentant un même matériel où des modifications contrôlées, de la température de consigne et des vitesses d'air soufflées, ont été effectuées. Ces configurations sont caractérisées par les paramètres physiques suivants :

- les températures et vitesses d'air mesurées par six capteurs placés sur deux sièges d'une salle voyageurs à différentes hauteurs (tête, buste et pieds) sur deux sièges (coté fenêtre et coté couloir), pendant toute la durée de l'expérience (deux heures),
- les températures mesurées à différents endroits de la salle voyageurs par cinq autres capteurs, pendant toute la durée de l'expérience (deux heures).

Cent soixante-cinq voyageurs répartis dans ces configurations ont été interrogés sur leur confort thermique en donnant une note sur une échelle discrète allant de 0 (pire) à 10 (meilleure).

2- Évaluation des configurations sur les dimensions du confort thermique

Afin d'effectuer la validation, nous avons tout d'abord évalué les configurations sur les dimensions de la modalité thermique. Pour cela, nous avons considéré leurs paramètres physiques et la saison à laquelle ils ont été mesurés. Ces évaluations ont nécessité, pour chacune des configurations, le calcul des grandeurs suivantes à partir des mesures physiques enregistrées :

- la température intérieure moyenne Tim obtenue à partir des températures mesurées par les cinq capteurs à différents endroits de la salle voyageurs pendant toute la durée de l'expérience,
- les températures moyennes maximales Tim_{\max}^{hrz} et minimales Tim_{\min}^{hrz} (parmi les températures mesurées par les cinq capteurs à différents endroits de la salle voyageurs) obtenues par les mesures effectuées pendant toute la durée de l'expérience,
- les températures moyennes maximales Tim_{\max}^{vrt} et minimales Tim_{\min}^{vrt} (parmi les températures mesurées par les six capteurs à différentes hauteurs) obtenues par les mesures effectuées sur les deux sièges pendant toute la durée de l'expérience,
- la vitesse d'air moyenne V obtenue à partir des vitesses d'air mesurées par les six capteurs à différentes hauteurs sur les deux sièges pendant toute la

durée de l'expérience.

En ce qui concerne les paramètres perceptifs de ces dimensions, nous avons considéré les températures Tic et vitesses d'air $Vref$ de référence données par le tableau 6.1 et qui sont fonction de la saison, de la température extérieure (Tem) ainsi que de la température intérieure moyenne (Tim).

Trains	Saison	Tem (°C)	Tic (°C)	Tim (°C)	$Vref$ (m/s)
TGV 6	hiver	19,75	24	24,50	0,40
TGV 5	hiver	12,50	23	22,80	0,30
TGV 2	automne	19,50	24	24,10	0,35
TGV 3	automne	8,50	23	22,80	0,30
TGV 7	hiver	11	23	22,10	0,25
TGV 1	automne	16	24	24,50	0,40
TGV 4	automne	10,50	23	22,20	0,25
TGV 8	hiver	12	23	21,40	0,22
TGV 9	hiver	17,50	23	23,20	0,30

Tableau 6.1 – Les valeurs des températures et vitesses d'air de référence

Les paramètres physiques mesurés dans ces configurations nous ont permis uniquement d'évaluer ces dernières sur quatre dimensions du critère *Absence de sensations désagréables* pour une saison donnée. Après avoir déterminé les paramètres physiques et perceptifs à prendre en compte, nous avons utilisé les indicateurs d'état correspondant à ces quatre dimensions :

- $\Delta TimTic$: l'écart entre la température intérieure moyenne Tim et la température de référence Tic en °C
- ΔTim^{hrz} : l'écart entre Tim_{max}^{hrz} et Tim_{min}^{hrz} en °C
- ΔTim^{vrt} : l'écart entre Tim_{max}^{vrt} et Tim_{min}^{vrt} en °C
- $\Delta VrefV$: l'écart relatif entre la vitesse d'air de référence $Vref$ et la vitesse d'air moyenne V

L'indicateur d'état fT^{paroi} correspondant à la dimension : *l'écart entre la température des parois et la température intérieure moyenne*, ainsi que les deux indicateurs fT^{TicTem} et fT^{pre} correspondant aux dimensions du critère *absence de rupture*, n'ont pu être calculés pour l'ensemble des configurations.

3- Formulation des suppositions

Les paramètres physiques mesurés nous ont uniquement permis d'évaluer les configurations sur certaines dimensions de la modalité thermique. Cela nous amène

à formuler les suppositions suivantes, sous lesquelles la conformité entre les évaluations du modèle et celles des voyageurs sera jugée :

- **H1** : étant donné que la température des parois n'a pas été mesurée, nous supposons que $fT^{\text{paroi}} \leq 10^\circ\text{C}$, cela implique que le critère fT^{paroi} est dans toute coalition concordante en faveur de la configuration, en la comparant avec les profils séparant les catégories : 1 (Inconfort), 2 (Inconfort léger) et 3 (Absence d'inconfort), lors de son évaluation sur le critère *Absence de sensations désagréables*. Cette supposition reste réaliste car il est rare de constater un écart de plus de 10°C entre la température intérieure moyenne et la température des vitrages dans les TGV actuels.
- **H2** : l'évaluation des configurations par le modèle sur la modalité thermique se réduit à leur évaluation sur le critère *Absence de sensations désagréables* car aucun paramètre physique, pouvant servir à évaluer les configurations sur les dimensions du critère *Absence de rupture* (fT^{TicTem} et fT^{pre}), n'a été mesuré. Cette supposition risque de ne pas être pertinente si, dans certaines configurations, des variations brusques de températures et de vitesses d'air ont été mesurées, alors que dans d'autres configurations, les conditions climatiques ont été plus homogènes durant le trajet

En plus de ces deux suppositions, nous supposons que les voyageurs interrogés sur leur confort thermique partagent (plus ou moins) la même perception, ce qui est le cas dans le modèle actuellement pour la modalité thermique. Cela implique que la moyenne de leurs évaluations (une note de 0 à 10) est (plus ou moins) représentative du confort d'un groupe de voyageurs partageant la même perception. Cette supposition est confortée par le fait qu'il n'y a pas de grands écarts entre les évaluations des voyageurs dans une même configuration.

4- Comparaison des évaluations

Afin de juger la conformité du modèle avec les évaluations des voyageurs, nous avons utilisé les neuf configurations (voir le tableau 6.2) :

- pour lesquelles nous avons calculé la moyenne M des notes attribuées par les voyageurs à leur confort thermique dans une saison (hiver et mi-saison) sur une échelle $[0, 10]$,
- et que nous avons évaluées, avec le modèle, sur le critère *confort thermique dans une saison* CI^{saison} , sous les suppositions H1 et H2.

Nous avons ensuite comparé, à l'aide de la relation 6.1, les deux préordres engendrés par M et CI^{saison} sur les neuf configurations.

Analyse de la correspondance avec la relation 6.1.4

Pour ce qui est de la correspondance, nous allons tout d'abord nous intéresser à

Trains	ΔT_{imTic} (°C)	$\Delta T_{im^{hrz}}$ (°C)	$\Delta T_{im^{vrt}}$ (°C)	ΔV_{refV} (%)	Nb. sujets	CIT^{saison}	Moyenne (M)
TGV 6	0,50	1,63	2,93	0	20	Absence d'inconfort	7,40
TGV 5	0,20	2,29	1,53	0	12	Absence d'inconfort	7,33
TGV 2	0,10	2,31	2,44	0	15	Absence d'inconfort	6,67
TGV 3	0,20	2,13	0,52	0	22	Absence d'inconfort	6,64
TGV 7	0,90	2,29	1,00	0	16	Absence d'inconfort	6,56
TGV 1	0,50	1,13	1,26	0	21	Absence d'inconfort	6,48
TGV 4	0,80	1,77	0,95	0	20	Absence d'inconfort	6,05
TGV 8	1,60	1,96	0,89	14	16	Inconfort léger	5,94
TGV 9	0	1,19	2,58	0	23	Absence d'inconfort	5,87

Tableau 6.2 – Évaluation du critère Confort thermique dans une saison par le modèle et par les voyageurs dans les TGV

la précision du modèle d'évaluation. Nous verrons ensuite si des divergences de type (6.4) existent.

Nous pouvons constater dans le tableau 6.2 que les moyennes des évaluations des voyageurs sont plutôt proches les unes des autres (l'écart entre la moyenne maximale et minimale n'est que de 1,53 sur une échelle allant de 0 à 10), ce qui est probablement dû au fait que les paramètres physiques sont relativement homogènes dans les configurations choisies. Nous ne pouvons donc pas affirmer que l'évaluation par le modèle n'est pas assez précise, à moins que les experts en confort affirment qu'il existe une différence significative entre deux notes de confort. Ce petit écart peut donc expliquer le fait que la plupart de ces configurations sont dans la même catégorie (*Absence d'inconfort*). Il nous semble donc plus intéressant de choisir, lors de la mise en œuvre du protocole d'essai, des configurations plus contrastées par rapport aux paramètres physiques mesurés, afin que la validation soit pertinente. Cela peut être réalisé en choisissant les configurations à partir de plusieurs types de matériel.

D'autre part, nous pouvons constater qu'il est possible que l'évaluation des configurations par le modèle ne soit pas assez précise. En effet, alors qu'il n'y a qu'un écart de 0,11 sur 10 entre le TGV 4 et le TGV 8 en terme d'évaluation voyageurs, ces deux TGV sont dans deux catégories différentes (*absence d'inconfort* et *inconfort léger*). Cela n'aurait peut-être pas attiré notre attention si par exemple le TGV 5 et le TGV 2 étaient également dans deux catégories différentes (un écart de 0,66). Cependant, il reste difficile de juger cette précision sur la base d'un ensemble réduit de configurations.

Nous pouvons constater également qu'il est possible d'avoir une divergence entre les évaluations des TGV 8 et TGV 9 par le modèle et par les voyageurs. En effet, la paire de configurations (TGV 8, TGV 9) peut violer la condition (6.4) si la différence entre les notes de confort $M(TGV\ 8)$ et $M(TGV\ 9)$ est jugée

significative, car :

$$CIT^{\text{saïson}}(TGV\ 8) = 2 < CIT^{\text{saïson}}(TGV\ 9) = 3$$

alors que

$$M(TGV\ 8) = 5,94 > M(TGV\ 9) = 5,87$$

Si la différence entre les notes $M(TGV\ 8)$ et $M(TGV\ 9)$ n'est pas jugée significative, alors la précision de l'évaluation de ces deux TGV par le modèle n'est pas pertinente. En revanche, si cette différence est réellement significative il serait intéressant de revoir les suppositions formulées à l'étape précédente. Nous proposons de poursuivre l'analyse avec cette deuxième hypothèse.

Compte tenu des conditions climatiques dans le TGV 9 (le moins bien évalué par les voyageurs) qui sont meilleures (sur les quatre dimensions considérées) que le TGV 6 (ayant la meilleure évaluation par les voyageurs), il est difficile de trouver un modèle monotone en fonction des performances sur les quatre dimensions considérées qui soit compatible avec les préférences des voyageurs. Pour cela, nous pensons qu'il n'est pas suffisant d'expliquer l'évaluation par les voyageurs du confort thermique en considérant uniquement les dimensions du critère *Absence de sensations désagréables*. En effet, cela montre que la supposition **H2** n'est pas réaliste et que s'il était possible d'évaluer les configurations considérées sur les dimensions du critère *Absence de rupture*, nous aurions certainement constaté que le TGV 9 ne serait pas dans la catégorie *Absence d'inconfort*.

Nous avons considéré dans la supposition **H2** que toutes les configurations avaient la meilleure évaluation possible sur le critère *Absence de rupture* ($CIT^{\text{AbsRup}} = 3$). Qu'en est-il, si nous avons considéré les deux autres scénarios où $CIT^{\text{AbsRup}} = 1$ et $CIT^{\text{AbsRup}} = 2$? Le tableau 6.3 montre que pour le scénario $CIT^{\text{AbsRup}} = 1$ le préordre engendré par g ne change pas, mais chaque configuration se retrouve dans la catégorie inférieure. Ce scénario n'aurait donc pas expliqué pourquoi le TGV 9 est moins bien évalué par les voyageurs que le TGV 8, alors qu'il est dans une meilleure catégorie. En revanche, en considérant le scénario où $CIT^{\text{AbsRup}} = 2$ (voir le tableau 6.3), toutes les alternatives sont dans la catégorie *Inconfort léger*, et le problème ne se pose pas. De plus, cela pourrait être en accord avec le fait que les évaluations de ces configurations par les voyageurs soient plus ou moins proches.

