UNIVERSITÉ PARIS DAUPHINE
ECOLE DOCTORALE DAUPHINE

No. attribué par la bibliothèque

THESE

Pour l'obtention du titre de
DOCTEUR EN INFORMATIQUE
(Arrêté du 7 Août 2006)
Spécialité: Aide à la Décision

Modèle intégré de structuration et d'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène du point de vue de l'acceptabilité sociale

Candidat: **Amidou KPOUMIÉ**

JURY

Directeur de thèse : **Alexis TSOUKIÀS**
LAMSADE, Université Paris Dauphine

Rapporteurs : **Vincent MOUSSEAU**
Laboratoire de Génie Industriel (LGI), École Centrale Paris (ECP)

Sebastien DAMART
Normandie Innovation Marché Entreprise Consommation (NIMEC), Université de Rouen

Suffrageants : **Myriam MERAD**
Institut National de l'EnviRonnement industriel et des rISques

Alain LE DUIGOU
Institut de Technico-Économie des Systèmes Énergétiques, CEA

Présentée et soutenue publiquement le 09 Juillet 2013 à Paris.

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.

À mon père, à ma mère,
À ma femme, à mes enfants chéris,
À tous ceux vers qui vont mes préférences...merci.

Remerciements

Cette thèse est le résultat d'un travail personnel acharné. Cependant, il n'aurait sans doute pas existé sans le concours de personnes éminentes et d'autres moins éminentes qui ont croisé ma route récemment. C'est pourquoi je souhaite exprimer ici ma reconnaissance à toutes ces personnes qui de loin ou de près ont contribué à l'aboutissement de cet abondant travail. Je tiens en tout premier lieu à exprimer toute ma gratitude envers mon encadrant de thèse : Alexis Tsoukiàs. Durant ces années ou parfois le temps défilait sans réelle trouvaille de ma part, il a su me soutenir et me diriger avec justesse et rigueur. Alexis, je te serai encore longtemps reconnaissant de m'avoir transmis une partie de ton esprit critique et ton goût du travail bien fait. Ton expérience et la très grande perspicacité de tes analyses m'ont permis d'éviter bien des écueils qui auraient ralenti ce travail et rallongé davantage son échéance. Mais au-delà de ton implication directe dans mes travaux et ton entregent pour me mettre à l'abri des préoccupations matérielles pendant tout le temps qu'aura duré la thèse, c'est ton abnégation et ton sens du travail bien fait qui seront pour moi des marqueurs et des sources de motivations futures. De manière pratique, ces travaux de thèse n'auraient pas vu le jour sans le concours bienveillant de toute l'équipe du projet AIDHY. Je leur témoigne toute ma gratitude. Aussi j'adresse des remerciements tout particuliers à Alain LeDuigou, François Werkoff respectivement employé du CEA et membre de l'AFH2 pour m'avoir accordé leur confiance en m'accueillant à plusieurs reprises dans leurs unités de recherche et pour m'avoir permis de bénéficier de toutes les ressources nécessaires. Une gratitude infinie pour Alain qui a souvent pris de son temps personnel et qui n'a pas aussi ménager ses efforts pour me permettre d'avoir toutes les informations les plus récentes sur l'hydrogène. Je remercie également Sébastien Damart donc la collaboration fructueuse dans AIDHY a abouti à la rédaction conjointe d'un article. Mes remerciements vont à Myriam Merad (INERIS) qui m'a permis d'intégrer l'équipe du projet AIDHY, à Bastien Affeltranger et Bruno Debray qui ont pris la suite de Myriam pour piloter le projet et assurer son bon déroulement. Je remercie Benjamin Rousval avec qui j'ai mené des réflexions fructueuses sur le concept d'indicateurs socialement intelligibles. Je n'oublierai pas de remercier la très sympathique équipe de Cohésium, qui nous a accueilli dans ses locaux lors des focus groups et qui nous a également permis d'assister au plateau téléphonique lors de l'enquête quantitative. Pour en finir avec le projet AIDHY, je remercie Gauthier Winé avec qui les discussions m'ont permis de mieux comprendre les principaux axes de développement des technologies de l'hydrogène comme vecteur d'énergie. Mes remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont acceptés d'examiner avec attention mon travail et d'y apporter des annotations nécessaires pour le rendre encore meilleur. Plus particulièrement, je souhaite remercier Vincent Mousseau et Myriam Merad qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être respectivement rapporteur et suffrageant. Les mêmes remerciements vont à Sébastien Damart et Alain Leduigou. Mes remerciements vont également à tous les membres du LAMSADE, enseignants, chercheurs, doctorants, et personnel d'appui à qui je rends ici un vibrant hommage pour leur implication quotidienne pour faciliter la vie du laboratoire et nous alléger l'esprit des tâches administratives. Qu'il me soit permis ici de témoigner, sans les citer tant ils sont nombreux, toute mon affection pour les doctorants en informatique qui n'ont jamais ménager leurs efforts pour moi.

Puisque ce travail est l'aboutissement de mes activités de recherche, qu'il me soit permis de souligner pour les remercier, ceux également qui ont contribué à me faciliter l'exercice de mes activités d'enseignement dans le cadre de mes fonctions de vacataire et d'ATER : il s'agit de Fabrice Ruinet et Mehdi Dafal. Ces valeureuses petites mains administratives infatigables qui nous ont rendu d'innombrables services. Enfin, il se pourrait que j'ai oublié de citer quelques personnes qui m'ont tout aussi bien aidé durant ce travail de recherche, ce sont les membres de ma famille, mes collègues et mes ami(e)s. Parmi eux, je voudrais tout particulièrement remercier ceux de mes collègues qui ont pu assisté aux différents séminaires de l'école doctorale où j'ai présenté mes travaux et donc les remarques m'ont été très utiles. J'y inclus aussi tous ceux qui ont jalonnés mon parcours du master 2 à la thèse ainsi que mes amis et connaissances moins "conventionnels" qui m'ont permis de rester motivé en m'agrémentant le quotidien (parfois austère d'un chercheur). Qu'ils retrouvent ici mes sincères excuses et toute l'expression de ma profonde gratitude.

Table des matières

Table des matières **1**

Table des figures **4**

Liste des tableaux **6**

1 Introduction générale **9**
1.1 Contexte de la thèse 9
1.2 Problématique 11
1.3 Notre proposition 12
1.4 Organisation du document 13

2 Présentation et Structuration du problème de l'acceptabilité sociale de l'hydrogène **15**
2.1 Présentation 16
2.2 De la problématique de l'énergie à celle de l'hydrogène-énergie 17
2.2.1 Énergie : Vecteur versus Source 17
2.2.2 Pourquoi l'Hydrogène : Hydrogène versus électricité 19
2.2.3 Situation du problème de l'Hydrogène 21
2.2.4 Etude comparative de l'évolution des sources d'énergie 22
2.3 L'hydrogène : Chaîne verticale de la production à l'utilisation 22
2.4 La production de l'Hydrogène 24
2.4.1 Les procédés thermochimiques 24
2.4.2 Les procédés électrolytiques 26
2.4.3 Les procédés biologiques 27
2.4.4 La purification de l'hydrogène 27
2.4.5 Problématiques liées à la production de l'Hydrogène 28
2.5 Le stockage de l'hydrogène 29
2.6 Le stockage embarqué de l'Hydrogène 29
2.6.1 Le stockage liquide de l'Hydrogène 29
2.6.2 Le stockage gazeux de l'Hydrogène 29
2.6.3 Le stockage solide de l'Hydrogène 30
2.6.4 Problématiques liées au stockage de l'Hydrogène 30
2.7 Distribution de l'Hydrogène 30

2.7.1 Problématiques de distribution de l'Hydrogène 30
2.8 Les utilisations de l'hydrogène 31
2.8.1 Les utilisations actuelles 31
2.8.2 Les utilisations d'avenir 31
2.9 Problématiques de la chaîne hydrogène 34
2.10 Les voies transverses à l'hydrogène 35
2.11 Charte graphique de la chaîne intégrée de l'hydrogène 35
2.12 Acceptabilité sociale 36
2.12.1 Présentation 36
2.12.2 Définition et problématique 37
2.12.3 Méthodologies 38
2.12.4 Présentation des études d'acceptabilité sur l'hydrogène 38
2.12.5 Discussion des études présentées 40
2.13 Conclusion du chapitre 2 42

3 Contexte décisionnel : Structuration des Problèmes et Aide Multi-critère à la Décision 45
3.1 Méthodes de structuration des problèmes de décision de groupe 46
3.1.1 Méthodes de structuration et typologie des problèmes 47
3.1.2 Méthodes de structuration 48
3.1.3 Méthodes de structuration de décision de groupe 49
3.1.4 Cartographie cognitive collective 50
3.2 Aide multi-critère à la décision (AMCD) : phases et étapes 52
3.2.1 Situation problématique et formulation du problème 53
3.2.2 Un modèle d'évaluation 53
3.2.3 Une recommandation finale 54
3.2.4 Données d'un problème de décision 54
3.2.5 Approches et méthodes de l'analyse multicritère 56
3.2.6 Méthodes de surclassement 57
3.2.7 Tableau des performances des alternatives 59
3.2.8 Structures de préférence 60
3.2.9 Exploitation des relations de préférence : ELECTRE TRI 61
3.3 Des cartes cognitives à l'arbre de valeurs des objectifs 62
3.3.1 Fondements de l'analyse par valeurs 63
3.3.2 Caractéristiques théoriques 66
3.3.3 Caractéristiques pratiques 68
3.3.4 Processus et algorithmes de transformation 69
3.4 Conclusion du chapitre 3 72

4 Application à l'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène : cas AIDHY 75
4.1 Contexte décisionnel 76
4.2 Les situations problématiques 77
4.3 Première grille d'analyse méthodologique : la structuration 78
4.3.1 Les acteurs de la filière hydrogène 78

4.3.2 Les objectifs des acteurs de la filière hydrogène énergie 80
4.4 Construction des scenarios des technologies de l'hydrogène 85
4.4.1 Définition générale du scénario 85
4.4.2 Éléments de construction des scénarios de l'hydrogène 86
4.4.3 Contraintes sur les scénarios 88
4.4.4 Définition formelle d'un scénario 89
4.4.5 Application à la construction des scénarios 89
4.4.6 Construction des critères 92
4.5 Deuxième grille d'analyse méthodologique : la méthode d'évaluation 97
4.5.1 Choix d'une méthode d'évaluation multicritère 97
4.5.2 Pourquoi les méthodes de surclassement ? 97
4.5.3 Pourquoi la méthode ELECTRE TRI ? 97
4.5.4 Contextualisation d'ELECTRE TRI 98
4.5.5 Application de la méthode ELECTRE TRI à l'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène 99
4.6 Résultats, analyse de robustesse et discussions 110
4.6.1 Résultats 110
4.6.2 Discussions 114
4.6.3 Analyse de sensibilité et affectations robustes 115
4.7 Conclusion du chapitre 4 123

Conclusion générale **125**

Bibliographie **130**

Annexes **142**

A Données physico-chimiques sur l'hydrogène **143**

B Rendements et puretés en hydrogène **145**

C Schémas de principe de l'électrolyse **147**

D Résultats de l'analyse de sensibilité sur Iris 2.0 **149**

E Représentations cognitives des focus groups **153**

F Graphiques des mix énergétiques en France **161**

Table des figures

1.1 Modèle (CPAE) d'acceptation sociale de l'hydrogène-énergie 10

2.1 Chaîne énergétique adaptée d'A. Moreau [Moreau, 2001] 18
2.2 Chaîne globale du système énergétique. D'après A.Stuart 18
2.3 Représentation schématique des principaux éléments de la problématique de l'énergie. 22
2.4 Courbe de l'évolution des consommations énergétiques à horizon 2030. 23
2.5 Principe du fonctionnement Electrolyseur/Pile à combustible. 32
2.6 Principe du fonctionnement d'une pile à combustible. 33
2.7 Processus de la chaine verticale de l'Hydrogène (de la matière première au consommateur final). 36

3.1 Forme graphique utilisée par Bourgon. Sources : [Cossette, 2003] 51
3.2 Forme graphique utilisée par Axelrod. Sources : [Cossette, 2003] 51
3.3 Forme graphique utilisée par Eden. Sources : [Cossette, 2003] 51
3.4 Établissement de la relation de surclassement. 58
3.5 Tableau des performances des alternatives. D'après Amir et Werey [Amir and Werey, 2009] 59
3.6 Diagramme intégré de la Méthode ELECTRE TRI 61
3.7 Arbre de valeurs partiel du grand public 65
3.8 Algorithme général de transformation. 69
3.9 Carte cognitive partiale sur les véhicules à hydrogène 71
3.10 Carte cognitive partiale sur les véhicules à hydrogène 72

4.1 Les industriels 79
4.2 Les autorités publiques 80
4.3 Associations 80
4.4 Le grand public 80
4.5 Passage des cartes cognitives aux arbres de valeurs 82
4.6 Les objectifs des industriels 83
4.7 Les objectifs des autorités publiques 84
4.8 Les objectifs du grand public 85
4.9 Exemple d'hypothèse et conséquences sur la chaîne hydrogène 90
4.10 Fonctionnement de la méthode ELECTRE TRI 100

4.11 Pondération moyenne collective des critères pour l'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène 109

A.1 Données physico-chimiques sur l'hydrogène gazeux 144

B.1 Comparaison des puretés et rendement en hydrogène selon les procédés 146

C.1 Schéma de l'électrolyse avec la technologie alcaline. 148
C.2 Schéma de l'électrolyse avec la technologie PEM. 148

D.1 Résultats d'affectation pour λ_{2050} sur IRIS 2.0. 150
D.2 Résultats d'affectation pour λ_{2030} sur IRIS 2.0. 151
D.3 Résultats d'affectation pour λ_{2020} sur IRIS 2.0. 152

E.1 Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus groups (session I) transport en commun du 04/06/09 154
E.2 Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus groups (session I) voiture particulière du 09/06/09 155
E.3 Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus groups (session I) écoresponsables du 23/06/09 156
E.4 Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus group (session II) transport en commun du 15/07/09 157
E.5 Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus group (session II) voiture particulière du 16/07/09 158
E.6 Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus group (session II) écoresponsables du 20/07/09 159

F.1 Répartition du mix d'énergie pour les scénarios Hyfrance 162
F.2 Répartition du mix d'énergie pour les scénarios Protec H_2 163

Liste des tableaux

2.1 Répartition mondiale de la consommation des énergies . . . 23
2.2 Procédés et Technologies de Production de l'Hydrogène. . . . 25
2.3 Problématiques de la chaîne hydrogène . . . 34

3.1 Relation carte cognitive-arbre de valeurs . . . 68

4.1 Scénario Baseline . . . 91
4.2 Scénario Solution H_2^+ . . . 91
4.3 Scénario challenge H_2^+ . . . 92
4.4 Scénario Pessimiste HyFrance . . . 92
4.5 Scénario Optimiste HyFrance . . . 92
4.6 Emission de CO_2 . . . 93
4.7 Parc nucléaire . . . 94
4.8 Stations Service . . . 94
4.9 Utilisation dans le Transport . . . 95
4.10 Indépendance Énergétique . . . 95
4.11 Incitations Économiques . . . 95
4.12 Incitations Économiques . . . 96
4.13 Table de synthèse des critères d'évaluation des scénarios d'évolution des technologies de l'hydrogène selon la perception du grand public . . . 96
4.14 Differences entre approches de surclassement et d'utilité . . . 98
4.15 Exemples d'affectation des scénarios de référence à des catégories - 1 . . . 101
4.16 Exemples d'affectation des scénarios de référence à des catégories - 2 . . . 101
4.17 Taux de pénétration des véhicules . . . 102
4.18 Matrice des jugements sur le critère ECo . . . 102
4.19 Matrice des performances sur le critère ECo . . . 103
4.20 Matrice des jugements sur le critère PNu . . . 104
4.21 Matrice des performances sur le critère PNu . . . 104
4.22 Matrice des jugements sur le critère SSe . . . 105
4.23 Matrice des performances sur le critère SSe . . . 105
4.24 Matrice des performances sur le critère UTr . . . 106
4.25 Matrice des performances sur le critère IEn . . . 107
4.26 Matrice des jugements sur le critère IEc . . . 107
4.27 Matrice des performances sur le critère IEc . . . 107

4.28 Matrice des relations inter - critère 109
4.29 matrice catégorie-horizon (des scénarios)-1 111
4.30 matrice catégorie-horizon (des scénarios)-2 112
4.31 Différents jeux de poids pour l'étude de sensibilité (profils de pondération différents) 116
4.32 Affectation 1 avec les exigences environnementales dominantes 117
4.33 Affectation 1 avec les exigences sécuritaires dominantes 117
4.34 Affectation 1 avec les exigences sur la sûreté de l'approvisionnement dominantes 117
4.35 Affectation 1 avec les exigences économiques dominantes 118
4.36 Affectation 1 avec les exigences sur le confort dominantes 118
4.37 Calcul de jeux de poids à rapports constants pour l'étude de sensibilité 120
4.38 Affectation 2 avec les exigences environnementales dominantes 120
4.39 Affectation 2 avec les exigences sécuritaires dominantes 121
4.40 Affectation 2 avec les exigences sur la sûreté de l'approvisionnement dominantes 121
4.41 Affectation 2 avec les exigences économiques dominantes 121
4.42 Affectation 2 avec les exigences sur la disponibilité dominantes 121
4.43 Intervalles de stabilité des poids pour une affectation court terme (2020) des scénarios 122
4.44 Intervalles de stabilité des poids pour une affectation moyen terme (2030) des scénarios 123
4.45 Intervalles de stabilité des poids pour une affectation moyen terme (2050) des scénarios 123
4.46 Sommaire des outils et techniques utilisés dans le processus d'aide à la décision sur l'acceptabilité sociale de l'hydrogène 124

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte de la thèse

Les problèmes de décision qui se posent aussi bien dans les organisations établies qu'aux individus sont de plus en plus complexes. Cette complexité se traduit d'une part par la nature intrinsèque du problème qui peut présenter un nombre important de paramètres non intuitivement saisissables par le décideur. D'autre part le décideur n'a pas toujours une vision assez claire de ce qu'est son problème, des options qui s'offrent à lui et de ses conséquences. Pire encore, certains problèmes impliquent parfois de nombreux acteurs qui plus est ont souvent des objectifs différents voire conflictuels et une connaissance imparfaite ou inexistante des données de leur problème. Dans ce contexte, le décideur, seul face à son problème se trouve démuni. C'est alors qu'il peut requérir l'aide d'une tierce personne ou d'un groupe de personnes (appelé analyste ou homme d'étude) pour l'aider soit à simplement comprendre son problème, soit à lui proposer des solutions ou enfin à construire avec lui les solutions à son problème. Une telle activité s'appelle aide à la décision (AD [1]) et lorsque le problème envisagé se présente sous plusieurs dimensions comme c'est généralement le cas, on parle d' aide multi-critère à la décision (AMCD [2]). C'est précisément dans ce cas de figure que nous (LAMSADE [3]) nous somme retrouvés dans le cadre du projet AIDHY [4]. En effet nous sommes conviés, dans ce projet novateur impliquant plusieurs partenaires institutionnels, publiques, non gouvernemental et industriels privés, à aider à structurer les éléments de la perception et de l'acceptabilité sociale des scénarios des technologies de l'hydrogène à destination des décideurs politiques et industriels. Dans le cas qui nous intéresse, nous aurons à identifier, qualifier et classer des scénarios des nouvelles technologies de l'hydrogène en tenant compte de la perception du grand public. In fine, il s'agit de proposer un cadre méthodologique qui permet de répondre de manière efficace à ces préoccupations. La difficulté c'est que le problème de l'hydrogène tel qu'il est posé, est multi dimensionnel, multi-facettes, multi-acteurs, et controversé. Dès lors, il s'agira pour nous non plus seulement de proposer un modèle d'évaluation des scénarios de l'hydrogène, mais

1. Decision Aiding (DA) en anglais.
2. Multicriteria Decision Aiding (MCDA) en anglais.
3. Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes et d'Aide à la Décision.
4. AIde à la Décision pour l'identification et l'accompagnement aux transformations sociétales induites par les nouvelles technologies de l'Hydrogène.

de structurer d'abord le problème de l'hydrogène. Autrement dit nous devons construire et décrire tout le processus de décision sur l'hydrogène en amont et en aval du modèle d'évaluation. Cette perspective nous engage dans une double problématique : comment peut-on structurer un problème comme celui de l'hydrogène en particulier et de décision de groupe en général dans une perspective d'évaluation multicritère ? Comment tenir compte dans notre modèle d'évaluation des caractéristiques singulières du problème de l'hydrogène-énergie et des possibilité de sa généralisation ? Pour répondre à ces questions, nous avons construit le modèle d'acceptation sociale des systèmes techniques fonctionnant à l'hydrogène qui servira de trame dans notre étude (voir figure 1.1). Ce méta-modèle essaye d'articuler un modèle de structuration avec un modèle d'évaluation. Le premier exploite et structure une étude qualitative des dimensions de la perception de l'hydrogène par le grand public ; le second définit la méthodologie d'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène. La transition entre les deux est faite au travers de la transformation des cartes cognitives en arbres de valeurs du grand public. Notre méta-modèle est construit à partir les connaissances du grand public sur l'hydrogène-énergie, de sa perception et de son acceptation dans ses usages courants. Dans la suite, nous le désignerons plus simplement par **modèle CPAE**, sous-entendu C : **C**onnaissances, P : **P**erception, A : **A**cceptation, E : **E**valuation.

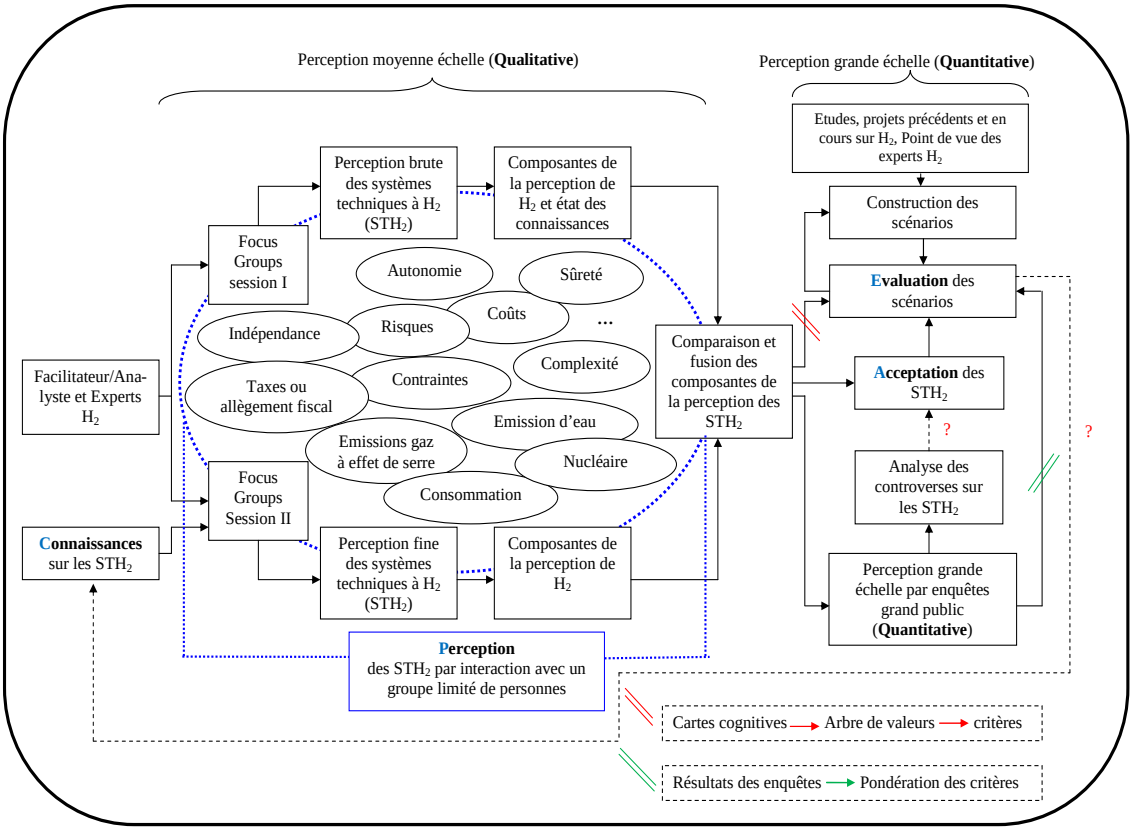


FIGURE 1.1 – Modèle (CPAE) d'acceptation sociale de l'hydrogène-énergie

En définitive, le modèle de structuration dérivé du modèle CPAE a permis d'obtenir les résultats suivants :

1. la chaîne de l'hydrogène
2. les cartes cognitives
3. la transformation des cartes cognitives en arbres de valeurs
4. la construction des scénarios

Ces quatre items qui sont les principaux output de la structuration du problème de l'hydrogène-énergie ont permis de construire notre modèle d'évaluation. Pour des raisons d'économie de la présentation, nous avons introduit par anticipation le premier résultat de la structuration dans le chapitre 2 avant de décrire en détail la méthodologie au chapitre 3. En effet il nous a semblé plus cohérent de présenter dans un premier temps l'objet de notre étude. Cette présentation a logiquement débouché sur la construction de la chaîne de l'hydrogène. Pour ce faire la démarche utilisée est intuitivement une démarche de structuration donc le formalisme est présenté plus tard au chapitre 3. Pour les autres résultats de structuration, la démarche est calquée sur la méthodologie du modèle d'évaluation dont elle alimente les étapes en éléments d'entrée (input).

1.2 Problématique

Selon Tsoukias [Tsoukiàs, 2007a], dans un processus d'aide à la décision, "l'objectif visé est d'arriver à un consensus entre le client et l'analyste" de sorte qu'il y ai une espèce de convergence entre les connaissances que le client a de l'objet de la décision et la méthodologie que l'analyste propose pour résoudre son problème. Dans la réalité d'un processus de décision, les expertises de ces deux catégories d'acteurs sont souvent distinctes (décideur et analyste). Chacun n'ayant parfois qu'une connaissance de son domaine. Comment permettre une meilleure compréhension du problème de décision par les deux parties ? Pour répondre à cette question, certains auteurs [Bouyssou et al., 2000], [Bouyssou et al., 2006], [Keller and Ho, 1988], [Rosenhead and Mingers, 2001], [Checkland, 1981], ont proposés une phase de structuration nécessaire pour résoudre un problème de décision. En effet la structuration des problèmes de décision est essentielle pour éviter de tomber dans des erreurs [5] de «type III» [Raiffa, 1968] qui consiste à définir le mauvais problème et donc la mauvaise solution. Car une bonne solution à un mauvais problème n'est ni plus ni moins qu'une mauvaise solution au bon problème. Structurer un problème c'est essayer de sortir de la simplification de la recherche opérationnelle classique qui recherche la meilleure solution possible d'un problème à partir de critères spécifiques et quantifiables. C'est aussi refuser le fait que le problème et les solutions existent à priori, au contraire c'est s'interroger sur ce qu'est le problème à résoudre en définitive : «what the problem is ?» [Rosenhead and Mingers, 2001]. C'est enfin tenir compte des complexités (sociales ou techniques), des incertitudes sur les concepts, les données ou le futur et des sources de conflits (intérêts et dilemmes) liés au problème. Nous nous sommes fixés pour objectif de structurer le problème de l'hydrogène à la lumière des méthodes de structuration existantes [6]

5. Raiffa [Raiffa, 1968] a proposée une typologie des erreurs dans la formulation des problèmes ; elle comporte plusieurs types d'erreurs : type I, type II, type III, etc.

6. PSMs : Problem Stucturing Methods.

telles que le strategic Options Developement and Analysis [Ackermann and Eden, 2001], le Soft System Methodology [Checkland, 1981], etc. La littérature des méthodes de structuration abonde en outils de tout genre. Alors le défi pour nous c'est dans un premier temps de déterminer l'outil qui répond aux caractéristiques [7] propres du problème de l'hydrogène et surtout de le justifier ; ensuite de déterminer comment et à quel étape du processus d'aide à la décision l'intégrer.

Une fois que nous avons choisi le méthode de structuration et intégrer ses outils dans notre processus décisionnel en précisant les modalité de son intégration, nous nous sommes focalisés sur le modèle d'évaluation. Dans notre processus de décision, en général les données de sortie de la structuration seront les données d'entrée du modèle d'évaluation. C'est pourquoi nous proposons de diviser notre processus en deux phases interdépendantes. Autrement dit de la phase de structuration dépendra le modèle d'évaluation et inversement le modèle d'évaluation peut permettre une révision de la structuration. Ces deux phases se distinguent néanmoins par leurs objectifs : la première vise à construire une compréhension partagée du problème entre l'analyste et les parties prenantes et à en dégager les billes essentielles pour la suite du processus (i.e. les valeurs, les critères, les alternatives,...) tandis que la seconde cherche à ordonner les alternatives pour permettre au décideur de choisir par exemple. La phase d'évaluation requiert la modélisation des préférences du décideur sur l'ensemble des alternatives.

1.3 Notre proposition

D'une part afin de répondre aux préoccupations portant sur la structuration de notre problème de décision dans une perspective d'évaluation multi-critère, nous avons choisi :

1. Une méthode d'analyse-validation du processus de l'hydrogène qui a débouché sur la construction d'une charte graphique validée [8] de la filière hydrogène. C'est à partir de cette charte graphique qui défini les principaux éléments à connaître sur la filière de l'hydrogène-énergie, et de quelques formules de calcul que nous avons pu construire des scénarios plausibles pour explorer le futur des systèmes techniques fonctionnant à l'hydrogène.
2. Une méthode qui permet de construire les scénarios à partir d'un ensemble d'informations prenant en compte la dimension temporelle des scénarios d'évolution des technologies de l'hydrogène.

Nous nous proposons de construire notre propre représentation de l'objet de la décision, en occurrence l'hydrogène, mais qui soit partagée par les autres acteurs du projet en même temps qui soit adaptée à une analyse multicritère.

Dans la plupart des processus d'aide à la décision, les analyses ainsi que les informations de nature qualitative ont tendance à être minimisées. Elles ne sont généralement pas prise en compte dans le processus de manière satisfaisante ; et lorsqu'elles le sont c'est de manière descriptive qu'elles apparaissent. Nous proposons d'en faire des éléments essentiels dans notre processus de décision. Ce d'autant plus que l'objet de notre étude, perception et acceptabilité,

7. Problème de décision publique impliquant plusieurs acteurs acteurs et plusieurs décideurs potentiels.
8. La validation s'est faite par les experts en hydrogène du projet AIDHY

sont typiquement des items subjectifs et le plus souvent qualitatifs. L'idée de base de notre approche consiste à faire un rapprochement entre un outil de structuration de problème et un outil d'évaluation à travers un exemple d'étude comme celui de l'hydrogène et d'analyser les perspectives qu'offre une telle opération (prise en compte du pluralisme des acteurs et des points de vue conflictuels, de leurs différentes participations dans le processus, etc).

D'autre part, nous proposons une méthode qui utilise les arbres de valeur comme un outil d'aide à l'exploitation de cartes cognitives dans une perspective d'analyse multi-critère. Elle permet d'établir un lien entre les cartes cognitives issues des focus group et les valeurs du grand public. En fait notre contribution aura été d'établir la manière d'intégrer une perception qualitative de masse dans un processus d'évaluation multi-critère. De définir la nature des informations utilisées, la façon et leur niveau d'utilisation et le résultat obtenu.

1.4 Organisation du document

Le premier chapitre est essentiellement consacré à l'introduction générale qui présente le contexte de la thèse, la problématique et la contribution que nous apporteront pour résoudre le problème en cause.

Dans le Deuxième chapitre, nous présenterons la structuration du problème de l'hydrogène. Nous mettrons en particulier l'accent sur l'analyse et la compréhension de notre objet d'étude : l'hydrogène-énergie. Nous essayerons de situer le problème de l'hydrogène-énergie dans le cadre plus vaste de l'énergie afin d'en dégager les problématiques. Toutefois nous ne manquerons pas de préciser que l'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais plutôt un vecteur d'énergie comme l'électricité. Ensuite nous consacrerons une très bonne partie du chapitre à décrire la filière de l'hydrogène énergie « du puits à la roue » [9], c'est-à-dire de sa production à sa consommation. Toutes les étapes importantes - production, stockage, distribution, transport et utilisations - de la chaîne hydrogène seront décrites et leurs problématiques seront dégagées. Nous terminerons ce chapitre en présentant le résultat majeur que nous avons obtenu suite aux étapes précédentes : la charte graphique de la chaîne intégrée de l'hydrogène telle qu'elle puisse nous servir dans l'analyse multi-critère des scénarios.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse de l'existant des principales études d'acceptabilité de l'hydrogène. Dans un premier temps la définition de la notion d'acceptabilité sociale sera précisée et les méthodologies déjà mises en oeuvre seront listées. Ensuite les études d'acceptabilités menées dans différents pays et portant sur l'hydrogène seront présentées dans leurs grandes lignes. Nous terminerons ce chapitre en discutant du positionnement de ces études par rapport à celle que nous avons menée dans le cadre du projet AIDHY.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les méthodes de structuration des problèmes en général et ceux des problèmes de décision de groupe en particulier. Nous montrerons la nécessité de structurer un problème de décision en amont et surtout lorsqu'il faut gérer des situations complexes, incertaines ou conflictuelles. Nous montrerons alors que notre problème de décision est propice à être structuré par les outils graphiques de collaboration permettant de représenter la complexité, de comprendre les incertitudes et juguler les conflits par consensus. Pour ce faire, nous mettrons un accent particulier sur la présentation des cartes cognitives. Nous

9. "From well to wheel", extrait du projet HyWays

terminerons le chapitre par un état de l'art de l'aide multi-critère à la décision. Plus exactement, après avoir présenté cette théorie, ses courants de développements actuels, nous exposerons leurs paradigmes. Nous montrerons alors que l'approche basée sur l'agrégation partielle des préférences du décideur est plus adaptée que celle basée sur l'agrégation totale des préférences dans notre contexte.

Dans le cinquième chapitre nous appliquons la méthodologie présentée au chapitre 3. En particulier nous donnons un premier aperçu de notre proposition au travers de deux grilles d'analyse méthodologiques : une première pour la structuration et une deuxième pour la méthode d'évaluation. Plus précisément, le premier cas définit les modalités du passage des cartes cognitives aux valeurs des acteurs et le deuxième cas justifie le choix de la méthode ELECTRE TRI pour évaluer les scénarios de l'hydrogène. Nous conclurons ce chapitre par des discussions sur les résultats de l'évaluation pour mettre en perspective les invariants de l'acceptabilité sociale des scénarios.

Chapitre 2

Présentation et Structuration du problème de l'acceptabilité sociale de l'hydrogène

"Quand on affronte les problèmes de demain avec les organisations d'hier, on récolte les drames".

Michel Crozier

Extrait de : "Analyse stratégique" (1988)

"Il n'y a pas des problèmes qu'on se pose, il y a des problèmes qui se posent. Il n'y a pas de problèmes résolus, il y a seulement des problèmes plus ou moins résolus".

Henri Poincaré - Mathématicien, physicien et philosophe français (1854-1912)

"Toutes politiques ou pratiques faisant abstraction de l'approbation et de l'acceptation sociales seront définitivement vouées à l'échec".

Clawson, 1975 et Firey, 1960

2.1 Présentation

La problématique énergétique mondiale appelle tous les pays à une réflexion profonde sur leurs politiques énergétiques ; ces politiques pouvant être articulées à différents niveaux : local, régional, national voire communautaire et sous différentes déclinaisons : plans, programmes, etc. Le défi énergétique majeur des prochaines années sera celui de définir une politique d'énergie cohérente avec les contraintes stratégiques, économiques et environnementales. A différents niveaux, des décisions doivent être prises sur les choix en matière d'énergie. De façon générale, la problématique énergétique mondiale se présente de la manière suivante : Pour des raisons géopolitiques, de réchauffement climatique, d'épuisement des ressources, il va falloir se passer un jour ou l'autre des énergies fossiles. De quelles autres solutions disposons-nous pour les remplacer ? C'est à cette question que certains industriels tentent de répondre en travaillant à la recherche et au développement de sources d'énergies, alternatives aux énergies fossiles. Dans cette optique, de nombreuses voies existent (Hydraulique, Marées, Eolien, Solaire thermique et photovoltaïque, Biomasse et nucléaire) qui présentent la caractéristique commune d'être des voies d'obtention d'énergie dites "renouvelables". Mais la démarche des industriels, essentiellement techno centrée et économique, se heurtent parfois aux interrogations de la société dans la très grande diversité de ses composantes. C'est sans doute pour anticiper et prendre en compte cette dimension sociétale longtemps oubliée, que le projet AIDHY (AIde à la Décision pour l'identification et l'accompagnement aux transformations sociétales induites par les nouvelles technologies de l'Hydrogène) se propose de se pencher sur le cas de la chaîne hydrogène. Nous nous sommes interrogés sur les raisons qui valident le choix de l'hydrogène énergie par rapport à l'autre vecteur d'énergie qu'est l'électricité notamment en mettant en perspective les avantages de l'un par rapport à l'autre. Le projet AIDHY proprement dit, vise à " introduire progressivement, auprès du grand public de l'hydrogène vecteur d'énergie " à travers des études ciblées (contraintes et modalités d'insertion dans le tissu social actuel et grille d'analyse de l'acceptabilité sociétale des nouvelles technologies de l'hydrogène, son " devenir vraisemblable dans la société civile " [Merad, 2008]). Pour notre part au LAMSADE, on s'est vu confié la tâche qui consiste à identifier, qualifier et classer des scénarios prospectifs (à destination des industriels et des législateurs) de l'insertion, dans la société, des nouvelles technologies de l'hydrogène d'une part. Et faire émerger les situations problématiques, le(s) modèle(s) d'évaluation et les recommandations finales d'autre part. Autrement dit, notre tache consiste en une contribution méthodologique sur comment :

- construire des scénarios sur l'évolution de l'hydrogène ;
- construire un modèle d'acceptabilité sociale (donc socialement intelligible) ;
- évaluer les scénarios sur la base de ce modèle.

Dans un premier temps n'étant pas des experts en énergie et encore moins en hydrogène énergie, nous nous sommes appropriés les connaissances importantes du domaine de l'énergie en générale et de la filière hydrogène en particulier. Il nous est apparu nécessaire d'approfondir la chaîne énergétique plutôt que de nous limiter à la seule source. Ce chapitre sera entièrement consacré à la présentation des connaissances sur l'hydrogène énergie. Ensuite nous décrirons toute la filière hydrogène de la production à l'utilisation finale afin d'en déterminer les tenants et les aboutissants.Un premier résultat de notre étude sera la construction de la chaîne verticale

de l'hydrogène. Dans le même temps nous ferons ressortir au travers d'informations croisées, les premiers éléments de notre analyse des situations problématiques de la filière hydrogène. Nous terminerons ce chapitre par une étude critique de l'existant des études diverses sur l'acceptabilité sociale de l'hydrogène. Nous discuterons des méthodes et résultats de ces études pour essayer d'en dégager une typologie ainsi que les principaux invariants qui distinguent les technologies de l'hydrogène de toute autre forme d'innovation technologique.

2.2 De la problématique de l'énergie à celle de l'hydrogène-énergie

Pour mieux appréhender la problématique de l'hydrogène, il convient d'abord de comprendre la différence qu'il y a entre un vecteur d'énergie et une source d'énergie.

2.2.1 Énergie : Vecteur versus Source

L'hydrogène a été découvert en 1766 par Henry Cavendish sous l'appellation de "l'air inflammable" et baptisé hydrogène en 1781 par Antoine Lavoisier c'est-à-dire "hydro" ou "eau" et "gène" ou "qui engendre". L'hydrogène est l'élément chimique le plus léger de la table périodique de Mendeleïev qui a la structure atomique la plus simple. Il est formé d'un unique électron chargé négativement qui gravite en orbite autour de son noyau central appelé proton, chargé positivement. Sous sa forme moléculaire, l'hydrogène est un gaz de symbole chimique H_2 peu dense, léger, inodore, incolore, non corosif et donc la combustion dégage de l'énergie. Par comparaison aux sources d'énergies fossiles, 1kg d'hydrogène libère 3 fois plus d'énergie que 1kg d'essence (120 MégaJoules contre 45 MégaJoules). Il occupe à poids égal beaucoup plus de volume qu'un autre gaz. Ainsi, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut environ 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars. Ces volumes importants sont une véritable contrainte pour le transport et le stockage sous forme gazeuse.

L'hydrogène est très abondant dans la nature, mais non à l'état naturel car il est toujours lié à de nombreux composés tels que l'eau, les hydrocarbures (méthane, résidus pétroliers,etc) et des composés organiques de la biomasse. Il ne peut donc pas être classé dans la catégorie des énergies primaires directement utilisables. Il se définit comme **un vecteur d'énergie**. " **Un vecteur d'énergie** est une forme d'énergie transposable donc utilisable en un lieu différent de celui où elle est produite. Le vecteur d'énergie n'existe pas à l'état naturel, il doit être produit à partir d'une énergie existante (charbon, pétrole, gaz naturel, énergies renouvelables, ou nucléaire "[1] [Werkoff et al., 2005]. Le vecteur d'énergie est donc un support qui permet simplement de stocker et de transporter une certaine quantité d'énergie d'un lieu de production à un lieu d'utilisation. Il est produit en utilisant différentes sources d'énergie primaires conventionnelles (Charbon, pétrole, gaz naturel, uranium, hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie, marée, bois) ou secondaires (Électricité, produits pétroliers, vapeur) pour obtenir une énergie finale (Mécanique, thermique, électromagnétique). Pour produire de l'hydrogène, il faut dépenser de l'énergie. Une présentation détaillée des propriétés physico-chimiques de l'hydrogène se trouve en annexe C.

1. Extrait du portail de l'AFH2 :http ://www.afh2.org/f/index.php ?c=32

Il existe plusieurs vecteurs énergétiques :

- Électricité
- Hydrogène
- Produits pétroliers
- Vapeur

Ils sont appelés énergies secondaires ou intermédiaires dans une structuration énergétique qui les intercalent entre les énergies primaires ou initiales et les énergies finales telle que l'illustre la figure 2.1. Les deux vecteurs majeurs d'énergie que sont l'hydrogène et l'électricité permettent de faire des transformations énergétiques importantes (voir figure 2.1).



FIGURE 2.1 – Chaîne énergétique adaptée d'A. Moreau [Moreau, 2001]

Ces transformations s'appuient sur la loi de conservation de l'énergie totale et les propriétés physiques et chimiques des matériaux. Elles ont pour but de fournir des services à l'utilisateur final. Parmi ces services nous pouvons citer le chauffage, le transport et les industries. Dès lors, il faut voir en l'hydrogène non pas une énergie directement utilisable, mais un support (vecteur) d'énergie complètement intégré dans le système énergétique global. Et comme vecteur d'énergie, l'hydrogène assure la liaison entre les sources d'énergie et les services dont nous avons besoin (voir figure 2.2).

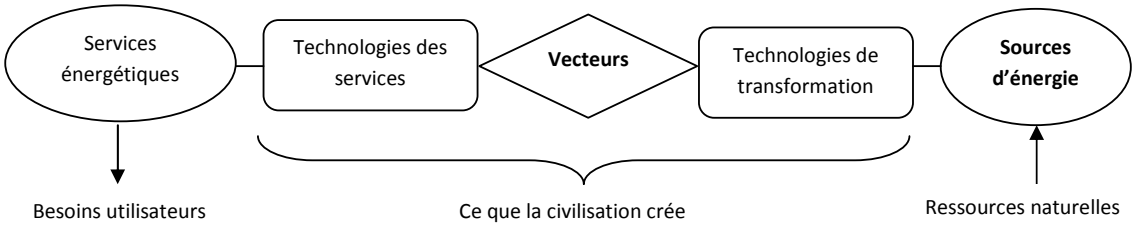


FIGURE 2.2 – Chaîne globale du système énergétique. D'après A.Stuart [Stuart, 2004]

Pour compléter ce que nous avons mentionné précédemment sur les vecteurs d'énergie, notons qu'il est également fait mention par certains auteurs qu' un vecteur se caractérise aussi par un contexte dont il faut tenir compte. Ce contexte peut être défini comme l'accès à la ressource, puis comme l'ensemble des pollutions, risques, déchets engendrés sur la totalité de son cycle de vie et son environnement, depuis sa production jusqu'en sortie de l'actionneur [2], y

2. Moteur thermique, pile à combustible ou réacteur de synthèse.

compris **l'acceptation sociale** de l'usage de ce vecteur résultant l'analyse des risques, des pollutions, des coûts, des servitudes, voire des controverses et des fantasmes qu'il suscite auprès des populations.

2.2.2 Pourquoi l'Hydrogène : Hydrogène versus électricité

De nombreuses études se sont penchées sur cette question du pourquoi choisir l'hydrogène plutôt qu'un autre vecteur. En effet il existe actuellement deux principaux vecteurs d'énergie : l'électricité et la chaleur. L'hydrogène est considéré comme le troisième vecteur d'énergie d'avenir. En l'état actuel des technologies de production de l'énergie en France, l'électricité produite est majoritairement d'origine nucléaire ($\geq 70\%$). Cette voie de production devient de plus en plus controversée au sein de la société. Dans ce contexte, l'hydrogène pourrait être produit à partir de cette électricité. Mais cette production serait également controversée. L'avantage de l'hydrogène serait donc de favoriser l'utilisation des sources d'énergies primaires alternatives dites propres. De manière plus générale, l'hydrogène vecteur d'énergie permet de valoriser les sources d'énergie primaires. En particulier il permet de valoriser les résidus d'hydrocarbures par une technique appelée reformage.

Mais au delà de ces considérations techniques et énergétiques globales, l'hydrogène présente des caractéristiques intrinsèques remarquables. En effet, l'hydrogène est l'un des éléments chimiques les plus abondants dans la nature. Il n'existe pas à l'état naturel mais uniquement sous forme de composé dans de nombreuses molécules comme celles des combustibles fossiles : gaz naturel (CH_4) et eau (H_2O) par exemple.

L'hydrogène présente de nombreux **avantages** :

- atome très abondant dans la nature majoritairement sous forme d'eau,
- molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg ou 39,4 kWh/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel et 5 fois le charbon !,
- gaz ni polluant, ni toxique,
- gaz ne générant que de l'eau par combustion dans l'air,
- le plus léger des gaz (grande vitesse de diffusion dans l'air) : facteur très positif pour la sécurité,
- transport facile par pipelines (pour la production de masse centralisée),
- modes de production variés assurant une plus grande diversification,
- combustible idéal des piles à combustibles qui constituent le moyen le plus efficace pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique.

Toutefois, l'hydrogène présente également quelques **inconvénients** :

- sa légèreté bien qu'importante du point de vue de la sécurité, implique une densité volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel. Un comparatif des valeurs énergétiques de l'hydrogène et de l'essence donne les résultats suivants :
  - ▷ H_2 comprimé à **700 bars** : 1 litre d'essence = 3 litres de H_2
  - ▷ H_2 comprimé à **pression ambiante** : 1 litre d'essence = 1500 litres de H_2
- les limites d'inflammabilité et de détonation avec l'air sont plus larges que pour le gaz naturel (d'un facteur 5 environ), mais seul compte la limite inférieure : 4% en volume dans l'air au lieu de 5,3% pour la limite inférieure d'inflammabilité et 13% au lieu de

6,3% en limite de détonation. En déhors d'une situation dite "confinée", c'est-à-dire où l'air est emprisonné dans un volume fermé, l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. En situation confinée, l'énergie explosive théorique par m^3 de gaz est 3,5 fois plus faible pour l'hydrogène et la surpression de détonation légèrement plus faible (14,7 contre 16,8),

- l'énergie minimale à fournir pour enflammer l'hydrogène est 10 fois inférieure à celles requises pour les hydrocarbures classiques (20μJ pour l'hydrogène, contre 260μJ pour le propane),
- la flamme de l'hydrogène est presque invisible et sa combustion en présence d'air génère des NO_x,
- son image dans le grand public est assez ambiguë, voire défavorable : il est considéré comme un gaz dangereux, ce qui est vrai, mais pas plus que les autres gaz, en occurrence le gaz naturel. Donc son acceptabilité sociale n'est pas acquise. Cette mauvaise réputation trouve son origine dans l'accident spectaculaire du ballon dirigeable Hindenburg, aux États-Unis en 1937. Cependant,les résultats d'une récente étude [3] très complète démontre sans ambiguïté :
  - ⋆ que l'accident du Hindenburg est dû uniquement à l'inflammabilité du vernis qui protégeait l'enveloppe de l'aéronef et qui n'a pas résisté à une décharge électrostatique par temps d'orage,
  - ⋆ ensuite, que si le dirigeable avait été gonflé à l'hélium, le déroulement de l'accident et ses conséquences (35 voyageurs et un technicien au sol tués sur 97 membres d'équipage et passagers) auraient été presque identiques.

En outre, contrairement à l'électricité, l'hydrogène peut être stocké. Ceci est l'énorme avantage du vecteur hydrogène sur le vecteur électricité. Dans ce cas la continuité de l'approvisionnement est assurée même si l'on n'est pas branché à un réseau comme le réseau électrique. Ainsi une partie de l'électricité produite et non consommée peut être transformée en hydrogène et stockée pour être réinjectée dans le réseau à la demande. Cependant en l'état actuel des recherches, le stockage de l'hydrogène pose d'autres problèmes (physiques et économiques) que nous traiterons à la section 2.6. En plus il faut dire que dans l'application transport, domaine phare du développement de ce vecteur, l'hydrogène offre une plus grande diversité d'usage que l'électricité. Il peut notamment y être utilisé dans les piles à combustible, les batteries, les moteurs électriques voire directement dans des moteurs thermiques. Alors que l'électricité n'est utilisable que dans les moteurs électriques.

Enfin, le transport de l'électricité génère des pertes d'énergie (10% de pertes en moyenne) dans les câbles. Alors que les problèmes de transport de l'hydrogène sont de toute autre nature et peuvent être facilement résolus en adaptant un mode de production décentralisé de l'hydrogène, ce qui n'est pas facilement faisable avec l'électricité.

Mais au delà des avantages des uns (Hydrogène) et des inconvénients des autres (électricité), ces deux vecteurs majeurs ont la remarquable propriété d'être complètement interchangeables grace aux deux technologies de **la pile à combustible** et de **l'électrolyseur** (voir figure 2.5 section 2.8.2).

3. Le rapport est disponible sur le site www.dwv-info.de/pm/pe00hb.htm

2.2.3 Situation du problème de l'Hydrogène

La question de l'hydrogène ne peut pas être traitée sans d'abord être envisagée dans le cadre plus global du problème de l'énergie. C'est pour cette raison que pour poser les bases d'une réflexion autour de l'hydrogène-énergie, nous devons la situer par rapport à la réflexion générale sur les problèmes énergétiques mondiaux de l'heure. Aborder la question de cette manière revient à se poser la question du pourquoi de l'hydrogène-énergie. Cette question en appellera certainement d'autres questions du genre : comment ? Pour qui ? Par qui ? Pour quoi faire ?...Dans cette partie nous traiterons essentiellement du pourquoi ?

La demande énergétique mondiale est en très forte croissance en raison de l'augmentation continue de la population mondiale (d'environ 1,5% par an) et des besoins croissants des pays émergents (Chine, Inde) en énergie. Or 65% de cette demande est satisfaite par des sources d'énergie fossiles (pétrole, gaz, charbon) à cause (puisqu'il faut désormais le déplorer) de la disponibilité et de la commodité de ces énergies à l'usage. Mais la production mondiale des énergies fossiles, notamment des hydrocarbures va connaitre un pic et décliner par la suite. C'est ce fameux pic de production qui est la hantise des décideurs de tous horizons : politiques, économiques et sociaux. Les prévisions les plus optimistes les situent à la date d'aujourd'hui à 15 ans pour le pétrole et le gaz à production croissante et à 10 ans pour le charbon à production constante, toutes choses égales par ailleurs. Ces prévisions sont faites sous l'hypothèse que les réserves ne sont pas infinies et donc s'épuiseront un jour, que la capacité de production des complexes pétroliers va connaitre elle aussi la saturation et enfin que les bonnes veilles résolutions de Kyoto sur l'environnement seraient dorénavant appliquées avec rigueur et par tous [4] . Car il faut le rappeler, la production et l'utilisation des énergies fossiles génèrent les gaz à effet de serre (CO_2, CH_4) qui provoquent le réchauffement climatique avec des conséquences désastreuses sur l'environnement. Quant à ces réserves, elles s'épuiseraient dans 100 ans au rythme actuel ou bien dans 40 ans en tenant compte de la croissance aussi bien économique que démographique. En outre, les principaux gisements (Arabie Saoudite, Iran, Irak, Russie, Venezuela, Angleterre, Norvège,..) ne sont pas également répartis dans le monde ; ce qui pose un problème de dépendance énergétique vis-à-vis de ces pays là. C'est le cas de nombreux pays de l'union européenne donc l'approvisionnement en gaz est majoritairement lié à la Russie et à l'Ukraine (Pologne, Allemagne, etc.) et à l'Algérie (France) pour ne citer que ces exemples. C'est donc en réponse à ces diverses problématiques (géopolitiques, environnementales et économiques) qu'est apparue la nécessité d'avoir recours à d'autres sources d'énergies plus ou moins respectueuses de ces contraintes (voir figure 2.3). On les a regroupé sous le vocable "énergies renouvelables " ou "énergie propres" du fait que leurs sources sont inépuisables, abondantes et durables et leurs émissions peu polluantes. Au nombre de celles-ci on peut énumérer les suivantes :

- Hydraulique
- Éolien
- Solaire (thermique et photovoltaïque)
- Biomasse
- Nucléaire

4. Avec le secret espoir que les Etats Unis d'Amérique adhèrent enfin à ce traité.

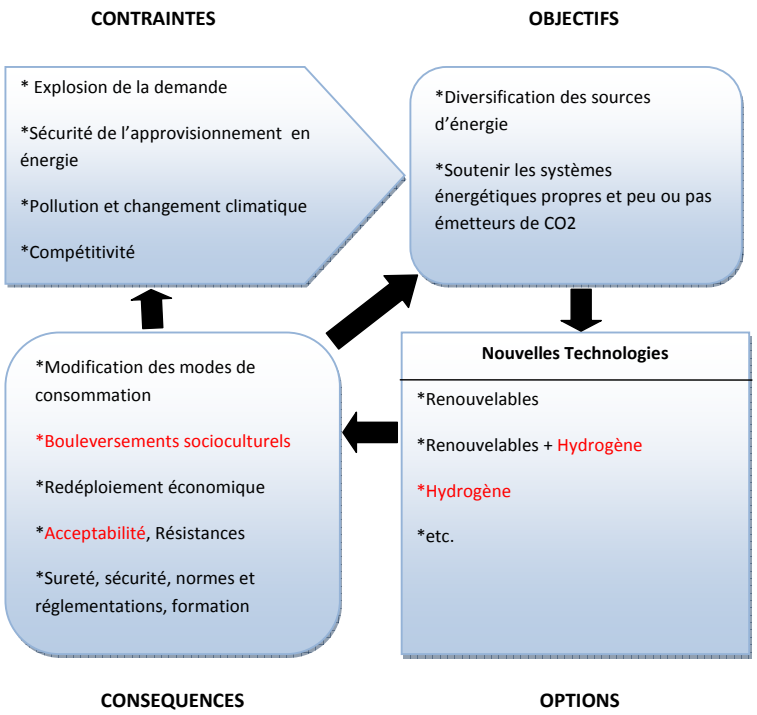


FIGURE 2.3 – Représentation schématique des principaux éléments de la problématique de l'énergie.

Toutefois il faut faire preuve de la plus grande circonspection dans l'usage de ces appellations ; car certaines de ces sources intrinsèquement neutre par rapport à leur émission de CO2, peuvent rapidement perdre leur attribut d'énergie propre selon le mode de production et de distribution envisagés. C'est pour cette raison que pour une source donnée, on mesure plutôt le bilan carbone qui tient compte de son cycle de vie.

2.2.4 Etude comparative de l'évolution des sources d'énergie

D'après les données d'une étude menée sur l'avenir de l'énergie [Eibenschutz, 2007], regroupées dans la table 2.1, nous avons essayé de construire une représentation de l'évolution dans le temps des différentes sources d'énergie en fonction de leur contribution individuelle à la consommation énergétique mondiale (cf.figure 2.4). Ces données sont à considérer comme des éléments d'hypothèse pour nous aider à nous projeter dans un horizon de temps infiniment commun dans les études sur l'hydrogène. Et comme telle, elles sont différentes d'un prévisionniste à l'autre. Mais leurs conclusions se recoupent presque toutes.

2.3 L'hydrogène : Chaîne verticale de la production à l'utilisation

Dans la section 2.2.1, nous avons dit que l'hydrogène, comme l'électricité, est un vecteur d'énergie, c'est-à dire qu'il doit être transformé sous d'autres formes d'énergie pour être utilisé.

Sources d'énergie	Contribution à la consommation énergétique mondiale (%)		
	1965	2005	2030
Pétrole	39,6	36,4	21,3
Gaz	16,4	23,5	13,7
Charbon	38,4	27,8	34,8
Hydraulique	5,5	6,3	5,3
Nucléaire	0,1	6,0	10,0
Energies Renouvelables(Biomasse, etc)	0,0	0,09	14,9

TABLE 2.1 – Répartition mondiale de la consommation des énergies

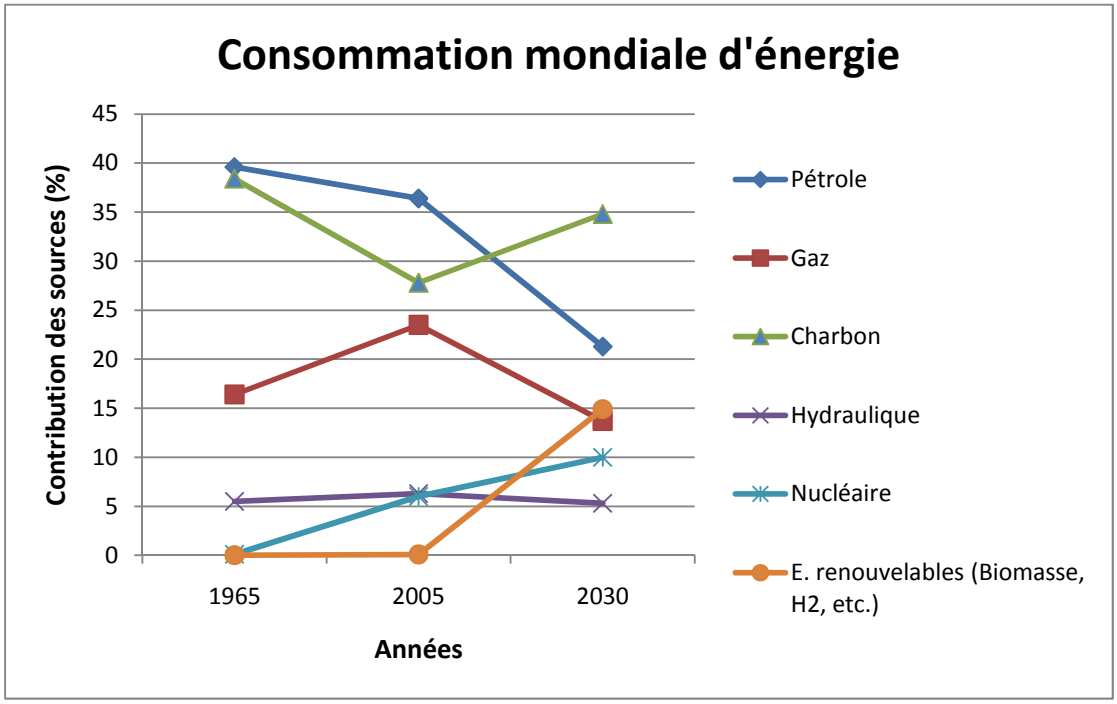


FIGURE 2.4 – Courbe de l'évolution des consommations énergétiques à horizon 2030.

L'hydrogène n'est pas directement disponible dans la nature. On doit le produire, le stocker, le transporter pour qu'il soit ensuite utilisé par le consommateur final. Toutes ces étapes : production, stockage, transport et consommation, doivent être accomplies avec efficacité et sécurité. Nous consacrerons donc les sections suivantes à examiner dans le détail ces différentes étapes de la chaîne hydrogène. Autour de ces connaissances nous construirons le Processus de la chaîne verticale de l'Hydrogène. Nous représenterons ce premier résultat préalablement validé par les experts, par une charte graphique qui détaille toute la chaîne de l'hydrogène.

2.4 La production de l'Hydrogène

L'hydrogène est la matière qu'on trouve le plus en abondance sur terre, et parmi tous les combustibles connus, celle qui possède le contenu énergétique le plus élevé par unité de poids. Il est chimiquement actif et existe rarement seul en tant qu'élément. Il se combine avec d'autres éléments, comme l'oxygène dans l'eau, le carbone dans le méthane, ou des microconstituants dans les composés organiques. Pour qu'il puisse être utilisé comme combustible ou matière première chimique, l'hydrogène doit d'abord être séparé des autres éléments par électrolyse (en faisant passer un courant électrique dans l'eau), par gazéification (chauffage à haute température en l'absence d'oxygène), ou par reformage (chauffage à haute température qui fait appel à un catalyseur).

Il existe plusieurs modes de production de l'hydrogène soit à l'état de recherche, soit déjà en application dans les industries. Ces différents modes peuvent être regroupés en quatre technologies [Dufoix et al., 2004] :

- Les technologies thermochimiques
- Les technologies nucléaires
- Les technologies électrolytiques
- Les technologies photolytiques

Nous avons regroupé ces technologies ainsi que les modes de productions qui leur sont associés dans la table 2.2. Ces modes de production peuvent être exothermique (produit de la chaleur, donc la variation d'enthalpie $\Delta H < 0$), endothermique (accompagné d'une absorption de chaleur, donc la variation d'enthalpie $\Delta H > 0$) ou athermique (neutre d'un point de vue énergétique, donc la variation d'enthalpie $\Delta H = 0$).

2.4.1 Les procédés thermochimiques

Les procédés thermochimiques représentent 95% dans la production de l'hydrogène. Il en existe plusieurs dont les plus répandus sont le vaporeformage, l'oxydation partielle et la gazéification du charbon.

2.4.1.1 Le vaporeformage

Le vaporeformage ou reformage à la vapeur d'eau du gaz naturel (dont le méthane CH_4 est le principal constituant) est effectué sur des hydrocarbures légers. Le but est de libérer la quantité maximale d'hydrogène contenue dans l'eau et le combustible par l'utilisation de la vapeur d'eau pour la transformation des hydrocarbures. Il s'effectue en trois étapes :

- Production d'un gaz de synthèse $CO + H_2$ contenant 65 à 70% d'hydrogène (voir réaction 2.1)
- Production de H_2 (voir réaction 2.2)
- Purification de H_2 (voir réactions 2.2 et 2.3)

Réaction 1 (Pression (P) entre 20 et 30 bar)

$$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3H_2, \quad \Delta H = 206 \quad \text{kJmol}^{-1}, \quad \text{endothermique} \qquad (2.1)$$

Procédés	Technologies	Matières premières	Produits
Thermochimiques (96%)	Vaporeformage	Gaz naturel{48%, (CH_4)}, eau	H_2, H_2O, CO, CO_2, CH_4
	Oxydation partielle	Gaz naturel, Hydrocarbures légers (48%), charbon, air (oxygène)	H_2,H_2O, CO, CO_2
	Reformage autotherme	Gaz naturel, Hydrocarbures légers, charbon, air (oxygène), eau	H_2, H_2S, CO_2, COS
	Gazéification du charbon	Charbon (18%), eau, air	H_2, CO
	Pirolyse de la Biomasse	Biomasse, eau, air	H_2, CO
Nucléaires	Réacteur très haute température	Uranium, électricité, eau	H_2, O_2, déchets nucléaires
	Réacteur à gaz à haute (France)	Uranium, électricité, eau	H_2, O_2, déchets nucléaires
	Réacteur à refroidissement au sodium (Japon & USA)	Uranium, électricité, eau	H_2, O_2, déchets nucléaires
Electrolytiques (4%)	Électrolyse haute température	Eau, Électricité	H_2, O_2 (gazeux)
	Électrolyse basse température	Eau, Électricité	H_2, O_2 (gazeux)
Photolytiques	Procédé photobiologique	Microbes, énergie solaire	H_2, CO_2
	Photoélectrolyse	Lumière solaire, cellules photoélectrochimiques	H_2, O_2
	Photobiochimie	Végétaux, oxygène	H_2, CO_2

TABLE 2.2 – Procédés et Technologies de Production de l'Hydrogène.

Réaction 2 (Température (T) entre 200 et 400°C)

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2, \quad \Delta H = -41 \quad \text{kJmol}^{-1}, \quad \text{exothermique} \tag{2.2}$$

Réaction Bilan (Température (T) entre 200 et 400°C) réaction

$$CH_4 + 2H_2O + \text{Chaleur} \longrightarrow CO_2 + 4H_2, \quad \Delta H = 165 \quad \text{kJmol}^{-1}, \quad \text{endothermique} \tag{2.3}$$

Les réactions 2.2 et 2.3 consistent à séparer le CO_2 du H_2 et à éliminer les traces d'impuretés. La table B.1 en annexe B donne une comparaison des rendements et puretés de l'hydrogène obtenu selon le procédé utilisé. Le vaporeformage produit environ 10 kg de CO_2/ kg de H_2.

2.4.1.2 L'oxydation partielle

L'oxydation partielle de résidus de pétrole(C_xH_y) ou bien de composés solides (gazéification du charbon, biomasse), consiste à convertir, en présence d'oxygène, des résidus de la distillation du pétrole ou du charbon, en hydrogène et en oxydes de carbone.

Réaction 1

$$C_xH_y + x/2O_2 \longrightarrow xCO + y/2H_2 \tag{2.4}$$

Réaction 2

$$xCO + xH_2O \longrightarrow xCO_2 + xH_2 \tag{2.5}$$

Réaction Bilan

$$C_xH_y + xH_2O + x/2O_2 \longrightarrow xCO_2 + (x + y/2)H_2 \tag{2.6}$$

L'oxydation partielle produit environ 12 à 19 kg de CO_2/ kg de H_2.

2.4.1.3 La gazéification du charbon

Elle nécessitent de la vapeur d'eau à 1200°C. Les réactions obtenues sont les suivantes :

Réaction 1

$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2 \tag{2.7}$$

Réaction 2

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2 \tag{2.8}$$

Le rendement de la gazéification du charbon est plus faible que celui du vaporeformage, les émissions de CO_2 y sont plus élevées ($+50\%$) avec un coût actuel double du vaporeformage [LeDuigou, 2009].

2.4.2 Les procédés électrolytiques

Les procédés électrolytiques représentent 4% de la production actuelle de l'hydrogène. Ils se regroupent autour de deux types d'électrolyses : électrolyse basse température et électrolyse haute température. En fonction de ces types d'électrolyses, on distingue trois technologies :

- La technologie alcaline
- La technologie PEM (Proton Exchange Membrane)
- La technologie électrolyte haute température

Dans l'ensemble il s'agit des technologies qui permettent des échanges ou réactions aux interfaces. La réaction globale obtenue est la suivante :

$$2H_2O + \text{Electricité} \xrightarrow{\textbf{Electrolyseur}} 2H_2 + O_2 \tag{2.9}$$

l'électrolyse de l'eau (voir reaction 2.9) permet le stockage d'énergie électrique, sous une forme chimique stable qui, le moment voulu, peut à nouveau être transformée en électricité ou en chaleur. De ce point de vue, les procédés par électrolyse peuvent être couplés à d'autres technologies sous certaines conditions :

- contrainte de temps : production pas en phase avec les besoins (par exemple pour suppléer l'intermittence de certaines sources comme l'éolien, le solaire)
- contrainte d'espace : lieux de production et de consommation éloignés (par exemple pour permettre l'acheminement de l'électricité produite par des barrages hydroélectriques dont la localisation est éloignée des grands centres urbains).

2.4.2.1 La technologie alcaline

Elle utilise un electrolyte (substance séparant les électrodes) liquide. Elle est plus ancienne et largement utilisée dans les industries, mais son rendement est faible. Les réactions obtenues sont les suivantes :

Cathode

$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^- \tag{2.10}$$

Anode

$$2OH^- \longrightarrow 2H_2O + 1/2O_2 + 2e^- \tag{2.11}$$

2.4.2.2 La technologie PEM

Elle procède par des échanges de protons (H^+) aux interfaces. Elle utilise un electrolyte solide mais avec un coût plus élevé car utilisant des métaux nobles. De ce fait fait des applications à grande échelle sont très limitées. Les réactions obtenues sont les suivantes :

Cathode (réduction)

$$2H^+ + 1/2O_2 + 2e^- \longrightarrow H_2O \tag{2.12}$$

Anode (oxydation)

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^- \tag{2.13}$$

2.4.3 Les procédés biologiques

La production biologique de l'hydrogène est définie comme le résultat du métabolisme d'un organisme vivant qui libère, dans des conditions données, de l'hydrogène gazeux comme métabolite secondaire. On distingue quatre classes de procédés biologiques [Chader et al., 2007] :

- la bio photolyse de l'eau par les algues et les cyanobactéries ;
- la photo décomposition des composés organiques par les bactéries photosynthétiques ;
- la fermentation des composés organiques par les bactéries ;
- le système hybride utilisant des bactéries photosynthétiques et des bactéries anaérobiques.

La réaction 2.14 illustre le procédé de fermentation des déchets de la biomasse par des bactéries à l'obscurité.

Réaction

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow 4H_2 + 2CH_3COOH + CO_2 \tag{2.14}$$

CH_3COOH : acide acétique.

2.4.4 La purification de l'hydrogène

En l'état actuel, on peut considérer qu'il existe deux types d'hydrogène : l'hydrogène captif et l'hydrogène marchand. L'hydrogène captif comprend la valorisation des résidus pétroliers et l'industrie chimique pour la production de l'ammoniac et du méthanol. Il représente la plus grande part de l'hydrogène produit et est souvent destiné à auto-alimenter le procédé du producteur en énergie. L'hydrogène marchand sous sa forme énergétique reste marginal et émergent

notamment dans l'utilisation de l'hydrogène comme combustible distribué pour le secteur des transports. Les principaux procédés spécifiques à l'hydrogène captif comprennent le reformage à la vapeur, la gazéification et l'oxydation partielle. Or comme nous venons de le voir dans les sections précédentes, ces procédés produisent un hydrogène impur faisant partie d'un mélange gazeux où subsistent d'autres gaz comme l'éthane, le méthane, le monoxide de carbone, etc. De plus les besoins des industriels en hydrogène sont quantitatif et qualitatif (pureté $\approx$ 99,99%). Pour répondre aux exigences de pureté recherchée par les industriels, plusieurs méthodes de purification ont été développées. Cependant deux technologies sont prédominantes pour la purification de l'hydrogène :

- la purification sur tamis moléculaire de type PSA (Pressure Swing Adsorption) est basé sur l'adsorption sélective des impuretés (CO, CO_2, CH_4),
- la purification par méthanisation, qui procède par transformation catalytique du CO en méthane, précédée d'une étape d'élimination du CO_2.

Le procédé PSA ne comporte pas d'étape de décarbonation alors que le procédé par méthanisation est précédé par une étape de désulfuration ou de décarbonation dans le cas d'une oxydation partielle, et nécessairement précédé par une étape de décarbonation dans le cas du vaporeformage avant l'étape de méthanisation proprement dite. Les différents niveaux de pureté atteints sont donnés en annexe B dans la table B.1 en fonction des technologies de production utilisées.

2.4.5 Problématiques liées à la production de l'Hydrogène

La production de l'hydrogène ne va pas sans poser quelques problèmes. Bien que la plupart de ces problèmes aient déjà été rencontrés, éprouvés et traités dans le cadre du déploiement d'autres technologies de l'énergie, ceux liés à l'hydrogène présentent quelques spécificités. Il faut d'abord se poser la question traditionnelle du rendement d'efficacité pour chaque mode de production ; Ils sont respectivement de 72 % pour une production à partir du gaz, 76% à partir du pétrole et 60% à partir du charbon. Les réacteurs nucléaires de quatrième génération fourniraient un rendement proche de 50% alors que le rendement de l'électrolyse se situe en pratique autour de 65%. Ensuite se posera alors le problème du coût de l'hydrogène produit qui dépendra entre autres du coût de la matière première et donc sera plus ou moins chère d'une technologie à l'autre. Sur ce point les technologies seront inévitablement en concurrence frontale. Enfin, il faudra se poser la question sur comment seront gérés le CO_2 issu de la production de l'hydrogène à partir des sources fossiles et les déchets nucléaires. A partir du moment où la question de la gestion du CO_2 produit, s'oriente inévitablement vers sa séquestration dans des cavité naturelles, cela implique de privilégié des modes de production centralisé plutôt que décentralisé.

Les problématiques liées à l'activité de production de l'hydrogène sont donc de quatre ordres :

- Les rendements et efficacités à la production
- La rentabilité économique
- La gestion des gaz à effet de serre et des déchets d'origine nucléaire

– Les risques (inflammation, explosion, mécanique (pressions et températures élevées), toxicité, corrosion, compatibilité des matériaux, biologique, couplage, societal).

2.5 Le stockage de l'hydrogène

Il faut distinguer le stockage de masse et le stockage en petites unités pour des véhicules et des générateurs portables ou stockage embarqué.

1. le stockage de masse utilise de grandes cavités naturelles ou artificielles souterraines, par exemple les anciennes mines. Il favorise un mode de production centralisé de l'hydrogène en grande quantité.
2. le stockage embarqué, de l'ordre de quelques grammes à quelques kilogrammes d'hydrogène, exploite trois filières de technologies en cours de validation ou de développement.

2.6 Le stockage embarqué de l'Hydrogène

Il existe trois filières principales pour le stockage de l'hydrogène :
– Stockage liquide basse température - 253 °C, 5 bars
– Stockage gazeux sous pression
– Stockage solide : Hydrures et nanostructures de carbone.