Discussion sur l'analyse de la correspondance des évaluations

L'analyse de la correspondance que nous avons effectuée repose sur deux suppositions. La première est que M représente une bonne évaluation des configurations pour l'ensemble des voyageurs. La deuxième est que si deux configurations a et b sont telles que $M(a) > M(b)$, alors les experts en confort sont capables de juger si a est significativement plus confortable que b . Une attention particulière

Trains	$CIT^{\text{saïson}}$ quand $CIT^{\text{AbsRup}} = 3$	$CIT^{\text{saïson}}$ quand $CIT^{\text{AbsRup}} = 1$	$CIT^{\text{saïson}}$ quand $CIT^{\text{AbsRup}} = 2$	Moyenne (M)
TGV 6	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	7,40
TGV 5	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	7,33
TGV 2	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	6,67
TGV 3	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	6,64
TGV 7	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	6,56
TGV 1	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	6,48
TGV 4	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	6,05
TGV 8	Inconfort léger	Inconfort	Inconfort léger	5,94
TGV 9	Absence d'inconfort	Inconfort léger	Inconfort léger	5,87

Tableau 6.3 – Évaluation du critère Confort thermique dans une saison par le modèle et par les voyageurs dans les TGV, en considérant les trois scénarios

doit donc être accordée au choix de M . D'autre part, la relation 6.1 nous a permis d'identifier deux raisons pour lesquelles les évaluations ne sont pas compatibles. La première concerne la précision de l'évaluation par le modèle lorsque que l'échelle de g comporte un nombre réduit d'échelons. La deuxième, qui permet d'identifier les divergences, nous éclaire sur la pertinence des suppositions formulées. Par ailleurs, il est important de souligner que le caractère pilote du protocole de validation peut affecter la pertinence de notre analyse.

Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les étapes les plus importantes d'un protocole de validation du modèle d'évaluation sur un critère, par rapport aux évaluations des voyageurs. La première étape consiste à recueillir les données d'entrée nécessaires à la validation. Ces données concernent les mesures physiques et les évaluations des voyageurs. Dans le cas où le protocole d'essai est destiné à la validation, nous avons mentionné certaines précautions à prendre en compte lors de la mise œuvre de ce protocole. La deuxième étape a pour objectif d'évaluer les différentes configurations sur chacune des dimensions correspondant au critère à valider. Pour cela, il est souvent nécessaire de transformer les paramètres physiques mesurés en grandeurs pouvant être prises en compte par les indicateurs d'état. Il peut arriver, lorsqu'il n'y a pas de contrôle sur le protocole d'essai, que les paramètres physiques mesurés ne soient pas suffisants pour évaluer les configurations sur chacune des dimensions ou que les voyageurs interrogés ne remplissent pas les conditions sur la variabilité interindividuelle ou sur les activités pratiquées. Dans ce cas, certaines suppositions doivent être formulées (troisième étape). Elles pourront justifier, dans le cas où la correspondance entre les évaluations n'est pas parfaite, certaines divergences entre les évaluations des voyageurs et celles du modèle. La quatrième étape consiste à

évaluer et analyser la correspondance entre le modèle d'évaluation et les évaluations des voyageurs. Nous avons défini pour cela une relation de correspondance sur laquelle nous avons fondé notre analyse.

Nous avons vu également que certains critères ne pouvaient être validés avec des évaluations voyageurs s'ils sont construits sur la base d'une politique des décideurs n'étant pas nécessairement en adéquation avec leurs évaluations. En effet, la validation de tels critères n'est nécessaire que pour vérifier si la politique des décideurs est en adéquation avec la perception des voyageurs.

Ce protocole a été appliqué uniquement pour valider le critère *confort thermique dans une saison*. Nous n'avons donc pas assez de recul pour y porter un regard critique. Nous n'avons pas non plus assez d'expérience pour tester sa pertinence. Cependant, nous pensons qu'il constitue une bonne base sur laquelle des méthodologies de validation peuvent être fondées.

Annexe

Comparaison des évaluations dans le cas des TER

Le projet « Outil multicritère pour l'évaluation globale du confort » a également pour objectif de construire un modèle d'évaluation du confort pour les TER. La décomposition de la modalité *Thermique* est presque similaire à celle des TGV sauf pour le critère *absence de rupture* qui regroupe d'autres dimensions en plus de celles du modèle TGV. Les paramètres physiques liés à la modalité *Thermique* ainsi que les évaluations voyageurs dans les TER ont également été recueillis dans le projet Esther. Nous les avons également utilisés pour la validation du modèle TER (voir le tableau 6.4). Nous pouvons constater que les évaluations sont assez proches les unes des autres mais moins qu'en TGV, ce qui est en adéquation avec le fait qu'il y ait deux catégories de confort plus marquées qu'en TGV. En effet, chaque catégorie comporte au moins quatre configurations, alors que la catégorie *inconfort léger* comporte une seule configuration dans le cas du modèle TGV.

Les évaluations des configurations TER par le modèle et par les voyageurs ne comportent pas de divergence par rapport à la condition (6.1). Cependant, à l'image du modèle TGV, il se peut que l'évaluation des configurations par le modèle TER ne soit pas assez précise. En effet, la différence entre les notes du TER 2 et du TER 6 est la plus petite parmi tous les couples de configurations (un écart de 0,03 sur 10), alors que ces deux TER sont affectés à deux catégories différentes par le modèle.

Nous pouvons également constater que les voyageurs TER sont moins exigeants que les voyageurs TGV. En effet, le TER 06 qui est dans la catégorie *Inconfort léger* a une évaluation voyageur moyenne de 6,71, alors que le TGV 4, qui est dans une meilleure catégorie (*Absence d'inconfort*), a une moins bonne évaluation voyageurs (6,04). Cela est dû au fait que, dans la construction des deux modèles d'évaluation, la différence entre les attentes des voyageurs dans les deux types de trains n'a pas été prise en compte.

Trains	Nb. sujets	$CIIT^{\text{saison}}$	Moyenne (M)
TER 01	28	Absence d'inconfort	7,57
TER 04	31	Absence d'inconfort	7,29
TER 05	9	Absence d'inconfort	7,22
TER 02	27	Absence d'inconfort	6,74
TER 06	21	Inconfort léger	6,71
TER 09	26	Inconfort léger	6,31
TER 10	24	Inconfort léger	6,17
TER 07	11	Inconfort léger	5,91
TER 03	18	Inconfort léger	5,61
TER 08	25	Inconfort léger	5,48

Tableau 6.4 – *Évaluation du critère Confort thermique dans une saison, par le modèle et par les voyageurs dans les TER*

Chapitre 7

Analyse critique et perspectives

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons tenter de porter un regard critique sur l'approche utilisée dans cette thèse et de revenir sur certains aspects importants qui la caractérisent. Cela pourrait mieux éclairer le lecteur intéressé par l'application de cette approche à un problème d'aide multicritère à la décision. Nous allons également revenir sur deux aspects importants, ayant fortement guidé notre approche, que nous avons peu discutés aux chapitres précédents. Ces aspects concernent l'interaction avec les intervenants et l'évolution de l'outil fondé sur le modèle d'évaluation.

À la section 7.1, nous allons revenir sur ce qui caractérise le modèle et l'approche de manière globale (utilisation de plusieurs méthodes dans un modèle hiérarchique et prise en compte de la perception). Nous verrons également comment les choix portant sur la finesse du modèle d'évaluation ont été effectués. Nous finirons la première section par des perspectives sur la généralisation de l'approche.

Nous décrirons à la deuxième section la manière dont s'est déroulée l'interaction avec les différents intervenants pour la construction du modèle. La troisième section sera consacrée aux évolutions de l'outil, ainsi qu'à l'intérêt qu'il pourrait avoir par rapport à la capitalisation des connaissances et à l'évolution du processus de décision.

7.1 L'approche utilisée pour la construction du modèle d'évaluation

Les trois points qui seront abordés dans cette section concernent le modèle d'évaluation et l'approche utilisée pour sa construction. Ce sont des aspects importants pouvant caractériser le modèle et l'approche et que nous avons jugés utiles

d'aborder de manière critique.

7.1.1 Caractéristiques générales du modèle d'évaluation

La première caractéristique du modèle d'évaluation est d'être hiérarchique et d'utiliser plusieurs méthodes d'agrégation. La deuxième est que la perception voyageurs a été prise en compte à toutes les étapes de sa construction. Nous allons voir quels sont les avantages et les inconvénients de ces caractéristiques par rapport aux modèles et aux approches existants.

Utilisation d'un modèle hiérarchique avec plusieurs méthodes d'agrégation

Le fait d'avoir choisi un modèle hiérarchique pour formaliser les critères de notre problème nous a permis de prendre en compte dans le modèle les différents aspects qui rendent complexe le concept de confort et d'en représenter les liens (dépendances). D'autre part, ce modèle nous a permis de rendre intelligible et opérationnelle la famille constituée d'un nombre important de critères. En effet, l'intelligibilité de ce modèle facilite aux experts CIM la négociation des modifications à apporter à une offre. Il facilite également la communication entre eux afin de mieux spécifier les critères de confort. Si nous avons choisi un modèle où tous les critères doivent être agrégés simultanément, nous aurions perdu ces deux propriétés.

Un modèle hiérarchique offre également la possibilité d'utiliser plusieurs méthodes d'agrégation, ce qui laisse à l'homme d'étude un degré de liberté afin d'effectuer un choix approprié. Il présente par contre un inconvénient de taille qui est dû au nombre important de procédures d'agrégation à implémenter. Cela demande une forte implication des intervenants pour l'élicitation des préférences. Cette implication de la part des intervenants peut nécessiter leur compréhension des procédures utilisées ainsi qu'un effort cognitif pour leur mise en œuvre. L'utilisation d'un modèle hiérarchique est donc à éviter dans le cas où l'implication des intervenants est limitée.

Dans les approches classiques d'aide multicritère à la décision utilisant un modèle hiérarchique, une seule méthode d'agrégation est utilisée à chaque nœud, à l'image de AHP. Dans notre approche, nous avons fait le choix de ne pas utiliser nécessairement la même méthode d'agrégation. Ceci a été apprécié par les différents experts car chaque modalité de confort possède des caractéristiques différentes (par exemple, dans certaines modalités il n'y a que de l'inconfort, alors que dans d'autres, il y a du confort et de l'inconfort). De plus, le degré de connaissances en confort n'est pas le même pour toutes les modalités, ce qui leur laisse la possibilité d'être plus ou moins exigeant sur la finesse du résultat souhaité.

Ce choix (utilisation de plusieurs méthodes) présente des avantages que nous avons vus au chapitre 5 mais aussi des inconvénients. Ils sont généralement liés à la mise en œuvre des méthodes d'agrégation (élicitation des préférences, implémentation du modèle) et à l'effort des intervenants pour s'en approprier le principe. Pour cela, nous avons considéré le minimum de méthodes possibles, tout en gardant les avantages par rapport à la conformité avec les hypothèses de la méthode utilisée, l'aptitude à modéliser l'information intercritères et la finesse du résultat souhaité.

Prise en compte de la perception voyageurs

Nous avons vu au chapitre 2 que pour modéliser le confort il est important de partir de la perception voyageurs, de tenir compte du fait qu'elle peut être différente d'un individu à un autre et qu'elle dépend du contexte. Nous avons vu également, dans ce chapitre, que les travaux réalisés sur la construction d'indicateurs de confort global ne prenaient pas en compte ces aspects importants de la perception. Nous allons rappeler, dans cette section, comment ces aspects ont été intégrés dans le modèle et voir si nous aurions pu les aborder différemment.

- **La variabilité interindividuelle** a été prise en compte dans le modèle en considérant des groupes de voyageurs partageant la même perception du confort, pour lesquels nous évaluons le confort dans la pratique d'une activité. Compte tenu des connaissances actuelles, seul le facteur morphologie nous a permis de les caractériser. Cependant, nous avons vu que l'un des avantages de placer les groupes au dessus des modalités est de pouvoir intégrer, sans modifications importantes de ce dernier, de nouveaux facteurs caractéristiques tel que l'âge, par exemple. En revanche, il sera quand même difficile d'intégrer des facteurs psychologiques liés à la mémoire. En effet, bien que ces facteurs soient importants dans la perception, ils sont propres à chaque individu. Il est donc impossible de réduire un groupe à un seul individu. D'autre part, nous avons vu au chapitre 4 qu'il était possible,
 - soit de considérer les groupes comme donnée d'entrée du modèle et d'évaluer le confort assis (ou même le confort global) pour chaque groupe. Cela aurait nécessité plus de connaissances sur les pratiques de chaque groupe, notamment la proportion de temps passé dans la pratique de chaque activité,
 - soit d'intégrer les groupes dans chaque modalité (la morphologie pour *Siège environné* et l'âge pour *Thermique*, etc.). Nous avons vu à la section 4.5 du chapitre 4 que, dans ce cas, s'il y avait au moins deux modalités pour lesquelles la variabilité interindividuelle est considérée, cela pouvait biaiser l'agrégation. Cependant, avec les connaissances actuelles (en considérant uniquement la morphologie), il aurait été plus intéressant d'intégrer les groupes sous la modalité *siège environné* car nous aurions eu moins de

nœuds dans le modèle hiérarchique (donc moins de procédures d'agrégation à implémenter).