2.6.1 Le stockage liquide de l'Hydrogène

Ce mode de stockage permet de faire passer l'hydrogène de sa phase initiale de production (gazeuse et basse pression) à sa phase liquide (à 20 K). Il présente l'avantage de permettre de stocker un volume important d'hydrogène. Par exemple un volume de l'hydrogène liquide pèse seulement 10% du poids d'un même volume d'essence. Toutefois ce mode est coûteux en énergie car il faut en dépenser (environ la moitié de l'énergie contenue dans l'hydrogène) pour baisser la température de l'hydrogène gazeux à 20 K. A titre d'exemple, les performances massiques du stockage utilisé par BMW sont les suivantes : pour 9,5 kg d'hydrogène, le réservoir vide pèse 145 kg, soit un ratio de 6,5 %. Cette consommation d'énergie aura pour conséquence de déplacer le bilan énergétique global du système : mode de stockage " énergivore ". En outre les équipements pour abaisser la température des gaz de manière significative coûtent chers.

2.6.2 Le stockage gazeux de l'Hydrogène

Il consiste à porter l'hydrogène à une pression supérieure à la pression atmosphérique, mais le gaz obtenu (entre 200 et 350 bars de pression et 293 K de température) est moins dense que l'hydrogène liquide. Il soulève plusieurs problèmes : la capacité volumique de stockage du gaz qui oblige les voitures à embarquer pour une quantité d'hydrogène peu importante, un réservoir de poids largement supérieur ; les pertes d'hydrogènes par fuite du gaz à travers les matériaux et le coût prohibitif des composites avec fibre de carbone sont autant de difficultés à résoudre pour envisager sereinement une application transport de l'hydrogène.

2.6.3 Le stockage solide de l'Hydrogène

Le stockage sous forme d'hydrures métalliques est une technique bien maîtrisée mais ils sont lourds et ne permettent de stocker que de petites quantités d'hydrogène. En plus de la faible capacité de stockage des hydrures, le prix des métaux et des alliages qui les composent est prohibitif à toute utilisation de masse. Le rapport poids d'hydrogène/poids du réservoir ne dépasse pas 2% à 3%, ce qui n'est convenable que pour de faibles masses d'hydrogène à stocker. Les nanostructures de carbone qui sont encore au stade de recherche promettent une plus grande diversité de stockage.

2.6.4 Problématiques liées au stockage de l'Hydrogène

Comme nous venons de le voir, le stockage de l'hydrogène donne lieu à des manipulations de gaz qui peuvent avoir de conséquences désastreuses. Parce que très peu dense, l'hydrogène doit être comprimé à des pressions très importantes pour être transportable dans un volume raisonnable. Cela pose un problème de sécurité et consomme de l'énergie. Or si cette énergie intermédiaire est d'origine fossile avec risque d'émission de gaz à effet de serre, les avantages environnementaux apportés par l'utilisation de l'hydrogène pourraient être neutralisés dans l'écobilan de l'hydrogène. En outre le coût des matériaux pour fabriquer les réservoirs restent très élevés notamment celui de la fibre de carbone qui offre une meilleure résistance aux fuites. Les technologies de stockage/déstockage ne sont pas encore très bien maîtrisées.

2.7 Distribution de l'Hydrogène

Les dispositifs de distribution dépendent du mode de stockage de l'hydrogène et de son usage. Dans les applications de transport par exemple on privilégiera les réservoirs et les points relais d'approvisionnement spécifique comme les stations services à hydrogène. En revanche pour approvisionner d'autres secteurs et pour des raisons d'économie d'échelle, une production centralisée exigera des installations de type pipelines. De nombreux autres moyens de distributions sont possibles (voir figure 2.7). Pour des applications stationnaires comme l'habitat (éclairage et chauffage), la distribution est quasi inexistante du fait du mode de production centralisée.

2.7.1 Problématiques de distribution de l'Hydrogène

Les problèmes posés par la distribution de l'hydrogène sont ceux liés aux coûts de transport et aux impacts de ces modes de transport aussi bien sur le bilan énergétique global que sur l'analyse du cycle de vie de l'hydrogène. Quel réseau de distribution utiliser ? Faut-il tirer profit et adapter le réseau de gaz déjà existant ou construire de nouvelles installations ? Autant de questions auxquelles les acteurs de la filière hydrogène n'ont pas encore trouvé de solutions définitives.

2.8 Les utilisations de l'hydrogène

Nous avions abordé la question de l'hydrogène essentiellement comme une vecteur d'énergie d'avenir, alors même que le gaz hydrogène est déjà largement employée dans de nombreux secteurs de la société. Cette approche totalement prospective est sans doute liée au fort potentiel de développement et aux nombreux espoirs qui sont placés en ce gaz pour nous permettre de juguler les défauts des énergies existantes. Mais pour une meilleure compréhension de ses applications, il faut présenter ses utilisations actuelles et à venir.

2.8.1 Les utilisations actuelles

Au niveau mondial, l'hydrogène est principalement utilisé sous forme gazeuse pour la fabrication de l'ammoniac (NH_3) à 50%, dans l'industrie pétrolière pour le raffinage à 37%, pour la production du méthanol (CH_3OH) à 8%, et les fabrications chimiques (production de chlore, d'éthylène, de styrène, reformage catalytique) dans la métallurgie (soudure), l'industrie du verre et l'industrie des semi-conducteurs à 4% comme gaz industriel et dans les applications aérospatiales à 1% (propulsion spatiale) comme énergie. L'industrie alimentaire (corps gras insaturés) et l'électronique (cartes à puces) et la production des carburants à faible teneur en soufre en font également usage.

2.8.2 Les utilisations d'avenir

Aujourd'hui l'hydrogène n'est utilisé dans l'industrie comme vecteur d'énergie que de façon marginale (aérospatiale, 1%) mais elle l'est majoritairement dans les industries pétrolières et chimiques. Il existera plusieurs modes d'utilisation de l'hydrogène dans l'avenir :

- Utilisation directe dans les véhicules : peu efficace
  * Moteurs thermiques, mais rendement et rapport puissance poids moyens.
  * PàC (La Pile à Combustible), chère à moins de remplacer le platine
  * Stocké à bord des véhicules dans des réservoirs : lourd et contraignant
- Utilisation indirecte : transition sans heurt vers les PàC
  * Moteurs hybrides, évite un renouvellement complet du parc des véhicules et du réseau de distribution.
- Utilisation dans les industries sous forme énergétique : hors transport
- Utilisation dans les ménages : autoproduction énergétique

Dans la suite, nous nous attarderons sur le cas de la pile à combustible qui, selon les derniers développements des industriels de l'automobile, serait l'application privilégiée pour l'avenir.

2.8.2.1 Les piles à combustible : principe et types

La pile à combustible (PàC)est la technologie privilégiée pour l'application de l'hydrogène énergie dans le transport. Ce regain d'intérêt pour la pile à combustible s'explique essentiellement par des enjeux environnementaux. En effet elle permet de diminuer les polluants locaux et d'augmenter de manière significative les rendements [5]. La pile à combustible est constituée

5. Le rendement d'un moteur électrique (à hydrogène) est largement supérieur à celui d'un moteur thermique, toutes choses égales par ailleurs (taille, puissance, etc)

d'un ensemble de modules qui permettent de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité grâce la réaction d'oxydo-réaction au sein de la cellule électrochimique élémentaire. L'équation qui régit le mécanisme de fonctionnement d'une PàC est la suivante :

$$2H_2 + O_2 \xrightarrow{\textbf{Pile à combustible}} \text{Electricité} + \text{Chaleur} + 2H_2O \tag{2.15}$$

La figure 2.5 décrit le mécanisme de la conversion hydrogène chimique/hydrogène énergétique ainsi que celui du mécanisme inverse.

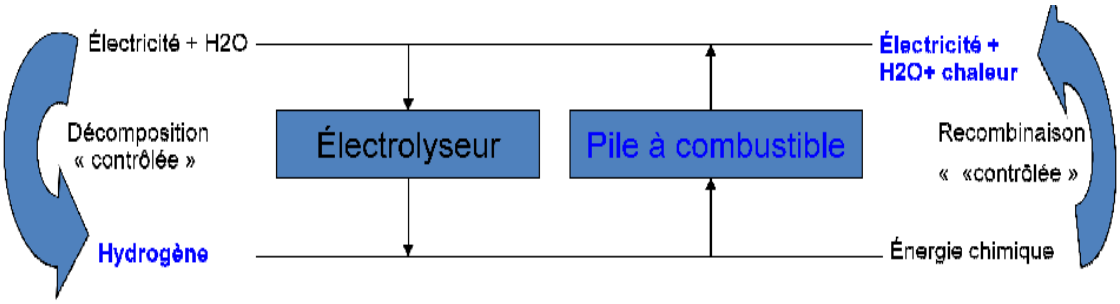


FIGURE 2.5 – Principe du fonctionnement Electrolyseur/Pile à combustible.

Dans la pratique, une cellule élémentaire est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte (liquide dans lequel baignent les électrodes et qui bloque le passage des électrons). La pile est alimentée en **hydrogène** provenant d'un reservoir et en **oxygène** provenant de l'air. A l'anode, l'hydrogène (H_2) réagit en se séparant en deux protons H^+ et deux électrons. Les protons passent à travers l'électrolyte et les électrons à travers le circuit électrique, ce qui crée un courant électrique continu. Ils se recombinent à la cathode avec l'oxygène (O_2) pour donner de l'eau (H_2O). De chaque coté des électrodes se trouvent des plaques bipolaires chargées de collecter le courant (voir figure 2.6) .

Une pile à combustible est constituée de plusieurs cellules élémentaires assemblées les unes aux autres en série ou en parallèle pour former un **stack**. La puissance d'un stack dépend du nombre de cellules et de leur surface et on peut ainsi couvrir un large spectre de puissance de quelques KW à plusieurs MW. Pour réaliser le système tout entier, il faut en plus des compresseurs, pompes, onduleurs, échangeurs de chaleur, systèmes de contrôle-commande, de sûreté de fonctionnement, de stockage et de préparation du carburant.

On distingue plusieurs filières de piles à combustible en fonction de leur température de fonctionnement, de l'électrolyte et de la nature des combustibles :

- Piles à basse température PEMFC avec du methanol (DMFC) ou de l'ethanol(DEFC)
- Piles à acide phosphorique PAFC ou la pile alcaline AFC
- Piles à haute température piles à carbonate fondu MCFC ou à oxyde solide SOFC

En dépit de cette grande diversité des PàC, leurs performances restent faibles et leurs coûts trop élevés (à cause du platine). Grace à un rendement de conversion intéressant, elles pourraient largement trouver leurs applications dans des domaines aussi variés que les navettes spatiales, les applications stationnaires avec cogénération, le transport, les objets nomades et

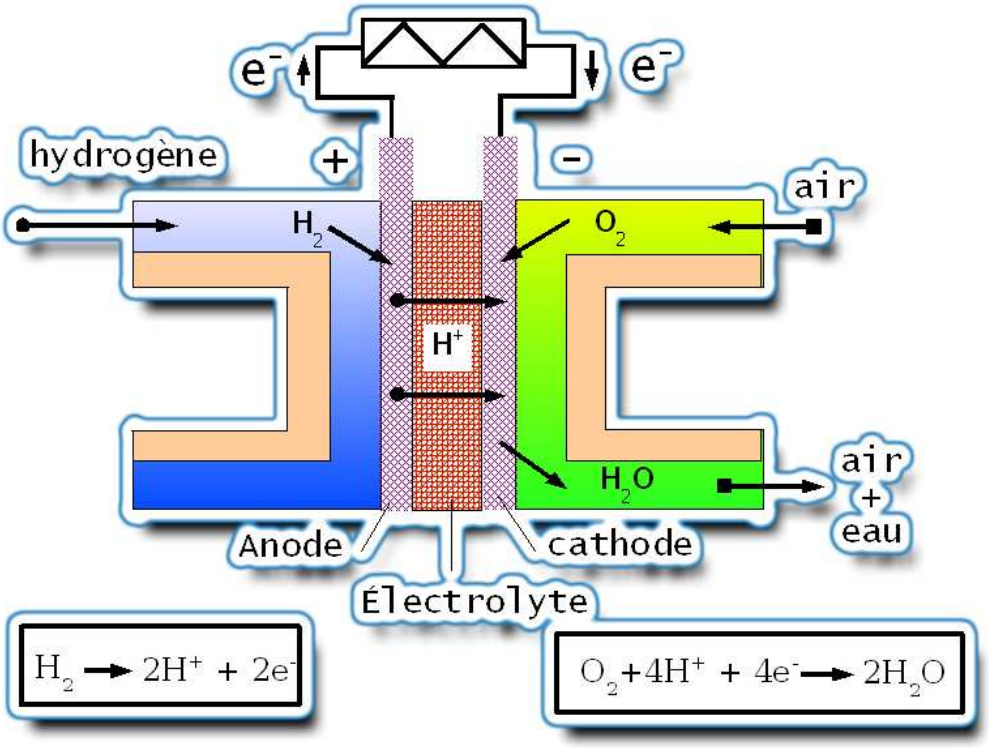


FIGURE 2.6 – Principe du fonctionnement d'une pile à combustible.

communicants. En outre elles ont de faibles émissions sonores et peu d'émissions selon le combustible utilisé. A l'état expérimental, les PàC n'existe pas encore à l'échelle de la production industrielle, sinon sous forme de prototypes dans des voitures test.

2.8.2.2 Les piles à combustible : applications

Les piles à combustible ont de multiples applications que l'on repartit dans les catégories suivantes :

- Automobile : véhicules particuliers, bus, véhicules de golf, etc
- Stationnaire : co-génération de chaleur et d'électricité (résidentiel, bâtiments publics : hôpital, école, résidences) ou générateur de secours
- Portable : téléphone, ordinateur, caméra, matériel de camping ou militaire
- Spatial, bateaux et sous marin

2.8.2.3 Les piles à combustible : avantages et inconvénients

Les piles à combustibles est très souvent présentée comme la meilleure solution pour l'utilisation de l'hydrogène dans le transport et les appareils portables. Ce choix est justifié par de nombreux avantages :

- les rendements énergétiques sont élevés même à charge partielle de 40% à 70% électrique, plus de 85% en tout (électricité et chaleur),
- les émissions sonores faibles,
- les pàc génèrent peu d'emissions (CO, NO_x, particules),
- les pàc ont une structure modulaire,
- les pàc ont diverses températures de fonctionnement,
- les pàc n'ont pas de partie rotative.

En dépit de ces nombreux avantages, les piles à combustible sont encore confinées à des applications pilotes sous forme de prototypes. En réalité, la démocratisation des piles à combustible est encore freinée par de nombreuses faiblesses :

- le prix des pàc ne permet pas encore d'assurer leur compétitivité. Les principaux points d'achoppement sont : le catalyseur en platine, les membranes les plaques bipolaires,etc encore trop coûteux,
- leur poids et leur volume sont dissuasifs pour des applications embarquées,
- leur durée de vie limitée,
- le problème de la valorisation de la chaleur produite ou de son évacuation selon le type de pile et l'application,
- le problème du type de carburant à utiliser dans les pàc

2.9 Problématiques de la chaîne hydrogène

Le déploiement des technologies de l'hydrogène dans un usage énergétique à grande échelle pose un certain nombre de problèmes techniques, économiques, sécuritaires et societaux. Ces problématiques portent sur tout le cycle de vie de l'hydrogène de sa production à son utilisation. Cependant ces problèmes se posent avec plus ou moins d'acuité selon les modes de production (centralisé versus décentralisé) et d'utilisation envisagés. En effet une utilisation directe de l'hydrogène énergie par exemple dans les moteurs à combustion internes pose un problème de volume de stockage alors que sa conversion dans les piles à combustibles se bute plutôt au coût prohibitif des matériaux de stockage. Toutefois, ces problèmes quelques soient les modes de production et d'utilisation, ont quelques invariants caractéristiques des problématiques rencontrées pour chaque activité de la chaîne logistique de l'hydrogène. Ce sont ces invariants que nous avons regroupé dans la table refpch.

Activités	Problématiques
Production	Rendements et efficacité (moteurs et batteries), rentabilité économique (coût de production/kg H_2), gestion des émissions (gaz à effet de serre et déchets nucléaires)
Stockage	Stockage énergivore, pression de stockage (sécurité), espace de stockage (encombrement) coût des matériaux de stockage (matériaux rares), maniabilité (stockage/destockage)
Transport	Quantités, coût, émissions
Distribution	Problématiques de transport et de stockage
Utilisation	Disponibilité des appareils, sécurité, acceptabilité

TABLE 2.3 – Problématiques de la chaîne hydrogène

2.10 Les voies transverses à l'hydrogène

La sûreté de fonctionnement des installations et des équipements, la sécurité liée aux points critiques du cycle de vie de l'hydrogène posent assurément des problèmes de normes, réglementations, formation et acceptabilité sociale de l'hydrogène.

Bien que les normes et techniques de sécurité en matière de gaz soient maîtrisées, le gaz hydrogène présente un risque d'inflammabilité et d'explosivité élevé. Il est plus difficile à détecter parce qu'il est inodore et non odorisable. Cette thèse est confirmée par Moy [Moy,] qui associe 22% des accidents industriels dus à l'hydrogène à des fuites non détectées et ce en dépit des procédures standards, des équipements de protection et des détecteurs électroniques de flamme et de gaz fournis au travailleurs spécialistes de l'hydrogène [Moy,]. S'appuyant sur ce constat, il attire l'attention sur la responsabilité pénale sur les produits dangereux et les implications qu'elle pourrait avoir en termes économiques. C'est le cas notamment des coûts supplémentaires dus aux primes d'assurance aux USA.

D'un autre côté, il faut donner au grand public des éléments pertinents pour dédouaner l'hydrogène de la responsabilité de la catastrophe provoquée par la destruction très spectaculaire du dirigeable Hindenburg [6] à Lakehurst(1937). C'est de cette manière que la perception du public pourrait évoluer et rendre possible l'acceptation de l'hydrogène comme vecteur énergétique sûr. D'où la nécessaire articulation entre innovation technologique et organisation sociale [Bijker and al, 1989], [Bijker and Law, 1994] pour aboutir à un "compromis socio-technique" [Latour and Woolgar, 1979] entre les différentes parties prenantes. Cette démarche est le fruit de négociations et de débats entre les acteurs de la filière technologique en question.

2.11 Charte graphique de la chaîne intégrée de l'hydrogène

Après avoir examiné dans les sections précédentes tous les éléments de la chaîne hydrogène, nous avons construit une charte graphique de la production à l'utilisateur final. Elle regroupe dans la figure 2.7 toutes les informations pertinentes dans la compréhension de la filière hydrogène.

Au final, cette charte graphique nous permettra de quantifier certains paramètres de chacune des étapes de la chaîne hydrogène. Par exemple pour une consommation de l'hydrogène dans le transport, et pour un taux de pénétration donné, nous pourrions selon des règles de calcul bien précises, déterminer et quantifier avec précision les éléments suivants :

- les modes de transport et de stockage privilégiés
- le nombre de station service engendré
- l'impact sur la facture énergétique
- la répartition de la production en termes de bouquet énergétique
- le nombre éventuel de tranches nucléaires induites
- etc.

6. Dirigeable Zeppelin LZ 129 Hindenburg, aéronef commercial allemand à hydrogène détruit par un incendie, le 6 mai 1937. Plusieurs hypothèses furent émises pour justifier cet accident, mais une zone d'ombre subsiste.

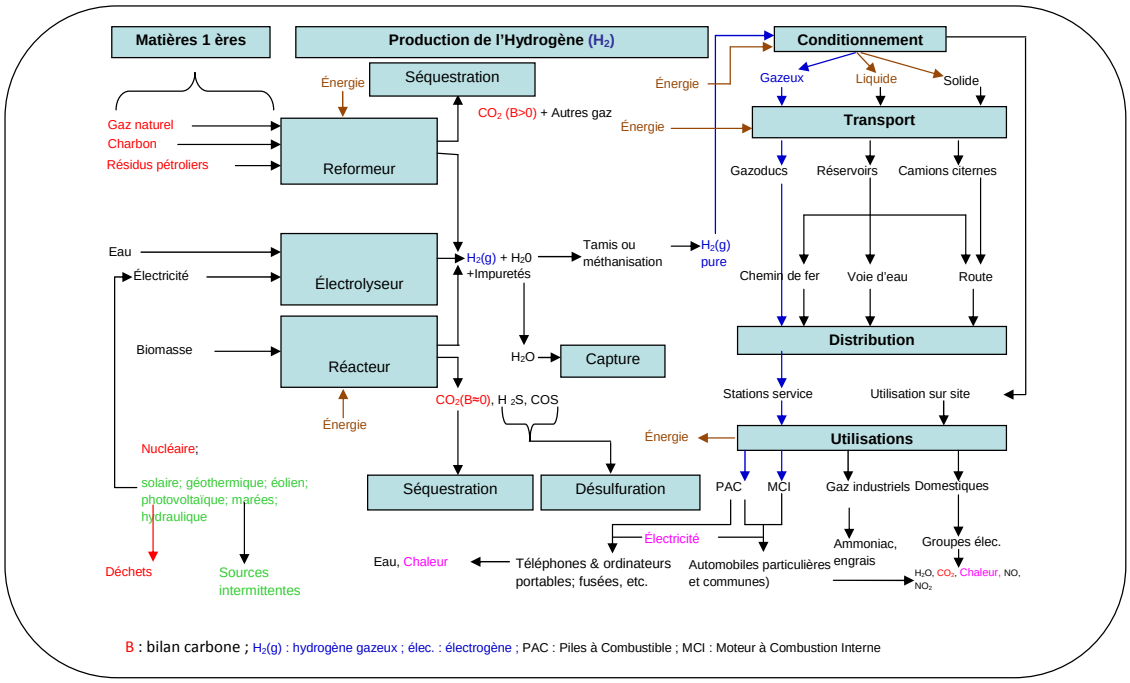


FIGURE 2.7 – Processus de la chaine verticale de l'Hydrogène (de la matière première au consommateur final).

Ainsi elle nous révèle quelques indicateurs qui sans doute interviendront dans la suite lorsqu'il faudra évaluer les scénarios des technologies de l'hydrogène. Dans ce chapitre, ils ne sont donnés qu'à titre indicatif car ils feront l'objet de développement détaillés dans le chapitre 4.

2.12 Acceptabilité sociale

2.12.1 Présentation

Les préoccupations environnementales et le souci de faire prochainement face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles ont poussé certains pays à commencer à réfléchir sur des scénarios alternatifs. Les pays européens en général et la France en particulier appuient de nombreuses études sur les nouvelles technologies énergétiques capables de répondre à ces préoccupations actuelles et futures. Mais rien ne garantit que les populations de ces pays adhèrent et acceptent d'utiliser ces technologies énergétiques. C'est le même problème qui se pose pour l'introduction de l'hydrogène comme vecteur d'énergie.

Dans cette section, nous essayerons d'abord de comprendre ce que recouvre exactement la notion d'acceptabilité sociale. Ensuite nous ferons une analyse de la littérature sur l'acceptabilité sociale des nouvelles technologies en général et celle de l'hydrogène en particulier.

2.12.2 Définition et problématique

Dans les pays développés où la société civile joue un rôle de plus en plus important, il devient difficile voire impossible de développer de nouvelles technologies sans réfléchir à leur acceptabilité sociale. Cette notion d'acceptabilité sociale a été diversement interprétée selon les études qui les abordaient et les technologies dont elle faisait appel. En outre, les méthodes de mise en oeuvre d'une étude d'acceptabilité sont diverses. Néanmoins, notre analyse d'une dizaine d'études nous a permis de dégager quelques éléments consensuels de l'acceptabilité sociale. En sociologie, l'acceptabilité sociale se définit comme l'étude des attitudes et des contraintes sociales et normatives conduisant les usagers à recourir effectivement à l'acceptation et à l'utilisation d'une technologie [Somat, 2008]. Ce qu'il faut retenir de cette définition, c'est la nuance qu'il y a entre mettre en place un processus pour clarifier les critères et les indicateurs de l'acceptabilité [7] (ce qui nous intéresse) et faire accepter ou obtenir l'adhésion des populations (ce qui est exclu de notre champ d'investigation). Dans la littérature, Alain Somat [Somat, 2008] affirme que plusieurs facteurs permettent de mesurer le niveau d'acceptabilité d'une nouvelle technologie :

- *l'utilisabilité et l'attrait [Kruigen and Groegen, 1993]*
- *le confort et le bénéfice [Becker et al., 1995]*
- *la facilité et la fréquence d'utilisation [Crosby et al., 1993]*
- *l'évaluation de l'information sur le contenu, le format, la pertinence, la précision [Schoffer and al, 1993]*
- *l'exactitude [Crosby et al., 1993], [Schoffer et al., 1993]*
- *l'efficacité de l'information [Michon and Mc Loughlin, 1991]*
- *l'intention d'achat [Crosby et al., 1993], [Schoffer et al., 1993]*
- *le prix à payer [Barham et al., 1993]*

D'après ce dernier, l'acceptabilité sociale est une des trois dimensions à prendre en compte lorsqu'on étudie l'usage d'une technologie nouvelle en plus de son utilité (conception) et de son utilisabilité (ergonomie). Brunson [Brunson, 1996] quant à lui donne une définition plus intuitive de la l'acceptabilité et qui est calqué sur un jugement de comparaison. Selon lui, c'est un processus de jugement par lequel "*les individus, (1) comparent la réalité perçue avec ses alternatives connues et, (2) décident si la condition réelle est supérieure, ou suffisamment similaire, à la plus favorable condition alternative*". Il précise que l'acceptabilité sociale fait référence à un ensemble de consentements publics dans lesquels les jugements sont partagés et articulés par un segment identifiable et politiquement significatif de la population. Il en résulte donc que l'acceptabilité sociale fait appel à des perceptions, valeurs, et attitudes diverses des individus pour essayer d'en faire une synthèse. Pour Stankey [Stankey, 1996], [Stankey and Shindler, 2006], l'acceptabilité sociale est bien plus qu'un jugement de comparaison. Il repose plutôt sur un choix de tolérance où la société accepte une technologie qui n'amplifie pas la dégradation de certaines conditions (environnementales par exemple) jugées critiques. Pour terminer sur ce point, notons que certaines études polémiques voient en ce concept d'acceptabilité sociale

7. Cette nuance fonde la différence entre un **processus d'acceptabilité** et un **processus d'acceptation**. Le premier permet d'évaluer (par anticipation) les probabilités d'appropriation d'une technologie sur certaines dimensions pour en limiter les risques de rejet. Le second analyse les usages et pratiques réels, l'expérience vécue pour comprendre les mécanismes d'appropriation d'une technologie dans l'usage sur d'autres dimensions.

une façon de "*faire avaler la pilule*" aux individus, la situant "*entre marketing et propagande*" [Clark and Lane, 2008]

En plus nous pouvons affirmer que l'acceptabilité d'une technologie dépend très fortement du contexte [Heiskanen et al., 2007].

2.12.3 Méthodologies

Selon le domaine d'étude, plusieurs méthodologies ont pu être mises en oeuvre dans les études d'acceptabilité :

- l'état de l'art
- les études socio-historiques
- les enquêtes par questionnaires
- les focus groups
- les recherches expérimentales de laboratoire
- les recherches expérimentales après mise en situation
- la surveillance automatique du comportement des utilisateurs
- la science-fiction

2.12.4 Présentation des études d'acceptabilité sur l'hydrogène

De nombreux programmes ont été développés dans plusieurs pays pour favoriser l'émergence d'une filière énergétique basée sur l'hydrogène comme vecteur d'énergie. Des projets pilotes et de démonstration dans les pays comme le **Canada**, les **États-Unis**, l'**Allemagne**, le **Japon** et l'**Islande** [Bouallou et al., 2010], ont démontré la faisabilité technique de la filière hydrogène. Cependant ils n'ont pas fait l'impasse sur une étude sociale de l'acceptabilité des nouvelles technologies de l'hydrogène énergie. C'est pays ont conduit des projets intégrant à la fois des aspects techniques et societaux.

2.12.4.1 Etude américaine

Aux **États-unis**, un projet d'étude de l'acceptabilité sociale de l'hydrogène appelé "H_2 *and you*" menée en 2004 et 2008 avait pour but de sensibiliser l'opinion publique sur la réalité de l'hydrogène. En particulier il devait permettre de familiariser le grand public avec les thématiques de l'hydrogène à travers la diffusion d'un faisceaux d'information par les médias, les industriels et internet et d'en mesurer les répercussions en termes de perception (positive ou négative). Cette étude portait sur cinq populations cibles : (1) le grand public, (2) les étudiants, (3) le personnel de l'état et des collectivités locales, (4) les utilisateurs finaux de l'hydrogène en tant que carburant et des piles à combustibles dans les entreprises et l'industrie, (5) le personnel de la sécurité et normes. La méthodologie utilisée était celle des enquêtes par questionnaires fermés à travers des interviews téléphoniques assistées par ordinateur. En pratique les questions portaient sur la perception (sécurité) de l'hydrogène, son mode de production et de distribution. Au terme de ce projet, il a été constaté une forte corrélation entre la connaissance de la technologie de l'hydrogène et son acceptation et que la temporalité bonifie la perception. En effet la perception a positivement évolué entre 2004 et 2008. Enfin l'autre élément important de cette

étude fut la hiérarchisation des composantes importantes de l'acceptabilité sociale : sécurité, coût, environnement et praticité ont été retenus dans cet ordre.

2.12.4.2 Etude japonaise

Une étude similaire a eu lieu au **Japon** (entre 2002 et 2004 à Yakushima, Tokyo et Kanagawa) mais portant sur trois catégories d'acteurs seulement, (1) les collégiens, (2) le grand public, et (3) les responsables de la flotte automobile de certaines entreprises. Dans cette étude, l'utilisation de l'hydrogène est envisagée dans le transport comme pile à combustible. Le mode opératoire par sondage est resté le même seule la façon d'interviewer les acteurs a changé : le grand public par sondage de rue, les décideurs par mail, et les collégiens par présentation du projet dans les établissements scolaires. Les questions portaient sur trois items : la connaissance, la perception et l'acceptation du grand public sur les piles à combustibles. Des conclusions similaires à celles obtenues pour le projet "H_2 *and you*" ont été tirées. Autrement dit forte corrélation entre connaissance et perception et entre perception et acceptation.

2.12.4.3 Etude canadienne

Le **Canada**, autre pays à se pencher avec sérieux sur les problématiques de transition énergétique, a préférer s'orienter vers des technologies qui permettent d'intégrer directement l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne. Un projet de démonstration d'un bus "H_2-MCI" , avec un moteur à combustion interne à hydrogène à la place des carburants conventionnels, a été réalisé en 2005. Une approche par sondage basée sur la collecte de la perception des utilisateurs du bus "H_2-MCI" et s'appuyant sur les éléments de confort du bus et de l'hydrogène comme combustible a été mise en oeuvre. Les résultats de cette étude indiquent plusieurs points positifs lorsque que les utilisateurs comparent un bus "H_2-MCI" et un bus traditionnel, notamment en termes de confort.

2.12.4.4 Etude allemande

En **allemagne**, deux études ont permis de se confronter à l'acceptabilité sociale de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie : le projet AcceptH_2 et le projet HH_2. Le premier (AcceptH_2) avait pour but d'évaluer le niveau d'influence des projets de démonstration de bus à hydrogène dans la ville de de Berlin (2004). La méthode utilisée est basée sur des sondages réalisés par téléphone avant l'introduction des bus à hydrogène (pré-introduction) et après leur introduction (post-introduction). L'étude démontre que les associations positives (environnement) et négatives (bombe à hydrogène) s'équilibrent. Ensuite elles ont permis de comprendre que le mode de distribution souhaité par les utilisateurs sont les stations services. Enfin, la majeure partie des personnes interrogées était prête à payer plus sous certaines conditions.

2.12.4.5 Etude islandaise

Ensuite, l'**islande** qui est un pays fortement engagée dans la voie de l'hydrogène-énergie, a réalisé dans sa capitale (Reykjavik) le projet ECTOS (Ecological City Transport System) entre 2001 et 2005 pour démontrer l'utilisation de l'hydrogène comme combustible. Des passagers

à bord d'un bus à hydrogène et d'autres à bord d'un bus diesel empruntant le même tronçon ont été sondés sur la base d'un unique questionnaire. Une large majorité (92%) était favorable à l'introduction de bus à hydrogène même lorsqu'il fallait payer plus cher que l'essence. Cependant la moitié des répondants avait des appréhensions sur la sécurité de l'hydrogène autant que sur son coût réel.

2.12.4.6 Etude française

Parmi ce groupe de pays, nous pouvons citer la France qui est un cas à part dans ce sens qu'elle a conduit un sondage qui n'était pas lié à un projet pilote industriel en grandeur nature. L'Association Française de l'Hydrogène (AFH2) a réalisé deux sondages sur l'hydrogène : l'un à Paris (septembre 2008) visant un public plus large et l'autre à Lyon (décembre 2008) dans un salon de personnes avisées sur les technologies et services des énergies renouvelables et de l'environnement. Ils ont permis de recueillir à cette échelle là, les connaissances des sondés sur l'hydrogène ainsi que leur perception de ce vecteur.

2.12.5 Discussion des études présentées

La portée de l'étude américaine sur l'acceptabilité de l'hydrogène est essentiellement pédagogique. Elle s'intéresse à l'hydrogène énergie d'une manière générale et vise plutôt à déterminer les facteurs qui caractérisent sa perception et ses composantes. Notamment en identifiant une relation entre connaissance et acceptation, la dynamique de la perception et donc de l'acceptation. Elle ne s'appuie sur aucun scénario technique donc la faisabilité est éprouvée du moins dans les études de laboratoire. Toutefois elle est la plus exploitable dans une démarche d'évaluation du fait de la structure hiérarchique des composantes de la perception qu'elle fournie. L'étude japonaise se limite sur une des applications (les PàC) de l'hydrogène certes la plus connue, mais qui n'est pas représentative de toute la filière hydrogène. L'étude canadienne se veut plus réaliste car elle offre la possibilité de limiter les effets d'une transition vers l'hydrogène par son intégration dans les systèmes déjà existant. Partant, elle pourrait être encline à moins de résistance de la part des sondés du fait qu'elle bouleverserait très peu leurs habitudes. Les études allemande et islandaise visent l'application transport de l'hydrogène très probablement sous forme de piles à combustible. Elles présentent l'avantage d'avoir sondé des personnes au plus près de la technologie, les utilisateurs directs des bus à hydrogène. En revanche la part de la perception liée exclusivement à l'hydrogène n'est pas clairement identifiée par les personnes interrogées. Seule la mention de l'absence de bruit dans les bus à hydrogène apparaît constamment dans les résultats. Mais cela aurait aussi pu être le cas avec les bus électriques.

Mais aucun des projets décrits ci-dessus ne prend en compte, dans son étude sur l'acceptabilité de l'hydrogène, la totalité des composantes de la filière hydrogène, de la production à l'utilisation finale telle que nous l'avons formalisée sur notre charte graphique (voir figure 2.7). En outre, ces études utilisent grosso modo les sondages, dont il faut relativiser la portée des résultats par rapport à la taille et à la représentativité de l'échantillon de personnes sondées (de quelques dizaines au millier suivant les projets). En plus il faut tenir compte de l'approche contextualiste de ces études qui les limite à des applications circonscrites et locales.

Néanmoins on a pu dégager quelques déterminants communs à ces études :

- **Invariance des principales composantes de la perception de l'hydrogène : sécurité, environnement, économie, disponibilité**
- **Corrélation entre les connaissances et la perception de l'hydrogène**
- **Corrélation entre la perception et l'acceptation de l'hydrogène**
- **Disposition à se contraindre (payer plus cher, limiter son autonomie, changer ses habitudes, etc) sous certaines conditions pour utiliser l'hydrogène**.

Nous avons présenté un panorama des études d'acceptabilité sociale de l'hydrogène dans les principaux pays où l'hydrogène est promis à jouer un rôle important dans le système énergétique. Elles sont pour la plupart européennes et nord-américaines à l'exception du japon. Notre analyse de ces études nous conduit à dresser une typologie des études d'acceptabilité de l'hydrogène en fonction du moment de l'introduction de l'hydrogène dans le circuit de consommation grand public. Nous avons distingué **trois types d'études** menées dans plusieurs pays :

1. **Etude d'acceptabilité pré-introduction (États-Unis)**
2. **Etude d'acceptabilité post-introduction (Canada, Islande, Japon)**
3. **Etude d'acceptabilité pré-introduction et post-introduction (Allemagne)**

Chacun de ces types d'études présente d'indéniables inconvénients. Une étude pré-introduction peut introduire un biais de perception car elle n'est pas tout à fait neutre par rapport à la perception finale que le grand public pourrait avoir vis-à-vis des technologies de l'hydrogène. Elle se fonde uniquement sur des hypothèses qui s'inspirent des modèles économiques de demande en énergie et des prévisions de maturation des technologies, c'est-à-dire du potentiel de la recherche et du développement (R&D). Si l'étude s'inscrit dans le cadre d'un projet pilote, alors elle peut être plus ou moins bien perçue selon que le projet a été ou non une réussite, et par conséquent faire l'objet d'une adhésion ou d'un rejet par le grand public. Dans certains cas, ce type d'étude a pu être considéré comme une façon de faire "passer la pilule" des technologies [Clark and Lane, 2008] potentiellement détestables par le public en s'inspirant des méthodes marketing. Mais cette crainte est occultée par la présence d'acteurs rassurant tels que les pouvoirs publics et les chercheurs dans les équipes d'études. En revanche elle permet de mesurer le potentiel d'acceptabilité sociale de l'hydrogène. A l'inverse, une étude post-introduction permet d'avoir une mesure effective de l'acceptabilité en s'appuyant sur le retour d'expérience des usages ciblés des technologies de l'hydrogène dans des cas concrets même lorsque ceux-ci sont limités à des démonstrations pilotes. En dépit de ces inconvénients, très peu d'apriorismes négatifs de la part du public vis-à-vis de l'hydrogène ont pu être décelé quelque soit le type d'étude envisagé. En l'occurrence, La catastrophe retentissante du Hindenburg, due à l'inflammation du dirigeable éponyme n'a pas fait l'objet d'une évocation massive de la part des publics cibles (voir [Archbold and Marschall, 1994] pour une revue détaillée de cette catastrophe).

La démarche que nous avons adoptée pour le projet AIDHY, repose sur la modélisation CPAE (voir chapitre 1), qui englobe les approches pré-introduction et post-introduction pour l'étude de l'acceptabilité sociale de l'hydrogène. Elle doit permettre d'évaluer par anticipation les scénarios des technologies de l'hydrogène, mais elle doit aussi intégrer un mécanisme de révision de la perception dans le cas d'une étude ex post. Elle s'appuie sur l'identification des

préoccupations du grand public et des conséquences de la prise en compte de ces préoccupations dans l'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène. Elle repose non pas sur un simple sondage pour orienter les politiques de développement de l'hydrogène, mais sur une prise en compte réelle et structurée des composantes de la perception du grand public par rapport à l'hydrogène.

2.13 Conclusion du chapitre 2

Nous avons utilisé l'analyse structurelle pour structurer la réflexion collective du problème de l'hydrogène énergie afin de déterminer les variables clés (présentes et futures) ainsi que les relations (présentes et futures) entres ces variables. En partant des connaissances actuelles sur l'environnement global des technologies et recherches sur l'hydrogène, nous avons défini **les principales informations nécessaires pour appréhender le problème d'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène**.

La définition ultérieure de la problématique décisionnelle doit tenir compte des différentes problématiques de la chaîne hydrogène telle qu'elle ont été présentées dans ce chapitre (cf. table 2.3). En particulier ce travail sera basée sur une logique conjonctive qui vise à relier les problématiques entre elles plutôt qu'une logique disjonctive qui viserait à les séparer.

En outre le modèle de décision doit intégrer les contraintes liées aux limites technologiques, économiques et environnementales. Elles doivent prendre en compte d'une part des hypothèses économiques permettant de produire des solutions technologiques viables et compétitives, et d'autre part des hypothèses techniques permettant de produire des scénarios qui ne soient pas farfelus. Compte tenu de la dynamique du modèle, ces contraintes doivent être suffisamment souples pour permettre d'intégrer tout événement inattendu dans les scénarios. Enfin il s'agit de répondre à une double dynamique : une dynamique interne aux scénarios qui est liée au fait qu'ils sont constitués de technologies non encore matures, donc sujet à évolution ; et une dynamique externe aux scénarios qui est liée à la perception que le grand public a des technologies de l'hydrogène, donc des scénarios encapsulant ces technologies et qui est évolutive par nature.

Nous avons regroupé les variables importantes obtenues à partir de l'analyse structurelle, **dans un schéma intégrée de la chaîne de l'hydrogène de sa production à son utilisation finale** (cf. figure 2.7) qui regroupe **les différentes activités du cycle de vie de l'hydrogène utilisé comme vecteur d'énergie**. C'est sur la base de cette représentation graphique que nous développerons, dans la suite, notre modèle d'évaluation.

Enfin il est apparu dans notre étude de l'existant sur l'acceptabilité sociale qu'elle relève d'un pronostic d'usage dans lequel l'utilisateur est invité à établir une évaluation ou des coûts-bénéfices sur un certains nombre de critères. Cette évaluation pouvant être faite soit par anticipation (ex ante [8]), soit après coup (ex post [9]). Cette étude nous a permis de dégager une typologie des approches d'acceptabilité en fonction du niveau d'analyse : deux grandes approches se dessinent. Une première approche s'intéresse aux représentations des personnes face aux technologies futures ou possibles de l'hydrogène ; elle relève du processus d'acceptabilité pré-introduction. Le postulat sous-jacent pose l'individu comme un être capable de se

8. expression latine signifiant "avant l'action", s'applique à une évaluation réalisée avant l'exécution d'un projet
9. expression latine signifiant "après coup", relatif à une évaluation ayant lieu après exécution d'un projet

représenter et de comparer par anticipation un grand nombre d'événements possibles d'une situation nouvelle. L'utilisateur est donc appréhender selon un modèle rationnel. Ce dernier est appelé a établir une évaluation par anticipation des coûts-bénéfices sur un certains nombre de dimensions de la technologie (sécurité, environnement, économie, disponibilité, etc.). Une seconde approche se focalise plus sur le vécu des personnes suite à l'introduction des nouvelles technologies de l'hydrogène dans des projets pilotes ; elle relève du processus d'acceptation post-introduction des technologies. Elle met l'accent sur un modèle de rationalité de l'utilisateur différente du précédent et qui s'intéresse aux impressions issues des expériences vécues dans des situations réelles avec les technologies. L'individu n'est plus un calculateur « rationnel» a priori mais une personne qui interprète et réagit aux caractéristiques de la technologie et de l'environnement. Chaque contexte d'implantation des technologies possède ses propres règles (formelles et informelles), chaque individu va interagir avec sa propre personnalité, sa culture. Cette approche s'intéresse aussi plus au processus d'acceptation effective. Les différents contextes psychosociaux dans lesquels s'ancrent les technologies sont privilégiés dans l'analyse. En dépit de cette différence dans les approches d'acceptabilité sociale des technologies de l'hydrogène, des déterminants communs les rapprochent. Il s'agit par exemple des principales composantes de la perception de l'hydrogène, de la corrélation entre les connaissances sur les technologies et leur perception (sous-modèle CP du modèle CPAE voir chapitre 1), de la corrélation entre la perception et l'acceptation de l'hydrogène (sous-modèle PA du modèle CPAE voir chapitre 1).

Chapitre 3

Contexte décisionnel : Structuration des Problèmes et Aide Multi-critère à la Décision

"The most ambitious approach is to link together differents parts from several methodologies, creating a design specific to the particular situatuion...And so multimethodology [employing more than one method or methodology] is necessary to deal effectively with the full richness of the real world".

John Mingers

Extrait de : "Rational Analysis for a Problematic World Revisited" (2001)

"... nous nous sommes efforcés de donner à ce schéma une valeur pratique, ce qui nous a conduit à faire un compromis entre la rigueur mathématique et le réalisme des situations concrètes, quitte à sacrifier délibérément celle-là à celui-ci. Il en est résulté un ensemble de règles mi-qualitatives, mi-quantitatives qui, énoncé dans le langage des affaires, est directement utilisable pour résoudre les problèmes qui se posent effectivement aux dirigeants ...".

Igor Ansoff

Extrait de : "Corporate strategy : An analytic approach to business policy for growth and expansion" 1965. Version française : Stratégie du développement de l'entreprise, Hommes et Techniques, (1968)

Au début du projet AIDHY, nous n'avions que très peu de connaissances sur l'hydrogène. Tout juste pouvions nous dire qu'il s'agit d'un gaz en nous référant à nos lointaines connaissances des études secondaires. Nous étions loin d'imaginer son utilisation comme énergie, du moins pour ce qui est de son usage à grande échelle et de ses implications technologiques, sociales et économiques. Nous nous sommes lancés dans l'étude de l'abondante littérature technique sur l'Hydrogène. Nous avons également largement consulté quelques experts de l'hydrogène avec lesquels nous travaillions dans ce projet.

Le chapitre précédent nous a permis de rassembler les billes sur l'hydrogène-énergie et d'appréhender l'objet de notre étude dans toutes ses dimensions. Plus précisément, nous y avons présenté la production, le stockage, le conditionnement, le transport et les usages de l'hydrogène. Nous avons également lorsque cela était possible, présenté les problématiques intéressantes de chaque étape de cette filière énergétique. Nous sommes parvenus à élaborer sur la base de ces informations et des conseils avisés des experts, une charte graphique validée de la chaîne hydrogène. De nombreuses autres représentations de la filière hydrogène existent, mais elles ne sont ni exploitable ni opérationnel dans un contexte qui consisterai à aider un individu à décider de manière rationnelle. C'est donc pour cette raison que nous avons jugé nécessaire de proposer une représentation qui s'inscrive dans une perspective d'aide multicritère à la décision. Aussi, nous allons présenter dans ce chapitre les éléments importants qui fondent notre approche méthodologique pour résoudre le problème qui nous est posé.

Nous présenterons d'une part quelques méthodes de structuration des problèmes de décision d'autre part nous présenterons quelques paradigmes de l'analyse multicritères avec ses méthodes emblématiques. Enfin nous essayerons de montrer le type et le niveau d'articulation que nous pouvons faire entre les deux, analyse multicritère et structuration, au regard du problème de décision que nous avons à résoudre.

3.1 Méthodes de structuration des problèmes de décision de groupe

La structuration du problème de décision est une étape importante dans un processus d'aide à la décision. Même si cette étape ne recouvre pas toujours la même réalité, à peu près tous les auteurs ([Winterfeldt, 1980], [Woolley and Pidd, 1981], [Volkema, 1988], [Tsoukiàs, 2007a], [Rosenhead and Mingers, 2001], [Bouyssou et al., 2006], [Keeney and Raiffa, 1976b], etc.) s'accordent pour l'intégrer à un moment ou un autre dans leur processus de décision. C'est seulement à partir du moment où on a constaté des difficultés des méthodes classiques de recherche opérationnelle à résoudre certains problèmes que des chercheurs se sont tournées vers les méthodes de structuration. Que recouvre donc exactement cette dernière expression ?

Simon [Simon, 1956] a défini la prise de décision comme un processus comportant trois étapes : l'intelligence, la conception et le choix. L'étape d'intelligence consiste à déterminer si le problème en question nécessite une décision. C'est une façon de se demander s'il y a vraiment un problème. Une réponse par l'affirmative à cette question commanderait de déployer quelques activités pour rassembler les informations. Une fois que le problème de décision est identifié, on passe à la phase de conception. C'est cette phase de conception qu'il considère comme la structuration du problème et qui aboutit à l'identification des alternatives, critères et attributs. La troisième phase est celle qui permet de réaliser la problématique du décideur.

3.1.1 Méthodes de structuration et typologie des problèmes

A la base, les méthodes de structuration des problèmes servent de support à l'analyse des problèmes. Elles se démarquent des méthodes de résolution des problèmes de la recherche opérationnelle classique qui focalise son attention sur la recherche de la meilleure solution. Elles ne font pas l'hypothèse très classique qui consiste à dire que le problème et les solutions existent à priori, préférant s'interroger sur ce qu'est le problème à résoudre : « what the problem is » [Rosenhead and Mingers, 2001]. En réalité l'approche classique et l'approche de structuration ne sont pas opposées, c'est juste la nature des problèmes qu'elles adressent qui les distinguent. En effet pour les théoriciens des méthodes de structuration des problèmes, la recherche des bases scientifiques pour résoudre les problèmes est limitée par la nature des problèmes. toujours selon eux, il existe plusieurs types de problèmes :

1. Les problèmes bien définis pouvant avoir une formulation exhaustive, contenant toutes les informations nécessaires pour le couple analyste-décideur pour le comprendre puis le résoudre. Ces problèmes sont du domaine de la recherche opérationnelle classique. Ils peuvent se laisser appréhender par les méthodes scientifiques et de ce fait sont aussi appelés « tame [1] problems » [Rittel and Webber, 1973]. Ces mêmes auteurs ont définis les caractéristiques de ce type de problème :

   - *Ils ont une formulation bien définie et stable*
   - *Ils possèdent une phase ultime où on peut dire si la solution est atteinte*
   - *Ils possèdent des protocoles scientifiques pour trouver leurs solutions*
   - *Ils possèdent une solution qui peut être objectivement évaluée comme vraie ou fausse*
   - *Ils appartiennent à une classe de problèmes qui peuvent être résolus de la même manière*
   - *Ils ont des solutions qui peuvent être essayées puis être abandonnées*

2. Les problèmes mal définies [2] sont complètement différents des précédents. Ils ont des concepts qui n'ont pas de définition ni objective, ni consensuelle. Leur résolution n'aboutit pas toujours in fine à une solution optimale. Ackoff [Ackoff, 1979] propose de changer carrément de paradigme pour ces problèmes. Il oppose ce qu'il appelle « messes» aux problèmes tels qu'ils sont définis à l'item précédent. Selon lui les problèmes doivent être "résolus" alors que les "messes" doivent être "gérés". Horn a repris ces idées [Horn, 2001] pour définir les critères de ce qu'il a appelé plus largement « social mess » :

   - *Aucun consensus n'existe sur ce qu'est le problème*
   - *Chaque tentative de trouver une solution change le problème*
   - *La solution ne peut pas être évaluée par "vrai" ou "faux" mais uniquement par "mieux", "pire", "suffisant", "bien", "mauvais", etc.*
   - *Chaque partie prenante a probablement une idée différente de ce qu'est le problème réel et de ses causes*
   - *L'arrêt du processus de résolution est déterminée par les parties prenantes, les forces politiques, la disponibilité des ressources ou une combinaison des précédentes*

1. apprivoiser en français, pour dire que ces problèmes sont apprivoisés, maîtrises
2. ill-defined ou wicked problems, en anglais

- *Les solutions du problème sont basées sur les "jugements" des parties prenantes*
- *Il n' existe pas de "meilleures pratiques"*
- *Chaque tentative de résolution compte et a des conséquences sur le problème à résoudre [Rittel and Webber, 1973].*
- *Chaque solution est unique et sur mesure* [3] *sans possibilité d'apprendre par essais et erreurs ;*

Cette dichotomie observées dans les problèmes a permis de regrouper les méthodes pour l'analyse des systèmes en deux groupes [Checkland, 1981] : les méthodes dites dures ou "hard" qui s'attaquent au premier type de problèmes et les méthodes dites souples ou "soft" qui s'intéressent au deuxième type de problèmes.

Cependant, dans la réalité, cette dichotomie des problèmes n'est pas totale et exclusive. Certains problèmes apparemment bien définis peuvent être par certains aspects très mal structurées. Les problèmes d'optimisation sont des exemples de tels problèmes. Un modèle d'optimisation suppose la définition de l'espace des solutions, du système des contraintes et la mesure des performances comme fonction des variables de décision. Si le problème de départ est manifestement bien formulé en soi, établir l'espace des solutions et ses contraintes et construire les performances sont des étapes mal définies de ce problème. Pour cette raison, nous pouvons dire que les méthodes "hard" et "soft" sont complémentaires. Par exemple les outils relevant des méthodes "soft" peuvent aider à structurer l'analyse en vue d'une application dans un processus "hard". C'est précisément cette dernière remarque qui nous intéressent et que nous comptons mettre à profit pour structurer notre problème de décision sur l'hydrogène.

Dans la suite nous présenterons quelques méthodes de structuration des problèmes. Nous nous attarderons en particulier sur les méthodes de structuration des problèmes de **décision de groupe**. En effet l'accent est mis sur cette typologie de méthodes de structuration parce qu'elle convient mieux à notre contexte décisionnel (voir chapitre 4 section 4.1).

3.1.2 Méthodes de structuration

Il existe de nombreuses méthodes de structuration des problèmes dans la littérature donc certains ont été utilisées pour résoudre des problèmes concrets. Elles ont été développées pour apporter un éclairage nouveau à la résolution des problèmes tels qu'ils sont définis à la section 3.1.1. Les méthodes les plus couramment rencontrées aussi bien dans les travaux de recherche que dans les cas pratiques sont :

- ◇ Strategic Options Development and Analysis (SODA) [Ackermann and Eden, 2001]
- ◇ Soft Systems Methodology (SSM) [Checkland, 1981]
- ◇ Strategic Choice Approach [Friend and Hickling, 2004]
- ◇ Drama Theory and Confrontation Analysis [Bennet et al., 2001]
- ◇ Hypergame Analysis [Rosenhead and Mingers, 2001]
- ◇ Robustness Analysis [Rosenhead, 2001]
- ◇ Metagame Analysis (1960s)
- ◇ Interactive Management (1974)
- ◇ Operational Gaming (1950s et 1960)

3. One-shot operation without opportunity to learn by trial-and-error

- ◇ Theory of Constraints (1994)
- ◇ Strategic Assumption Surfacing and Testing (1969/1981)
- ◇ Différentes combinaisons de ces méthodes [Rosenhead and Mingers, 2001]

En résume, le **"SSM"** est basé sur la théorie des systèmes alors que le **"SODA"** est basé sur la théorie de la psychologie. Quant au **"Drama Theory"**, c'est une extension de la très classique theorie du jeu dont il se départ de ses aspects mathématique. Le **"Strategic Choice"** essaye de codifier les pratiques facilitatives dans les processus de décision. Enfin le **"Robustness Analysis"** applique la modélisation mathématique aux données non numériques.

3.1.3 Méthodes de structuration de décision de groupe

Les méthodes de structuration de décision de groupe ont été développées suivant trois perspectives [Jabeur and Martel, 2005] :

1. *"une perspective structurelle qui s'intéressent essentiellement aux structures et aux règles de fonctionnement des groupes restreints (structuration du processus de décision de groupe, résolution des problèmes liés aux interactions interpersonnelles, compréhension des comportements et des attitudes des individus dans ces processus).*
2. *une perspective mathématique qui s'intéresse aux problèmes liés à l'agrégation des préférences individuelles en vue d'établir une préférence collective ou de consensus (développement de nouvelles procédures d'agrégation pouvant être appliquées dans divers contextes décisionnels).*
3. *une perspective technologique qui s'intéresse aux apports de nouvelles technologies de l'information (NTI) pour supporter la prise de décision de groupe (développement des outils pour faciliter l'accès des membres à l'information appropriée, la communication, la collaboration et l'interaction entre ces derniers)"*

C'est dans la deuxième perspective que s'inscrit la structuration du problème de l'évaluation des scénarios de l'hydrogène. En général, la structuration d'un problème de décision multicritère prend la forme générique suivante :

- définition du problème
- description des alternatives
- definition des critères
- analyse des conséquences des alternatives
- mise en oeuvre de la problématique sur les alternatives (choix, tri, rangement, description)
- présentation des résultats
- recommandations
- révision et mise à jour

Chacune de ces étapes nécessitent des informations en entrée. Ces informations, pour être recueillies, demandent de disposer d'outils permettant d'interagir au sein d'un groupe restreint d'individus. Dans le cadre de notre projet, un outil spécifique a été utilisé pour recueillir de

l'information qualitative dans des groupes d'individus représentant les valeurs du grand public : il s'agit des cartes cognitives. Dans la sous-section suivante, nous présenterons cet outil.

3.1.4 Cartographie cognitive collective

Dans le cadre d'un processus d'aide à la décision classique, deux individus, le décideur et l'homme d'étude, interagissent en vue de résoudre un problème. Cette interaction a pour but d'aider le décideur à faire le point sur ses idées en vue de la résolution de son problème. Un dialogue informel de personne à personne peut suffire dans ce cas là. Toutefois des auteurs comme Eden, Ackermann [Eden and Ackermann, 2001] et Komocar [Komocar, 1985] ont proposé un outil plus formel pour effectuer ce genre d'interaction. Il s'agit de la cartographie cognitive. Le recours à cette dernière est d'autant plus justifiée lorsqu'il s'agit en outre d'une situation de décision impliquant un nombre de décideurs conséquent. Cette technique de modélisation par cartographie cognitive est le cadre par excellence pour cartographier la pensée des individus dans les études de psychologie sur la perception [Eden and Ackermann, 2001]. C'est à ce titre que cette technique à été utilisée dans le cadre du projet AIDHY pour recueillir la perception que le grand public a de l'hydrogène-énergie. Cependant elle a déjà été utilisée dans d'autres domaines : en gestion dans les principes organisationnels [Cossette, 2003], en politique pour la gestion des conflits [Axelrod, 1976], et en informatique pour faire des simulations [Kosko, 1986].

L'idée générale de la cartographie cognitive est de représenter graphiquement les idées d'un groupe d'acteurs par un réseau de concepts et de liens de causalité entre certains d'entre eux. Elles sont co-construites par les acteurs et le facilitateur [4] sur un support qui est visualisable par tous les participants au groupe de discussion. D'après Cossette [Cossette, 2003] sa visualisation *"aide à réfléchir, à explorer et à transformer ou confirmer des idées plus ou moins partagées"*. Dans le même sillage, elle y voit un *"outil d'aide à la communication avec soi-même ou avec d'autres"* et un outil d'analyse. Elle est généralement utilisée dans un processus d'aide à la décision pour la définition d'un problème à travers un *"réseau d'explications et de conséquences associées à une situation singulière"* [Cossette, 2003]. Et dans ce sens elle permet d'aplanir les conflits d'objectifs à travers des *"négociations d'idées"* entre individus. Mais au-delà de son intérêt pour dire ce qu'est le problème (de décision), utilisation qui est traditionnellement faite des cartes cognitives en décision, nous nous pencherons davantage sur l'analyse et l'exploitation de son contenu à des fins de structuration d'une analyse multicritère [5]. Cet objectif nous situe davantage dans une perspective de faire des cartes cognitives non pas un but, mais un moyen.

La définition de ce qu'est une carte cognitive qui nous semble la plus complète est celle donnée par Cossette [Cossette, 2003] :*"Une carte cognitive est une représentation graphique de la représentation mentale que le chercheur* [facilitateur] *se fait d'un ensemble de représentations discursives énoncées par un sujet à partir de ses propres représentations cognitives, à*

4. Le facilitateur est la personne chargée de conduire et re-cadrer les discussions dans un groupe de discussion ou d'une dizaine de personne au maximum communément appelé focus group. Ces groupes visent à favoriser des discussions ouvertes entre les participants et à stimuler leur imagination en vue de leur faire produire le maximum d'idées en un minimum de temps (remue-méninges ou "brain-storming").

5. L'analyse multicritère est in fine notre but

propos d'un objet particulier". En effet, en pratique, une carte cognitive est un graphe orienté et étiqueté dont les sommets représentent des *concepts* (mot ou phrase, appelé variable, événement, ou état selon les cas) et donc les arcs représentent les influences entre ces concepts. L'étiquette d'un sommet est le nom du concept et celle de l'arc une valeur ou un symbole qui qualifie l'effet de l'influence. Une carte cognitive permet dans le cadre d'un problème avec plusieurs parties prenantes ou plusieurs expertises, de présenter de manière synthétique les informations collectées. Son analyse aide à prendre des décisions. En général l'outil d'analyse des cartes cognitives est le mécanisme de raisonnement par *propagation*. La propagation permet de calculer une influence entre deux concepts de la carte pas nécessairement reliés directement. Elle est calculée en fonction des chemins composés d'une suite d'influences qui relient ces deux concepts, ainsi que des valeurs associées aux influences de ces chemins. Par exemple, dans les cartes cognitives des figures 3.2 et 3.3, les valeurs d'influences sont «+» ou «−». Cette caractéristique des relations d'influence dans les cartes cognitives est souvent désignée comme *polarité*. Il existe cependant d'autres attributs caractérisant ces relations : la direction (liens généralement unidirectionnels), la force (dans quelle mesure le concept "A" provoque une augmentation ou une diminution du concept "B" ?), la probabilité (quelle est la probabilité que le concept "B" se produise si le concept "A" se produit ?), le temps de latence (quelle est la durée nécessaire pour que le concept "B" se produise une fois que le concept "A" s'est produit) et la certitude (pour faire un choix entre deux liens contradictoires en cas de fusion de plusieurs cartes). Néanmoins, les cartes cognitives n'utilisent pas toujours l'ensemble de ces attributs mais uniquement ceux qui sont adaptés au domaine d'application du modèle.

En général il n'est pas rare que le concepteur qui construit une carte ne soit pas son utilisateur. Dans ce cas il convient de se conformer à un formalisme de représentation conventionnel afin de s'assurer que concepteur et utilisateur se comprennent dans les mêmes termes. Plusieurs formes graphiques qui adoptent des conventions différentes ont été proposées par Bougon et al. [Bougon et al., 1977], Axelrod [Axelrod, 1976] et Eden [Eden, 1988] pour représenter les cartes cognitives. Nous présentons cette différence de formalisme graphique dans la représentation des cartes cognitives dans les figures 3.1, 3.2, et 3.3 ci-dessous :

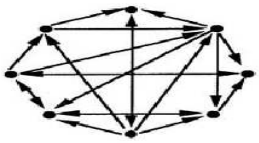


FIGURE 3.1 – Forme graphique utilisée par Bourgon. Sources : [Cossette, 2003]

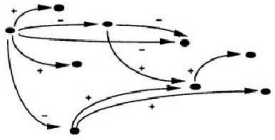


FIGURE 3.2 – Forme graphique utilisée par Axelrod. Sources : [Cossette, 2003]

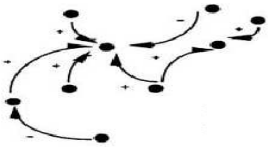


FIGURE 3.3 – Forme graphique utilisée par Eden. Sources : [Cossette, 2003]

En dépit de ces différences graphiques, la structure minimale d'une carte cognitive (CC) est : $CC \equiv$(concept, influence). L'analyse d'une carte cognitive peut être quantitative et/ou qualitative en fonction des éléments contenus dans sa représentation (étiquettes, poids, probabilités,etc.).

3.2 Aide multi-critère à la décision (AMCD) : phases et étapes

L'aide à la décision (AD) a subi plusieurs évolutions qui ont abouti à l'apparition de l'analyse multicritère(AM). L'hypothèse originale qui consiste à définir tous les problèmes de décision comme des problèmes d'optimisation conduisait fatalement à modéliser le problème par une fonction économique à optimiser. Cette dérive mathématique systématique présentait cependant plusieurs inconvénients :

- ne pas tenir compte de la multiplicié de critères
- vouloir systématiquement modéliser une préférence par une fonction
- impossible dans le cas de plusieurs objectifs, de les atteindre tous à la fois
- faire des hypothèses très restrictives : hypothèses de globalité, de stabilité et de complète comparabilité transitive.

En effet, la recherche d'un optimum unique suppose que toutes les actions candidates comprennent tous les aspects du problème et sont mutuellement exclusives (hypothèse de globalité). Ce qui est rarement le cas dans les problèmes de décision où les actions sont souvent complémentaires, partielles et très peu globales. En outre au cours du processus décisionnel, ces actions peuvent être amenées à évolué (violation manifeste de l'hypothèse de stabilité). Enfin la structure des préférences du décideur révèle de bien curieuses caractéristiques en contradiction avec l'hypothèse de complète comparabilité transitive :

- Incomparabilité entre les actions (manque ou mauvaise information pour juger)
- Intransitivité de l'indifférence (préférence faible, non humainement ressentie ni exprimée)
- Intransitivité de la préférence

Au delà de ces situations embarrassantes d'un point de vue de la modélisation mathématique si chère à la recherche opérationnelle classique, le modèle obtenu censé représenté la réalité n'en est pas toujours fidèle. C'est pour ces raisons qu'il a été nécessaire de changer de paradigmes, par exemple passer d'une quête excessive de l'optimum à la recherche d'un compromis. Les considérations supplémentaires suivantes ont conduit à de nouvelles méthodes non optimisatrices, donc l'analyse multicritère :

- Multiples critères
- Multiples intervenants
- Critères non commensurables
- Critères contradictoires
- Points de vue conflictuels
- États d'hésitation du décideur

L'aide multicritère à la décision est une activité qui consiste, pour un individu que l'on nomme souvent analyste, à apporter une aide à un ou plusieurs individus appelés décideurs pour leur permettre de résoudre un problème. Cette activité est née du fait de la nécessité des déci-

deurs de trouver une aide rationnelle pour faire face aux problèmes dans une situation de choix complexe, incertain ou conflictuel. La définition donnée par Vincke résume bien ces préoccupations :«L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte»[Vincke, 1998]. Aider à prendre la décision comme prendre la décision elle même sont des processus qui mettent en jeu les activités cognitives d'un décideur [Tsoukiàs, 2007b]. Selon que le décideur agit pour lui même ou pour un prescripteur, ces deux processus peuvent être totalement intégrés ou différents. Pour simplifier la modélisation de ces processus, on s'accorde souvent à ne considéré que les deux acteurs suivants qui jouent des rôles différents :

- Le décideur
- L'analyste

La modélisation est une étape structurante de tout processus d'aide multicritère à la décision. Elle permet de construire un corpus d'éléments de réflexion à partir duquel s'articuleront les grandes phases de l'analyse. [Tsoukiàs and Paschetta, 2000], [Tsoukiàs, 2007a] :

- Une représentation de la situation problématique
- Une formulation du problème
- Un modèle d'évaluation
- Une recommandation finale

3.2.1 Situation problématique et formulation du problème

La représentation de la situation problématique et sa formulation se trouvent à la convergence de deux activités :

(a) L'identification du problème et sa formulation

Cette étape permet de définir et de délimiter le problème de décision. C'est à ce niveau d'analyse qu'on intègre les contraintes externes et les contraintes de ressources et de temps. Dans le cadre d'une décision avec plusieurs parties prenantes, on y abouti à la construction d'une vision partagée du sujet couvrant tous les aspects du problème. Une carte de concepts interconnectés est un outil très efficace pour l'identification du problème. Les formulations de problèmes les plus couramment rencontrées dans la pratique sont : le choix, le rangement et le classement.

(b) La structuration du problème

L'idée selon laquelle "un problème bien posé est un problème à moitié résolu" trouve ici toute sa signification. En effet c'est dans cette étape qu'on met à plat tous les concepts retenus lors de l'identification du problème et qu'on les explore pour aboutir à la construction de l'ensembles des alternatives et de l'ensemble des critères.

3.2.2 Un modèle d'évaluation

L'élaboration d'un modèle d'évaluation se caractérise par le déploiement de deux activités :

(a) La modélisation des préférences

Il s'agit de capturer les préférences du décideur dans un contexte décisionnel spécifique. Deux types d'informations préférentielles sont à recueillir :

- informations sur la comparaison des alternatives sur un même critère ; elles induisent des structures de types : indifférence, préférence ou hésitation.
- informations sur l'importance relative entre les critères ou poids des critères

(b) L'agrégation et l'analyse des résultats
Cette dernière étape combine le score des alternatives et les informations préférentielles pour arriver à une solution finale qui prend en compte tous les critères.

3.2.3 Une recommandation finale

La recommandation finale d'un problème de décision dépend du type de formulation retenu. Deux types d'activités permettent de faire une recommendation qui a du sens :

- L'étude de sensibilité
- L'analyse de robustesse

En général, il s'agit de vérifier si pour un ensemble de valeurs différentes d'un ou de plusieurs paramètres, toutes choses égales par ailleurs, la(les) solution(s) proposée(s) reste(nt) la (les) même(s).

3.2.4 Données d'un problème de décision

L'analyse d'un problème de décision dans une optique d'évaluation multi-critère à pour but de déterminer les données liées aux items importants du processus : alternatives, critères, pondération (poids), et évaluation (matrice des performances ou des conséquences).

3.2.4.1 Alternatives

Un problème de décision est constitué d'alternatives, au moins deux alternatives. Selon le contexte décisionnel, ces alternatives peuvent porter différents noms : actions, options, variantes, scénarios, solutions, projets,etc. Dans un processus de décision, toutes les alternatives ne font pas l'objet de la même attention. Les alternatives qui méritent d'être retenues pour éclairer la décision sont appelées alternatives ou actions potentielles [Roy, 2002]. Cette précision nous sera très utile par la suite pour distinguer les scénarios fantaisistes et farfelus des scénarios réalistes donc potentiels. A priori tous les scénario ne seront pas envisageables, seuls ceux présentant un intérêt pour notre processus seront retenus.

Dans la suite nous désignerons par a_i les alternatives associées à un problèmes de décision $(1 \leq i \leq n)$; n étant le nombre d'alternatives retenues pour un problème de décision. Ces alternatives appartiennent à un ensemble $A = \{a_1, ..., a_i, ..., a_n\}$ défini en **extension** dans le cas d'un nombre restreint d'actions ou en **comprehension** pour un nombre infiniment grand d'alternatives. Cet ensemble peut vérifier les propriétés suivantes :

- □ **Propriété 3.2.1** *: stable et défini à priori, A reste statique et inchangé d'un bout à l'autre du processus décisionnel*
- □ **Propriété 3.2.2** *: A est évolutif, dynamique et modifiable en cours du processus de décision*

□ **Propriété 3.2.3** *: A est globalisé donc constitué d'éléments exclusifs les uns par rapport aux autres*

□ **Propriété 3.2.4** *: A est fragmenté c'est-à-dire constitué d'une combinaison d'actions.*

3.2.4.2 Critères

Les alternatives seront évaluées seront différents point de vue du décideur que l'on appelle critères[Bouyssou, 1986]. C'est sur la base de ces critères que les alternatives seront choisies, classées, triées, etc. suivant la décision attendue. Ces critères appartiennent à un ensemble $C = \{c_1, ..., c_i, ..., c_m\}$ Pour chaque critère de décision a_i, on définit une fonction $c_j(a_i)$ qui donne une évaluation de l'alternative a_i suivant le j-ième critère ($1 \leq j \leq m$) ; m étant le nombre de critères retenus pour un problème de décision.

On choisira une **famille cohérente de critères** c'est-à-dire un ensemble de critères suffisamment nombreux et précis pour couvrir tous les aspects du problème, satisfaire tous les objectifs du décideurs, et qui garantit la non-redondance entre critères pour éviter de majorer l'importance attribuée à une dimension du problème. Dans tous les cas on aura soit un problème monocritère ($C(a_i) \mid a_i \in A$), soit un problème multicritère ($c_1(a_i), ..., c_m(a_i) \mid a_i \in A$). Les critères doivent vérifier les axiomes suivants :

Axiome 3.2.1 ***(Axiome d'exhaustivité)*** *: C doit être suffisante pour comparer tout couple d'alternatives $(a, b) \in A$ sans perte d'information.*

Conséquence : si deux alternatives ont les mêmes vecteurs performances c'est-à-dire les mêmes conséquences pour tous les critères, alors il faut être sûr que les acteurs sont bien indifférents entre les deux alternatives.

Axiome 3.2.2 ***(Axiome de cohésion)*** *: il doit exister une cohérence minimale entre les préférences sur chaque critère et les préférences globales.*

Conséquence : en partant de deux alternatives qui sont jugées équivalentes, si l'on accroît la performance de la première sur un critère quelconque, alors elle apparaît *"comme au moins aussi bonne"* que la seconde alternatives inchangée. De plus si a est préféré [6] à b sur chaque critère de C alors a doit être globalement préféré à b.

Axiome 3.2.3 ***(Axiome de non-redondance)*** *: un critère est redondant si son retrait de la famille laisse une nouvelle famille vérifiant les deux axiomes précédents.*

Conséquence : la suppression d'un critère de C conduit à la violation d'un des deux axiomes précédents.

6. ici les expressions "préféré à" et "au moins aussi bonne" sont équivalentes

3.2.4.3 Évaluation

Le résultat d'une évaluation d'une alternative c'est le jugement porté sur l'alternative par le décideur suivant un point de vue ou critère. On notera e_{ji} ce résultat pour l'alternative a_i. Il est exprimé par la relation : $e_{ji} = c_j(a_i)$. Ainsi on construit une matrice $M(e_{ji})$ appelée matrice des performances où e_{ji} est l'évaluation de la i-ième alternative suivant le j-ième critère.

Dans le cas ou l'on fait appel à plusieurs évaluateurs pour apporter un jugement et participer à la résolution du problème de décision, le résultat de l'évaluation devient e_{jik}. C'est l'évaluation de la i-ième alternative suivant le j-ième critère, par le k-ième évaluateur. De même sa matrice des performances sera notée $M_k(e_{ji})$.

3.2.5 Approches et méthodes de l'analyse multicritère

Dans les approches d'analyse multicritère, il existe deux grands courants ayant des théories différentes, [Figueira et al., 2004], [Belton and Stewart, 2001] :

* **L'approche dite classique** qui est basée sur une agrégation complète des préférences du décideur. L'hypothèse fondamentale de cette approche est l'existence à priori des préférences du décideur qui s'exprime par la connaissance claire et sans ambiguïté de ses valeurs ou des utilités sur tous les attributs et de leurs poids. Elle s'est développée autour des méthodes connues comme la Valeur/Utilité Multiattributs(MAVT/MAUT) [7] [Keeney and Raiffa, 1976a] ou l'Analyse Hiérarchique des Process (AHP) [8][Saaty, 1980]. Dans ces méthodes, on arrive à établir une fonction critère unique agrégeant les différents critères : $U(a) = U(c_1(a), c_2(a), ...c_m(a))$. Ensuite ce résultat d'agrégation globale sera utilisé pour choisir, trier ou ranger les alternatives.