- **Le contexte** : pour les voyages en TGV, le contexte est principalement caractérisé par les activités que les voyageurs pratiquent car les enquêtes ont montré qu'ils évaluaient leur confort en fonction des activités. Dans le modèle, les activités ont une importance particulière, elles composent le confort assis et conditionnent l'évaluation de chaque modalité. Bien que les activités soient la principale caractéristique du contexte, il peut y avoir d'autres facteurs qui n'ont pas été considérés dans le modèle comme le fait qu'un voyageur soit accompagné ou pas, ou son motif de voyage (affaires ou loisir). Cela pourrait être considéré si des statistiques sur de tels facteurs étaient disponibles.

7.1.2 Arbitrage entre finesse du modèle et difficulté de sa mise en œuvre

Avant de commencer la construction du modèle d'évaluation, nous avons compris que les décideurs et les experts en confort voulaient privilégier la finesse du modèle. Cela se traduisait par une exhaustivité dans la définition des critères et dans l'identification des spécifications dans les cahiers des charges. Le projet « outil multicritère pour l'évaluation du confort » représentait une occasion de formaliser dix années d'études et de recherche sur le confort à la SNCF afin d'obtenir cette vision globale qui a du sens pour les voyageurs. Concernant les experts en matériel roulant (CIM), ils appréhendaient ce choix qui, pour eux, risquait d'aboutir à un outil difficile à utiliser. Étant donné le temps limité (trois ans) dont nous disposions, cette volonté de la part des experts d'être exhaustif dans la définition des critères et la construction des échelles de chaque modalité de confort, nous a conduit à limiter la construction du modèle d'évaluation au confort assis. Si cela n'avait pas été le cas, nous aurions pu faire l'hypothèse que les parties du modèle d'évaluation correspondant à chaque modalité avaient déjà été construites. Nous aurions commencé l'agrégation à partir des modalités. Cela nous aurait peut être permis de traiter le confort global dans le temps imparti.

Lors de la construction du modèle d'évaluation, nous avons également été confrontés à des choix relevant de la finesse du modèle et pouvant rendre difficile sa mise en œuvre. Ce choix portait sur trois aspects : la décomposition de l'offre par endroits, la définition de sémantiques pour les catégories et le fait d'obtenir un rangement au sein d'une même catégorie. Nous allons voir dans cette section quels sont les avantages et inconvénients de la prise en compte de ces trois aspects.

Décomposition de l'offre par endroits

Cet aspect a déjà été abordé au chapitre 5. Dans cette thèse nous avons fait le choix de ne pas nous préoccuper de la décomposition par endroits car cela n'était pas prioritaire par rapport à la construction du modèle d'évaluation. Pour cela, nous avons considéré l'offre comme étant un seul endroit pour lequel le confort est évalué. Néanmoins, il est clair, avec cette hypothèse, que l'évaluation du confort (principalement le confort assis) peut ne pas être pertinente, car les caractéristiques physiques sont différentes : sièges en file/carré, coté fenêtre/couloir, près/loin des portes intercirculations, présence d'équipements individuels uniquement à certaines places, etc. Il est donc nécessaire, lors de la mise en œuvre de l'outil, de laisser la possibilité aux entités qui évaluent les offres de les décomposer par endroits (dont les caractéristiques physiques sont plus ou moins homogènes), et d'intégrer ensuite cette décomposition dans le modèle d'évaluation. Cette décomposition dépend des réponses des fournisseurs. Il est donc important, lors de l'évaluation des offres, de les inciter à donner le plus d'information possible.

Définition de sémantiques pour les catégories de confort

Dans une problématique de tri, les catégories de confort sont souvent associées à des prises de décisions. Dans notre modèle, étant donné son caractère exploratoire, les catégories servent essentiellement, pour les experts en confort et les décideurs, à construire des références de confort qui seront ensuite corrélées à des évaluations faites par les voyageurs. Pour le moment, les décideurs n'ont pas manifesté de politique correspondant à chaque catégorie, mais nous pensons que le fait d'arriver à formaliser leurs connaissances en confort peut les amener, dans le futur, à définir des politiques par rapport au choix du fournisseur ou à la valorisation du confort comme un service auprès des voyageurs. Pour ce qui concerne les experts en matériel roulant, les catégories de confort peuvent leur servir d'aide à la négociation avec le fournisseur choisi. Pour cela, nous avons fait l'effort, avec les différents intervenants, de définir, pour les catégories, des sémantiques permettant d'obtenir plus d'information par rapport à l'évaluation d'une offre sur le critère correspondant. Cela permet aux négociateurs de trouver plus facilement les points faibles d'une offre et de justifier leurs demandes de modifications aux fournisseurs. L'effort cognitif nécessaire à la définition de ces sémantiques est important. Pour cela, lors de la phase d'agrégation, certains experts n'ont pas manifesté l'intérêt de définir des sémantiques pour chaque catégorie comme dans la modalité *thermique*.

Obtention d'un rangement au sein d'une même catégorie

Nous avons vu que la problématique d'aide à la décision associée à notre problème était une problématique de tri. Pour cela, nous avons construit des niveaux

de référence représentant des catégories de confort. Il s'est avéré, pour certains critères, que ces catégories n'étaient pas suffisamment précises pour rendre compte du confort d'une offre. Cette précision nécessite la mise en œuvre de méthodes plus élaborées (l'intégrale de Choquet dans notre cas) pas forcément intuitives pour tous les intervenants et pouvant nécessiter plus de temps et plus de conditions sur leur utilisation. Pour cela, et au moment du choix de la méthode, nous cherchons à savoir si un rangement est nécessaire en identifiant des alternatives appartenant à une même catégorie pour lesquelles l'intervenant juge nécessaire de les différencier. Cela arrive souvent dans des nœuds où :

- les échelles des critères à agréger représentent des niveaux de confort déjà construits et bien définis (ce qui est rarement le cas des dimensions),
- il y a, dans une même catégorie, des relations de dominance entre alternatives, par rapport à ces critères,
- et le nombre de critères est important (supérieur, et parfois égal à quatre)

Nous choisissons donc une méthode permettant d'obtenir un rangement uniquement si cela est nécessaire.

7.1.3 Généralisation de l'approche utilisée

L'approche, développée dans cette thèse, utilisée pour la construction du modèle d'évaluation du confort dans les TGV, a également été utilisée pour les TER et les Transilien. La différence principale entre les modèles était dans la définition et la formalisation des critères. Bien que les composantes physiques soient les mêmes dans les trains, leur perception est différente en raison du contexte. En effet, alors qu'en TGV ce sont les activités qui représentent la caractéristique principale du contexte, en Transilien c'est l'affluence qui la représente. Le confort en Transilien se décline donc par rapport à différents scénarii d'affluence et non pas par rapport aux activités. La perception du confort en TER se rapproche de celle en TGV pour les TER longues distances, et se rapproche de celle des Transilien pour TER périurbains. Le modèle TER est donc une combinaison des deux modèles. Au delà de l'utilisation de l'approche pour des problématiques d'évaluation du confort dans les trains, il est intéressant de voir à présent, étape par étape, quels sont les aspects de l'approche pouvant être généralisés à d'autres problèmes d'aide multicritère à la décision.

À l'étape de définition et de formalisation des critères, il est intéressant de vérifier, au delà de ce que doit représenter une famille de critères, si les besoins des intervenants concernés par l'aide à la décision peuvent affecter cette construction. Dans notre problème, cela consistait à donner la possibilité aux décideurs de fixer leur cible confort à travers les activités, et, aux experts CIM, à faciliter leurs négociations avec le fournisseur choisi en considérant des modalités qui représentent chacune de leurs expertises. Si l'on s'intéresse à des problématiques d'évaluation

du confort, dans les transports en commun par exemple, il est important d'identifier, puis d'intégrer dans un modèle de critères les aspects liés au contexte et à la variabilité interindividuelle.

En ce qui concerne l'étape de construction des échelles, il est important d'identifier les données qui vont servir à évaluer ce qui va faire l'objet de la décision (les alternatives) afin de construire les dimensions du modèle. Ces données comprennent les caractéristiques des alternatives, et parfois, les valeurs de référence sur chacune des caractéristiques, que doit idéalement atteindre une alternative. Dans le cas où l'on veut construire des échelles numériques, elles représentent généralement des distances par rapport aux valeurs de référence. En revanche, s'il est difficile de construire des échelles numériques pour un critère parce qu'il n'est pas possible de mesurer physiquement les données qui lui sont associées, il est important, pour la suite, de construire des échelles qualitatives reposant sur des caractéristiques bien définies et acceptées par tous.

La phase d'agrégation des critères de notre approche présente plusieurs aspects pouvant être exploités pour d'autres problématiques. Pour tout problème dont le modèle de critère est hiérarchique (sous forme d'arborescence), nous avons vu qu'il n'était pas nécessaire d'utiliser systématiquement la même méthode d'agrégation à chaque nœud, et qu'il était intéressant de considérer plusieurs méthodes potentielles. Nous avons proposé, pour cela, un protocole de choix de la méthode (voir le chapitre 5) fondé sur :

- le précision du résultat, souhaitée par l'intervenant,
- la conformité des échelles et de l'information préférentielle avec les conditions d'utilisation de la méthode.

Afin que le choix de la méthode soit pertinent il est important que les méthodes potentielles soient assez complémentaires sur leurs conditions d'utilisation et sur leurs capacités à modéliser l'information inter-critères du problème. En ce qui concerne l'élicitation des préférences (pour déterminer les paramètres décisionnels ou pour construire une base de règles) avec des exemples d'affectation, il est préférable dans une procédure d'agrégation/désagrégation d'utiliser des alternatives représentant des bornes de catégories (les meilleures et les moins bonnes alternatives). L'identification de telles alternatives nécessite un dialogue avec l'intervenant (voir le chapitre 5).

7.2 Interaction avec les intervenants

L'objectif de cette section est de décrire la manière dont s'est déroulé le processus d'interaction avec les différents intervenants et de rappeler les difficultés rencontrées. Les premières interactions avaient pour objectif de comprendre le processus de décision associé à l'achat et à la rénovation d'un TGV. Pour cela,

nous avons eu, tout d'abord, un entretien d'une heure trente environ, avec le représentant des décideurs (SNCF Voyages) puis un autre entretien similaire avec un représentant de la direction du matériel. Ces deux entretiens nous ont également permis d'identifier leurs besoins par rapport à l'utilisation de l'outil (aide à la spécification, aide à l'évaluation et aide à la négociation). Afin de préparer ces réunions, nous avons élaboré un questionnaire portant sur le rôle des différents intervenants au sein de ce processus, leurs attentes par rapport à l'aide à la décision ainsi que les données utilisées dans le processus.

D'autres réunions ont suivi avec les experts en confort ainsi que les experts du CIM, afin de leur expliquer le principe de l'aide multicritère à la décision et de les familiariser avec le langage (critères, échelles). Ils représentent les entités avec qui s'est faite l'interaction pour la construction du modèle d'évaluation. Pour cela, nous avons utilisé des présentations dans lesquelles nous avons expliqué les notions d'échelle et de critère, ainsi que le principe de certaines méthodes d'agrégation en utilisant des exemples concrets.

La majorité des réunions que nous avons eues avec les intervenants a porté sur la construction du modèle d'évaluation. Nous allons décrire dans cette section le processus d'interaction pour la construction du modèle d'évaluation, dans un premier temps, avec les experts en confort, puis, avec les experts en matériel roulant.

7.2.1 Interaction avec les experts en confort

La plupart des réunions et entretiens pour la construction du modèle d'évaluation ont eu lieu avec les experts en confort. Ils étaient également les encadrants industriels de la thèse. L'équipe Confort Voyageurs et Design était constituée de quatre experts :

- un expert en confort global,
- un expert en confort dynamique, confort du siège et confort acoustique,
- un expert en confort thermique et en confort visuel,
- un expert en design prospectif.

Les premières réunions que nous avons eues, étaient avec l'expert en confort global. Elles nous ont permis d'identifier les composantes à prendre en compte et de construire la première partie du modèle conceptuel (formalisation des critères) jusqu'aux modalités. Avant chaque réunion, nous avons préparé une proposition de modélisation après s'être approprié les différents rapports d'études sur le confort global dans les TGV. Ces propositions étaient ensuite discutées, avec l'expert, puis modifiées jusqu'à l'obtention de la première version du modèle conceptuel, c.-à-d. la décomposition du confort jusqu'aux modalités sans entrer dans le détail de chacune. Nous avons eu, au total, trois réunions d'une heure trente pour cela.

Pour la construction et la validation de la deuxième partie du modèle conceptuel (formalisation des critères de chaque modalité) ainsi que les échelles et l'agrégation des critères correspondant à chaque modalité, nous avons organisé plusieurs réunions pour chaque modalité avec l'expert correspondant. Certaines modalités n'ont nécessité qu'une seule réunion alors que d'autres, comme la modalité siège environné, ont en nécessité plus de dix. Ces réunions duraient au moins deux heures, leur préparation dépendaient de leurs objectifs (formalisation des critères, construction des échelles et agrégation des critères).