* **L'approche de surclassement** qui est basée sur une agrégation partielle des préférences du décideur. L'hypothèse qui sous tend cette approche est que les préférences du décideur ne sont pas données à priori mais qu'elles apparaissent et se structurent au cours du processus de décision. Les principales différences entre cette approche et l'approche classique resident dans la prise en compte des préférences faibles et des situations d'incomparabilité. Les méthodes les plus représentatives de cette approches sont : ELECTRE [Roy, 1990] et PROMETHEE [Brans et al., 1984]. Dans ces méthodes, on compare deux à deux toutes les alternatives suivant chacun des critètes. Ensuite on établi des relations de surclassement entre alternatives.Une relation de surclassement est une relation binaire S définie sur l'ensemble A des actions du problème de décision telle que $a_i S a_k$ si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur, des évaluations et du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que l'action a_i est au moins aussi bonne que l'action a_k(principe de concordance), sans qu'il y ait de raison importante de refuser cette affirmation (principe de discordance). Enfin on exploite les résultats de la comparaison selon les problématiques suivantes quelque soit la méthode utilisée :

  1. **Problématique de choix** α **(**P_α**)**. Également appelée problématique de sélection, elle permet à partir d'un ensemble A d'alternatives potentielles, d'obtenir un sous-

7. Multi Attribute Value/Utility Theory
8. Analytical Hierarchy Process

ensemble A_1 de A d'alternatives aussi restreint que possible contenant les meilleurs alternatives.

2. **Problématique de tri β (P_β)**. Également appelée problématique de segmentation ou d'affectation, elle permet à partir d'un ensemble A d'alternatives potentielles, de partitionner les alternatives dans des catégories définies à priori selon des modalités arrêtées (très bonne, bonne, moins bonne, ...). Cette problématique est idoine lorsqu'on se trouve en présence de normes, ou de références à l'aide desquelles on peut définir les catégories destinées à recevoir les alternatives.
3. **Problématique de rangement γ (P_γ)**. Également appelée problématique de classement, elle permet de classer les alternatives d'un ensemble A d'alternatives potentielles, de la meilleur à la moins bonne. Elles sont ainsi rangées dans des classes d'équivalence partiellement ou totalement ordonnées selon les préférences.
4. **Problématique de description δ (P_δ)**. Elle permet de présenter le problème de décision à l'aide d'un langage approprié sous forme de description des actions de l'ensemble A des alternatives et de leurs conséquences. En effet elle met en évidence les informations et les conséquences sur les alternatives potentielles pour permettre au décideur de les comprendre et de les jauger. C'est une démarche de formalisation préparant une prescription ou une simple participation au processus décisionnel.

Ce qui est intéressant avec ces problématiques, c'est le caractère révisable des préconisations obtenues par applications d'un modèle de préférence et la possibilité d'une utilisation répétitive ou automatisée de la méthodologie. Ce dernier point peut favoriser l'emploi d'outils informatiques dans de tels processus d'aide à la décision et permettre de mettre à profit la puissance de calcul des ordinateurs pour assister le couple analyste-décideur. Mais le caractère parfois chaotique et non linéaire de certains processus de décision ne permettent pas toujours de tels traitements.

3.2.6 Méthodes de surclassement

Les procédures d'agrégation par relation de surclassement de type ELECTRE consiste en une comparaison par paire des alternatives. Ensuite il s'agit d'exploiter ces relations binaires partielles pour construire une structure de préférence globale. Ces comparaisons sont jugées sur la base d'un indice appelé degré de crédibilité ($\sigma_s(a, b)$) du surclassement d'une alternative par une autre. Le degré de crédibilité est obtenu à partir de deux indices :

1. indice de concordance. Il permet de se poser la question de savoir s'il y a suffisamment d'arguments ou de "raisons positives" pour admettre une proposition de type le scénario a surclasse ou est au moins aussi bon que le scénario b (aSb). On le notera $C(a, b)$. A l'issue de cette phase, on obtient une table de concordance.
2. indice de discordance. Il permet de se poser la question de savoir s'il y a une raison importante pour refuser la proposition précédente. On le notera $D(a, b)$. A l'issue de cette phase, on obtient une table de discordance.

Ces deux conditions réunies se traduisent par la relation suivante :

$$(aSb) \Longleftrightarrow (C(a,b) \wedge \neg D(a,b) \tag{3.1}$$

Le principe général de fonctionnement des méthodes de surclassement est la suivante :

1. Former toutes les paires ordonnées d'alternatives potentielles.
2. Répondre pour chaque paire d'alternatives aux questions :
   (a) a est - elle au moins aussi bonne que b ?
   (b) a est - elle nettement plus mauvaise que b ?
3. Juger globalement l'assertion aSb en tenant compte des réponses fournies aux deux questions précédentes.

La relation de surclassement est établie à partir des degrés de crédibilité $\sigma_s(a,b)$ et d'un seuil de coupe λ [9] comme l'indique la figure 3.4.

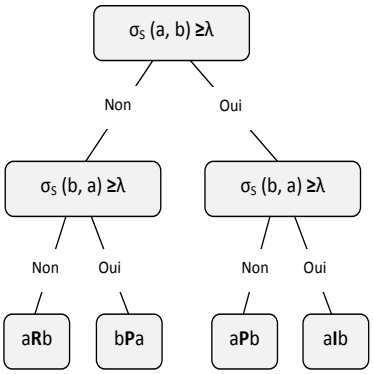


FIGURE 3.4 – Établissement de la relation de surclassement.

Remarque 3.1 *(Explication des notations de la figure 3.4)*
"$\geq$" : relation d'ordre sur l'ensemble des réels $\mathbb{R}$.
"P" : préférence.
"I" : indifférence. "R" : incomparabilité.

Les paramètres qui permettent d'établir une relation de surclassement sont des indices de concordance, de discordance et de crédibilité. Les relations 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 permettent de les obtenir.

Indice de Concordance partiel

$$c_j(a,B_h) = \begin{cases} 1, & \text{si } g_j(B_h) - g_j(a) \geq p_j(B_h)\,; \\ 0, & \text{si } g_j(B_h) - g_j(a) \leq q_j(B_h)\,; \\ & \frac{p_j(B_h)+g_j(a)-g_j(B_h)}{p_j(B_h)-q_j(B_h)}. \end{cases} \tag{3.2}$$

9. λ le nombre de critères qui valident la proposition aSb, $\lambda \in [0,1]$

Indice de Concordance global

$$C(a, B_h) = \frac{\sum\limits_{j \in F} k_j c_j(a, B_h)}{\sum\limits_{j \in F} k_j}, \quad C(a, B_h) \in [0, 1] \tag{3.3}$$

Indice de discordance partiel

$$d_j(a, B_h) = \begin{cases} 1, & \text{si } g_j(a) \leq g_j(B_h) + p_j(B_h)\,; \\ 0, & \text{si } g_j(a) > g_j(B_h) + v_j(B_h)\,; \\ \in [0, 1] & \text{sinon.} \end{cases} \tag{3.4}$$

Indice de crédibilité

$$\sigma(a, B_h) = C(a, B_h) \Pi \frac{1 - d_j(a, B_h)}{1 - C(a, B_h)}, \quad \sigma(a, B_h) \in [0, 1] \tag{3.5}$$

Remarque 3.2 *(Signification des extremums de l'indice de crédibilité)*
$\sigma(a, B_h) \to 0 \Rightarrow$ *la proposition* (aSb) *est totalement rejetée pour deux raisons : soit il n'y a aucune raison positive qui l'affirme, soit un critère y oppose son veto (raison négative).* $\sigma(a, B_h) \to 1 \Rightarrow$ *la proposition* (aSb) *est totalement crédible. Deux raisons également l'expliquent : il y a suffisamment de raisons positives qui l'affirment et aucun critère n'y oppose son veto.*

3.2.7 Tableau des performances des alternatives

En général le résultat de l'analyse des conséquences est résumé dans le tableau de performances ayant la configuration de la table en figure 3.5) :

Critères	g_1	g_2	…	g_j	…	g_n
Poids	k_1	k_2		k_j		k_n
	p_1	p_2	…	p_j	…	p_n
Seuils	q_1	q_2	…	q_j	…	q_n
	v_1	v_2	…	v_3	…	v_n
Actions						
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_i)$	…	$g_j(a_1)$	…	$g_n(a_i)$
a_2	.	.		.		.
.	.	.		.		.
.	.	.		.		.
.	.	.		.		.
a_i	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	…	$g_j(a_i)$	…	$g_n(a_i)$
.						
.						
.						
a_m	$g_1(a_m)$	$g_2(a_m)$	…	$g_j(a_m)$	…	$g_n(a_m)$

FIGURE 3.5 – Tableau des performances des alternatives. D'après Amir et Werey [Amir and Werey, 2009]

3.2.8 Structures de préférence

chaque critère est caractérisé par un seuil de préférence p, un seuil d'indifférence q ou un seuil de veto v qui s'expriment dans les relations suivantes :

Indifférence (seuil q_j) : aI_jb

$$|g_j(a) - g_j(b)| \leq q_j \tag{3.6}$$

Signification : l'alternative a est indifférent à l'alternative b suivant le critère j car il existe des raisons positives qui justifient cette équivalence.

Préférence stricte (seuil p_j) : aP_jb

$$|g_j(a) - g_j(b)| \geq p_j \tag{3.7}$$

Signification : l'alternative a est strictement préférée à l'alternative b suivant le critère j car il existe des raisons positives qui justifient cette préférence stricte.

Préférence faible : aQ_jb

$$q_j < g_j(b) - g_j(a) \leq p_j \tag{3.8}$$

Signification : l'alternative a est faiblement préférée à l'alternative b suivant le critère j car il existe des raisons positives qui justifie une préférence stricte en faveur de l'une des deux alternatives. Mais ces raisons sont insuffisantes pour en déduire soit une préférence stricte en faveur de l'autre, soit une indifférence entre les deux alternatives.

Non préférence (seuil v_j) : $a\neg P_jb$

$$|g_j(a) - g_j(b)| > v_j \tag{3.9}$$

Signification : l'alternative a est strictement non préférée à l'alternative b et vice versa suivant le critère j car il existe certes des raisons positives qui justifient une préférence (stricte ou faible) mais le veto s'y oppose fermement.

En tenant compte du seuil de coupe λ, les équations 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 se ramènent aux trois relations suivantes :

☐ Indifférence :

$$(\sigma_s(a,b) \geq \lambda \wedge \sigma_s(b,a) \geq \lambda) \Rightarrow aI_jb \tag{3.10}$$

☐ Préférence stricte :

$$(\sigma_s(a,b) \geq \lambda \wedge \sigma_s(b,a) < \lambda) \Rightarrow aP_jb \tag{3.11}$$

$$(\sigma_s(b,a) \geq \lambda \wedge \sigma_s(a,b) < \lambda) \Rightarrow bP_ja \tag{3.12}$$

☐ Incomparabilité :

$$(\sigma_s(a,b) < \lambda \wedge \sigma_s(b,a) < \lambda) \Rightarrow aR_jb \tag{3.13}$$

Certains auteurs ont complétés ces structures de préférences classiques par des structures de préférence qui essayent de modéliser les états d'hésitation du décideur [Ozturk and Tsoukiàs, 2004a].

3.2.9 Exploitation des relations de préférence : ELECTRE TRI

Plusieurs méthodes existent pour exploiter les relations de préférence. selon la problématique du problème posé, on distingue :

- Les méthodes ELECTRE I et IS pour la problématique de sélection
- Les méthodes ELECTRE II, III et IV pour la problématique de classement
- La méthode ELECTRE TRI pour la problématique d'affectation

Nous examinerons particulièrement la procédure d'exploitation des préférences par la méthode ELECTRE TRI. Cette méthode est notamment caractérisée par une relation de surclassement $\sigma_s(a,b)$ définie sur $A \times P \cup P \times A$ où A est l'ensemble des alternatives et P l'ensemble des normes qui caractérisent les catégories prédéfinies. Il s'agit de bornes inférieures ou caractéristiques minimales requises pour qu'une action quelconque appartienne à une catégorie donnée. En effet, la méthode ELECTRE TRI compare les alternatives non pas entre elles comme ELECTRE I,II, III, IV et IS ($\sigma_s(a,b) \subseteq A \times A$) mais elle les compare par rapport à des alternatives définies comme profils limites des catégories ($\sigma_s(a,b) \subseteq A \times P \cup P \times A$). Dans ses développements récents, la méthode ELECTRE TRI utilise deux procédures pour obtenir du décideur les paramètres d'entrée du modèle d'évaluation : une procédure directe par un jeu de questions-réponses plus difficile à mettre en oeuvre, et une procédure indirecte par des exemples d'affectation qui demande un moindre effort cognitif que la précédente de la part du décideur. Nous avons regroupé les deux procédures dans un algorigramme intégré que nous présentons sur la figure 3.6.

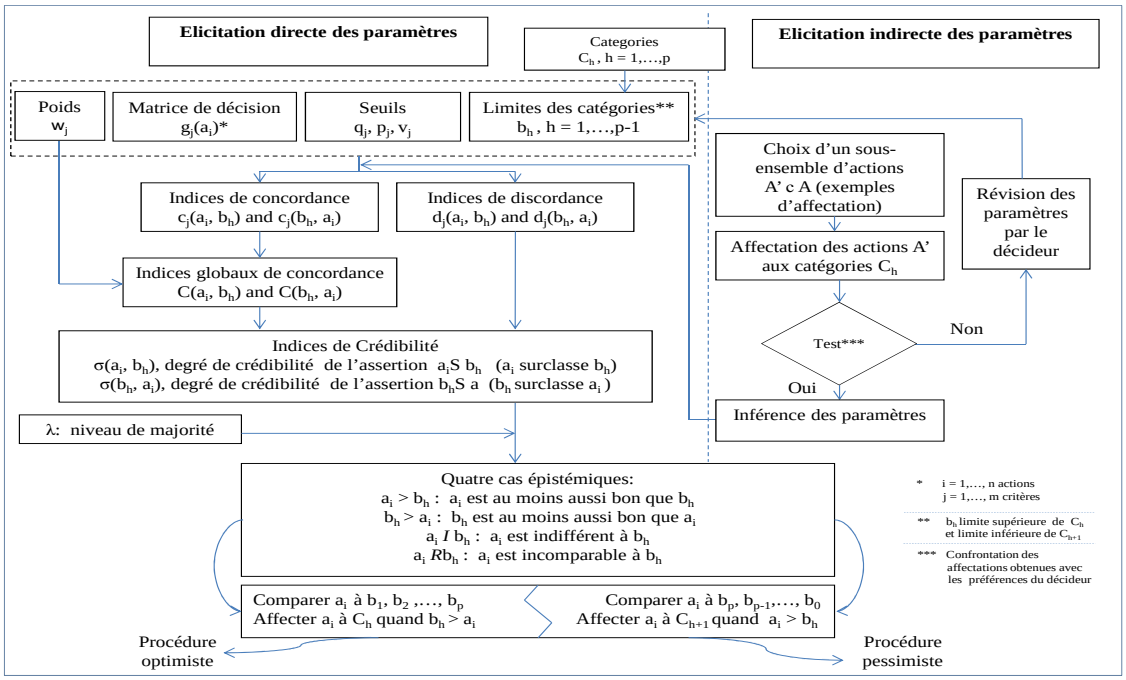


FIGURE 3.6 – Diagramme intégré de la Méthode ELECTRE TRI

Dans sa phase d'exploitation, ELECTRE TRI propose deux procédures d'affectation [Roy, 2002] :

1. La procédure d'affectation pessimiste ou pseudo-disjonctive
2. La procédure d'affectation optimiste ou pseudo-conjonctive

3.2.9.1 Procédure d'affectation pessimiste

Elle s'inspire de la logique de "précaution maximum". Dans cette procédure, il faut comparer successivement l'alternative a_i aux profils des catégories Pr_h en commençant par le profil le plus bas. Étant donné B_h une action de référence caractérisant un profil Pr_h on affectera une alternative a_i à une catégorie h si :

$$(a_i P_j B_h) \wedge (B_{h-1} P_j a_i) \tag{3.14}$$

ou

$$(a_i P_j B_h) \wedge (B_{h-1} R_j a_i)) \tag{3.15}$$

ou

$$(a_i I_j B_h) \wedge (B_{h-1} P_j a_i) \tag{3.16}$$

3.2.9.2 Procédure d'affectation optimiste

Elle s'inspire de la logique de "précaution minimum". Dans cette procédure, il faut comparer successivement l'alternative a_i aux profils des catégories Pr_h en commençant par le profil le plus haut. Étant donné B_h une action de référence caractérisant un profil Pr_h on affectera une alternative a_i à une catégorie h si :

$$(a_i P_j B_h) \wedge (B_{h-1} P_j a_i) \tag{3.17}$$

ou

$$(a_i P_j B_h) \wedge (a_i I_j B_h) \tag{3.18}$$

ou

$$(a_i P_j B_h) \wedge (a_i R_j B_h) \tag{3.19}$$

3.3 Des cartes cognitives à l'arbre de valeurs des objectifs

Dans ce qui précède, nous avons fait apparaître distinctement que notre problème de décision est constitué de deux modules : (1) un module de structuration et (2) un module d'évaluation pour lesquels nous disposons d'outils. Après avoir choisi pour chaque module, l'outil approprié, l'idée c'est de trouver un ou plusieurs points d'articulations entre ces outils, d'en exploiter les forces pour construire une démarche méthodologique cohérente pour leur intégration. Dans cette section, nous rechercherons la matière la plus efficace pour intégrer ces deux modules. Dans le premier module, la cartographie cognitive nous a permis de construire des cartes des parties prenantes donc les concepts sont leurs préoccupations, leurs idées, leurs opinions, leurs objectifs, etc. Dans le second module, la formulation du problème induite du module précédent nous a permis de choisir et de justifier la méthode d'évaluation des scénarios.

Le lien objectif que nous avons pu dégager entre les deux modules ce sont les objectifs. En effet l'une des étapes importantes de l'analyse multicritère consiste à structurer les objectifs du décideur ou des parties prenantes. Le premier module permet de capturer ces objectifs de manière à gérer plus efficacement ceux parmi eux qui sont inévitablement conflictuels compte tenu de la multiplicité des acteurs et donc de construire le consensus. Dans le second module, ces objectifs sont utilisés pour évaluer les scénario via les attributs ou les critères. A cet égard, pour passer du module (1) au module (2), on s'est appuyé sur les travaux de Keeney [Keeney, 1992] et de Keeney et Raiffa [Keeney and Raiffa, 1976b].

3.3.1 Fondements de l'analyse par valeurs

Certaines caractéristiques de l'environnement décisionnel rendent complexe la prise de décision :

- la multiplicité des objectifs à atteindre par le décideur sources potentielles de conflit qu'il importe de gérer
- certains impacts des conséquences sont difficiles à évaluer
- l'horizon des conséquences peut être long
- la décision peut avoir un impact sur des groupes différents
- il existe un certain niveau de risque et d'incertitude (données insuffisantes, changement de populations, changement de priorité...)
- la décision nécessite des expertises multiples
- il existe plusieurs décideurs
- nécessité d'opérer des arbitrage entre coût actuel et coût futur
- ...

En présence d'un tel environnement et dans un cadre multicritère, Keeney [Keeney, 1982] fonde l'analyse de la décision sur les objectifs. En effet son approche préconise d'effectuer deux tâches pour la structuration du problème de décision : la construction des options ou actions potentielles et la spécification des objectifs et des attributs mesurant leur réalisation. Il propose d'utiliser la décomposition hiérarchisée pour réaliser ces deux tâches au moyen de de l'arbre de décision. Ensuite pour spécifier les préférences et l'incertitude il propose respectivement d'utiliser l'arbre de valeurs, la théorie de l'utilité (jugement sur la désirabilité des conséquences) et la théorie des probabilités (jugement sur la vraisemblance des conséquences). Ce sont ces parties qui se retrouvent rassemblées sur l'arbre de décision. Il convient de rappeler qu'il n'est pas toujours nécessaire de réaliser ces deux tâches de manière exhaustive. Selon le degré d'interaction avec le décideur et les difficultés rencontrées, on focalisera sur une tâche plutôt que l'autre pour concentrer l'analyse sur les options les plus intéressantes.

Construire une hiérarchie des objectifs avec le décideur est donc un moment important de la structuration. En effet, dans un contexte de décision multiobjectif [Keeney and Raiffa, 1976b], Keeney propose de construire un arbre de valeurs où les éléments centraux sont les objectifs [Keeney, 1992]. Un objectif est l'énoncé de quelque chose que l'on souhaite accomplir. Il le caractérise par trois éléments :

- le contexte décisionnel
- l'objet
- la direction des préférences

Keeney [Keeney, 1992] distingue deux types d'objectifs : les objectifs fondamentaux et les objectifs de moyens. il précise la différence entre ces deux types d'objectifs en ces termes : "The fundamental objective characterizes an essential reason for interest in decision situation" ; on the other side, "A means objective is of interest in the decision context because of its implications for the degree to which another (more fundamental) objective can be achieved [...]". Selon lui il est possible d'obtenir une hiérarchie des objectifs par une construction ascendante ou descendante. Dans le cas d'une construction qui part du bas vers le haut, on développe une liste de conséquences possibles pour les options examinées et on tente ensuite de les organiser en repérant les objectifs communs poursuivis.

Dans le cas d'une construction qui part du haut vers le bas, on prend les valeurs les plus générales du décideur pour les décomposer jusqu'au niveau le plus accessible à l'analyse. dans ce cadre Keeney [Keeney, 1992] propose une décomposition hiérarchique des objectifs fondamentaux du décideur en partant d'un objectif global vers des sous-objectifs plus opérationnels. Ensuite il propose de spécifier ces objectifs en termes de contexte de décision, d'objet et de direction des préférences. Il s'agit donc de décliner les souhaits du décideur sous une forme qui puisse permettre l'action : l'objet de l'action (Que faire ?) et le sens souhaiter de l'action (maximisation ou minimisation).

Dans les deux cas, pour chacun des objectifs de bas niveau finalement obtenu, un attribut est conçu pour permettre de mesurer l'impact de l'action potentielle sur l'objectif, c'est à dire sa réalisation. Par exemple l'objectif de minimisation de la pollution peut se mesurer par l'attribut kg de CO_2. Mais la définition d'un attribut n'est pas toujours facile pour caractériser certains objectifs.

Selon Keeney & Raiffa [Keeney and Raiffa, 1976b], l'arbre de valeurs vérifie quelques propriétés fondamentales :

1. la complétude : les valeurs couvrent tous les aspects importants du problème
2. l'opérationnalité : être assez simple pour être utilisé compris par par le décideur
3. la décomposabilité : l'évaluation doit pouvoir se faire à partir de chacune de ses parties en "indépendance"
4. la non redondance : ne pas compter plusieurs fois le même impact

Il s'en suit que un arbre de valeur n'est pas unique pour un problème donné ; il dépend du point de vue adopté par le décideur.

En plus conduire une analyse de décision en se focalisant sur les valeurs en expliquant les objectifs et les attributs requiert moins de moyens que de déterminer les impacts des options. Savoir en conséquence quelle information est de la plus haute valeur peut économiser du temps et concentrer l'analyse.

En examinant les caractéristiques physiques et les propriétés des cartes cognitives et des arbres de valeur, le passage de l'une à l'autre représentation se fait en exploitant deux types de caractéristiques :

– les caractéristiques théoriques
– les caractéristiques pratiques

Dans les méthodes traditionnelles du MCDA, la structuration des objectifs lorsqu'on se place dans une perspective d'évaluation, aboutit à un arbre de valeurs éventuellement hiérarchique (voir la figure 3.7).

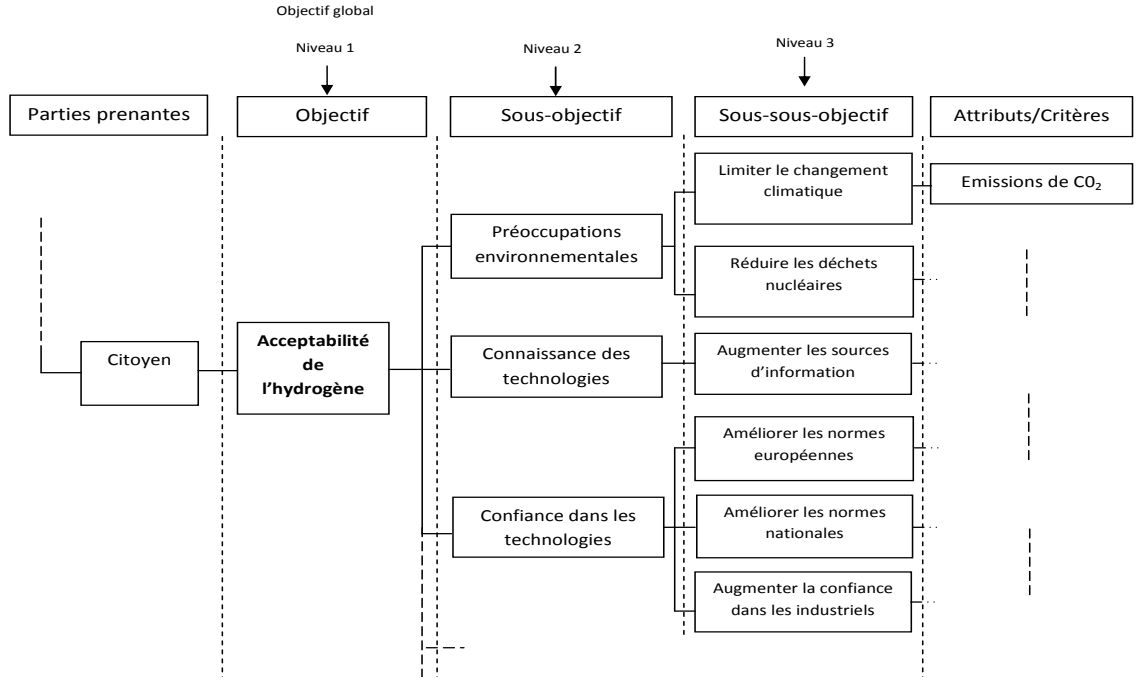


FIGURE 3.7 – Arbre de valeurs partiel du grand public

En fait la figure précédente est une représentation partielle de l'arbre de valeurs des citoyens que nous avons développé au chapitre 4. Elle représente sur plusieurs niveaux hiérarchiques (3 niveaux dans ce cas) les objectifs fondamentaux du grand public par rapport aux nouvelles technologies de l'hydrogène. La construction de tels objectifs est basée sur une approche top-down. Dans cette approche, l'objectif fondamental global est identifié, ensuite il est décomposé en des objectifs plus spécifiques. Cette décomposition s'opère de manière itérative jusqu'à l'obtention de sous objectifs suffisamment bas dans la hiérarchie de sorte qu'on puisse les associer à des attributs ou critères mesurables. Cette approche de structuration a été utilisée par plusieurs auteurs et appliquée dans plusieurs études (voir [Adelman et al., 1986], [Borcheding and Winterfeldt, 1988], [Mustajoki and Hämäläinen, 2000], [Pöyhönen et al., 2001], [Saaty, 1980], [Salo and Hämäläinen, 1997]) ; en particulier dans le secteur de l'énergie (voir [Jones et al., 1990], [Phdungslip and Wuttipornpun, 2011]). Dans le but d'aider à la structuration des objectifs, Belton et al. [Belton et al., 1997] proposent l'utilisation des cartes cognitives que nous avons présentées à la section 3.1.4.

Une fois que nous avons identifié les outils qui peuvent nous permettre de passer du module de structuration au module d'évaluation, il ne nous reste plus alors qu'à définir les modalités qui permettent une telle transformation. Ces modalités, nous les avons rangé dans deux groupes de caractéristiques liés aux représentations graphiques des cartes cognitives et des arbres de valeurs, et qui permettent d'établir une jonction entre les deux modules : les caractéristiques théoriques et les caractéristiques pratiques.

3.3.2 Caractéristiques théoriques

Il est formellement identifié que les deux objets de notre étude, la carte cognitive et l'arbre de valeurs sont des graphes. D'une part une carte cognitive est un graphe orienté fini et signé [10] où les sommets sont des concepts et les arc les relations d'influence ordonnées entre les sommets pris deux à deux ; d'autre part, un arbre de valeur est une arborescence dont un graphe non orienté, sans cycle avec un sommet principal appelé racine et qui n'est autre que l'objectif général, de sorte que de chaque sommet, il y ait exactement un chemin de la racine à ce sommet.

Sur un plan formel, les cartes cognitives et les arbres de valeurs, sont des graphes ayant des structures différentes. Les items qu'ils représentent sont attachés à des sémantiques différentes. Plusieurs livres traitent abondamment du sujet de la théorie des graphes (see [Deo, 1974], [Gondran and Minoux, 1985], [Wilson, 1996] and [Diestel, 2000]). Pour appliquer le formalisme de graphe à notre modèle, nous utiliserons les definitions suivantes :

Définition 3.1 ***(Graphe orienté)***
Un graphe orienté (aussi appelé digraph) est une paire ordonnée d'ensemble $G = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ *où* $\mathcal{V} = \mathcal{V}(G)$ *est un ensemble de noeuds ou sommets et* $\mathcal{A} = \mathcal{A}(G) \subseteq \mathcal{V}(G) \otimes \mathcal{V}(G)$ *un ensemble d'arcs constitué de paires ordonnées de noeuds* $\mathcal{V}$.

Définition 3.2 ***(Graphe orienté convexe)***
Un graphe orienté est dit connexe s'il y a un chemin (une sequence alternée de noeud et d'arcs, commençant et finissant par des noeuds, sans répétition de noeuds), entre deux noeuds quelconque.

Définition 3.3 ***(Carte cognitive)***
Une ***carte cognitive*** *(CM) est un graphe orienté connexe* $CM = (\mathcal{C}, \mathcal{A})$ *dont les sommets sont des items tels que les objectifs, les événements, les idées, et/ou des opinions* ($\mathcal{C}$) *et les relations entre ces items sont les arcs* ($\mathcal{A}$). *Ici une CM est un graphe sans boucle, c'est-à-dire :* $\forall u \in \mathcal{C}$, $(u, u) \notin \mathcal{A}$.

Les concepts représentent les idées, les opinions qu'un individus ou groupe de personnes associent à un sujet donné. Par exemple, dans notre cas, dans les cartes cognitives qui renseignent la perception et l'acceptabilité sociale des technologies de l'hydrogène, les concepts représentent les préoccupations et les principales options que des groups d'individus spécifiques associent aux technologies de l'hydrogènes ainsi qu'à leurs consequences. En plus, les cartes cognitives représentent dans un format hiérarchique (quoique imprécise, et biaisée) la manière dont un individu explique sa perspective, et pourquoi une situation (sujets stratégiques) peut avoir son importance pour l'avenir stratégique d'une organisation (elicitation des objectifs, des valuers, etc).

Ainsi nous pouvons obtenir à partir d'une CM, un sous-graphe connexe noté $C_oM = (\mathcal{O}, \mathcal{A}_o)$ où $\mathcal{O} = \mathcal{O}(C_oM)$ représente un ensemble d'objectifs ou de préoccupations de parties prenantes dérivé de l'ensemble initial de concepts $\mathcal{C}$ ($\mathcal{O} \subseteq \mathcal{C}$) et $\mathcal{A}_o$ le sous ensemble correspondant de $\mathcal{A}$ constitué de paires ordonnées d'objectifs tel que $\mathcal{A}_o = \mathcal{A} \cap (\mathcal{O} \times \mathcal{O})$.

10. C'est-à-dire ayant des arcs avec polarité ($+$ ou $-$)

Définition 3.4 ***(Arborescence)***
une arborescence avec un sommet r appelé racine est un sous graphe orienté $T = (\mathcal{V}', \mathcal{A}')$ d'un digraph G qui ne contient aucune paire d'arcs opposés (aucun cycle) et tel que les conditions suivantes soient vérifiées : (i) si les directions des arcs sont ignorées, alors T est un arbre couvrant ; (ii) il y a un chemin de r à tout autre sommet $u' \in V'$

Ainsi un **arbre de valeurs** des objectifs (VT_o) est une arborescence dont la racine root l'objectif global.

Compte tenu de ces définitions, la question est de savoir sous quelle(s) condition(s) nous pouvons passer d'une représentation graphique (C_oM) à un arbre (VT_o) conformément à l'objectif de cette partie de notre étude. Le lemme suivant nous donne un outil pour faire face à cette question de manière efficace.

Lemme 3.1 *C_oM contient une arborescence VT_o si et seulement si chaque noeud dans C_oM est atteignable à partir de r. Où r est la racine à partir duquel il y a un chemin conduisant à tous les autres sommets $v \in \mathcal{O}$.*

Pour la preuve, nous rappelons la définition suivante (see [Wilson, 1996]) :

Définition 3.5 ***(Arbre couvrant)***
Un arbre couvrant T d'un graphe G est un sous graphe de G contenant tous les sommets de G tel que $V(T) = V(G)$. Où $V(T)$ (respectivement $V(G)$) est l'ensemble des sommets de T (respectivement de G).

Preuve 3.1 (Lemme 3.1) *Montrons que "$1 \Longleftrightarrow 2$" :*
$1 \equiv C_oM$ contient une arborescence VT_o ; $2 \equiv$ chaque sommet dans C_oM est atteignable de r.
***(a)** preuve de "$1 \Rightarrow 2$" : supposons que la direction des arcs est ignorée dans C_oM et que C_oM contient une arborescence VT_o, d'où VT_o est un arbre couvrant (voir (i) dans la definition 3.4) et $V(VT_o) = V(C_oM)$ (voir definition 3.5), à partir de ces conséquences, la conclusion est directe : chaque sommet dans C_oM est atteignable à partir de n'importe quel sommet VT_o, comme il n' y a pas de cycle (voir definition 3.4). En particulier chaque sommet dans C_oM est atteignable à partir de la racine r de l'arbre couvrant.*
***(b)** preuve de "$1 \Leftarrow 2$" : supposons que chaque sommet dans C_oM est atteignable à partir de r, d'où il y a (i) un chemin de r à n'importe quel sommet $u' \in VT_o$, un sous graphe de C_oM ; et (ii) VT_o n'a pas de cycle.*
(i) et (ii) $\Rightarrow$ VT_o est un arbre couvrant, d'où VT_o est une arborescence contenue dans C_oM. □

La conséquence de ce lemme est que en se référant à la manière dont une carte cognitive est construite, elle contient toujours une arborescence. En effet l'objet principal de la carte est la racine à partir de laquelle tous les autres concepts sont directement (connexité forte) ou indirectement (connexité faible) liés.

Dans le formalisme de graphe que nous avons développé ci-dessus, la conversion d'une CM en un arbre de valeur obéit à quelques règles. En tenant compte du fait que les graphes

peuvent avoir des circuits fermés, la conversion est obtenue en ouvrant les circuits soit par ($\mathbf{R_1}$) duplication d'un des sommets du circuit (qui pourrait contenir des informations plus distinctes), soit par ($\mathbf{R_2}$) fusion de deux ou plusieurs sommets (qui pourraient contenir des informations redondantes).

- La transformation des concepts en objectifs opérationnels
- La hiérarchisation des objectifs eu égard à la hiérarchisation des concepts initiaux
- La transformation des polarités positive ($+$) ou négative ($-$) des cartes cognitives en direction préférentielle (maximisation ou minimisation) pour chaque objectif associé à la polarité. Cette transformation se fait en utilisant les verbes tels que améliorer, augmenter, permettre, etc. pour les concepts ayant une polarité positive et réduire, diminuer, limiter, etc. pour les concepts ayant une polarité négative.

Cette démarche facilite notablement la construction de l'arbre des valeurs du décideur.

3.3.3 Caractéristiques pratiques

En général, dans les cartes cognitives, un sommet représente un concept, qui peut être une idée, une opinion, un objectif, etc. comme nous l'avons mentionné dans la section précédente ; un arc représente une relation d'ordre entre deux sommets distincts. Cette relation peut être causale, d'antériorité, d'influence, etc. Dans notre étude nous avons une relation d'influence entre les concepts. Les polarités $+$ ou $-$ indiquent le type de corrélation (positive ou négative) qui existe entre deux sommets. En remarquant que toutes les cartes cognitives n'ont pas toutes les mêmes conventions de représentation (voir section 3.1.4) , notamment en ce qui concerne les polarités, et la relation, il apparaît judicieux de choisir la représentation cognitive en fonction du problème et notamment de sa formulation. Cependant quelque soit la convention adoptée, le tableau suivant nous donne les points d'articulations des deux graphes (carte et arbre) :

Points clés	**Carte cognitive**	**Arbre de Valeur**
Objet	*Concepts*	*Objectifs*
Point de départ	*concept Central*	*objectif général*
Structure	*Relationnel*	*Hierarchique*
Type of relation	*Influence*	*Descendante*
Nature of relation	*Corrélation*	*Préférentiel*
Direction	*Positive ou Négative*	*Maximiser or Minimiser*
Décideurs	*Plusieurs*	*Unique*

TABLE 3.1 – Relation carte cognitive-arbre de valeurs

Les polarités ont les significations suivantes :

$$(iP_+j) \Longrightarrow (c_i \nearrow) \wedge (c_j \nearrow) \quad (prop.) \tag{3.20}$$

Pour l'équation 3.20, le concept c_i a une influence positive sur le concept c_j signifie que plus c_i, implique plus de c_j.

$$(iP_j) \Longrightarrow (c_i \nearrow) \wedge (c_j \searrow) \quad (inv.prop.) \tag{3.21}$$

Pour l'équation 3.21, le concept c_i a une influence negative sur le concept c_j signifie que plus c_i, implique moins de c_j.

3.3.4 Processus et algorithmes de transformation

Nous utiliserons dans cette section pour des raisons de traitement informatique, la définition 3.6 :

Définition 3.6 *Une **carte cognitive** définie sur l'ensemble des concepts $\mathcal{C}$ est un graphe orienté étiqueté connexe ($\mathcal{C}$, $étiq_C$, $\mathcal{A}$, $étiq_A$) où :*
- *$étiq_C$ est une fonction d'étiquetage bijective qui associe à un noeud du graphe un concept de $\mathcal{C}$.*
- *$\mathcal{A} \subseteq \mathcal{C} \times \mathcal{C}$ est un ensemble d'arcs d'influence.*
- *$étiq_A : \mathcal{A} \rightarrow I$ est une fonction d'étiquetage qui associe à une influence une valeur de I.*

Dans notre cas $I = \{-\ ,\ +\}$ associe à une influence une valeur de polarité totalement positive ou totalement négative. Cependant il existe des cas où cet ensemble n'est pas binaire : il peut être représenté par $I = [-\ ,\ +]$, dans ce cas les polarités sont plus ou moins positive ou négative ; ou d'après Kosko [Kosko, 1986], par des variables linguistique ordonnées, I = {nul, faible, moyen, fort}

Cette définition donne également la possibilité d'un codage d'une carte cognitive en utilisant une matrice d'adjacence contenant les valeurs 0, +1, -1. 0 entre deux concepts indique qu'il n'y a pas d'arc entre les deux concepts, +1 correspond à une influence positive entre deux arcs et -1 indique une influence négative entre deux arcs. Ce codage a été employé par Axelrod [Axelrod, 1976].

Le processus de transformation d'une carte cognitive en un arbre de valeurs est un aspect important dans l'élaboration d'outils d'aide à la décision en particulier pour la mise en place d'un modèle d'évaluation pour des decisions de groupe. En utilisant les fondements théoriques et les conseils pratiques décrites dans les sous-sections 3.3.2 et 3.3.3, nous avons pu construire l'algorithme générale de transformation représenté dans la figure 3.8.

1. Identifier le principal objectif de la carte cognitive.
2. Marquer tous les objectifs fondamentaux liés à l'objectif principal.
3. Enlever tous les circuits : dupliquer les sommets (heuristique 1) ou fusionner les sommets (heuristique 2).
4. Hiérarchiser les objectifs fondamentaux : relier les objectifs fondamentaux à l'objectif principal par niveaux successifs. Arrêter l'étape quand l'objectif fondamental obtenu donne assez de détails permettant d'effectuer une quantification ou une mesure.
5. Arrêter l'algorithme quand tous les objectifs fondamentaux sont visités.

FIGURE 3.8 – Algorithme général de transformation.

Les cartes cognitives obtenues étant des graphes quelconque, il convient de vérifier si ils sont acycliques ou pas afin d'appliquer les recommandations ($\mathbf{R_1}$) et ($\mathbf{R_2}$). De ce fait nous avons proposé deux procédures pour vérifier si les cartes cognitives obtenues sont acycliques.

La première procédure consiste à faire un parcours en profondeur en coloriant les sommets du graphe comme le décrit l'algorithme 1. Sa complexité est en $\mathbf{O}(n+m)$, où n est le nombre de sommets et m le nombre d'arcs (si les accès aux successeurs sont en temps constant).

Algorithm 1 Vérification graphe acyclique par parcours en profondeur

Entrée : Graphe G
Sortie : Graphe acyclique G'

Méthode :

```
1: final static int OPEN = 0, USED = 1, CLOSED = 2 ;
2: static boolean acyclic (Graph G)
3: {
4: int n = G.vertices.length ;
5: int[] status = new int[n] ;
6: for (int x=0 ; x<n ; x++) status[x] = OPEN ;
7: for (int x=0 ; x<n ; x++)
8: if (status[x] == OPEN && cycle(G, x, status)
9: return false ;
10: }
11: static boolean cycle (Graph G, int x, int[] status)
12: {
13: status[x] = USED ;
14: for (int i=0 ; i < G.edgesFrom[x].length ; i++)
15: {
16: int y = G.edgesFrom[x][i] ;
17: if (status[y]==USED
18: || status[y]==OPEN && cycle(G,y,status))
19: return true ;
20: }
21: status[x] = CLOSED ;
22: return false ;
23: }
```

La deuxième procédure implémentée par l'algorithme 2 est plus pratique si on a une représentation du graphe sous forme de matrice booléenne (la matrice d'adjacence par exemple), mais elle est moins performante en $\mathbf{O}(n^3)$. Elle consiste à calculer la fermeture transitive du graphe, puis à regarder si un element apparaît dans la diagonale, si oui on a un cycle.

Ces deux procédures sont applicables dans notre cas en étiquetant les sommets des cartes cognitives par des nombres entiers $1, 2, 3...n$. L'une ou l'autre nécessite une forte interaction avec les parties prenantes : dans le cas où il y aurait des circuits, la fusion ou la duplication de

Algorithm 2 Vérification graphe acyclique par fermeture transitive

Entrée : Graphe G
Sortie : Graphe acyclique G'

Méthode :

```
1: static Relation transitiveClosure (Relation R)
2: {
3: Relation S = new Relation(R) ;
4: int n = S.m.length ;
5: for (int k=0 ; k<n ; k++)
6: for (int i=0 ; i<n ; i++)
7: for (int j=0 ; j<n ; j++)
8: S.m[i][j] = S.m[i][j] || S.m[i][k] && S.m[k][j] ;
9: }
```

sommets incombe aux parties prenantes.

Il est intéressant de voir sur un exemple comment la mise en oeuvre de toutes ces procédures permet de passer d'une représentation d'information plutôt hétérogène à une organisation de données qui a du sens du point de vue l'aide à la décision multi-critère.

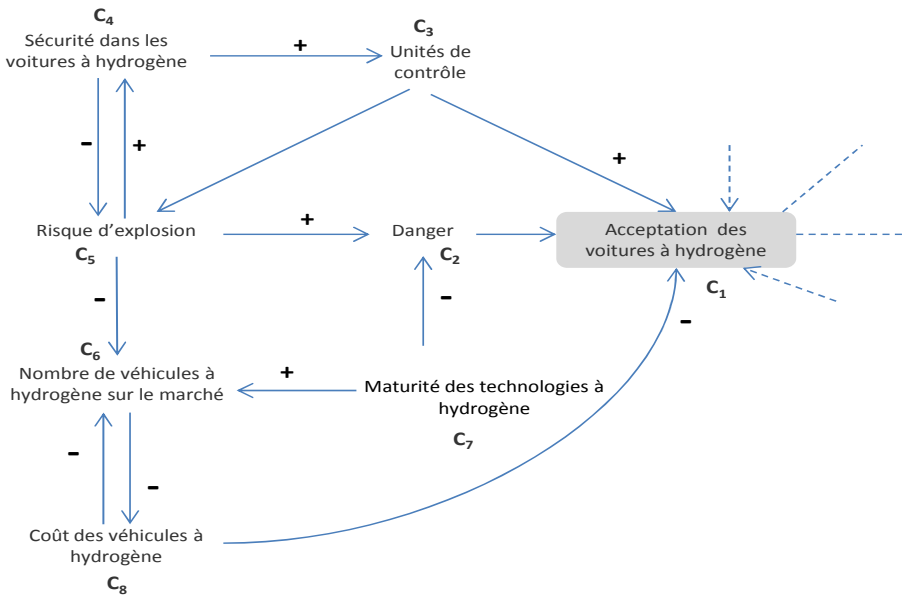


FIGURE 3.9 – Carte cognitive partiale sur les véhicules à hydrogène

Exemple 1 *La figure 3.9 représente une carte cognitive partielle dont la construction s'est appuyée sur la convention d'Eden [Eden, 1988]. Elle décrit les préoccupations d'un groupe*

d'individus en rapport avec leur acceptabilité des véhicules légers de transport fonctionnant à l'hydrogène. Diverses informations s'y retrouvent : les idées, les relations entre ces idées, les étiquettes...

En effet en appliquant nos procédures sur cette carte cognitive et en tenant compte de la table de correspondance 3.1, on obtient l'arbre de valeur à 3 niveaux de la figure 3.10 : le premier niveau commence avec l'objectif principal qui consiste à maximiser l'acceptabilité des systèmes fonctionnant à l'hydrogène. Pour atteindre cet objectif, il faut satisfaire plusieurs objectifs de niveau 2 parmi lesquels il faut maximiser la sécurité et minimiser les coûts d'acquisition et de maintenance. Ensuite le niveau 3 vise la satisfaction des objectifs tels que minimiser le risque d'explosion et maximiser les unités de contrôle sur les systèmes embarqués à hydrogène pour atteindre l'objectif de sécurité d'une part. Et maximiser le nombre de véhicules fonctionnant à l'hydrogène pour satisfaire l'objectif de minimiser les coûts d'autre part.

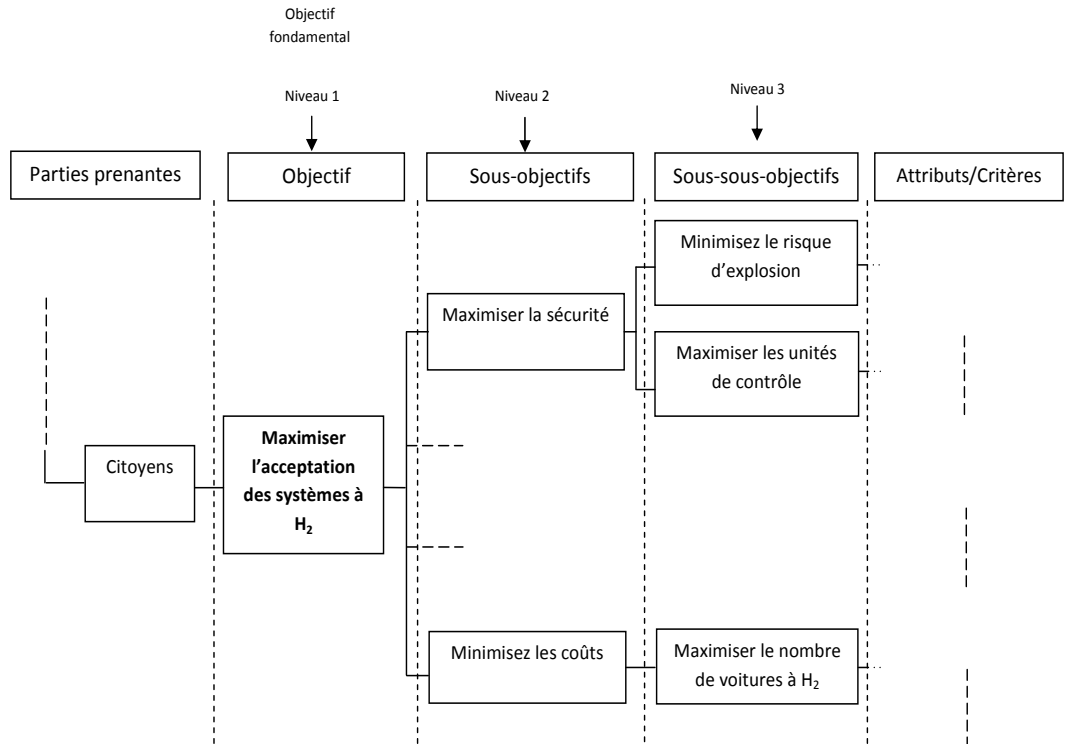


FIGURE 3.10 – Carte cognitive partiale sur les véhicules à hydrogène

3.4 Conclusion du chapitre 3

Dans de nombreux cas d'études concrets, l'analyse de données sur les graphes n'est pas limitée à la seule connaissance du graphe. Il est courant que des informations supplémentaires

soient disponibles sur les sommets et que l'utilisateur souhaite combiner ces informations à la structure du graphe lui-même pour comprendre l'intégralité des données en sa possession. C'est ce problème que nous avons abordé dans ce chapitre, en nous focalisant sur une méthode de structuration de problème qui combine deux modes de représentations de données : les cartes cognitives et les arbres de valeurs. Nous expliquons comment le choix d'un formalisme graphique de représentation de l'information (des parties prenantes ou du décideur) peut être plus ou moins adapté à une problématique décisionnelle donnée. Nous montrons également comment un tel choix peut permettre de combiner de manière efficace des informations de natures diverses (graphes, étiquettes, relations, variables textuelles...) pour construire une structure de données simplifiée et exploitable dans le contexte d'un modèle d'évaluation. Notre approche est illustrée par un premier exemple concret tiré du projet AIDHY : il a permis de mettre en oeuvre et de comprendre le fonctionnement général de la méthode. Un second exemple que nous présenterons au chapitre 4 illustre la méthode sur trois graphes réels de plusieurs dizaines de sommets, qui modélisent un corpus de préoccupations de quelques parties prenantes des technologies de l'hydrogène.

Chapitre 4

Application à l'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène : cas AIDHY

"As soon as questions of will or decision or reason or choice of action arise, human science is at a loss".

Noam Chomsky, - Professeur honoraire de linguistique au MIT et activist (1928-)

Extrait d'une interview

"There are no such things as applied sciences, only applications of science".

Louis Pasteur, - Microbiologiste, chimiste et humaniste français (1822-1895)

Dans le chapitre 2 nous avons défini l'objet et le cadre général de notre étude. Nous nous sommes attelés à comprendre puis à définir l'objet de notre travail ainsi que son environnement et ses contraintes. Cette étape nous a permis de rassembler toutes les billes nécessaires à la comprehension de la filière hydrogène. Ensuite nous avons structuré les connaissances sur l'hydrogène énergie dans une perspective d'analyse multicritère. Le principal résultat de ce chapitre c'est la construction d'une charte graphique permettant de représenter de manière synthétique tous les éléments importants de la filière hydrogène. Dans le chapitre 3 nous présentons le cadre théorique sur lequel reposera notre étude. Dans cette partie, après avoir présenté quelques développements importants sur la théorie de l'aide multicritère à la décision, nous donnons quelques méthodes de strucruration de problèmes de décision de groupe. Nous y présentons également notre démarche méthodologique, notamment comment nous avons intégrer les outils de structuration à notre processus d'aide à la décision.

Dans ce chapitre, nous utiliserons les résultats obtenus dans les chapitres 2 et 3 dans le cas pratique du problème d'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène. Ce cas réel nous servira de fil conducteur pour explorer tous les aspects théoriques importants de notre approche méthodologique. A la fin du chapitre, la table 4.46 résumera les outils et techniques que nous aurons utilisés durant cette étude.

4.1 Contexte décisionnel

Il convient, avant de poursuivre notre étude, de fixer le cap qui nous guidera dans la compréhension et par conséquent dans la recherche des solutions et propositions fiables pour résoudre les problèmes liés au déploiement futur des technologies de l'hydrogène. A cet effet nous rappelons quelques points fondamentaux qui permettent d'appréhender le contexte décisionnel qui nous intéresse. Nous décrirons sommairement quelques uns et réserverons des développements plus importants dans les sections suivantes pour ceux qui nous semblent essentiels.

- **Le Problème de décision** : évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène au regard de leur acceptabilité sociétale.
- **Le décideur** : dans notre processus décisionnel, le décideur, contrairement à des situations classiques de décision où il est unique, apparaît multiple. Selon le niveau d'implication dans le processus de décision, nous avons les pouvoirs publics (niveau stratégique) et les industriels (niveau opérationnel).
- **Les alternatives** : il s'agit d'un ensemble de scénarios construit sur la base des résultats de deux projets précédents et donc nous donnerons les détails plus tard (voir section 4.4).
- **Les parties prenantes** : en plus des pouvoirs publics et des industriels que nous avons déjà mentionnés, nous ajouterons le grand public. Cette rubrique fera aussi l'objet de développements ultérieurs.
- **Les valeurs** : elles sont construites autour des objectifs fondamentaux des différents groupes d'acteurs (pouvoirs publics, industriels, grand public) obtenus par application des méthodes de structuration.
- **Les sources d'information** : nous nous sommes largement inspirés des résultats des projets HyFrance et PROTEC-H2, en plus de l'interaction directe avec quelques experts

(AFH2, ALPHEA Hydrogène, CEA) de l'hydrogène et des résultats terrain des focus groups (M-LAB).

- **Les contraintes** : la dynamique de nos deux objets d'étude ; en effet les scénarios ainsi que la perception évoluent dans le temps.

Il faut préciser que dans notre contexte, nous sommes en présence d'une **décision sociale** s'appuyant sur un **régime de délégation** autour de plusieurs groupes d'acteurs dont les **experts** et le **grand public**. L'interaction nécessaire dans tout processus d'aide à la décision s'est faite directement lorsqu'il s'agissait des experts. En revanche celle avec le grand public était indirecte soit à travers des petits groupes pour les éléments de structuration (voir focus group en annexe E), soit par délégation à travers des sondages téléphoniques pour les éléments de modélisation multicritère (voir pondération des critères en section 4.5.5.11).

4.2 Les situations problématiques

L'ensemble des situations problématiques intrinsèquement liées au cycle de vie de l'hydrogène ont été présentées dans les parties précédentes sans se préoccuper ni de la manière, ni du processus dans lesquels elles allaient être traitées. En ce qui nous concerne, c'est comme processus d'aide à la décision que nous aborderont ces problématiques et donc avec l'impératif de les rendre intelligibles au sens du processus d'aide à la décision adopté. Par exemple on se demandera quel est le processus d'aide à la décision envisagé dans le cas de la mise en oeuvre d'une technologie de l'hydrogène. C'est également ici le lieu de passer d'une situation problématique plutôt mal structurée à une situation problématique clairement définie et formulée en termes d'acteurs, d'enjeux et de ressources. Les parties prenantes seront clairement définies et identifiées, leur position, leur rôle, leur influence ainsi que leur niveau d'implication ; la caractérisation de leur priorité par le couple enjeu/influence. Dans ce cas autant que possible construire une typologie des situations problématiques et d'outils d'aide à la décision dans le domaine de la prospective en matière d'énergie, notamment d'évolution des technologies de l'hydrogène.

Dans le cas de notre travail, nous avons pu mettre en évidence au travers des préoccupations des parties prenantes et de leur compréhension du problème de l'évolution des scénarios de l'hydrogène, des classes de scénario. Elles proviennent des focus groups et des enquêtes quantitatives. Ces classes ou catégories sont définies par des modalités très intuitives et fort heureusement classées : Catastrophe, Inquiétude, Confiance, Avenir Radieux. La catégorie "Catastrophe" définies les scénarios donc la mise en oeuvre aurait des conséquences catastrophique pour le grand public. La catégorie "Inquiétude" regroupe des scénarios donc la survenue inquiéterait le grand public. La catégorie "Confiance" contient les scénarios pour lequel le statu quo est maintenu dans la perception de ses conséquences par le grand public. Enfin, La catégorie "Avenir Radieux" contient des scénarios pour lesquels la perception du grand public sur ses conséquences est très optimiste. C'est donc une problématique de type tri qui conviendrait pour construire un outil d'évaluation des scénarios.

4.3 Première grille d'analyse méthodologique : la structuration

Pour aborder et aller au fond de toutes les questions soulevées au cours de notre analyse, nous avons choisi d'utiliser les méthodes du "Problem Structuring" ([Bouyssou et al., 2006], [Rosenhead and Mingers, 2001], [Woolley and Pidd, 1981], [Winterfeldt, 1980], [Dillon, 2000], [Keller and Ho, 1988], [Eden, 1988], [Eden, 1979],[Checkland, 1981], [Axelrod, 1976], [Clemen and Reilly, 2001]). Ce travail amont se fait parallèlement à une étude sur le terrain menée dans le cadre des focus group qui du reste fournissent des éléments d'entrée à la structuration du problème. Cette méthodologie est utilisée pour faire émerger les items constitutifs de nos situations problématiques comme les enjeux, les parties prenantes ainsi que leurs engagements vis à vis à la situation décisionnelle. C'est elle qui permet de donner du sens aux termes comme scénario, acceptabilité sociale, etc. Pour se fixer un peu les idées sur les tâches que nous allons entreprendre, donnons en quelques illustrations. Prenons l'exemple du maillon ultime de la chaîne de l'hydrogène, c'est-à-dire celui du consommateur. Il se pourrait qu'il en existe plusieurs catégories n'ayant pas toutes le même rapport à l'hydrogène : consommateurs industriels, individuels, niche de consommateurs...De même les engagements d'un responsable local, le maire en occurrence, pourrait être déclinés en ressources qu'il va mettre en place (son autorité ou son aura politique pour expliquer à sa population les biens fondés de l'implantation d'une unité de stockage de l'hydrogène par exemple) et en ressources qu'il va demander (les connaissances sur l'hydrogène, et les taxes par exemple). De manière plus générale, cette méthodologie, assortie d'outils à choisir dans un large panel de méthodes de structuration permet de capturer plus d'informations pertinentes pour la construction des scénarios impliquant un grand nombre de facteurs. Elle permet de compléter les données quantitatives par des données basées sur du jugement, des croyances et des préférences pour structurer et paramétrer en amont les différents scénarios.

Nous commencerons cette étape de structuration par une identification exhaustive des acteurs de la filière hydrogène, ensuite nous associerons à chaque groupe d'acteurs ses objectifs. Nous terminerons cette section par la description des scénarios.

4.3.1 Les acteurs de la filière hydrogène

Les différents éléments recueillis dans l'étude bibliographique de la filière hydrogène, les avis d'experts de la filière, les échanges dans le projet ainsi que les rapports du focus groups [Damart, 2011] ont permis de dégager trois grandes catégories d'acteurs :

1. Les industriels
2. Le grand public
3. Les autorités publiques

Chacune des catégories précédentes peuvent être divisées en sous catégories d'acteurs ayant des intérêts divergents ou convergents et des implications différentes dans la filière hydrogène éventuellement au sein d'une même catégorie. Ceci implique de tenir compte non seulement des acteurs avec leurs intérêts pris isolément, mais de considérer aussi les inévitables rapports conflictuels qu'ils peuvent avoir.

Les trois catégories d'acteurs sont représentées dans les sous-sections suivantes avec leurs sous-catégories.

4.3.1.1 Les industriels

Ils constituent un maillon essentiel dans le développement des technologies et des infrastructures support de la filière hydrogène. D'une part nous avons des industriels qui assurent la logistique de l'hydrogène de sa production à son utilisation ; d'autre part il y a également des industriels qui produisent toutes sortes de matériels susceptibles de fonctionner à l'hydrogène. Ces différents acteurs sont listés dans le schéma ci-dessus :

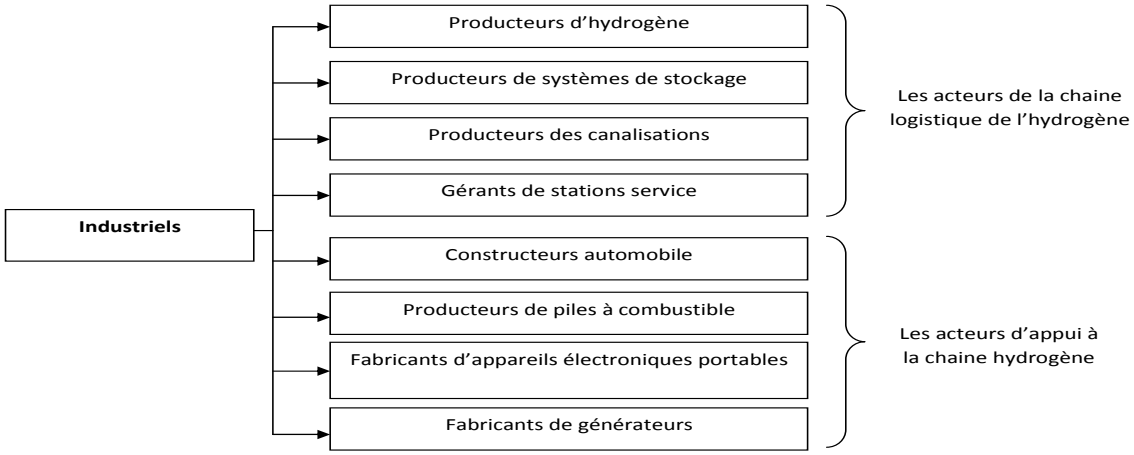


FIGURE 4.1 – Les industriels

4.3.1.2 Les autorités publiques, associatives et syndicales

L'engagement politique, les pressions associatives et syndicales jouent un rôle essentiel à tous les niveaux du déploiement d'une nouvelle technologie en général et en particulier pour l'hydrogène qui est un gaz pas plus dangereux que les autres mais qui du reste n'est pas à mettre entre toutes les mains sans réglementation particulière. C'est ainsi qu'on a pu identifier d'une part des acteurs d'influence supra - nationaux (l'Union Européenne), nationaux (les états), et locaux (les collectivités locales) et le type de pouvoir qu'ils exercent. Et d'autre part les acteurs (syndicalistes, consommateurs, riverains) qui peuvent avoir un pouvoir de pression sur les politiques et les industriels par rapport au développement de la filière hydrogène.



FIGURE 4.2 – Les autorités publiques

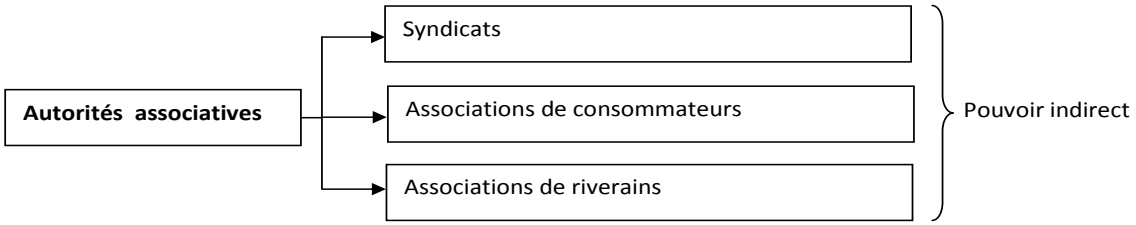


FIGURE 4.3 – Associations

4.3.1.3 Le grand public

Par grand public, nous entendons tous les utilisateurs des technologies et dérivés de l'hydrogène, les personnes voisines d'une installation fonctionnant avec un système à hydrogène, et le citoyen quelconque peu ou prou toucher par un tel système. Nous avons construit le schéma suivant en trois grands groupes de public selon leur niveau de proximité avec les problématiques de l'hydrogène.

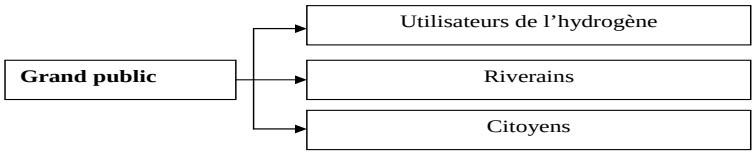
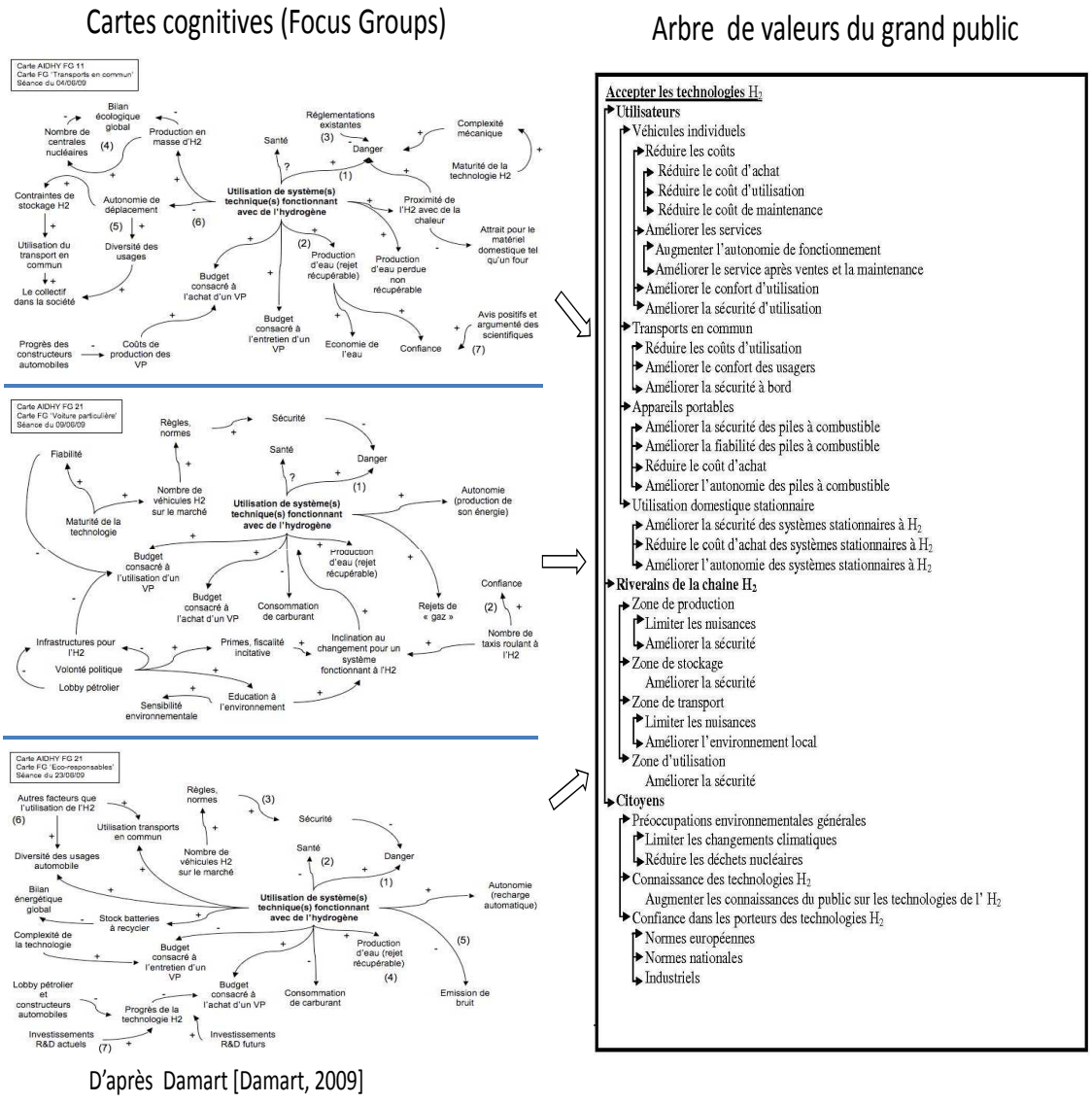


FIGURE 4.4 – Le grand public

4.3.2 Les objectifs des acteurs de la filière hydrogène énergie

L'une des étapes importante dans la structuration analytique du problème de décision et qui vient juste après la définition du contexte décisionnel est la génération des objectifs ([Hämäläinen, 2003], [Hämäläinen, 2008]). De ce point de vue, il est utile de lister tous les objectifs importants. Rousval et Maurin propose une description hiérarchique des objectifs [Rousval and Maurin, 2008] pour structurer les problèmes ayant les mêmes caractéristiques

que le notre. Cette méthode inaugurée par Keeney [Keeney and Raiffa, 1976b], [Keeney, 1992] consiste à spécifier les objectifs en termes de contexte décisionnel, objet et direction préférentielle. Ce dernier distingue deux types d'objectifs : les objectifs fondamentaux et les objectifs de moyens. Selon Keeney [Keeney and Raiffa, 1976a], "The fundamental objective characterizes an essential reason for interest in decision situation" ; on the other side, "A means objective is of interest in the decision context because of its implications for the degree to which another (more fundamental) objective can be achieved [...]". Entre les deux types d'objectifs coexiste généralement un lien de causalité. Pour identifier de manière exhaustive ces les objectifs fondamentaux, Hamalainen [Hämäläinen, 2008] propose d'utiliser une liste de souhaits des parties prenantes, des alternatives, des conséquences ou d'autres perspectives. Dans notre cas, nous avons utilisés des informations provenant de notre analyse des différentes études sur la filière hydrogène, des experts en hydrogène impliqués dans le projet AIDHY, et des résultats des différents focus groups. Nous pouvons voir une illustration du passage des informations recueillies sous formes de cartes cognitives (voir annexe E), lors des focus groups, aux arbres des valeurs dans la figure 4.5. Notons que focus groups, cartes cognitives et arbres des objectifs sont des étapes importantes du processus de structuration dans un processus de décision de groupe. Les focus groups sont des cadres d'échange formel entre les parties prenantes du processus de décision. L'objectif de ces échanges était de faire émerger les idées importantes et récurrentes sur le problème de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. Cette étape correspond à une phase qualitative de l'analyse de notre problème de décision. Cette dernière s'achève par l'élaboration de représentations graphiques simples et inter-connectées des concepts qui caractérisent mieux les différentes représentations que les parties prenantes ont des problématiques de l'hydrogène-énergie. Il s'agit des cartes cognitives construites sur trois catégories d'acteurs : *"les utilisateurs importants des transports en commun en zone urbaine, les utilisateurs des voitures particulières en zone urbaine et périurbaine, les utilisateurs d'une technologie de production d'énergie éco-responsable"*[Damart, 2011]. Rappelons pour conclure sur cet aspect de l'analyse que le focus group défini le cadre de concertation et les cartes cognitives sont des outils pour formaliser les participations des intervenants des focus groups.



D'après Damart [Damart, 2009]

FIGURE 4.5 – Passage des cartes cognitives aux arbres de valeurs

De manière pratique, nous avons considéré chaque groupe d'acteurs comme point de départ de chacun de nos trois arbres d'objectifs hiérarchiques. Ensuite un décalage vers la droite dans la ramification marque le changement de niveau dans la hiérarchie. Chaque item ou ensemble d'items situé juste en dessous d'un autre et décalé d'un rang vers la droite est un ensemble de sous objectifs de l'objectif au dessus. En partant d'un objectif plus général, nous le décomposons jusqu'à obtenir un objectif atomique, spécifique et non décomposable. L'application de cette méthodologie aux trois grandes catégories d'acteurs de la filière hydrogène énergie a donné lieu aux arbres des sections suivantes.

4.3.2.1 Les objectifs des industriels

Les objectifs des industriels de la filière hydrogène portent essentiellement sur ce qui permet de développer et d'améliorer les systèmes techniques fonctionnant à l'hydrogène. Ils sont principalement de nature économique et technique. La figure 4.6 donne une décomposition de ces objectifs.



FIGURE 4.6 – Les objectifs des industriels

4.3.2.2 Les objectifs des autorités publiques

Les autorités publiques sont davantage sensibles à des enjeux plus globaux pouvant impacter la société à plusieurs niveaux : niveaux organisationnel et individuel. La figure 4.7 donne une décomposition des objectifs des autorités publiques en fonction de ces enjeux.

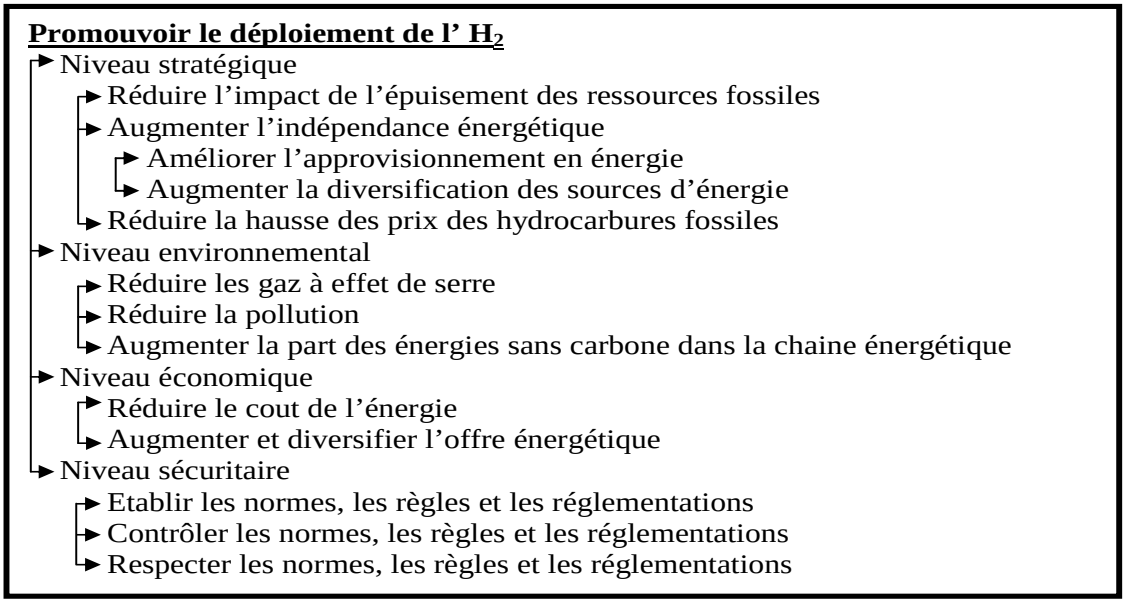


FIGURE 4.7 – Les objectifs des autorités publiques

4.3.2.3 Les objectifs du grand public

Les objectifs du grand public visent davantage les usages potentiels des systèmes techniques fonctionnant à l'hydrogène et de leurs conséquences. Ils dépendent du niveau de proximité avec de tels systèmes ainsi que du niveau de sensibilisation des individus en tant que citoyen par rapport à l'hydrogène. La figure 4.8 donne une décomposition de ces objectifs en fonction des catégories d'individus qui constituent le grand public.