Pour la formalisation des critères et la construction des échelles, la préparation était similaire à celle des réunions avec l'expert en confort global. Les rapports d'études, qui nous servaient à proposer une formalisation de critères, étaient issus de projets plus spécifiques sur la perception des composantes du confort de chaque modalité. En ce qui concerne la construction des échelles, nous avons dû nous approprier les spécifications des cahiers des charges et des normes avant de proposer ces échelles à l'expert. Lors de ces réunions nous apportons des modifications pouvant :

- être de fond, auquel cas la structure du modèle pouvait complètement changer comme pour la modalité *siège environné*,
- consister seulement à rajouter une nouvelle composante à une modalité, une nouvelle spécification afin de modifier une échelle ou en construire une nouvelle.

En ce qui concerne les réunions pour l'agrégation des critères, aucune préparation particulière n'était nécessaire au delà de qui a été vu au chapitre 5. Pour chaque modalité, les premières réunions avaient pour objectif de choisir, pour chaque nœud, une méthode d'agrégation à utiliser, en s'appuyant sur le protocole présenté au chapitre 5. Une fois la méthode choisie, l'essentiel de l'interaction portait sur l'élicitation des préférences. Cela pouvait nécessiter plusieurs réunions selon les méthodes choisies et le nombre de nœuds à agréger pour chaque modalité. La plupart des procédures d'élicitation des préférences (directes ou indirectes) utilisées, nécessitait un dialogue avec l'expert pour :

- déterminer les coalitions minimales et les seuils de veto pour ELECTRE TRI,
- construire des alternatives d'apprentissage pour l'élicitation des capacités pour l'intégrale de Choquet,
- construire des règles de décision.

L'utilisation de ces procédures n'aurait pas été envisageable si l'implication des experts en confort n'était pas totale. De plus, ils se sont bien appropriés le langage utilisé en aide multicritère à la décision, mais aussi le principe des méthodes d'agrégation. Si cela n'avait pas été le cas, il aurait été plus intéressant d'utiliser des procédures où l'interaction peut se faire à distance (par exemple, en évitant de les solliciter pour la construction des exemples d'apprentissage).

7.2.2 Interaction avec les experts en matériel roulant (CIM)

Les réunions que nous avons eues jusqu'à présent avec les experts en matériel roulant avaient pour objectif de valider certaines étapes de construction du modèle d'évaluation. La première réunion, qui a duré une demi journée, s'est déroulée avec le responsable des experts CIM ainsi que quelques experts (en climatique, acoustique, éclairage, dynamique et siège). L'objectif était de valider la première partie du modèle conceptuel (du confort global jusqu'aux modalités) que nous avons construit avec l'expert en confort global. Afin de préparer cette réunion, nous avons utilisé comme support des présentations dans lesquelles nous avons exposé ce modèle, ses caractéristiques, ses avantages ainsi que ses inconvénients. Le modèle ne leur paraissait pas intuitif et leur semblait trop complexe car il regroupe des aspects qui ne leur étaient pas familiers (contexte, variabilité interindividuelles) et ne faisait pas ressortir leur expertise. En effet, les critères pouvant avoir un lien avec leur expertise leur semblaient être dispersés dans le modèle. De plus, il nous ont fait remarquer qu'il y avait une expertise pouvant avoir un lien avec le confort qui n'était pas représentée dans le modèle (le confort tympanique). Pour cela, ils nous ont proposés de construire un modèle par fascicules (voir chapitre 4). Nous leur avons expliqué ensuite qu'il était difficile de prendre en compte la perception des voyageurs avec une telle décomposition et avons proposé, tant que cela restait cohérent avec la représentation de la perception voyageurs, de construire des modalités de confort de telle sorte à ce que chaque modalité contienne uniquement des critères correspondant à une expertise. Cette proposition leur semblait être un bon compromis.

Les réunions suivantes avaient pour objectif de valider, pour chaque modalité, la formalisation des critères, la construction des échelles et l'agrégation des critères. Nous avons eu, au total, sept réunions de deux heures, pour chaque réunion nous avons rencontré un expert correspondant à une modalité. L'implication de ces experts était moins importante que celle des experts en confort pour des raisons géographiques et du fait qu'ils étaient impliqués dans des projets n'ayant aucun lien avec le confort. Nous avons eu donc pour chaque modalité une réunion où étaient présents l'expert en confort et l'expert CIM correspondant à cette modalité. Au cours de chacune des réunions, nous devions présenter notre proposition déjà validée par l'expert en confort. Cette proposition comprenait, pour la majorité des modalités, le modèle de critères correspondant à la modalité, les échelles et les méthodes d'agrégation utilisées. L'une de ces réunions nous a permis de créer une nouvelle modalité : *Tympanique*, constituée d'un seul critère mesurant l'inconfort lié à la compression des tympons lors d'un passage sous un tunnel. Les réactions des experts CIM, par rapport au modèle proposé, portaient principalement sur les échelles et le choix des spécifications des cahiers des charges à partir desquelles elles ont été construites, ce qui donnait lieu à des modifications du modèle. Il

est important de souligner que la durée de ces réunions était souvent trop courte pour certains experts pour qu'ils puissent s'approprier pleinement le travail de modélisation réalisé. Cela se ressentait lorsqu'ils n'avaient pas de réactions ou de demandes à formuler. Nous aurions pu leur faire part de nos propositions de modélisation à l'aide de documents que nous aurions envoyés avant les réunions afin qu'ils aient le temps de se les approprier.

7.3 Évolution de l'outil et du processus de décision

Le modèle d'évaluation a été construit sur la base des connaissances actuelles en confort et utilise des données perceptives correspondant aux attentes actuelles des voyageurs. Nous allons voir dans cette section, comment l'outil fondé sur ce modèle pourrait intégrer et capitaliser les évolutions des connaissances en confort et des attentes des voyageurs. Nous aborderons ensuite les évolutions possibles du processus de décision engendrées par un tel outil.

7.3.1 Intégration des évolutions et capitalisation des connaissances dans l'outil

Conscients que les attentes des voyageurs et les connaissances en confort (par exemple, la nature des interactions entre les composantes) peuvent évoluer, l'une des premières préoccupations des différents intervenants, avant de commencer la construction du modèle, était de pouvoir intégrer ces évolutions.

Concernant les attentes des voyageurs, dans le modèle il est possible de modifier les seuils de confort représentant les paramètres perceptifs des échelles et les valeurs des profils dans ELECTRE TRI, ou de rajouter des équipements qui affectent le confort assis dans la modalité *aménagement*. Ces modifications n'auront aucun impact sur la structure du modèle (donc de l'outil) car elles constitueront des données d'entrée pour l'outil. Ces mises à jour ainsi que les indicateurs d'état seront capitalisés dans l'outil. En revanche, selon la méthode d'agrégation qui sera utilisée, il pourrait être difficile de rajouter ou de supprimer une activité.

Pour ce qui est de l'intégration des nouvelles connaissances en confort, il est possible d'intégrer des facteurs de variabilité interindividuelle comme l'effet de l'âge sur la perception de la modalité thermique, si nous arrivons à implémenter une méthode d'agrégation qui prend en compte le nombre de groupes. Il est également possible, dans les nœuds où l'intégrale de Choquet et ELECTRE TRI ont été utilisées, d'intégrer de nouvelles préférences. Cela peut être réalisé en modifiant les valeurs des paramètres préférentiels (poids, capacités) en données d'entrée. En

revanche, afin d'intégrer :

- une nouvelle composante dans une modalité de confort,
- une dépendance entre composantes se trouvant dans des modalités différentes (bruit de fond et niveau de vibration),
- de nouvelles préférences sur l'agrégation des critères dans les nœuds où des méthodes à base règles ont été utilisées,
- de nouvelles catégories de confort,

il faudrait modifier la structure du modèle. Pour cela, nous avons tenté dans ce mémoire de thèse de décrire en détail la méthodologie suivie pour la construction du modèle d'évaluation afin qu'elle puisse être reproduite.

7.3.2 Évolution du processus de décision

Nous avons vu au chapitre 1 que le processus de décision évoluait dans le temps pour différentes raisons. Il est possible que cette évolution soit la conséquence de l'aide à la décision apportée. Le projet « Outil multicritère pour l'évaluation du confort » a permis d'améliorer le dialogue entre les différents intervenants du processus. De plus, étant données nos connaissances de ce processus et ces préoccupations des acteurs, nous pensons que les principales évolutions futures porteront sur la rédaction des spécifications ayant un impact sur le confort, dans les cahiers des charges et les EFB. Ces évolutions porteront également sur la manière d'évaluer les offres des constructeurs.

Nous verrons dans cette section en quoi consiste l'amélioration du dialogue avec les différents intervenants. Nous nous intéresserons ensuite aux évolutions qui porteront sur la rédaction EFB et des cahiers des charges ainsi que sur les réponses des constructeurs (STB).

Amélioration du dialogue entre intervenants : nomination d'un expert confort global

Le projet « Outil multicritère pour l'évaluation du confort » a permis d'améliorer et, parfois même, d'instaurer le dialogue entre les différents intervenants et plus précisément entre les experts du CIM. En effet, cette préoccupation de confort global a permis la nomination d'un expert confort au CIM qui a été notre interlocuteur pour l'organisation des réunions avec les différents experts CIM. Il sera également chargé, lorsque l'outil sera opérationnel, de veiller à ce que les différentes spécifications correspondent à la cible confort désirée par les décideurs et de capitaliser toutes les connaissances en confort. Cela constitue, pour les experts en confort, une grande avancée par rapport à la prise en compte du confort dans le processus de décision.

Évolution des EFB, des cahiers des charges et des SFB

L'une des préoccupations des intervenants par rapport à l'utilisation de l'outil est l'aide à la spécification. Pour les décideurs, l'outil leur permettrait de formaliser leurs besoins par rapport à la cible confort. Il faudrait donc qu'ils arrivent à spécifier ces besoins dans les EFB, ce qui n'est pas le cas actuellement. Ces spécifications pourront porter, par exemple, sur le temps passé par les voyageurs dans la pratique de chaque activité.

En ce qui concerne les experts du CIM, l'outil constituera, pour eux, un moyen de s'assurer que leurs spécifications correspondent bien à la cible confort des décideurs. Cela pourrait modifier leurs « stratégies » de spécification des critères de confort car ils auront une vision globale. De plus, l'outil constituera un moyen pour eux d'inciter les constructeurs à être plus précis et plus exhaustifs dans leurs réponses aux spécifications de confort (ce qui n'est pas toujours le cas actuellement) afin qu'ils puissent être évalués de manière pertinente.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes revenus sur certains aspects importants qui caractérisent ou qui ont guidé l'approche utilisée pour la construction du modèle d'évaluation. À la section 7.1, nous avons abordé de manière critique les deux aspects caractérisant le modèle d'évaluation de manière globale. Nous sommes revenus ensuite sur les différents choix que nous avons fait dans notre approche concernant la précision du modèle d'évaluation. Nous avons vu enfin comment l'approche pouvait être généralisée à d'autres problèmes d'aide multicritère à la décision. Pour cela, nous avons parlé d'une application de l'approche, dans le cadre du projet, à d'autres types de trains (TER et Transilien). Nous avons également identifié les aspects de l'approche pouvant être généralisés à d'autres problématiques que l'évaluation du confort.

La section 7.2 avait pour objectif de décrire la manière dont s'est déroulée l'interaction avec les différents intervenants. Nous avons fait le choix d'inclure les différents intervenants dans toutes les étapes de construction du modèle d'évaluation. Cela a pour avantage de bien comprendre leurs préoccupations à chacune de ces étapes et, pour eux, d'avoir le temps de bien les formaliser. Néanmoins, l'organisation des réunions nécessite beaucoup de temps et d'implication de la part de l'homme d'étude et des intervenants.

La dernière section était consacrée aux évolutions de l'outil et du processus de décision. Nous avons montré comment se fera l'intégration des nouvelles connaissances en confort ainsi que les évolutions des attentes des voyageurs dans un outil déjà opérationnel. Nous avons vu également quelles étaient les évolutions du pro-

cessus de décision engendrées par le projet « Outil multicritère pour l'évaluation globale du confort ». Enfin, nous avons abordé ce que pourrait engendrer l'outil comme évolutions par rapport à la rédaction des spécifications dans les cahiers des charges et à l'évaluation des offres.

Conclusion générale

Ce travail de thèse avait pour objectif de construire un modèle d'évaluation du confort global dans les TGV afin de pouvoir juger les offres des constructeurs lors des projets d'acquisition et de rénovation des rames TGV. Pour cela, nous avons tenté de comprendre au chapitre 2 le concept de confort de manière générale et d'identifier quelles étaient les caractéristiques du confort dans les trains afin de pouvoir le modéliser. Nous avons vu que la notion de confort est complexe car elle dépend de la perception intégrant :

- des facteurs psychologiques, propres à chaque personne, liés à la mémoire,
- des représentations sociales liées aux catégories socioculturelles et aux motivations des personnes expérimentant le confort,
- le contexte dans lequel la personne se trouve,

C'est aussi une notion globale. Il faut donc partir de cette globalité pour identifier les composantes du confort, ayant un sens pour les personnes le percevant. Nous avons présenté, également dans ce chapitre, les outils d'évaluation du confort global existant dans la littérature afin de montrer quel pourrait être l'apport d'une nouvelle approche.

Après avoir analysé le processus de décision au chapitre 3, nous avons vu que plusieurs intervenants étaient concernés par la mise en œuvre de l'outil fondé sur le modèle d'évaluation : SNCF Voyages qui est l'entité finançant le projet et la première bénéficiaire de l'aide à la décision, les experts en confort de la Direction de l'Innovation et de la Recherche de la SNCF, mandatés par SNCF Voyages afin de gérer le projet et mettre en œuvre l'outil, les experts en matériel roulant (CIM) qui rédigent les cahiers des charges et qui seront les principaux utilisateurs de l'outil. Cela a donné lieu à d'autres préoccupations liées à l'utilisation de l'outil, au delà de l'évaluation des offres des constructeurs. En effet, l'outil constituera également une aide pour SNCF Voyages à la formulation des besoins concernant la cible client (loisir, affaires, etc.), pour les experts en matériel roulant, à la rédaction des spécifications ayant un impact sur le confort et à la négociation des mises au point à apporter à l'offre avec le fournisseur choisi. L'identification de ces besoins et préoccupations nous a permis de définir la problématique d'aide à la décision à laquelle nous devons répondre qui était une problématique de tri (afin de connaître

le niveau de confort réel des offres), mais aussi de rangement des offres au sein d'une même catégorie (afin de pouvoir les comparer entre elles).

Une fois la problématique déterminée, nous avons commencé la construction du modèle d'évaluation par la construction des critères (construction du modèle conceptuel et des échelles, voir chapitre 4). Pour la construction du modèle conceptuel, nous avons opté pour un modèle hiérarchique afin de prendre en compte les besoins des différents intervenants concernant l'aide à la spécification et l'aide à la négociation et de représenter, au mieux, la perception des voyageurs. L'avantage de ce modèle par rapport à ceux présentés au chapitre 2 est en effet de prendre en compte *a priori* certains facteurs importants liés à la perception du confort dans les trains : les activités pratiquées (principales caractéristiques du voyage en train) et la variabilité interindividuelle en donnant la possibilité de construire des groupes de voyageurs partageant la même perception à partir de la morphologie et éventuellement de l'âge, des catégories sociales (première et deuxième classes) et des motivations (voyage loisir ou professionnel). Dans ce modèle, nous avons décomposé le confort global en confort assis, confort debout et qualité perçue. La thèse a porté sur la construction et l'agrégation des critères de la composante confort assis qui est la plus importante en TGV. Cependant, la méthodologie développée a également été utilisée pour le confort debout et la qualité perçue dans le cadre du projet englobant la thèse.

En ce qui concerne la construction des échelles, nous avons commencé par identifier les spécifications des cahiers des charges ayant un impact sur les critères feuille de notre arborescence afin de construire les conséquences élémentaires de notre modèle d'évaluation et les échelles associées. Ces échelles dépendent des paramètres physiques liés à l'offre et des paramètres perceptifs pouvant être liés aux groupes, aux activités ou à d'autres facteurs perceptifs considérés dans le modèle. Ces paramètres perceptifs peuvent évoluer en considérant de nouvelles activités, de nouveaux groupes consensuels, de nouveaux facteurs ou, tout simplement, parce que les attentes des voyageurs évoluent. Pour cela, nous avons fait de telle sorte à ce que l'on puisse facilement intégrer ces modifications dans le modèle sans changer sa structure.

La phase d'agrégation des critères et d'élicitation des préférences constitue la dernière étape de la construction du modèle d'évaluation. La particularité de notre modèle d'évaluation, par rapport à l'agrégation des critères, est la possibilité d'utiliser différentes méthodes d'agrégation d'un nœud à un autre. Afin que le modèle soit intelligible, nous avons considéré uniquement trois méthodes d'agrégation (la construction de règles avec le décideur, l'intégrale de Choquet et ELECTRE TRI) complémentaires dans leurs conditions d'utilisation, leurs prises en compte de l'information intercritères et la finesse du résultat souhaité. Nous commençons d'abord par agréger tous les critères d'une modalité à partir des dimensions, avant

de passer à une autre modalité, ainsi de suite jusqu'à ce qu'elles soient toutes évaluées (*thermique, dynamique, acoustique, éclairage, siège environné, tympanique et aménagements*). Les critères des modalités *siège environné* et *aménagements* n'ont pas tous été agrégés par manque de temps. Une fois les nœuds, correspondant à chaque modalité, agrégés, nous traiterons les nœuds correspondant au confort des groupes, au confort des activités et au confort assis. La mise en œuvre d'une méthode d'agrégation à un nœud, nécessite l'élicitation des préférences d'un ou plusieurs intervenants afin de construire des règles ou de déterminer les paramètres décisionnels de cette méthode. L'agrégation des critères de certaines modalités peut ne pas dépendre des activités. Dans ce cas, les préférences sont élicitées pour une seule activité. En revanche, pour d'autres modalités, comme le *siège environné* et *aménagements*, il est nécessaire d'appliquer une procédure d'élicitation des préférences pour chaque activité.

Après avoir construit le modèle d'évaluation, nous avons voulu en valider une partie (un critère du modèle conceptuel). Pour cela, nous avons proposé une procédure permettant de vérifier si l'évaluation d'un ensemble de trains (configurations) avec le modèle représente bien (correspond à) l'évaluation de ce même ensemble par les voyageurs. Cette procédure consiste d'abord à collecter les mesures physiques nécessaires et à recueillir les évaluations des voyageurs. Ensuite, il s'agit de traiter et transformer ces mesures physiques afin de pouvoir évaluer chaque configuration sur les dimensions correspondant au critère à valider. La troisième étape de la procédure consiste à formuler des suppositions dues au fait que certains paramètres physiques n'ont pas pu être mesurés, ou que les voyageurs interrogés ne remplissent pas les conditions sur la variabilité interindividuelle. La dernière étape consiste à comparer les évaluations de ces configurations obtenues par le modèle avec celles obtenues en interrogeant les voyageurs. Il est également intéressant, à cette étape, d'analyser cette comparaison par rapport aux hypothèses formulées. Afin d'illustrer cette procédure, nous avons validé le critère *confort thermique dans une saison*. Il est important de noter que notre manque de prise de recul dans la validation fait de cette procédure une procédure expérimentale. Plusieurs améliorations peuvent être envisagées, notamment à l'étape de comparaison des évaluations.

Le dernier chapitre propose une prise de recul sur l'approche utilisée pour la construction du modèle d'évaluation. Ce chapitre nous a également permis de porter un regard critique sur certains aspects importants de l'approche pouvant être appliqués à d'autres problématiques d'aide à la décision. Le caractère constructif de notre approche a fait que nous avons eu une forte interaction avec les différents intervenants à toutes les étapes. Nous avons tenté de résumer la manière dont s'est déroulée cette interaction afin d'attirer l'attention du lecteur sur les principales difficultés rencontrées, pouvant être récurrentes dans une telle approche. Nous avons

vu également comment un outil opérationnel, fondé sur le modèle d'évaluation, pourrait intégrer les évolutions des attentes des voyageurs et des connaissances en confort. Un tel outil pourrait également faire évoluer le processus de décision.

Les travaux menés dans cette thèse ont abouti à des résultats intéressants, aussi bien d'un point de vue scientifique qu'opérationnel. En effet l'approche développée pour la construction du modèle d'évaluation a montré l'intérêt d'un modèle hiérarchique pour la modélisation d'un ensemble de critères de grande taille et avec des dépendances. Lors de la phase d'agrégation, nous avons exposé les avantages de ne pas utiliser systématiquement la même méthode d'agrégation à tous les nœuds. Pour cela, une procédure permettant de choisir une bonne méthode (ou d'écarter celles qui ne sont pas appropriées), a été proposée. Cette préoccupation de choisir la bonne méthode d'agrégation peut faire l'objet de plus d'investigation. Nous avons identifié certains aspects importants qui nous ont permis de sélectionner les méthodes potentielles et de construire la procédure de choix. Ces aspects peuvent servir de base pour la construction d'une procédure plus générale de choix d'une méthode d'agrégation. Nous nous sommes également intéressés dans la phase d'agrégation à l'amélioration de la procédure d'élicitation des préférences en proposant une méthode de construction d'exemples d'apprentissage informatifs lorsqu'ils représentent des exemples d'affectation. Nous envisageons pour cela deux perspectives de recherche intéressantes. La première est d'arriver à montrer mathématiquement que cette manière de construire les exemples d'apprentissage est meilleure que si ces exemples étaient quelconques. La deuxième perspective est de généraliser cette construction pour d'autres types d'exemples d'apprentissages (comparaisons par paires, préordres, etc.). Par ailleurs, dans certains nœuds, les critères à agréger sont évalués sur des échelles bipolaires traduisant du confort et de l'inconfort. Il se peut que les méthodes d'agrégation considérées dans notre problème ne correspondent pas aux préférences d'un intervenant car elles ne sont pas particulièrement adaptées pour agréger des critères évalués sur des échelles bipolaires. Il nous paraît donc utile en tant que perspective de recherche de s'intéresser à la mise en œuvre des méthodes existantes adaptées à ce type d'échelle ou d'en proposer de nouvelles.

D'un point de vue opérationnel, la thèse a permis aux experts en confort de la SNCF de formaliser une décennie d'études et de projets de recherche sur le confort des voyageurs. De plus, le caractère constructif de l'approche a permis d'améliorer la communication entre les différents intervenants (décideurs, experts en confort et experts en matériels roulants). D'autre part, l'approche utilisée a également été appliquée, dans le cadre du projet, à l'évaluation du confort dans les TER et les Transiliens. Nous pensons qu'il est également possible de l'appliquer à d'autres domaines où le confort constitue une réelle préoccupation. Cela est le cas du transport aérien et automobile, mais aussi de l'industrie hôtelière. Au delà

de l'évaluation du confort, les méthodes d'agrégation utilisées dans cette approche ainsi que les procédures d'élicitation développées, pourront être également utilisées dans d'autres problèmes multicritères. Cela pourrait être le cas du problème d'évaluation des offres des constructeurs à la SNCF¹, où la somme pondérée est utilisée actuellement.

1. En prenant en compte tous les critères et pas uniquement ceux du confort

Annexes

Annexe A

Les échelles des modalités de confort

A.1 La modalité acoustique

Les voyageurs évaluent la modalité acoustique sur trois critères : *le bruit des autres*, *le bruit de fond* et *les émergences*. Les deux premiers critères sont des feuilles de l'arborescence, par contre le critère *émergences* n'est pas une feuille car il est composé *des émergences temporelles* et *des émergences fréquentielles*. Nous allons voir dans cette section quelles sont les échelles associées à chaque feuille.

A.1.1 Le bruit de fond

Le bruit de fond est le bruit généré par le train à vitesse commerciale à l'intérieur d'une voiture. Actuellement, l'indicateur spécifié dans les cahiers des charges pour mesurer le bruit de fond perçu est le leq (dBA), cependant les études menées sur la corrélation des indicateurs physiques avec le ressenti des voyageurs ont montré qu'il était difficile de corrélérer cet indicateur avec le ressenti des voyageurs. Ces mêmes études ont montré qu'un autre indicateur (la Sonie) qui sera bientôt introduit dans les cahiers des charges, était mieux corrélé avec le bruit de fond perçu. Pour cela nous avons choisi comme échelle l'indicateur de Sonie avec son ensemble de valeurs possibles, s'il est spécifié ou le Leq (en dBA) sinon. Les indicateurs d'état correspondant aux deux échelles sont monotones (plus leurs valeurs sont élevées et plus l'inconfort augmente).

$$fA^{\text{BrtFnd}}(e) = \text{Sonie}(e) \tag{A.1}$$

A.1.2 Les émergences

Ce critère représente l'inconfort généré par le bruit émergeant par rapport au bruit de fond de différentes sources environnant un train (traverses, portes, croisements, etc.). L'inconvénient est que ces sources ne sont pas toutes connues *a priori* (avant d'évaluer les offres), et cela peut constituer un inconvénient lors de la phase d'agrégation car il n'y a pas que le bruit généré par une source qui entre en compte dans l'évaluation du confort, mais aussi sa nature, ceci est confirmé dans la thèse de M. Mzali [63]. Les experts en confort ont jugé utile de décomposer le critère *émergences* avant d'arriver aux sources en deux sous critères correspondant à deux types d'émergences rencontrées : fréquentielles et temporelles.