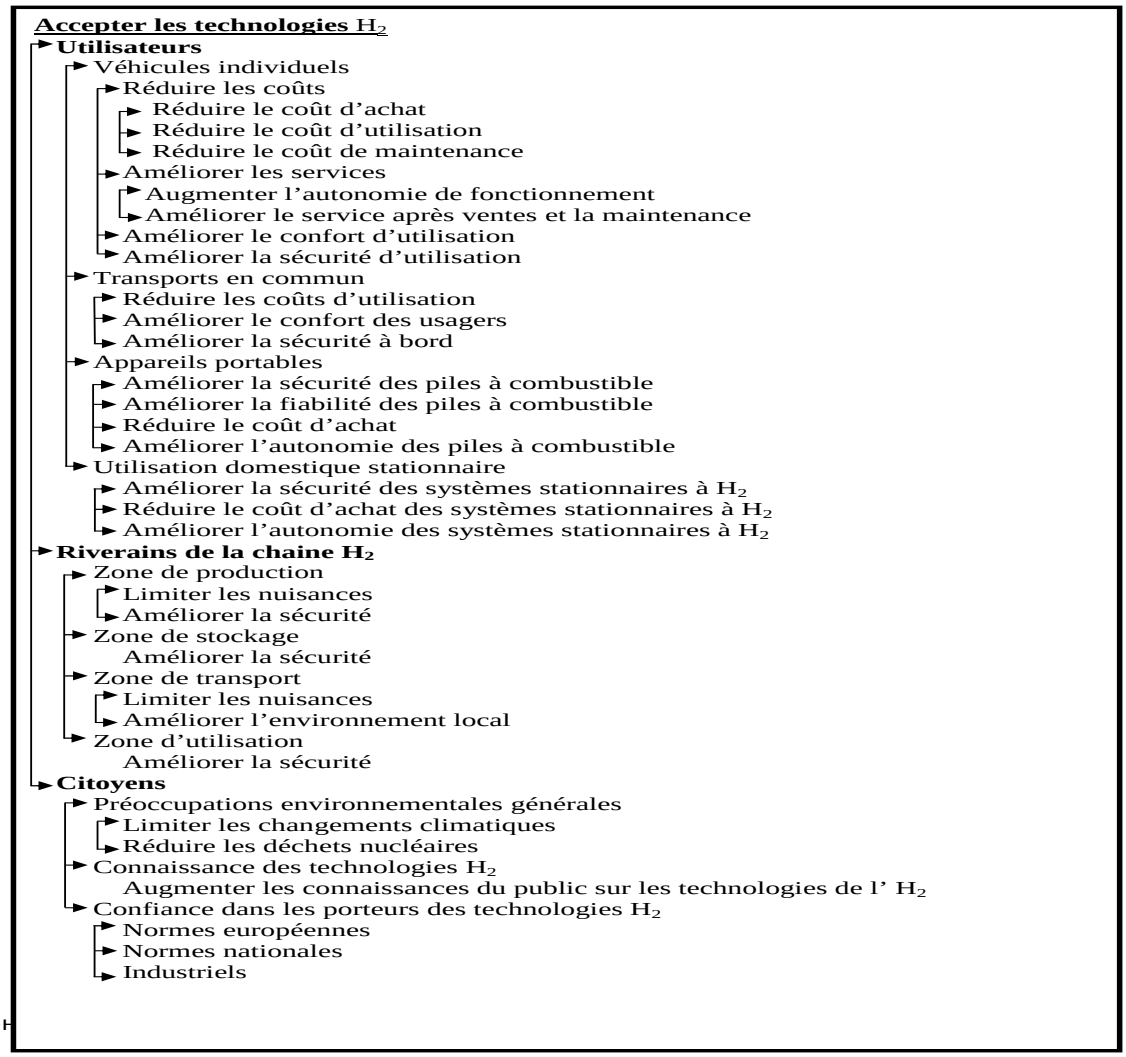


FIGURE 4.8 – Les objectifs du grand public

4.4 Construction des scenarios des technologies de l'hydrogène

4.4.1 Définition générale du scénario

Notre étude a pour but de construire un modèle d'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène. Mais au fond c'est quoi donc un "scénario" ? Quel sens ce mot a-t-il dans un contexte de planification de politique publique comme celui du projet AIDHY ? Que pouvons nous en tirer pour construire notre modèle d'évaluation ? C'est ce que nous essayerons de préciser dans cette section.

Selon certains auteurs de la prospective stratégique comme De Jouvel et Godet , [Jouvel, 1999], [Godet, 2007],[Schwartz, 1993] un scénario est un ensemble formé par la description d'une

situation future et du cheminement des événements qui permettent de passer de la situation origine à la situation future. Ils distinguent deux types de scénarios :

1. *Les scénarios exploratoires qui partent des tendances passées et présentes et conduisent à des futurs vraisemblables. Ils sont tendanciels ou contrastés.*
2. *Les scénarios d'anticipation ou normatifs qui sont construits à partir d'images alternatives du futur et sont ou souhaités ou au contraire redoutés. Ils sont conçus de manière rétrospective et sont aussi tendanciels ou contrastés.*

Les scénarios constituent un éclairage indispensable pour orienter les décisions stratégiques. La construction des scénarios consiste donc à faire émerger un ensemble de représentations de l'état du système qu'on analyse. La base est l'expression d'un système d'éléments dynamiques liés les uns aux autres. Le système étant lui-même lié à son environnement extérieur, il convient donc de :

- délimiter le système et son environnement
- déterminer les variables essentielles
- analyser les conséquences des hypothèses sur ces variables

L'environnement étant identifié et les variables déterminées, on peut repérer les futurs possibles par une liste d'hypothèses traduisant par exemple le maintien d'une "tendance" ou au contraire sa rupture. On peut ensuite réduire l'incertitude en estimant les probabilités subjectives d'occurrence des différentes combinaisons ou des différents événements clés pour le futur. L'analyse structurelle permet d'identifier les variables clés et l'enquête auprès d'experts permet d'obtenir des hypothèses clés pour le futur.

4.4.2 Éléments de construction des scénarios de l'hydrogène

En nous inspirant de la théorie de la prospective, notre idée de base c'est de faire un rapprochement entre l'analyse de la chaîne hydrogène à celle d'un problème de prospective. En effet les dimensions ou composantes démographique, économique, technique ou sociale d'un problème sont d'un point de vue méthodologique, assimilables aux composantes de la chaîne hydrogène. Et comme tel, elles peuvent être caractérisées par un certain nombre d'états possibles (hypothèses ou configurations). Dans ce cas un scénario ne sera alors rien d'autre qu'un cheminement, une combinaison associant une configuration de chaque composante. un scénario donné sera caractérisé par le choix d'une configuration spécifique sur chacune des composantes. On peut donc imaginer qu'il y aura autant de scénarios possibles que de combinaisons de configurations. Mais cet ensemble des possibles est fortement contraint et limité par d'une part des prévisions réalistes (pour éviter des hypothèses trop farfelues), et d'autre part par les limites technologiques (par exemple sur les modes de stockage de l'hydrogène) [1].

La construction des scénarios de l'hydrogène s'appuie sur deux éléments essentiels :

- la prise en compte de la chaîne hydrogène
- leur capacité à être évaluer par les préoccupations du grand public

Il s'agit donc de construire des scénarios à partir de la chaîne H_2 en tenant compte des objectifs manifestés dans les focus groups par le grand public. Les composantes ou variables clés de la chaîne hydrogène sont : source, production, stockage, distribution, transport, utilisation.

1. Le stockage solide de l'hydrogène reste au stade de la recherche et les coûts seraient prohibitifs.

A partir des éléments d'analyse et de structuration précédemment obtenus, nous avons pu obtenir les **quelques configurations** suivantes :

Configuration 1 : production décentralisée de l'hydrogène à partir de sources renouvelables d'énergie comme le solaire avec un stockage solide et pour une utilisation dans des maisons individuelles (en cogénération [2]).

Variables et (instances) de la configuration 1 : sources (solaire), production (décentralisée), utilisation (maisons individuelles).

Configuration 2 : production décentralisée de l'hydrogène à partir des résidus pétroliers (sources fossiles) par les industries pétrolières et stocké sous forme gazeuse pour une utilisation en interne pour le chauffage des bâtiments.

Variables et (instances) de la configuration 2 : sources (résidus pétroliers), production (décentralisée), stockage (gazeux), utilisation (chauffage bâtiments).

Configuration 3 : production centralisée de l'hydrogène à partir d'une source géothermique par une unité de production dédiée et transporté par camions citerne sous forme liquide pour être stocké et distribuée par des stations services aux utilisateurs d'automobiles.

Variables et (instances) de la configuration 3 : sources (géothermie), production (centralisée), stockage (liquide), transport (camions), distribution (stations service), utilisation (véhicules).

Configuration 4 : production centralisée de l'hydrogène à partir de l'électricité d'origine nucléaire par une centrale pour être distribué par pipeline sous forme gazeuse pour le chauffage dans les habitations collectives.

Variables et (instances) de la configuration 4 : sources (nucléaire), production (centralisée), stockage (gazeux), distribution (pipeline), utilisation (chauffage habitations collectives).

Configuration 5 : production centralisée de l'hydrogène à partir de l'électricité d'origine hydraulique pour être distribué par bateaux sous forme gazeuse pour la fabrication des batteries (solides) des appareils électroniques portables.

Variables et (instances) de la configuration 5 : sources (hydraulique), production (centralisée), stockage (gazeux et solide), distribution (bateau), utilisation (batteries portables).

etc.

En considérant les projections des autres projets (Hyways, HyFrance, Protec-H2) nous pouvons présenter les **quelques hypothèses** suivantes comme exemples d'hypothèses réalistes :

hypothèse 1 : 5 % de la flotte des véhicules légers [3] en France se converti à l'utilisation de l'hydrogène-énergie à l'horizon 2020.

hypothèse 2 : 20 % de la flotte des véhicules (lourds et légers) en France se converti à l'utilisation de l'hydrogène-énergie à l'horizon 2030.

2. La cogénération est un principe de production simultanée d'électricité et de chaleur, la chaleur étant issue de la production électrique ou l'inverse.

3. par opposition aux poids lourds et super lourds

hypothèse 3 : 70 % de la flotte des véhicules (lourds et légers) en France se converti à l'utilisation de l'hydrogène-énergie à l'horizon 2050.

etc.

4.4.3 Contraintes sur les scénarios

Dans la définition formelle que nous avons donné de ce qu'est un scénario dans la section 4.4.4, il apparaît que plusieurs combinaisons sont possibles pour obtenir un scénario. Cependant toutes les combinaisons ne sont pas admissibles pour des raisons économiques, environnementales, technologiques et sécuritaires. D'où l'idée d'introduire la notion de contrainte pour traduire cette restriction du champ des possibles aux seules combinaisons admissibles. Nous Commencerons par donner quelques exemples concrets de combinaisons non admissibles.

Exemple 2 *:*

Production décentralisée de l'hydrogène à partir de sources renouvelables d'énergie comme l'éolien avec un stockage solide et pour une utilisation dans le transport.

En effet en l'état actuel des technologies, la configuration précédente (cf. exemple 2) n'est pas raisonnablement envisageable pour des raisons de maturité technologique et par conséquent économiques. La production grace à l'éolien n'est pas soutenable pour une consommation de masse car ce mode de production intermittent est tributaire du vent. Pour ce qui est du mode de stockage solide, le coût est prohibitif et le poids et l'encombrement sont très dissuasive pour une utilisation dans les voitures.

Exemple 3 *:*

Production centralisée de l'hydrogène à partir de sources fossiles d'énergie comme le charbon avec un stockage gazeux et pour une utilisation dans les appareils électroniques grand public.

La configuration de l'exemple 3 n'est pas réalisable puisqu'elle se heurte à des contraintes d'ordre environnemental d'une part, à cause des émissions de CO_2 par le charbon et technologique d'autre part du fait de la nécessité d'adapter les appareils électroniques à un fonctionnement à batteries ou piles à hydrogène. En plus il restera encore à vaincre les reticences des usagers à porter avec eux des appareils chargés à l'hydrogène (contrainte de sécurité liée à la gestion du risque réel ou perçu induit par les technologies à hydrogène sur les appareils portables).

En définitive nous pouvons retenir cinq grandes contraintes pour la construction des scénarios de développement des technologies de l'hydrogène :

- Contraintes technologiques (limites technologiques, mise en oeuvre technologiques,...)
- Contraintes environnementales (traité de Kyoto, grenelle de l'environnement, ...)
- Contraintes économiques (compétitivité des technologies de l'hydrogènes, coût des technologies H_2)
- Contraintes sociales (acceptation ou rejet du grand public)

- Contraintes sécuritaires (législation sur les produits inflammables, normes nationales et communautaires)

4.4.4 Définition formelle d'un scénario

La définition précédente n'est pas adaptée à une manipulation mathématique des données qu'elle permet de dégager. Pour y parvenir, nous proposons une définition plus formelle du concept de scénario que nous allons utiliser pour construire notre modèle d'évaluation.

Définition 4.1 ***(scénario)***
soit $\mathcal{S}$ l'ensemble des scénarios,
soit $\mathcal{C}$ l'ensemble des configurations de notre système (chaîne hydrogène),
soit $\mathcal{H}$ l'ensemble des hypothèses portant sur notre système,
soit $\mathcal{T}$ l'ensemble des horizons temporels,

tout élément $s \in \mathcal{S}$ sera appelé scénario s'il est un triplet $\langle c_i, h_j, t_k \rangle$ appartenant à $\mathcal{C} \times \mathcal{H} \times \mathcal{T}$

Autrement dit tout scénario sera caractérisé par la donnée d'une instance du triplet $\langle c_i, h_j, t_k \rangle$.

En reprenant les configurations et les hypothèses de la sous-section 4.4.1, nous obtenons :
$\mathcal{C} = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, \ldots\}$
$\mathcal{H} = \{h_1, h_2, h_3, \ldots\}$
$\mathcal{T} = \{t_1, t_2, t_3, \ldots\}$
avec des exemples de scénarios suivants :
$s_1 = \langle c_1, h_2, t_2 \rangle$, $s_2 = \langle c_3, h_2, t_1 \rangle$, $s_3 = \langle c_4, h_1, t_1 \rangle$, $s_4 = \langle c_5, h_2, t_3 \rangle$, $s_5 = \langle c_2, h_3, t_1 \rangle$,...

Remarque 4.1 *Les instances des hypothèses et du temps ont des conséquences sur les composantes des configurations. Et c'est précisément la traduction de ces conséquences sur certains attributs (variables) du système qui retiendra particulièrement notre attention pour l'évaluation multicritère.*

Définition 4.2 ***(scénario admissible)***

En considérant l'ensemble des contraintes définies à la section 4.4.3, que nous noterons $\mathcal{C}_{ti}$, un scénario admissible sera défini par la donnée des deux éléments suivants :

$\longrightarrow$ *le triplet $\langle c_i, h_j, t_k \rangle$*

$\longrightarrow$ *sous contraintes c_{ti}, $c_{ti} \in \mathcal{C}_{ti}$*

4.4.5 Application à la construction des scénarios

Le **chapitre 2** nous a permis de conclure que le problème de l'hydrogène ne devient tangible qu'en le positionnant sur une chaîne. Un scénario de développement des technologies de l'hydrogène devra intégré toutes ou partie des composantes de cette chaîne. Dans le cadre de notre étude, on entend par scénario toute combinaison possible des phases du processus de l'hydrogène faite sur la base des hypothèses de demande en énergie à divers horizons (voir la définition 4.4.4). Dans cette acception de scénario, il nous semble important de faire émerger quatre éléments fondamentaux :

- La chaîne intégrale de l'hydrogène et ses composantes
- Les hypothèses sur la demande en hydrogène pour la consommation énergétique
- Les conséquences de ces hypothèses (ou flux) sur les autres composantes de la chaîne
- L'horizon temporel

La première restriction que nous avons fait c'est de ne considérer que le besoin en hydrogène tiré par la consommation dans les transports. Dans ce dernier cas, les hypothèses portent sur le taux de pénétration ou diffusion des véhicules fonctionnant à l'hydrogène. Ce taux désigne la proportion de la flotte de véhicules qui fonctionnerait à l'hydrogène énergie. Dans ce cas de figure ou c'est la demande qui tire la production, l'intérêt de l'étude c'est de voir comment ce flux se répartit sur les autres maillons de la chaîne hydrogène ainsi que les conséquences qu'elles génèrent. Par exemple en supposant un taux de pénétration de 10%, on peut selon des règles de calculs précis, déterminer les conséquences sur un scénario en termes de moyens de distribution (le nombre de stations services), de stockage, de production,...Et selon le mode de production obtenu, on peut également déterminer les implications en termes d'émission de CO_2, ou bien en termes de nombres de tranches nucléaires. Nous avons utilisé des modèles de calcul contenu dans la littérature sur l'hydrogène que nous avons adaptés à notre étude. La figure 4.9 nous donne un exemple d'hypothèse de calcul et ses conséquences. Comme nous indique cette figure, nous avons fait des hypothèses sur trois taux de pénétration des voitures à hydrogènes (20% : pénétration faible, 50% : pénétration moyenne et 100% : pénétration forte). Autrement dit on a fait les hypothèses successives que 20%, 50% et 100% du parc automobile léger fonctionne totalement à l'hydrogène énergie et on en a mesuré les conséquences sur : la distribution, le transport, le stockage et la source de l'hydrogène. Au niveau de la production ce modèle a permis de définir les mix énergétiques privilégiés et de quantifier la contribution individuelle de chaque source selon chaque hypothèse. Il a également permis de définir les quantités par mode de stockage et de transport et par voies de distribution.

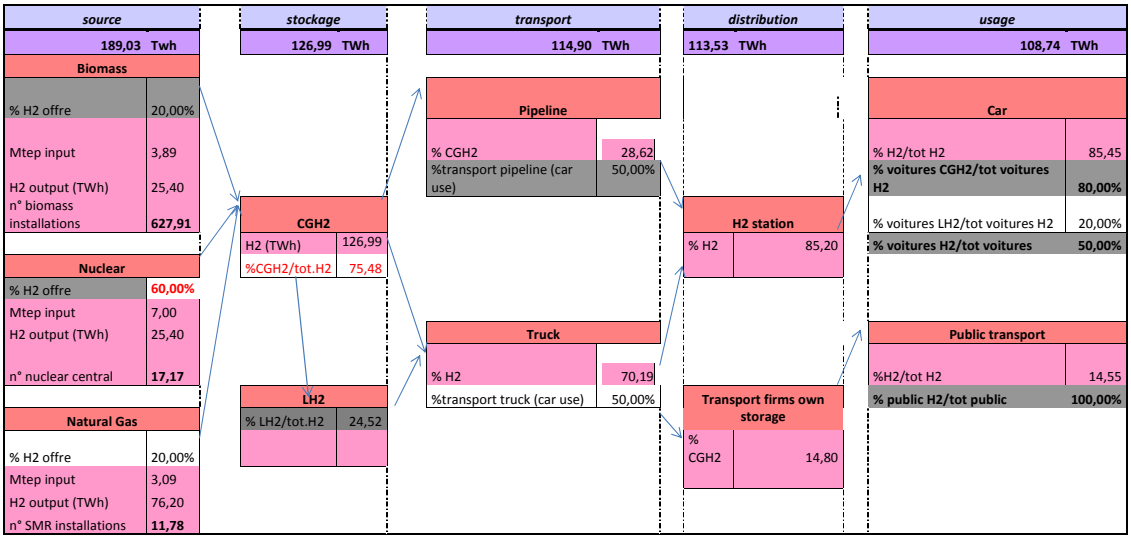


FIGURE 4.9 – Exemple d'hypothèse et conséquences sur la chaîne hydrogène

Sur la base de ce travail, nous avons pu structurer cinq scénarios à partir de deux précédents projets sur l'hydrogène. Nous décrivons dans les tables ci-dessus cinq scénarios issus des projets PROTEC-H2 et HyFrance [LeDuigou, 2010], [Agator and Avril, 2006], [LeDuigou, 2009], [Bellevrat et al., 2009]. Ils consistent en des hypothèses et la distribution temporelle des conséquences de celles-ci sur certaines séquences (production, transport ou distribution, usages) du cycle de vie de l'hydrogène. Ces scénarios ont été construits autour des maillons de la chaîne hydrogène qui nous semblent porteur d'information dans la perspective de leur évaluation multicritère.

4.4.5.1 Scénario S_1 : Baseline

Scénario Baseline	Hypothèse : Monde non contraint, soumis aux seules lois du marché, sans politique de soutien particulier à l'H_2.		
Sources	Renouvelable : 5% ; Nucléaire :2% ; Fossiles :93%		
Autres conséquences	Production centralisée ; Transport par pipeline ; H_2 gazeux		
	Horizon		
	2020	2030	2050
Diffusion des véhicules	0,5%	1%	4%
Emission de CO_2 en Mt (Megatonne)	125	120	118
Demande d'H_2 en Mtep (Megatonne équivalent pétrole)	[0, 2.5]	[1, 2]	[2, 5]

TABLE 4.1 – Scénario Baseline

4.4.5.2 Scénario S_2 : Solution H_2^+

Scénario Solution H_2^+	Hypothèse : stabilisation des émissions de CO_2 ; réduction des émissions d'un facteur 2,5		
Sources	Renouvelable : 40% ; Nucléaire :45% ; Fossiles :15%		
Autres conséquences	Production décentralisée ; Transport par pipeline et camion		
	Horizon		
	2020	2030	2050
Diffusion des véhicules	1%	2%	41%
Emission de CO_2 en Mt (Megatonne)	115	100	50
Demande d'H_2 en Mtep (Megatonne équivalent pétrole)	[0, 2.5]	[1, 2]	[9, 10]

TABLE 4.2 – Scénario Solution H_2^+

4.4.5.3 Scénario S_3 : Challenge H_2^+

Scénario Challenge H_2^+	Hypothèse : Percée technologique au niveau de la demande (transport), doublement du montant R&D, réduction de 20% des coûts plancher, forte incitation fiscale (TIPP nulle jusqu'en 2050)		
Sources	Renouvelable : 5% ; Nucléaire :2% ; Fossiles :93%		
Autres conséquences	Production centralisée ; Transport par pipeline ; H_2 gazeux		
	Horizon		
	2020	2030	2050
Diffusion des véhicules	1%	2%	41%
Emission de CO_2 en Mt (Megatonne)	120	110	85
Demande d'H_2 en Mtep (Megatonne équivalent pétrole)	[0, 2.5]	[1, 2]	[9, 10]

TABLE 4.3 – Scénario challenge H_2^+

4.4.5.4 Scénario S_4 : Pessimiste HyFrance

Scénario Pessimiste HyFrance	Hypothèse : utilisation dans les transport et faible diffusion		
Sources	Renouvelable : 19% ; Nucléaire : 20% ; Fossiles : 61% (2050)		
Autres conséquences			
	Horizon		
	2020	2030	2050
Diffusion des véhicules	0,1%	2%	20%
Emission de CO_2 en Mt (Megatonne)	95	97	78
Demande d'H_2 en Mtep (Megatonne équivalent pétrole)	0,12	0,72	8,84

TABLE 4.4 – Scénario Pessimiste HyFrance

4.4.5.5 Scénario S_5 : Optimiste HyFrance

Scénario Optimiste HyFrance	Hypothèse : utilisation dans les transport et forte diffusion		
Sources	Renouvelable : 8% ; Nucléaire : 20% ; Fossiles :72% (2050)		
Autres conséquences			
	Horizon		
	2020	2030	2050
Diffusion des véhicules	1%	12%	70%
Emission de CO_2 en Mt (Megatonne)	98	82	42
Demande d'H_2 en Mtep (Megatonne équivalent pétrole)	0,24	5,26	32,98

TABLE 4.5 – Scénario Optimiste HyFrance

4.4.6 Construction des critères

L'une des étapes clé d'un processus de décision est la construction d'une famille cohérente de critères qui représentent autant de points de vue suivant lesquels seront évaluées les actions,

les scénarios dans notre étude. A ce stade nous avons utilisé l'arbre des objectifs du grand public pour définir nos critères. Nous en avons identifié sept que nous décrivons dans les sous section suivantes. Notre modèle étant orienté grand public, ces sept critères dérivent des arbres de valeurs du grand public qui présente à la base un nombre plus important de critères. Mais en éliminant des critères redondants tel qu'ils ont été définis à l'axiome 3.2.3 de la section 3.2.4.2, chapitre 3, nous avons agrégé un certains nombre d'entre ceux qui définissaient des valeurs similaires. En réalité l'arbre des objectifs du grand public nous a permis d'avoir une description exhaustive des critères qui représentent les points de vue par rapport auxquels l'hydrogène est perçu par le grand public. En même temps il donne pour chacun de ces critères sa direction de préférence. Ce sont les deux principaux enjeux de la construction de l'arbre des objectifs (objectifs et sens de préférence) qui permettent la transition des modalités verbales obtenues dans les focus groups aux critères directement opérationnels dans un module d'évaluation.

Les sept critères que nous avons retenus synthétisent très bien les préoccupations du grand public décrites dans les cartes cognitives. En effet il ressort des cartes cognitives (voir annexe E) et des arbres de valeur (voir figure 4.8) cinq préoccupations importantes par rapport aux technologies de l'hydrogène :

- l'environnement
- la sécurité
- la sûreté d'approvisionnement
- l'économie
- la disponibilité

Les sections suivantes détaillent ces sept critères à travers des éléments essentiels à leur utilisation dans un modèle d'évaluation : description, indicateur, sens de variation, échelle.

4.4.6.1 Emission de CO_2

Dans notre modèle orienté grand public, le critère Emission de CO_2 est mesuré par l'indicateur facteur de réduction des émissions CO_2. Cet indicateur a intuitivement un sens de préférence croissant pour le grand public. C'est-à-dire que plus cet indicateur est important, meilleur le scénario est.

Critère : Emission de CO_2				
Code	*Description*	*Indicateur*	*Sens de variation*	*Echelle*
ECo	Il permet de mesurer le facteur de réduction du CO_2 dont l'objectif est le facteur 4 (F4).	Facteur de réduction des émissions de CO_2	Croissant	Échelle discrète à quatre échelon : F1, F2, F3, F4

TABLE 4.6 – Emission de CO_2

4.4.6.2 Parc Nucléaire

Le critère Parc Nucléaire est mesuré par le nombre de tranches ou centrales nucléaires supplémentaires, c'est-à-dire le nombre de tranches qu'il faudra en plus pour satisfaire une

modification de la demande courante induite par une hypothèse différente. Et en se basant toujours sur notre modèle orienté grand public, qui manifeste un point de vue réfractaire à une augmentation de tranches, plus il y a de centrales, moins le scénario est accepté. Cela implique un sens de variation décroissant pour l'indicateur nombre de tranches supplémentaires.

Critère : Parc Nucléaire				
Code	*Description*	*Indicateur*	*Sens de variation*	*Échelle*
PNu	Il permet de mesurer le taux d'augmentation du parc nucléaire national par rapport à l'année de référence.	Nombre de centrales nucléaires supplémentaires	Décroissant	Échelle numérique continue à valeurs entières

TABLE 4.7 – Parc nucléaire

4.4.6.3 Stations Services

Du point de vue du grand public, plus il y aura de stations services à hydrogène dans un scénario, meilleur il sera classé. D'où le sens de préférence croissant pour l'indicateur nombre de stations services.

Critère : Stations Services				
Code	*Description*	*Indicateur*	*Sens de variation*	*Échelle*
SSe	Il permet de mesurer la proportion de stations services proposant de l'Hydrogène (H_2).	Nombre de stations services	Croissant	Échelle numérique continue à valeurs entières

TABLE 4.8 – Stations Service

4.4.6.4 Utilisation dans le Transport

Un taux de pénétration croissant a un effet positif sur le développement de la filière notamment pour faire baiser les coûts. Donc plus le aux de pénétration est important, meilleur le scénario est. D'où le sens de préférence croissant pour l'indicateur taux de pénétration global des véhicules.

4.4.6.5 Indépendance Énergétique

Un mix énergétique qui accorde une part importante aux énergies non carbonées est plutôt bien perçu par le grand public pour assurer l'indépendance énergétique du pays. Une part croissante de l'hydrogène dans ce mix est plutôt appréciée. Plus il y aura d'hydrogène dans un scénario, mieux il sera évalué. En supposant un mix énergétique avec de l'hydrogène d'origine non carbonée, on peut donc mesurer le taux de réduction du recours aux énergies fossiles. Étant

Critère : Utilisation dans le Transport				
Code	*Description*	*Indicateur*	*Sens de variation*	*Echelle*
UTr	Il permet de mesurer la proportion de la flotte de véhicules (personnels, bus, etc.) fonctionnant à l'Hydrogène (H_2).	Taux de pénétration global des véhicules	Croissant	Échelle numérique continue à valeurs entières

TABLE 4.9 – Utilisation dans le Transport

donné que les énergies fossiles sont majoritairement importées, ce taux de réduction permet à coup sur de mesurer l'indépendance énergétique. Plus le taux de réduction sera important, plus le scénario sera apprécié : c'est ce qui explique le sens croissant de l'indicateur de la table 4.10 du tableau qui le mesure.

Critère : Indépendance Énergétique				
Code	*Description*	*Indicateur*	*Sens de variation*	*Échelle*
IEn	Il permet de mesurer la contribution de l'Hydrogène "propre" (H_2) au mix énergétique.	Pourcentage de reduction du recours aux énergies fossiles	Croissant	Échelle numérique continue à valeurs réelles

TABLE 4.10 – Indépendance Énergétique

4.4.6.6 Incitations Économiques

Plus un scénario est économiquement incitatif, mieux il sera classé.

Critère : Incitations Économiques				
Code	*Description*	*Indicateur*	*Sens de variation*	*Échelle*
IEc	Il permet d'apprécier la qualité des mesures économiques accompagnant chaque scénario.	Niveau d'incitation (fiscale, financière, prime, bonus ou malus)	Croissant	Échelle qualitative à quatre échelons : Pas incitateur, Peu incitateur, Incitateur, Très incitateur

TABLE 4.11 – Incitations Économiques

4.4.6.7 Autonomie en Fonctionnement

Plus un scénario permettra une autonomie de fonctionnement plus grande, mieux il sera évalué. En d'autre termes, plus une voiture à hydrogène par exemple pourra tenir longtemps

avec un plein d'hydrogène, mieux il sera classé. C'est du moins ce qui apparaît en l'état actuel de l'opinion du grand public.

Critère : Autonomie en Fonctionnement				
Code	*Description*	*Indicateur*	*Sens de variation*	*Échelle*
AFo	Il permet de mesurer la distance parcourue (en km) par un véhicule avec un "plein" ou une "recharge" d'hydrogène.	La distance en kilomètre	Croissant	Échelle numérique continue à valeurs réelles

TABLE 4.12 – Incitations Économiques

La table 4.13, donne toutes les indications sur tous les critères décrits précédemment.

Critère	**Signification**	**Indicateur**	**Sens des préférences sur le critère**		**Type de critère**		**Echelle de préférence du critère**	**Unité de l'échelle (dimension)**	**Nature de l'échelle**						
			Croissant (maximisation)	**Décroissant (minimisation)**	**Construit**	**Informel**			**Quantitative**	**Qualitative**	**Conventionnelle**	**Cardinale**	**Ordinale**	**Continue**	**Discrète**
ECo	Réduction de l'Emission de CO_2	F4	•		Relevé de mesures		{F1, F2, F3, F4}	Symbole			•		•		•
PNu	Parc Nucléaire	Proportion de REP supplémentaires		•	Fonction mathématique		[0, 100]	%	•			•		•	
SSe	Stations Services	Proportion de Stations Service supplémentaires	•		Fonction mathématique		[0, 100]	%	•			•		•	
UTr	Utilisation dans le Transport	Taux de pénétration des véhicules	•		Relevé de mesures		[0, 100]	%	•			•		•	
RRf	Réduction du recours aux énergies fossiles	Pourcentage de réduction du recours aux énergies fossiles	•		Fonction mathématique		[0, 100]	%	•			•		•	
IEc	Incitations Économiques	Niveau d'incitation	•			Avis d'expert	{Mauvaise, Moyenne, Bonne, très Bonne}	Sémantique		•			•		•
AFo	Autonomie en Fonctionnement	Distance parcourue	•		Relevé de mesures		[0, 800]	Km	•			•			

TABLE 4.13 – Table de synthèse des critères d'évaluation des scénarios d'évolution des technologies de l'hydrogène selon la perception du grand public

4.5 Deuxième grille d'analyse méthodologique : la méthode d'évaluation

La phase de structuration du problème de décision a permis de mettre en relief le caractère multi-critère du problème de l'hydrogène-énergie. Il convient donc d'utiliser une approche d'évaluation qui intègre cet aspect du problème.

4.5.1 Choix d'une méthode d'évaluation multicritère

Comme nous avons pu le décrire dans le chapitre 3, dans la littérature de l'aide à la décision, il existe plusieurs approches et dont plusieurs méthodes d'analyse multi-critère. La difficulté réside donc dans le choix d'une approche qui soit adaptée au problème examiné. Pour un problème donné, il n'existe pas une seule bonne méthode conduisant à une solution satisfaisante. Dans ce cas, le choix d'une approche ou d'une méthode doit être motivé pour asseoir sa légitimité auprès des parties prenantes du processus de décision.

4.5.2 Pourquoi les méthodes de surclassement ?

Nous avons choisi l'approche de surclassement pour des raisons qui ne se justifient pas seulement par les différences fondamentales qui existent entre cette approche et l'approche de la valeur ou de l'utilité multi-attribut. En effet au delà de leurs clivages traditionnels que nous avons synthétisé dans la table 4.14 [4], nous avons pu trouver et justifier une complémentarité entre ces deux approches. La phase de structuration ayant abouti à l'arbre de valeurs des objectifs fondamentaux au sens de Keeney [Keeney, 1992], ceci est en accord avec l'idée de construire une famille cohérente de critères au sens de Roy [Roy, 1996]. En plus cette phase a fait apparaître de nombreuses informations qualitatives. Ce type d'information est plus adapté aux méthodes de surclassement qui peuvent les traiter sans chercher à les convertir en nombre comme le feraient les méthodes basées sur la valeur ou l'utilité multi-attribut.

4.5.3 Pourquoi la méthode ELECTRE TRI ?

Nous avons choisi l'approche de surclassement pour notre problème, notamment les méthodes de type ELECTRE. Or il existe une grande variété de méthodes de surclassement appartenant à deux grands groupes : le groupe des méthodes ELECTRE comprenant : ELECTRE I, Is, II, III, IV, and ELECTRE TRI [Bouyssou et al., 2006] et répondant à des problématiques décisionnelles différentes (voir chapitre3) ; et le groupe des méthodes PROMETHEE qui englobent PROMETHEE I, II, III et IV [Brans et al., 1984]. A ce niveau il est important de rappeler deux facteurs importants de notre étude. Ce sont les scénario des technologies de l'hydrogène et la perception que le public a de ces scénarios. Ces deux facteurs sont dynamiques. D'une part parce que les scénarios ne sont pas définitivement établis, car ils englobent des technologies qui ne sont pas encore définitivement établies, par conséquent, susceptibles

4. $*P : Préférence, I : Indifférence, R : Incomparabilité, Q : Hésitation$, avec différents états d'incomparabilité (R) et d'hésitation (Q) ayant des structures différentes. Pour avoir plus de détails sur ces structures de préférence, vous pouvez consulter Tsoukias et al.[Tsoukiàs and Vincke, 1997].

Approche de surclassement	versus	**Approche de l'utilité**
Non-axiomatique		Axiomatique
Comparaison par paire entre alternatives		Score unique pour chaque alternative
Incommensurabilité		Commensurabilité
Moins d'informations		Plus d'informations
Informations qualitatives		Informations quantitatives
Relations de preference $\{P, I\}$		Relations de preference $\{P, I, R, Q\}$
Partiellement-compensatoire		Entièrement compensatoire
Relation non complète		Relation complète
Relation intransitive		Relation transitive
Structure de préférence à posteriori		Structure de préférence à priori
Force des préférences		Intensité des préférences
solution de compromis		Solution optimale

TABLE 4.14 – Differences entre approches de surclassement et d'utilité

de changer. D'autre part, la perception du public n'est pas figé dans le temps, mais est juste une photographie à un moment donné. Ainsi, il serait inutile de comparer ces scénarios entre eux étant donné qu'un scénario contenant des technologies immatures sera toujours préféré à un scénario avec des technologies matures. D'où l'élimination des méthodes basées sur le principe des jugements relatifs des scénarios. Il ne reste qu'à examiner les méthodes basées sur le jugement absolu des scénarios, c'est à dire, en comparant les scénarios avec des références afin de déterminer leur valeur intrinsèque. L'unique méthode de surclassement en conformité avec ces desiderata est la méthode ELECTRE TRI. En outre, étant donné que le décideur veut anticiper l'évolution des technologies, il est plus intéressant pour lui de définir des catégories et de voir comment les scénarios sont affectés dans ces catégories en fonction des horizons de temporels définis. Il est difficile d'obtenir ce profil temporel des scénarios avec l'évaluation relative à cause du manque des points de référence. La définition de ces catégories requiert moins d'effort cognitif, car, comme nous le verrons dans la section 4.5.5.1, cette opération est intuitive. En utilisant les caractéristiques technologiques des scénarios pour calibrer les scénarios de référence et les composantes de la perception du grand public pour évaluer les scénarios, l'utilisation d'ELECTRE TRI est d'un grand intérêt. Cette méthode d'évaluation offre ainsi la possibilité d'intégrer dans un même modèle des points de vue d'experts et des points de vue grand public, opération plus conforme à notre situation problématique.