A.1.2.1 Les émergences fréquentielles

La spécification des cahiers des charges correspondant à ce critère est une différence de niveaux de bruit entre une source et le bruit de fond ΔNSP_{BF} en dB à ne pas dépasser pour toutes les bandes en basses fréquences et un niveau ΔNSP_{HF} pour toutes les bandes en hautes fréquences pour chaque source. La réponse à cette spécification par les fournisseurs est donc pour chaque source émergente, les niveaux de différence de bruit entre la source et le bruit de fond ΔNSP_i pour chaque bande de fréquences i en basses fréquence et ΔNSP_j pour chaque bande de fréquences j en hautes fréquences. D'autre part, des études ont montré que la perception des émergences par les voyageurs est différente selon qu'elles soient en hautes ou bien en basses fréquences. Pour cela nous avons décomposé, avec les experts, chaque source émergente en deux sources fictives (basses fréquences et hautes fréquences) pour obtenir autant d'échelles que de sources fictives. Chaque échelle représente l'émergence maximale sur toutes les basses fréquences ou sur toutes les hautes fréquences (selon la source artificielle associée à l'échelle). En effet, les experts ont fait l'hypothèse qu'une source qui émerge beaucoup sur une bande de fréquences parmi une vingtaine doit être jugée moins bonne qu'une source qui émerge sur toutes ces bandes de fréquences mais de peu. L'inconvénient de cet indicateur construit est qu'il n'exploite pas toute l'information disponible. Cela n'a pas été jugé problématique car les connaissances actuelles ne nous permettent pas d'exploiter cette information. Cependant cet indicateur pourrait être remplacé par un autre qui s'avèrerait plus pertinent sans changer la structure du modèle. Nous avons donc pour chaque source fictive S (en basses et en hautes fréquences) pour un endroit e du train :

$$fA_{BF}^{EmrFrq}(S, e) = \max_{i \in BF} \{\Delta NSP_i(S, e)\} \quad (A.2)$$

$$fA_{HF}^{EmrFrq}(S, e) = \max_{i \in HF} \{\Delta NSP_i(S, e)\} \quad (A.3)$$

où BF et HF sont respectivement les ensembles des tiers d'octave en basses et en hautes fréquences.

Les sources émergentes identifiées avec les experts comme étant les plus importantes dans la perception des voyageurs sont les émergences du bruit de fond (comme le bruit lié au passage des traverses) et les portes (voir la figure A.1). Les autres sources seront introduites dans l'outil par l'expert si cela s'avère nécessaire.

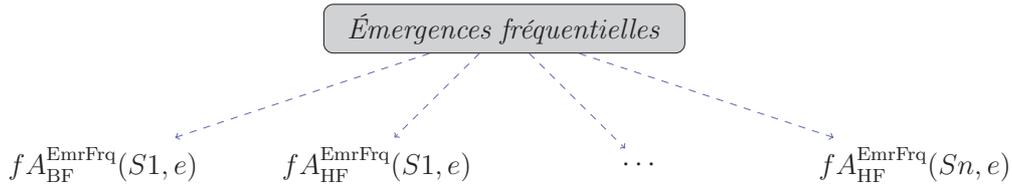


Figure A.1 – Les échelles du critère émergences fréquentielles

A.1.2.2 Les émergences temporelles

La spécification correspondante à ce critère qui a été identifiée dans les cahiers des charges est une différence de niveaux entre la valeur maximale d'un indicateur de bruit perçu d'une source $L_{pA,max}(S)$ et la valeur de ce même indicateur correspondant au bruit de fond Leq en dBA, et cela pour chaque source susceptible d'émerger lors d'un voyage. Bien que cette différence soit monotone, nous l'avons légèrement modifiée afin d'obtenir une échelle plus pertinente pour chaque source :

$$fA^{EmrTmp}(S, e) = \max \{L_{pA,max}(S, e) - Leq(e), 0\} \quad (A.4)$$

Les sources émergentes les plus importantes sont les portes des salles voyageurs, le bruit généré lors des croisements et le bruit généré lors de la traversée des tunnels (voir la figure A.2). Les autres sources seront introduites dans l'outil par l'utilisateur si cela s'avère nécessaire.

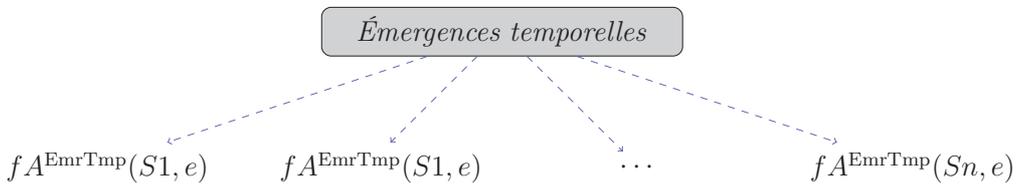


Figure A.2 – Les échelles du critère émergences temporelles

A.1.3 Le bruit des autres

Actuellement, il n'existe aucune spécification dans les cahiers des charges ou d'indicateur pertinent pour mesurer l'inconfort généré par le bruit des autres voyageurs. Néanmoins, nous avons quand même jugé utile avec les experts de construire une échelle dont l'indicateur à minimiser dépend du temps de réverbération (le temps de réverbération d'une salle est l'intervalle de temps pour lequel la pression acoustique diminue d'un millième de sa valeur, suite à l'arrêt de la source sonore, ce qui représente une diminution du niveau sonore de 60 dB) en faisant l'hypothèse que moins le temps de réverbération est élevé et moins le bruit généré par les autres voyageurs se propage. Dans les cahiers des charges, le temps de réverbération est spécifié sous forme de courbe en fonction des tiers d'octave (fréquences) (voir la figure A.3) et la réponse des fournisseurs est également une courbe qui est plus ou moins similaire à celle-ci. L'indicateur construit avec les experts est une moyenne pondérée des temps de réverbération sur les tiers d'octave i à un endroit e en donnant plus d'importance aux hautes fréquences qui correspondent aux fréquences des bruits générés par les voyageurs.

$$fA^{\text{Tr}}(e) = \sum_{i=1}^{nbBF} w_i \times Tr_i(e) \quad (\text{A.5})$$

Où $nbBF$ est le nombre de tiers d'octave considéré et $w_i \in [0, 1]$ est le poids du tiers d'octave i .

Les w_i sont obtenus à partir de la courbe spécifiée dans les cahiers des charges (voir la figure A.3) qui est plus contraignante en haute fréquence. Pour cela on considère que c'est une courbe isoconfort (c.-à-d. un temps de réverbération Tr_j dans un tiers d'octave (bande de fréquences) j est équivalent à un temps de réverbération Tr_i dans un tiers d'octave i et cela quels que soient (i, Tr_i) et (j, Tr_j) dans la courbe), ce qui donne les égalités suivantes :

$$\forall i, j \in nbBF : w_i \times Tr_i(e) = w_j \times Tr_j(e) \quad (\text{A.6})$$

En rajoutant la contrainte de normalisation $\sum_{i=1}^{nbBF} w_i = 1$, on obtient les valeurs des w_i qui sont plus élevées pour les hautes fréquences

On aurait pu choisir comme indicateur un écart par rapport à la courbe de référence, mais la difficulté que les experts craignaient, était de ne pas être capables d'attribuer des seuils de confort à ces indicateurs lors de la phase d'agrégation.

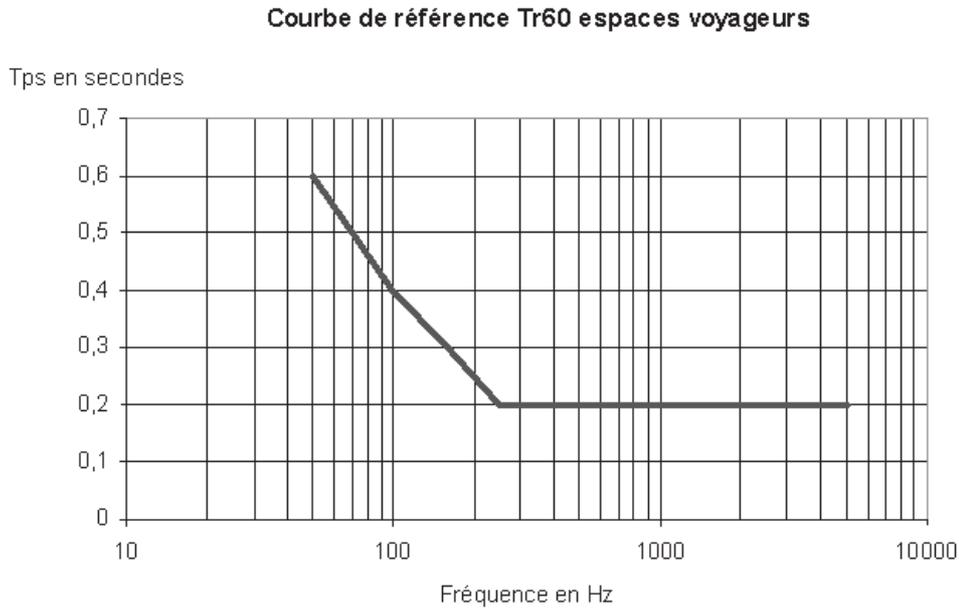


Figure A.3 – Le temps de réverbération en fonction des fréquences

A.2 La modalité dynamique

Cette modalité regroupe deux critères : *le confort vibratoire* ainsi que *l'absence de cinétose*.

A.2.1 Le confort vibratoire

L'indicateur spécifié dans les cahiers des charges correspondant à ce critère est N_{mv} , l'ensemble des valeurs possibles associé à cet indicateur est donné par le tableau A.1. La spécification est une valeur maximale N_{mv}^{\max} à ne pas dépasser, qui dépend des accélérations sur le plancher. On notera la réponse du fournisseur par $N_{mv}(e)$.

Des études sur le confort ont montré que cet indicateur n'était pas totalement corrélé avec le confort vibratoire du voyageur assis car les accélérations n'étaient pas mesurées sur le siège. Ces études ont montré également que l'indicateur N_{va} était mieux corrélé avec le confort vibratoire assis car il dépend des accélérations sur le siège. Néanmoins, il n'a pas été prévu d'introduire cet indicateur dans les cahiers des charges. Pour cette raison les experts en confort ont proposé d'introduire un autre paramètre dans les cahiers des charges qui est **la fonction de transfert des vibrations** du siège *SEAT* qui sera bientôt spécifiée. Cette fonction prend ses

valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. On notera la réponse du fournisseur par $SEAT(e)$.

Échelle initiale	Échelle de préférence
$N < 1$	très bon confort
$1 \leq N < 2$	bon confort
$2 \leq N < 4$	confort moyen
$4 \leq N < 5$	mauvais confort
$N \geq 5$	très mauvaise confort

Tableau A.1 – Les valeurs possibles du N_{mv} et du N_{va}

L'indicateur associé à ce critère (à minimiser) a été obtenu à partir du N_{mv} et du $SEAT$. Il représente le produit de ces deux valeurs :

$$fDyn^{Vbr}(e) = N_{mv}(e) \times SEAT(e) \quad (A.7)$$

L'étape suivante a été de s'assurer que ce produit avait une signification pour l'expert en confort afin de construire un ensemble de valeurs possibles à partir du tableau A.1. Nous avons obtenu le tableau A.2

Échelle initiale	Échelle de préférence
$fDyn_{Vbr} < 1$	Absence d'inconfort
$1 \leq fDyn_{Vbr} < 2$	Inconfort léger
$2 \leq fDyn_{Vbr} < 4$	Inconfort moyen
$fDyn_{Vbr} \geq 4$	Au mieux inconfortable

Tableau A.2 – Les valeurs possibles du $fDyn_{Vbr}$

A.2.2 La cinétose

La cinétose, ou mal des transports, est l'ensemble des troubles provoqués chez le voyageur en bateau, en voiture, en train, en avion. Elle est le résultat d'un trouble entre la perception visuelle et la perception des mouvements. Dans les cahiers des charges actuels, il n'y a aucune spécification sur la cinétose, cependant, les experts ont jugé utile de considérer ce critère dans l'évaluation du confort. Son intégration dans les cahiers des charges se fera dans un futur proche, d'autant plus que l'indicateur associé ($MSDV_z$) peut être calculé à partir des accélérations déjà mesurées.

Dans notre modèle nous avons retenu comme indicateur (à minimiser) le $MSDV_z$ qui est exprimé en $m/s^{1.5}$ et calculé pour un temps d'exposition du voyageur de 300s :

$$fDyn^{Cin}(e) = MSDV_z(e)_{T=300s} \quad (A.8)$$

A.3 La modalité ambiance lumineuse

La modalité ambiance lumineuse regroupe les critères d'éclairage sur lesquels seront évalués les offres. Le critère le plus important pour les voyageurs interrogés est l'intensité d'éclairement [27, 26]. Cependant, nous avons jugé utile avec les experts de considérer quatre autres critères jugés importants pour l'évaluation de la modalité ambiance lumineuse : *Le rendu des couleurs*, *La température de couleurs*, *Les gênes éventuelles*. Nous verrons dans la suite que les échelles associées à ces critères peuvent être différentes d'une activité à une autre.

A.3.1 L'intensité d'éclairement

Actuellement, les spécifications correspondant à ce critère que nous avons identifiées dans les cahiers des charges sont l'intensité d'éclairage général minimum $EclMoy_{min}$ en lux, une plage idéale d'uniformité de l'intensité d'éclairement dans la salle voyageur $[UEcl^*min, UEcl^*max]$ ainsi qu'un éclairage individuel réglable en intensité et parfois même en position, devant éclairer une zone bien définie. La réponse du fournisseur à ces spécifications est une valeur d'intensité d'éclairement général $EclMoy$, une valeur de l'uniformité d'éclairement $UEcl$ et une plage ou un ensemble de valeurs d'intensité d'éclairement $EclInd$ obtenues par l'éclairage individuel + l'éclairage général, dans la zone définie.

$$UEcl = \begin{cases} \frac{EclMax}{EclMoy} & \text{si } \frac{EclMax}{EclMoy} - 1 \geq 1 - \frac{EclMin}{EclMoy} \\ \frac{EclMin}{EclMoy} & \text{sinon} \end{cases} \quad (A.9)$$

où $EclMax$ et $Eclmin$ sont les valeurs d'intensité d'éclairement maximales et minimales mesurées dans la salle voyageur.

Une étude récente menée à la SNCF [85] a montré que la valeur de l'intensité d'éclairement général spécifiée dans les cahiers des charges est trop élevée surtout pour l'activité se reposer. Elle a préconisé que cette valeur devrait être spécifiée comme une valeur maximale $EclMoymax$ sachant que la valeur minimale est assurée par l'éclairage de sécurité E_0 . Cette même étude a montré également qu'une liseuse bien positionnée et dont l'intensité d'éclairement est réglable en continu

était idéale pour un éclairage individuel. Ces préconisations seront introduites dans les futures cahiers des charges.

Avant de construire les échelles pour ce critère, nous avons séparé les activités pour lesquelles l'éclairage individuel était indispensable de celles pour lesquelles il ne l'était pas, car les échelles seront différentes. La seule activité ne nécessitant pas un éclairage individuel est l'activité *se reposer*. On suppose que les autres activités nécessitent un éclairage individuel.

A.3.1.1 Les activités ne nécessitant pas un éclairage individuel

Les indicateurs d'état associées à ce critère pour ces activités sont obtenus à partir des deux premières spécifications.

- 1- L'intensité d'éclairage moyenne (à minimiser) proposée par le constructeur à condition de s'assurer préalablement pour toute offre que $EclMoy(e) > E_0$

$$fAL^{EclMoy}(e) = EclMoy(e) \quad (A.10)$$

- 2- L'écart de l'uniformité de l'éclairage général par rapport à la valeur idéale qui est égale à 1 (à minimiser).

$$fAL^{UEcl}(e) = |1 - UEcl(e)| \quad (A.11)$$

$fAL^{UEcl}(e)$ n'est pas un indicateur qui corrige l'éclairage moyen, mais mesure le confort ou l'inconfort généré par la différence d'intensité d'éclairage dans une même salle pour le voyageur.

A.3.1.2 Les activités nécessitant un éclairage individuel

Pour ces activités, l'indicateur construit est obtenu à partir de la troisième spécification. Cette construction s'est faite en plusieurs tentatives, car le point de vue associé à ce critère pour ce type d'activité était difficile à définir. Ce point de vue consiste d'une part à obtenir un recouvrement maximum de l'intervalle idéal des intensités d'éclairage pour chaque activité A de ce type

$$EclInd^{ideal}(A) = [Ecl_{min}^{ideal}(A), Ecl_{max}^{ideal}(A)]$$

par l'ensemble des intensités d'éclairage proposé par les constructeurs $EclInd(e)$ et d'autre part à favoriser la bonne répartition de ces intensités lorsque le recouvrement n'est pas total. L'indicateur obtenu (à minimiser) est donné par :

$$fAL^{EclInd}(e, A) = \max_{x \in EclInd^{ideal}(A)} \min_{y \in EclInd(e)} |x - y| \quad (A.12)$$

L'interprétation de cet indicateur n'est pas intuitive, il représente le plus grand écart entre une valeur d'intensité d'éclairage idéale non recouverte et la valeur la plus proche de l'intervalle $EclInd(e)$

A.3.2 Le rendu des couleurs

Le rendu des couleurs désigne la qualité du rendu de couleurs sous un éclairage donné. La spécification correspondante identifiée dans les cahiers des charges est l'indice de rendu des couleurs minimum R_a^{\min} pour chaque source lumineuse. La réponse des fournisseurs est une valeur $R_a(S)$ pour chaque source S .

Nous avons donc considéré comme indicateurs correspondant aux échelles que nous avons associées à ce critère, les indices de rendu des couleurs correspondant à chaque source S dans la salle voyageur (voir la figure A.4)

$$fAL^{R_a}(S, e) = R_a(S, e) \quad (\text{A.13})$$

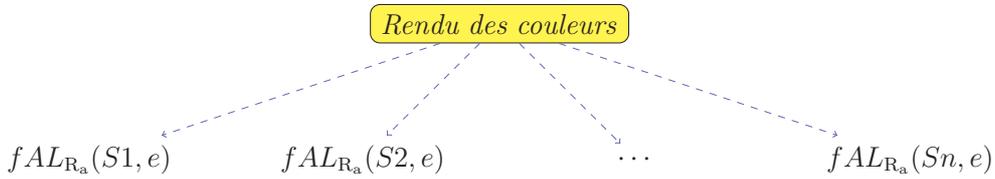


Figure A.4 – Les échelles du critère rendu des couleurs

A.3.3 La température de couleurs

La température de couleur est la couleur apparente d'une source lumineuse, elle peut aller du bleu froid au rouge chaud. La spécification correspondant à ce critère dans les cahiers des charges est une valeur maximale de température de couleur à ne pas dépasser TC_{\max} pour chaque source de lumière en °K. La réponse des fournisseurs est notée $TC(S)$ pour chaque source S .

Les experts en confort ont proposé de rajouter comme spécification dans les cahiers des charges, la différence maximale de température de couleur ΔTC_{\max} entre la source dont la température est la plus élevée et celle dont la température est la moins élevée, car cela affecte le confort des voyageurs. Cette préconisation sera intégrée dans les futurs cahiers des charges.

Nous avons construit deux indicateurs correspondant à ces deux spécifications, pour notre modèle :

- 1- La valeur maximale de la température de couleur sur toutes les sources

$$fAL^{TC}(e) = \max_S TC(S, e) \quad (\text{A.14})$$

- 2- La plus grande différence de température de couleur des sources.

$$fAL^{\Delta TC}(e) = \Delta TC(e) \quad (\text{A.15})$$

A.3.4 Les gênes visuelles éventuelles

Ce critère regroupe les gênes liées à l'éclairage qui sont sources d'inconfort pour le voyageur comme l'éblouissement, les débordements, les masquages, etc. Ce critère a été introduit pour corriger en partie le biais lié au manque de connaissances sur les éléments pouvant causer une gêne ainsi qu'au protocole de mesure associé.

Actuellement, dans les cahiers des charges, il n'y a que l'éblouissement qui est spécifié par un indicateur physique qui est l'UGR, la valeur spécifiée est une valeur maximale à ne pas dépasser UGR_{\max} . En ce qui concerne les autres gênes comme les débordements et les masquages, il n'y a pas d'indicateur physique spécifié dans les cahiers des charges, les spécifications sont généralement qualitatives.

Nous avons identifié avec les experts trois types de gênes éventuelles l'éblouissement, les débordements et les masquages. Pour les débordements et les masquages, étant donné le manque de connaissances, nous laissons le libre choix à l'expert qui évalue l'offre de juger si elles présentent une gêne ou pas. L'échelle correspondant à ce type de gênes G est donc une échelle binaire :

$$fAL^{\text{gene}}(G, e) = \begin{cases} 0 & \text{si } G \text{ ne constitue pas de gêne à l'endroit } e \\ 1 & \text{si } G \text{ constitue une gêne à l'endroit } e \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

En ce qui concerne les l'éblouissement, nous avons également une échelle binaire définie comme suit :

$$fAL^{\text{Ebl}}(e) = \begin{cases} 0 & \text{si } UGR(e) \leq UGR_{\max} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

Glossaire

ACONIT Approche globale des composantes du CONfort et de leurs InTeractions pour les trains grandes ligne.

AL Ambiances Lumineuses.

AMCD Aide Multicritère à la Décision.

CIM Centre d'Ingénierie du Matériel.

CERNE Centre d'Évaluation et de Recherche des Nuisances et de l'Énergie

DIVIZ Une plateforme logicielle de méthodes d'aide multicritère à la décision.

DRSA Dominance-Based rough set approach

Dyapos Dynamique activités et postures.

EFB Expression Fonctionnelle de Besoin.

ELECTRE Élimination Et Choix Traduisant la REalité.

Esther Évolution des Spécifications du confort THERmique.

IDTGV Filiale du groupe SNCF qui propose des voyages en TGV particuliers.

INRETS Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

Kappalab Librairie du langage R contenant des routines pour la manipulation de capacités et des intégrales correspondantes.

MACBETH Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Tech-nique.

MAUT Multi-Attribute Utility Theory.

OWA Ordered weighted Average.

PROMETHEE Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Eva-luations.

RTRI Railway Technical Research Institute (institut japonais)

SNCF Société Nationale des Chemins de fer Français.

STB Spécification Technique de Besoin.

TER Train Express Régional.

TGV Train à Grande Vitesse.

TOMASO Technique for Ordinal Multiattribute Sorting and Ordering.

Transilien Train régional d'Ile de France.

Bibliographie

- [1] AFNOR : Éclairage électrique pour matériel roulant des systèmes de transport public. *Norme européenne, norme française, NF EN 13272*, 2002.
- [2] AFNOR : Lumière et éclairage, éclairage des lieux de travail. *Norme française, NF EN 12464*, 2003.
- [3] R. AZIBI et D. VANDERPOOTEN : Construction of rule-based assignment models. *European Journal of Operational Research*, 138(2):274–293, April 2002.
- [4] C.A. BANA, E. COSTA et J.-C. VANSNICK : A theoretical framework for Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH). *In Proc. XIth Int. Conf. on MultiCriteria Decision Making*, pages 15–24, August 1994.
- [5] D. BELL, H. RAIFFA et A. TVERSKY : *Decision Making: Descriptive, normative and prescriptive interactions*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1988.
- [6] V. BELTON et T. STEWART : *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic, Dordrecht, 2002.
- [7] D. BOUYSSOU : Building criteria: A prerequisite for MCDA. *In C.A. BANA, éditeur : Readings in multiple criteria decision aid*, pages 58–80. Springer-Verlag, 1990.
- [8] D. BOUYSSOU, T. MARCHANT, M. PIRLOT, P. PERNY, A. TSOUKIÀS et Ph. VINCKE : *Evaluation and decision models: a critical perspective*. Kluwer Academic, Dordrecht, 2000.
- [9] D. BOUYSSOU, T. MARCHANT, M. PIRLOT, A. TSOUKIÀS et Ph. VINCKE : *Evaluation and decision models with multiple criteria: Stepping stones for the analyst*. Springer, Boston, 2006.
- [10] J.-P. BRANS et B. MARESCHAL : *PROMETHEE-GAIA, Une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Éditions de l'Université de Bruxelles, Éditions Elipses, 2002.

-
- [11] CEN : Applications ferroviaires - Confort de marche des voyageurs - Mesurage et évaluation. *Norme européenne, ENV 12299*, 1999.
- [12] L.M. CLÉON : Le confort du passager d'un véhicule ferroviaire. *Rapport SNCF*, 1986.
- [13] M. DE MONTMOLLIN : *L'ergonomie*. Paris : La Découverte (collection Repères), 3ème édition, 1996.
- [14] L.C. DIAS et V. MOUSSEAU : Inferring Electre's veto-related parameters from outranking examples. *European Journal of Operational Research*, 170:172–191, 2006.
- [15] D. DUBOIS : Sciences humaines et cognitives : des sciences pour l'ingénieur ? *In Journée d'étude ANAEM*. Lettres de l'ANAEM, Paris, 2002.
- [16] D. DUBOIS et S. GUERRAND : Évaluation du confort acoustique à bord des trains : approche psycholinguistique. *In Donner du sens à son produit, à son service*, Paris, 2000. Actes des 3èmes rencontres du marketing sensoriel.
- [17] D. DUBOIS et H. PRADE : Weighted minimum and maximum operations in fuzzy set theory. *Information Sciences*, 24:205–210, 1986.
- [18] G. DÉLEPAUT : *Contribution de la linguistique cognitive à l'identification du confort : Analyse des discours des passagers sur le confort en train*. Thèse de doctorat, Université La Sorbonne Nouvelle - Paris III, 2008.
- [19] P.O. FANGER : *Thermal comfort*. McGraw-Hill, New York, 1973.
- [20] B. FAVRE : Éléments d'analyse et de calcul pour l'élaboration d'un indicateur global de confort applicable aux véhicules de transport - Partie 1 : Problématique et algorithmique. Rapport de recherche, IRT, CERNE, 1980.
- [21] J. FIGUEIRA et B. ROY : Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research*, 139:317–326, 2001.
- [22] G.N. FISCHER : *Psychologie de l'environnement social*. Paris : Dunod, 1997.
- [23] P.C. FISHBURN : *Utility Theory for Decision Making*. Wiley, New York, 1970.
- [24] H. FLETCHER et W. A. MUNSON : Loudness, its definition, measurement and calculation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 5:82–108, 1933.
- [25] J.-L. GENARD et M. PIRLOT : Multiple criteria decision aid in a philosophical perspective. *In D. BOUYSSOU, E. JACQUET-LAGRÈZE, P. PERNY, R. SLOWINSKI, D. VANDERPOOTEN et Ph. VINCKE, éditeurs : Aiding decisions with multiple criteria: essays in honour of Bernard Roy*, pages 89–117. Kluwer Academic, Dordrecht, 2002.
- [26] J. GONAC'H : Projet Ambiances Lumineuses : Analyse des enquêtes de jour sur la perception visuelle en TGV. Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, décembre 2009.

-
- [27] J. GONAC'H : Projet Ambiances Lumineuses : Analyse des enquêtes de nuit sur la perception visuelle en TGV. Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, mai 2009.
- [28] J. GONAC'H : Projet ESTHER-lot1 : Diagnostic perceptif du confort thermique dans les trains : Analyse des enquêtes "hiver". Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, juillet 2010.
- [29] C. GONZALES et P. PERNY : GAI Networks for Decision Making under Certainty. In R.I. BRAFMAN et U. JUNKER, éditeurs : *Proceedings of the 19th International Joint Conference on Artificial Intelligence – workshop on advances in preference handling*, pages 100–105, 2005.
- [30] Christophe GONZALES et Patrice PERNY : Gai networks for utility elicitation. In *Proceedings of the 9th International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 224–234, 2004.
- [31] M. GRABISCH : Une approche constructive de la décision multicritère. *Traitement du signal*, 22(4):321–337, 2005.
- [32] S. GRECO, B. MATARAZZO et R. SLOWINSKI : A new rough set approach to evaluation of bankruptcy risk. In C. ZOPOUNIDIS, éditeur : *Operational tools in the management of financial risks*, pages 121–136. Kluwer Dordrecht, Dodrecht, 1998.
- [33] S. GRECO, B. MATARAZZO et R. SLOWINSKI : The use of rough sets and fuzzy sets in MCDM. In T. GAL, T. STEWART et T. HANNE, éditeurs : *Advances in MCDM models, Algorithms, Theory, and Applications*, pages 14.1–14.59. Kluwer Academic, Dordrecht, 1999.
- [34] S. GRECO, V. MOUSSEAU et R. SLOWINSKI : Ordinal regression revisited: multiple criteria ranking using a set of additive value functions. *European Journal of Operational Research*, 191(2):415–435, December 2008.
- [35] L. GROENESTEIJN, S. Van MASTRIGT, M.M. BLOK et P. VINK : Towards the ideal comfort sncf train seat. Rapport interne, TNO, 2011.
- [36] P. HAAS : Aérodynamique des trains rapides : Exposes des phénomènes relevant de la circulation en tunnel. Les notes techniques du CMEFE, École d'ingénieur de Genève, 2000.
- [37] P.C. HUMPHREYS, O. SVENSON et A. VÁRI : *Analysis and aiding decision processes*. North-Holland, Amsterdam, 1983.
- [38] ISO : Vibrations et chocs mécaniques : Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps-. *Norme internationale, ISO2631*, 1997.
- [39] E. JACQUET-LAGRÈZE et J. SISKOS : Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European Journal of Operational Research*, 10:151–164, 1982.

-
- [40] F. JOURDAIN : Étude comportementale des voyageurs dans les tgv. *Revue française de sociologie*, 27(2):301–316, 2001.
- [41] E. S. JUNG, S. H. HAN, M. JUNG et J. CHOE : Coach design for the korean high-speed train: a systematic approach to passenger seat design and layout. *Applied Ergonomics*, 29(6):507–519, 1998.
- [42] R.L. KEENEY et H. RAIFFA : *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. J. Wiley, New York, 1976.
- [43] R.L. KEENEY et H. RAIFFA : *Value-focused thinking. A path to creative decision making*. Harvard University Press, Cambridge, 1992.
- [44] I. KOJADINOVIC : Minimum variance capacity identification. *European Journal of Operational Research*, 177(1):498–514, 2007.
- [45] I. KOJADINOVIC : Quadratic distances for capacity and bi-capacity approximation and identification. *JOR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 5(2):117–142, 2007.
- [46] M. KOLICH, N. SEAL et S. TABOUN : Automobile seat comfort prediction: statistical model vs. artificial neural network. *Applied ergonomics*, 35(3):275–84, 2004.
- [47] D.H KRANTZ, R.D LUCE, P. SUPPES et A. TVERSKY : *Foundations of measurement, Vol.1 Additive and polynomial representations*. Academic Press, New York, 1971.
- [48] Ch. LABREUCHE et M. GRABISCH : The choquet integral for the aggregation of interval scales in multicriteria decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 137:11–26, 2003.
- [49] O. LE GOFF : *L'invention du confort*. Presses universitaires de Lyon, 1994.
- [50] J. LONGHI et C. TALOTTE : Projet ACONIT, Rapport Final. Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, Mai 2009. REFERENCE : ACONIT RAPPORT FINAL.DOC.
- [51] R.D. LUCE et H. RAIFFA : *Games and decisions*. J. Wiley, New York, 1957.
- [52] J.-L. MARICHAL : An axiomatic approach of the discrete choquet integral as a tool to aggregate interacting criteria. *IEEE Tr. on Fuzzy Systems*, 8(6):800–807, 2000.
- [53] J.-L. MARICHAL, P. MEYER et M. ROUBENS : Sorting multi-attribute alternatives: The tomaso method. *Computers and OR*, 32:861–877, 2005.
- [54] J.-L. MARICHAL et M. ROUBENS : Determination of weights of interacting criteria from a reference set. *European Journal of Operational Research*, 124: 641–650, 2000.

-
- [55] J.-M. MARTEL et B. ROY : Analyse de signifiante de diverses procédures d'agrégation multicritère. *Cahiers du LAMSADE*, 19, décembre 2002.
- [56] B. MAYAG, M. GRABISCH et Ch. LABREUCHE : A representation of preferences by the choquet integral with respect to a 2-additive capacity. *Theory and Decision*, 71(3):297–324, 2011.
- [57] C. MELLTET et M. HERNANDEZ : Projet ACONIT, phase 3 - Analyses des données : évaluation des indices de confort et recherche d'interaction entre modalités, rapport d'essais AEF, tomes 1 à 6. Internal report, SNCF, AEF, 2006.
- [58] P. MEYER et M. ROUBENS : Choice, ranking and sorting in fuzzy multiple criteria decision aid. In J. FIGUEIRA, S. GRECO et M. EHRGOTT, éditeurs : *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pages 471–503. Springer Verlag, New York, 2005.
- [59] P. MOREL : *L'anthropologie physique*. Presses Universitaires de France, 1962.
- [60] V. MOUSSEAU, J. FIGUEIRA et J.-P. NAUX : Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results. *European Journal of Operational Research*, 130(2):263–275, 2001.
- [61] V. MOUSSEAU et R. SLOWINSKI : Inferring an ELECTRE TRI model from assignment examples. *Journal of Global Optimization*, 12(2):157–174, 1998.
- [62] T. MUROFUSHI et M. SUGENO : An interpretation of fuzzy measure and the choquet integral as an integral with respect to a fuzzy measure. *Fuzzy Sets and Systems*, 29:201–227, 1989.
- [63] M. MZALI : *Perception de l'ambiance sonore et évaluation du confort acoustique dans les trains*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2002.
- [64] M. MZALI : Projet ACONIT, Synthèse phase 1 : Cadrage bibliographique et spécification de l'objet d'étude. Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, janvier 2004. RÉFÉRENCE N° SFC/MM/ACONIT/SPECIFOBJET.
- [65] M. MZALI : Projet ACONIT, Synthèse phase 2 : Exploration du confort global. Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, Novembre 2005. REFERENCE N° SFC/MM/ACONIT/SYNTHLOT2.
- [66] M. MZALI et C. TALOTTE : Projet ACONIT, phase 3 - Analyse des corrélations entre les mesures perceptives et mesures physiques - Volume 2 : Bilan de l'analyse des évènements de confort et du confort global et perspectives. Internal report, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, 2009.
- [67] Z. PAWLAK : Rough sets. *International Journal of Information and Computer Sciences*, 11:341–356, 1982.

-
- [68] Z. PAWLAK : *Rough sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
- [69] C. PINEAU : *Psychologie différentielle du confort ; Etude des besoins individuels en matière de confort dans les logements*. Thèse de doctorat, Université Paris V, 1980.
- [70] E.C. POULTON : *Behavioral decision theory: A new approach*. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- [71] L. RENAUT : Recherche d'un indicateur global de confort des voitures des chemins de fer. *Rapport INRETS*, 1985.
- [72] M. RICHELLE : Définitions complémentaires. In R.DORON et F.PAROT, éditeurs : *Dictionnaire de Psychologie*. PUF, Paris, 1998.
- [73] A. RICO, M. GRABISCH, Ch. LABREUCHE et A. CHATEAUNEUF : Preference modeling on totally ordered sets by the Sugeno integral. *Discrete Applied Mathematics*, 147:113–124, 2005.
- [74] B. ROY : ELECTRE III : Un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahiers du CERO*, 20(1):3–24, 1978.
- [75] B. ROY : *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Ed. Economica, 1985.
- [76] B. ROY : Decision science or decision-aid science? *European Journal of Operational Research*, 66(2):184–203, 1993.
- [77] B. ROY : A propos de la signification des dépendances entre critères : quelle place et quels modes de prise en compte pour l'aide à la décision? *RAIRO-Oper. Res.*, 43(3):255–275, 2009.
- [78] B. ROY et D. BOUYSSOU : *Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas*. Economica, Paris, 1993.
- [79] T.L. SAATY : *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [80] C. SAUBESTY : Le confort global dans les transports ferroviaires : Analyse bibliographique. Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, 2000.
- [81] S.S. STEVENS : On the theory of scales of measurement. *Science*, 103:677–680, 1946.
- [82] M. SUGENO et T. MUROFUSHI : Choquet integral as an integral form for a general class of fuzzy measures. pages 408–411, Tokyo, Japan, 1987. 2nd IFSA Congress.
- [83] P. SUPPES : Measurement empirical meaningfulness and three-valued logic. In CHURCHMAN et RATOOSH, éditeurs : *Measurement: Definition and Theories*, pages 129–143. John Wiley and Sons, New York, 1959.

-
- [84] H. SUZUKI : Recent Research and Developments in the Fields of Riding Comfort Evaluation. *Quarterly Report of RTRI*, 37(1), 1996.
- [85] S. SÉGRÉTAÏN : Ambiances Lumineuses dans les trains : Rapport final. Rapport interne, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, décembre 2011.
- [86] S. SÉGRÉTAÏN : Projet ESTHER-synthèse des lot 1 et 2 : Diagnostic perceptif et physique du confort thermique dans les trains. Internal report, SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, 2011.
- [87] A. Ngo THE et V. MOUSSEAU : Using assignment examples to infer category limits for the ELECTRE TRI method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 11(1):29–43, 2002.
- [88] C. THIERRY : Le confort global dans les trains : Application de méthodes d'aide a la decision multicritere. Mémoire de D.E.A., Université Paris Dauphine, Paris, 2012.
- [89] R. THOM : *Esquisse d'une sémiophysique*. Paris :Inter Éditions, 1988.
- [90] A. TSOUKIÀS : From decision theory to decision aiding methodology. *European Journal of Operational Research*, 187(1):138–161, 2008.
- [91] VEILLETECHNOLOGIQUE : Le confort dans les voitures de passagers. *Rapport SNCF*, 1998.
- [92] J. Von NEUMANN et O. MORGENSTERN : *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2 édition, 1947.
- [93] D. VON WINTERFELDT et W. EDWARDS : *Decision Analysis and Behavioral Research*. Cambridge University Press, 1986.
- [94] A. WEILL-BARAIS : *L'homme cognitif*. Paris. Presses Universitaires de France, collection Premier Cycle, 3ème édition, 1996.
- [95] G.S.K. WONG : Influence of A-weighting tolerances and frequency-band limits on level measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(6): 1578–1583, 1980.
- [96] R. YAGER : On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18(1):183–190, 1988.