4.5.4 Contextualisation d'ELECTRE TRI

Cette section se propose de présenter les caractéristiques de notre problème qui justifient le recours à la méthode ELECTRE TRI que nous avons choisie en vue de l'analyse des scénarios relativement à l'acceptabilité sociale. Notre contexte décisionnel est caractérisé par un certain nombre de spécificités :

– notre problème de décision comprend à la fois des aspects mesurables et non mesurables, (cf. section 4.4.6)

- il n'est pas souhaitable qu'un critère controversé comme le nombre de centrales nucléaires puisse être compensé par un autre critère
- certains paramètres n'admettent pas de valeurs objectivement vraies ; chaque instanciation de ces paramètres pouvant conduire à un résultat jugé réaliste
- la multiplicité des acteurs de notre processus de décision induit des objectifs multiples et parfois divergents ; il est impossible de les atteindre tous à la fois
- la plupart des technologies de l'hydrogène n'ayant pas encore fait l'objet d'applications concrètes, des incertitudes et des imprécisions subsistent sur certaines données. Seule la contribution des experts aura permis d'avoir des plages de valeurs pour approcher la réalité future. Les interactions avec les experts ont montré que ceux ci hésitaient parfois sur certains choix.
- aucun scénario de l'hydrogène ne présente à priori pas de profil qui soit la meilleure simultanément sur tous les critères. Il serait donc vain de penser à une méthode d'optimisation dans un tel contexte plutôt qu'à une méthode pouvant aider les décideurs à éclairer leurs choix
- des normes et références existent pour certains items

Pour répondre à ces exigences de notre contexte de décision sur l'hydrogène-énergie, nous avons choisi d'utiliser une approche basée sur la relation de surclassement pour agréger les préférences. Les caractéristiques de notre problème que nous avons mis en évidence à travers les études menées au chapitre 2 et les avantages de l'approche par surclassement présentée au chapitre 3 nous confortent dans notre choix. La famille des méthodes ELECTRE caractérisent cette approche. Chacune de ces méthodes s'applique au problème de décision selon la problématique de décision envisagée : choix, tri, rangement, description. La problématique de tri que nous avons identifiée à la section 4.2 correspond à l'utilisation de la méthode ELECTRE TRI.

4.5.5 Application de la méthode ELECTRE TRI à l'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène

Nous rappelons que l'objectif de notre travail est de construire un modèle d'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène en prenant en compte la dimension sociétale de son acceptabilité. Le but sous-jacent étant de définir les propriétés caractéristiques que doit comporter une méthode ou un outil d'évaluation, afin qu'il puisse aborder avec efficacité les problèmes liés à l'évaluation comme étape d'une démarche de structuration. Pour atteindre ces objectifs, nous avons effectué une analyse de la filière hydrogène et des différents outils dans une perspective décisionnelle

A ce stade de notre étude, nous avons à peu près compris le problème de l'hydrogène qui en est l'objet, nous avons identifié les composantes essentielle à sa compréhension. Il nous reste donc à soumettre tous les output importants de notre méthodologie à l'épreuve d'un outil d'évaluation répondant à la problématique de tri. Dans cette optique nous utiliserons la méthode d'évaluation ELECTRE TRI.

Les résultats de l'application d'ELECTRE TRI ainsi que le modèle réalisé font l'objet de cette section. Nous nous emploierons à construire un modèle d'évaluation des scénarios sur la

base de la méthode ELECTRE TRI [Dias and Clímaco, 2000] par une implementation des données existantes sur le logiciel "IRIS [5]" [Dias and Mousseau, 2003a], [Dias and Mousseau, 2003b]. Cet exercice aura pour objectif de tester la validité de la démarche que nous avons proposé. Cette étape comportera deux phases. L'une sera consacrée à l'évaluation proprement dite avec ses phases de construction des catégories, évaluation des scénarios et étude de sensibilité ; l'autre phase sera dédiée aux analyses des résultats et aux conclusions. Dans ce dernier point, l'occasion nous sera donnée de relever les problèmes de recherches que soulève notre étude auxquels nous tenterons d'apporter nos solutions.

4.5.5.1 Méthode ELECTRE TRI

Le mode opératoire général de l'application de la méthode ELECTRE TRI est représenté dans la figure 4.10 :

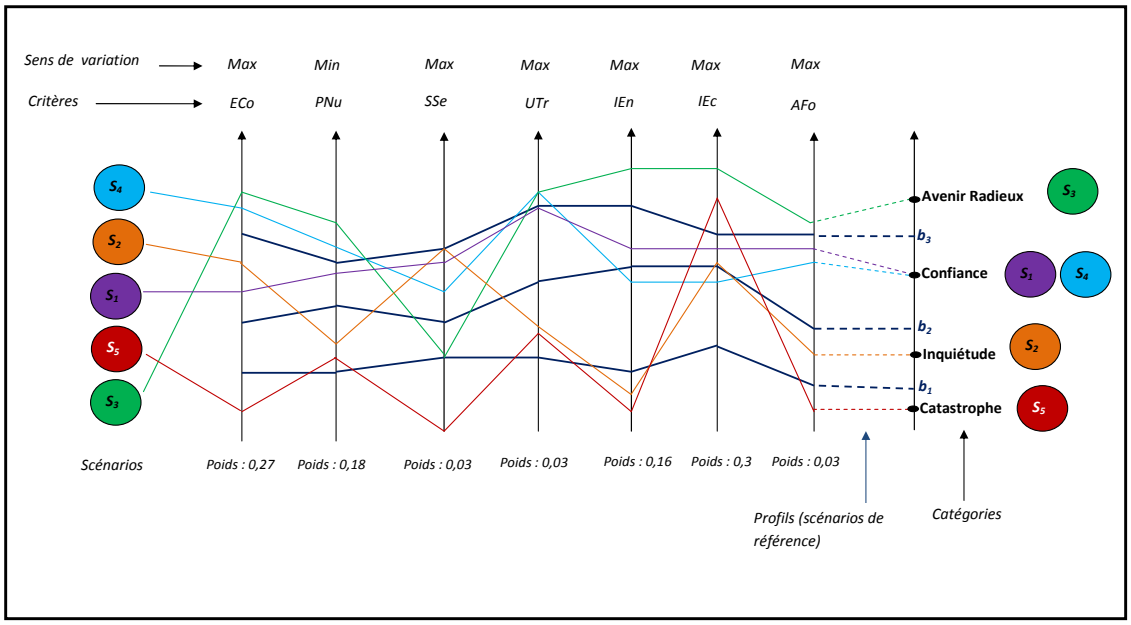


FIGURE 4.10 – Fonctionnement de la méthode ELECTRE TRI

4.5.5.2 Application à la construction des catégories

L'exploitation des résultats des focus groups et des enquêtes grands public a permis de définir quatre catégories dans lesquelles on peut classer l'ensemble des scénarios. En fait l'idée intuitive qui est à la base de ces catégories est la suivante : soit un scénario maintient le statu quo, soit il évolue en mal ou en bien. Nous avons donc re travaillé ces catégories naturellement ordonnées pour les adapter à la méthode ELECTRE TRI et nous avons obtenu les quatre

5. Interactive Robustness analysis and parameters Inference for multicriteria Sorting problems (version 2.0)

catégories totalement ordonnées (ordre décroissant) et exclusives suivantes :

- Avenir Radieux
- Confiance
- Inquiétude
- Catastrophe

Ce découpage des catégories correspond mieux à notre modèle orienté grand public d'une part parce qu'il est intuitivement simple à appréhender et d'autre part pace qu'il s'intègre bien dans notre méthode d'évaluation.

Dans notre modèle d'évaluation (grand public), ces catégories obéissent à l'ordre préférentiel suivant :

$$AvenirRadieux \succ Confiance \succ Inquietude \succ Catastrophe \tag{4.1}$$

Par la suite, avec l'aide d'un expert, nous avons défini les exemples d'affectation dans les catégories en leur associant des évaluations sur chaque critère. Ces évaluations représentent les paramètres des scénarios de référence. Cet exercice nous à permis d'obtenir les tables 4.15 et 4.16 :

Catégories	**Critères**			
	Emission de CO_2	Parc nucléaire	Stations services	Utilisation dans le transport
Avenir Radieux	F4	Moins de 5%	Plus de 75%	Plus de 40%
Confiance	F3	Entre 5% et 15%	Entre 75% et 50%	Entre 15% et 40%
Inquiétude	F2	Entre 15% et 30%	Entre 50% et 20%	Entre 5% et 15%
Catastrophe	F1	Plus de 30%	Moins de 20%	Moins de 5%

TABLE 4.15 – Exemples d'affectation des scénarios de référence à des catégories - 1

Catégories	**Critères**		
	Indépendance énergétique	Incitations fiscales	Autonomie en fonctionnement
Avenir Radieux	10% et plus	Très Bon	Plus de 800 km
Confiance	Entre 5% et 10%	Bon	Entre 500 km et 800 km
Inquiétude	Entre 2% et 5%	Moyen	Entre 200 km et 500 km
Catastrophe	Moins de 2%	Mauvais	Moins de 200 km

TABLE 4.16 – Exemples d'affectation des scénarios de référence à des catégories - 2

4.5.5.3 Application à la construction des matrices de performance

Sur la base des informations recueillies auprès des experts hydrogène au sein du projet AIDHY et des données des projets PROTEC-H2 et HyFrance, nous avons pu construire des

évaluations pour chacun des scénarios retenus sur l'ensemble des critères. Une partie importante de ces performances est la résultante d'un calcul qui implique les taux de pénétration ou de diffusion des véhicules à hydrogène. Nous avons convenu, puisqu'ils seront d'un usage assez régulier dans nos calculs, de regrouper ces taux dans le tableau suivant :

Taux de pénétration (en %)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	0,5	1	1	0,1	1
2030	1	2	2	2	12
2050	4	41	41	20	70

TABLE 4.17 – Taux de pénétration des véhicules

4.5.5.4 Matrice performance-horizon : Emission de CO_2

Sur ce critère, la performance d'un scénario est mesurée sur sa contribution à la réduction des émissions de CO_2. Elle est appréciée par son facteur de réduction que nous avons noté F. Ce dernier est comparé à quatre facteurs de références : F1, F2, F3, F4. En général, la notation Fn signifie qu'on divise les émissions CO_2 par un facteur n. Le facteur F4 est inatteignable en principe et constitue plutôt un objectif alors que le facteur F1 signifie pratiquement le statu quo.

Critère : Emission de $C0_2$ (Facteur de réduction F)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	$F < F2$	$F < F2$	$F < F2$	$F < F2$	$F < F2$
2030	$F < F2$	$F < F2$	$F < F2$	$F < F2$	$F < F2$
2050	$F < F2$	$F2 < F < F3$	$F < F2$	$F < F2$	$F2 < F < F3$

TABLE 4.18 – Matrice des jugements sur le critère ECo

Nous avons défini une fonction de valeurs g_1 qui nous permet de déterminer le rang de chaque scénario en fonction du domaine (intervalle) dans lequel varie son facteur de réduction. Cette fonction a donné lieu aux relations suivantes :

$$\begin{aligned} F < F2 &=> g_1(F) = 1 \\ F2 < F < F3 &=> g_1(F) = 2 \\ F = F3 &=> g_1(F) = 3 \\ F = F4 &=> g_1(F) = 4 \end{aligned}$$

Ces relations ont permis d'exprimer les inégalités de la table précédente sous une forme directement exploitable par notre outil comme le montre la table 4.18 :

Critère : Emission de $C0_2$ (Facteur de réduction F)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	1	1	1	1	1
2030	1	1	1	1	1
2050	1	2	1	1	2

TABLE 4.19 – Matrice des performances sur le critère ECo

4.5.5.5 Matrice performance-horizon : Parc nucléaire

Pour déterminer le nombre de réacteurs nucléaires qu'entraînerait la satisfaction de la demande en hydrogène aux horizons 2020, 2030 et 2050, nous avons fait les hypothèses suivantes :

- Nous considérons uniquement les réacteurs nucléaires de type REP[6] qui délivre une puissance de 1000 MWe en "moyen" chacun.
- Production d'énergie électrique fonctionnant en " base " : réacteur en service pendant 7900 heures en moyenne par an (EDF).
- Toute la demande en hydrogène est satisfaite par de l'hydrogène d'origine nucléaire
- Toutes choses égales par ailleurs, nous supposons que le nombre de REP est une fonction linéaire du taux de pénétration dans le temps. Cette dernière considération à pour but de nous permettre d'extrapoler les valeurs des horizons 2020 et 2030 de celles de 2050 pour lesquelles nous disposons d'informations valides.

En France, il devrait y avoir à l'horizon 2050 environ 35 000 000 de véhicules dits "légers" (jusqu'à 3,5 tonnes). Si 1% de ces véhicules sont à pile à combustible (PàC), il faudra produire pour cela 100 000 tonnes/an d'hydrogène, soit 10 Mégatonne/an pour passer toute la flotte française aux Piles à Combustible. Un REP délivre 1000 MWe, et est prévu pour un taux d'utilisation annuel de 90% soit 7900 heures. Si l'on considère qu'à long terme il faudra environ 4 kWh pour produire $1m^3$ d'H_2, soit 90g (il faut 4,5 kWh / m^3 aujourd'hui), cela correspond à 45 kWh pour 1 kg d'H_2. Ce qui fait qu'un REP devrait pouvoir produire chaque année $(1000MWe * 7900h/45KWh * 103)/103$, soit 175 556 tonnes d'hydrogène. Il faudrait donc $10 * 10^6$ tonnes par an $/175556$, soit 57 REP (1000 MWe chacun) pour alimenter 100% de la flotte française de véhicule légers en H_2 pour les PàC ; on en déduit le nombre de REP pour chaque taux de pénétration. On utilise la formule de proportion linéaire également pour le nombre de REP, et on prend un REP "moyen" de 1000 MWe.

A partir de ce résultat et des taux de pénétration des différents scénarios à divers horizons, nous pouvons en déduire le nombre de réacteurs de ce type correspondant par la proportion linéaire :
Nombre de réacteurs = $(56*$ Taux de pénétration$)$ $/100$.

6. Réacteur à Eau Pressurisée

Les calculs analogues peuvent être faits pour les réacteurs de type EPR en prenant une puissance moyenne unitaire de 1600 MWe. Il faut cependant remarquer qu'en l'état actuel, les réacteurs EPR n'existent pas encore en France.

Critère : Parc nucléaire (en nombre)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	1	0	1	0	0
2030	6	1	11	1	7
2050	21	23	25	11	39

TABLE 4.20 – Matrice des jugements sur le critère PNu

L'indicateur associé à ce critère mesure une augmentation relative, d'où la nécessite de comparer la table 4.20 à une référence. En prenant comme année de référence 2005 comme la base de nos conversions, année où la France comptait 58 réacteurs de type REP, nous en déduisons la table suivante du critère PNu en valeurs relatives : Soit V_{ij} une valeur de la matrice précédente, on calcule la proportion de réacteurs supplémentaires de type REP par la formule suivante :

$$\%V_{ij} = [(58 + V_{ij})/58 - 1] * 100 \tag{4.2}$$

Plus généralement :
% V_{ij} = [(nombre total de réacteur de l'année de référence + V_{ij})/58 - 1] $*100$
où V_{ij} représente un élément de la matrice d'évaluation des réacteurs à l'horizon i et pour le scénario j.

critère : Parc nucléaire (en %)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	1,72	0	1,72	0	0
2030	10,35	1,72	18,97	1,72	12,07
2050	36,21	39,66	43,40	18,97	67

TABLE 4.21 – Matrice des performances sur le critère PNu

Un autre modèle mathématique pour le calcul du nombre de réacteurs nucléaires pour une production massive de l'hydrogène en France aux horizons 2020, 2030, 2050 a été proposée par Werkoff et al.[Werkoff et al., 2005] pour les scénarios haut (forte diffusion) et bas (faible diffusion) du projet HyFrance.

4.5.5.6 Matrice performance-horizon : Stations services

En considérant des calculs simples de débits admissibles par station service H_2 [CGDD, 2010], on obtient environ 110 stations ; pour 1% de taux de pénétration, soit 11 000 stations. Ce dernier nombre est sensiblement proche des 12 520 stations actuelles servant du carburant classique.

En réalité il n'est atteint que pour des taux de pénétrations supérieurs à 100% de sorte que pour des taux inférieurs à 100, il n y ait pas proportionnalité entre le taux de pénétration et le nombre de stations. Dans ce cas de figure les calculs deviennent plus complexes. Pour simplifier, nous ferons l'hypothèse de proportionnalité entre ces deux nombres. Les résultats sont résumés dans la table 4.22 :

Critère : Stations services (en nombre)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	220	0	165	11	110
2030	1210	220	2200	220	1320
2050	4180	4510	4910	4910	7700

TABLE 4.22 – Matrice des jugements sur le critère SSe

En prenant comme référence les stations classiques (les stations à H_2 n'existant pas pour le moment en France) et l'année 2009, année où il y avait en France 12 520 stations services, nous en déduisons la matrice suivante :

La formule de calcul : Soit V_{ij} une valeur de la table 4.22 précédente, on calcule la proportion de stations services par la relation suivante :

$$\%V_{ij} = [(12520 + V_{ij}/12520) - 1] * 100 \tag{4.3}$$

Plus généralement :
$\%V_{ij}$ = [(nombre total de stations services de l'année de référence + V_{ij})/12520 - 1] $*$100

où V_{ij} représente un élément de la matrice d'évaluation des stations services à l'horizon i et pour le scénario j.

Critère : Stations Services (en %)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	1,76	0	1,32	0,09	0,88
2030	9,66	1,76	17,57	1,76	10,54
2050	33,39	36,02	39,22	39,22	61,50

TABLE 4.23 – Matrice des performances sur le critère SSe

4.5.5.7 Matrice performance-horizon : Utilisation dans les transports

Nous avons retenu comme valeurs les différents taux de pénétration ou la diffusion des véhicules fonctionnant à l'hydrogène suivant les trois horizons :

Critère : Utilisation dans les transports(en %)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	0,5	1	1	0,1	1
2030	1	2	2	2	12
2050	4	41	41	20	70

TABLE 4.24 – Matrice des performances sur le critère UTr

4.5.5.8 Matrice performance-horizon : Indépendance énergétique

Nous restons dans le domaine du transport où ce critère nous permet de mesurer l'impact des véhicules à piles à combustible (PàC) sur l'indépendance énergétique. Nous procéderons par quelques analogies. En 2009 (notre année de référence), la France a importé environ 135 Mtep (Mégatonne équivalent pétrole) d'énergie primaire (charbon, pétrole, gaz, produits pétroliers raffinés). La part des transports est d'environ 50 Mtep. Nous avons examiné l'impact du déploiement des PàC sur la consommation des énergies fossiles importées à partir des informations contenues dans les graphiques de l'annexe F. En effet il y apparaît que le mix énergétique est le principal déterminant pour caractériser ce critère. C'est donc ce dernier que nous avons utilisé comme indicateur pour mesurer l'indépendance énergétique par rapport aux énergies fossiles importées.

En effet chaque mix d'énergie est constitué de plusieurs types d'énergie :

- Co-produit
- Gaz naturel
- Biomasse
- Mix électrique
- Nucléaire dédié
- ...

En considérant que l'hydrogène est entièrement produit à partir de la biomasse et du nucléaire dédié, nous déduisons sur les graphiques les pourcentages cumulés de la biomasse et du nucléaire dédié. Les pourcentages obtenus pour chaque horizon de temps sont pondérés par deux facteurs :

- le taux de pénétration (cf.table 4.17)
- la part des transport dans l'énergie importée, soit $50Mtep/135Mtep \approx 0,37$

La table 4.25 synthétise les pourcentages de réduction du recours aux énergies fossiles pour chacun des cinq scénarios. Ces valeurs ont été obtenues à partir des mesures effectuées sur les graphiques des projets PROTEC H_2 et HyFrance (voir l'annexe F) et en tenant compte des deux facteurs de pondération précédents.

Par exemple pour le Scénario S_1 qui correspond à Baseline, on mesure sur le graphique un pourcentage de 4%. Ce scénario ayant un taux de pénétration de 70% à l'horizon 2050, on obtient le pourcentage de réduction suivant :

Soit $\alpha_{2050}^{S_1}$ ce pourcentage de réduction,

$$\begin{aligned}\alpha_{2050}^{S_1} &= (0,04 \times 0,7 \times 0,37) \times 100 \\ &= 1,036 \\ &\approx 1\end{aligned}$$

Critère : Indépendance énergétique(en %)					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	0	0	0	0	1
2030	0,3	0,6	0	0,6	3,5
2050	1	13	13	4	8

TABLE 4.25 – Matrice des performances sur le critère IEn

4.5.5.9 Matrice performance-horizon : Incitations économiques

Les incitations économiques désignent l'ensemble des mesures incitatives qui peuvent être des réductions ou crédits d'impôts, des primes ou des bonus. Elles sont le plus souvent conjoncturelles et répondent à des orientations des pouvoirs publics en matière de politique énergétique et de sauvegarde de l'environnement.

La table 4.26 résume les valeurs des scénarios sur ce critère suivant les trois horizons de temps.

Critère : Incitations économiques					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	Mauvaise	Moyenne	Très Bonne	Bonne	Moyenne
2030	Mauvaise	Moyenne	Très Bonne	Bonne	Moyenne
2050	Mauvaise	Moyenne	Très Bonne	Bonne	Moyenne

TABLE 4.26 – Matrice des jugements sur le critère IEc

A partir de la représentation numérique ci-dessous nous obtenons la table 4.27 :
g_2 (Mauvaise) = 0 ;
g_2 (Moyenne) = 1 ;
g_2 (Bonne) = 2 ;
g_2 (Très Bonne) = 3.

Critère : Incitations économiques					
Horizon	Scénario S_1	Scénario S_2	Scénario S_3	Scénario S_4	Scénario S_5
2020	0	1	3	2	1
2030	0	1	3	2	1
2050	0	1	3	2	1

TABLE 4.27 – Matrice des performances sur le critère IEc

4.5.5.10 Matrice performance-horizon : Autonomie de fonctionnement

La quasi totalité des constructeurs automobiles proposent une offre automobile équivalente en terme d'autonomie quelque soit le scénario envisagé. Dans notre tableau de performance, nous lui attribuerons la moyenne européenne, soit 400 km avec un seul plein (Opel Zafira équipée d'une PàC) sur tous les scénarios.

4.5.5.11 Pondération des critères

La pondération des critères est collective et elle est basée sur des valeurs moyennes obtenues indirectement par voie de sondage [Roussel and Rouch, 2010]. Ce sondage a été fait par téléphone par un organisme spécialisé, sur un échantillon d'un millier de personnes représentatif de la population française. Le questionnaire a été conjointement élaboré par tous les partenaires du projet AIDHY. Nous y avons apporté des questions spécifiques pour recueillir des informations nécessaires pour la construction de notre modèle d'évaluation. Son but était de recueillir la perception que le public a des technologies de l'hydrogène à travers une série de questions cibles concernant les connaissances, l'utilisation, l'image et l'acceptabilité de l'hydrogène. Il a permis de mesurer le niveau de connaissance, l'image, et le degré d'acceptabilité des technologies de l'hydrogène. En outre, il a surtout aidé à identifier les dimensions structurant l'acceptabilité telles que l'écologie, l'économie, la sécurité, la disponibilité,etc. En effet un ensemble de questions a été posées à cet échantillon de personnes sur des items portant sur l'hydrogène. Parmi ces questions, il a été demandé aux répondants de classer entre autre quelques items que nous avions identifiés comme faisant partie des valeurs du grand public sur l'hydrogène (cf.figure 4.8). Ces items ont été représentés sur des diagrammes avec pour chacun d'eux la proportion de répondants ayant donné sa position dans le classement. Nous avons obtenu un rangement des items et ce que nous donnons dans la figure 4.11 est une représentation numérique des coalitions que nous avons obtenu avec l'expert du CEA.

Ce rangement a permis de calculer le poids de chaque critère par le ratio suivant :

$$\mathcal{W}_j = \frac{\sum_{i=1}^{m} g(\alpha_i) \times \mathcal{N}_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}(\sum_{i=1}^{m} g(\alpha_i) \times \mathcal{N}_{ij})}, \quad j = 1, ..., n \tag{4.4}$$

Où
n est le nombre de critères ;
m est le rang du critère ;
$\mathcal{W}_j$ est le poids normalisé du critère j ;
α_i est l'échelle de l'attribut associé au rang i ($\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > ... > \alpha_m$) ;
g est la fonction de valeur qui associe l'échelle de l'attribut α_i aux nombres réels ;
$\mathcal{N}_{ij}$ est le nombre de répondants mettant le critère j au rang i ;

$$\sum_{j=1}^{n} \mathcal{N}_{ij} = N, \quad i = 1, ..., m \tag{4.5}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \mathcal{W}_j = 1 \tag{4.6}$$

Dans notre cas, le nombre de critères est $n = 7$ et le nombre total de répondants est $N = 1000$.

Soit λ le seuil de majorité, c'est-à-dire le nombre requis pour déterminer une majorité gagnante, $\lambda \in [0.5, 1]$. Aucun critère seul n'a le seuil de majorité. La coalition formée par n'importe quel groupe de critères (e.g. C_1, C_2, C_3) est une majorité si et seulement si la somme des poids des critères du groupe est plus grande que le seuil de majorité (e.g. $\mathcal{W}_1 + \mathcal{W}_2 + \mathcal{W}_3 \geq \lambda$).

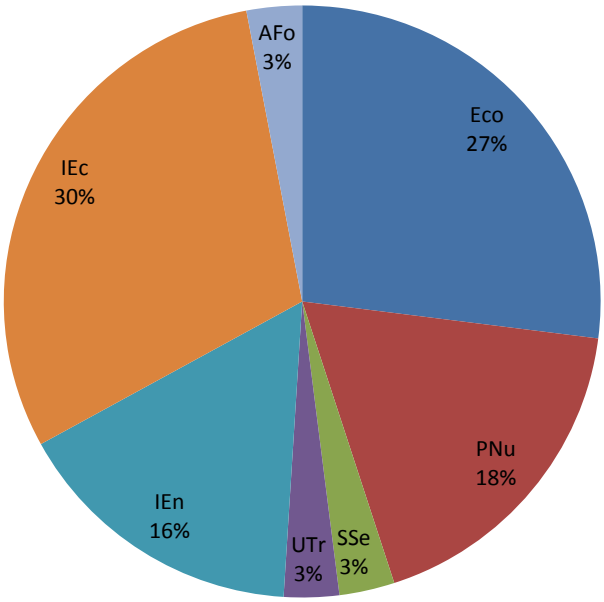


FIGURE 4.11 – Pondération moyenne collective des critères pour l'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène

Les poids sont normalisés et les résultats sont résumés dans la table 4.28 :

code critère	ECo	PNu	SSe	UTr	IEn	IEc	AFo	$\Sigma Poids$
Poids	0,27	0,18	0,03	0,03	0,16	0,3	0,03	**1**

TABLE 4.28 – Matrice des relations inter - critère

Rappel :
- ECO : Émissions de CO_2
- PNu : Parc ou Tranche Nucléaire

- SSe : Stations Services
- Utr : Utilisation ou taux de pénétration dans le Transport
- IEn : Indépendance Énergétique
- IEc : Incitations Économiques
- AFo : Autonomie en Fonctionnement

4.6 Résultats, analyse de robustesse et discussions

Dans cette section, l'ensemble des données d'entrée de notre cas d'étude sera appliqué à notre modèle d'évaluation. Le logiciel "IRIS 2.0" permet de classer les cinq scénarios dans les quatre classes (catégories) suivant chaque horizon. Il utilise la procédure pessimiste de la méthode ELECTRE TRI (voir chapitre 3 sous-section 3.2.9.1). A chaque horizon correspondra une implémentation sur "IRIS 2.0", donc au total pour les trois horizons on aura trois modèles différents. Ensuite nous mettrons en évidence la dimension temporelle du modèle d'évaluation dans une matrice catégorie-horizon.

Soit λ_i le nombre de critères qui valident la proposition $S_1 \sigma S_2$ (le scénario S_1 surclasse ou bien est au moins aussi bien que le scénario S_2) ; où σ est la relation de surclassement et λ_i le niveau de coupe associé à l'horizon i. Les trois valeurs possibles de i sont : 2020, 2030 et 2050 et les valeurs de λ_i correspondante sont : λ_{2020}, λ_{2030}, λ_{2050}.

4.6.1 Résultats

Nous adopterons la même convention de couleur que le logiciel "IRIS 2.0" pour indiquer les affectations possibles de chaque scénario au regard de toutes les contraintes du problème : les couleurs vert claire et foncé caractérisent ces affectations. Chaque scénario pouvant être affecté à une ou plusieurs catégories, les cases en vert foncé sont celles des affectations recommandées par "IRIS 2.0" sur la base des valeurs inférées des paramètres. Les résultats détaillés de chaque évaluation avec l'étude de sensibilité se trouvent en annexe E. Dans cette partie, nous nous limiterons à présenter le résultat global obtenu en tenant compte de l'horizon temporel. Nous n'avons retenu que les affectations recommandées par le logiciel "IRIS 2.0". Suivant les jeux de paramètres du modèle retenus, nous avons distingué deux cas de figure :

- $\lambda_{2020} \in [0,4; 0,6]$, $\lambda_{2030} \in [0,4; 0,6]$, $\lambda_{2050} \in [0,4; 0,6]$
- λ_{2020} = 0,8 ; λ_{2030} = 0,8 ; λ_{2050} = 0,8.

• Cas 1 : $\lambda_{2020} \in [0,4; 0,6]$, $\lambda_{2030} \in [0,4; 0,6]$, $\lambda_{2050} \in [0,4; 0,6]$

Par application de ces paramètres nous obtenons les affectations de la table 4.29.

Horizons / Catégories	2020	2030	2050
Avenir Radieux	S3 S4	S4	
Confiance	S1 S2 S5	S3 S2 S5 S1	S4 S2 S5
Inquiétude			S1
Catastrophe			

TABLE 4.29 – matrice catégorie-horizon (des scénarios)-1

- Cas 2 : $\lambda_{2020} = 0{,}8$; $\lambda_{2030} = 0{,}8$; $\lambda_{2050} = 0{,}8$.

Par application de ces paramètres nous obtenons les affectations de la table 4.30

Horizons / Catégories	2020	2030	2050
Avenir Radieux			
Confiance	S2 S3 S5 S4 S1	S2 S3 S5 S4	S2 S3 S5 S4
Inquiétude	S1	S1	S4 S1
Catastrophe			

TABLE 4.30 – matrice catégorie-horizon (des scénarios)-2

⟶Lorsque le principe de précaution (cf.chapitre 3, sous-section 3.2.9.1, page 62) est assoupli (paramètre λ pas trop important), nous obtenons les affectations de la figure 4.29 :

- A court terme (2020), les scénarios Challenge $H_2^+(S_3)$ et HyFrance Pessimiste (S_4) semblent promis à un bel avenir en termes de leur perception et de leur acceptabilité (car

ils sont affectés à la catégorie Avenir Radieux). Les trois autres scénarios, Baseline(S_1), Solution $H_2^+(S_2)$ et HyFrance Optimiste (S_5) sont tout juste acceptables (car ils sont affectés à la catégorie confiance).

- A moyen terme (2030), seul le scénario HyFrance Pessimiste (S_4) est largement plébiscité (Avenir Radieux). Le scénario Challenge $H_2^+(S_3)$ dégringole dans le classement pour rejoindre les trois autres - Baseline(S_1), Solution $H_2^+(S_2)$ et HyFrance Optimiste (S_5) - dans la catégorie confiance.
- A long terme (2050), des changements importants surviennent dans la classification des scénarios : La perception et l'acceptabilité du scénario Challenge $H_2^+(S_3)$ s'améliore car il passe de la catégorie basse (Confiance) à la catégorie haute (Avenir Radieux). Le scénario HyFrance Pessimiste (S_4), fait le mouvement inverse de ce dernier et chute de la catégorie supérieure (Avenir Radieux) à la catégorie inférieure (Confiance). Les scénarios Solution $H_2^+(S_2)$ et HyFrance Optimiste (S_5) se stabilisent dans la catégorie Confiance. Jusqu'ici les scénarios ont certes subi des évolutions dans leurs affectations, mais ils restaient dans le domaine de l'acceptable. Fait marquant de cet horizon de temps, le scénario Baseline(S_1) est sorti de ce domaine d'acceptabilité et se retrouve dans la catégorie Inquiétude.

$\longrightarrow$Lorsque le principe de précaution (cf.chapitre 3, sous-section 3.2.9.1, page 62) est exacerbé (paramètre λ trop important), nous obtenons les affectations de la figure 4.30 :

- A court terme (2020), les scénarios Solution $H_2^+(S_2)$, Challenge $H_2^+(S_3)$, HyFrance Pessimiste (S_4) et HyFrance Optimiste (S_5) sont acceptables (car ils sont affectés à la catégorie confiance). Le scénario Baseline(S_1), est inquiétant (car il est affecté à la catégorie Inquiétude).
- A moyen terme (2030), Tous les scénarios sont stables et maintiennent le classement de l'horizon précédent.
- A long terme (2050), Les scénarios Solution $H_2^+(S_2)$, Challenge $H_2^+(S_3)$ et HyFrance Optimiste (S_5) n'ont toujours pas changé de catégorie (Confiance). En revanche, le scénario HyFrance Pessimiste (S_4) se retrouve maintenant dans la catégorie Inquiétude, pendant que le scénario Baseline(S_1) s'enfonce définitivement dans les profondeurs du classement (catégorie Catastrophe).

En définitive nous pouvons tirer deux enseignements de ces premières affectations :

1. Nous obtenons là deux profils types assez contrastés du comportement des scénarios dans le temps du point de vue de leur perception et de leur acceptabilité par le grand public :
   (a) profil stable : pour des scénarios qui gardent la même affectation quelque soit l'horizon de temps choisi. **Exple** : Solution $H_2^+(S_2)$, HyFrance Optimiste (S_5)
   (b) profil chaotique : pour des scénarios qui tantôt améliore leur classement, ou tantôt dégrade leur classement selon l'horizon temporel. **Exple** : Challenge $H_2^+(S_3)$, Baseline(S_1), HyFrance Pessimiste (S_4)

2. Il nous semble assez clair que le grand public n'a pas la même perception des scénarios des technologies de l'hydrogène que les experts en hydrogène. C'est le cas avec le scénario HyFrance dit "Pessimiste" mais qui se retrouve dans une bonne et très bonne catégorie (Confiance et Avenir radieux) - comme son nom ne l'indique pas - tout au moins pour ce qui est de la première affectation. Ce premier résultat était tout à fait prévisible car le dimensionnement des scénarios des technologies de l'hydrogène répond d'abord à des préoccupations techniques. Ainsi lorsqu'ils sont soumis à l'acceptation du grand public donc l'élément de jugement est sa perception - subjectivité oblige - on peut obtenir un tout autre résultat que celui escompté par les experts.

4.6.2 Discussions

Les résultats précédants sont à prendre avec la plus grande prudence. Ils ont surtout une valeur indicative pour illustrer la démarche méthodologique que nous avons adoptée. Un certains nombre de faits et réserves sont à souligner :

- d'un point de vue de notre objet d'étude, l'élément sur lequel nous travaillons à savoir la perception et l'acceptabilité - le dernier découlant du premier - a une dimension dynamique indéniable. Or ce que nous avons fait c'est de capturer "une photographie" de la perception au moment même où nous menions cette étude, puis de la projeter sur les autres horizons de temps bien choisis. Il est fort à parier que la perception des scénarios des technologies de l'hydrogène d'aujourd'hui n'est pas celle d'hier, et ne sera pas celle de demain. Cette différence de perception liée à cette dynamique peut avoir deux incidences sur notre modèle d'évaluation, précisément sur nos résultats : d'une part, les composantes de la perception n'étant plus tout à fait les mêmes d'une époque à une autre, les critères du modèle ne seraient probablement plus les mêmes. D'autre part, l'importance relative des dimensions de la perception seraient également différentes, d'où des jeux de poids différents pour les critères du modèle. En outre, plus l'échelle de temps est longue, plus l'incertitude est importante. Cela concerne par exemple l'évolution attendue des technologies qui peut influencer la perception et donc l'acceptation du scénario dans lequel elles se trouvent. Nous n'avons pas non plus tenu compte du fait qu'à terme, les scénarios mis en oeuvre aurons atteint la maturité et présenterons nécessairement une meilleure évaluation sur certaines critères. C'est par exemple le cas si nous considérons que certains coûts baisseront lorsque la technologie deviendra accessible au grand nombre. De même un nombre croissant de stations services, tiré par la popularisation de la technologie, serait de nature à améliorer la perception, partant l'acceptabilité d'un scénario.
- d'un point de vue méthodologique, tous les paramètres de la méthode utilisée pour l'évaluation n'ont pas pu être déterminés. Les seuils de préférence, d'indifférence et de veto notamment n'ont pas été intégrés dans le modèle.

Pour essayer d'apporter quelques éléments de réponses au deuxième aspect (importance relative des dimensions de la perception) des réserves émises dans le premier item ci-dessus portant sur l'objet de l'étude, nous essayerons d'appréhender cette incertitude en jouant sur un paramètre de notre problème. Ce paramètre, c'est le poids des critères. Nous lui attribuerons

plusieurs valeurs différentes pour étudier l'impact qu'elles ont sur l'affectation des scénarios et les conséquences qu'on peut en tirer.

4.6.3 Analyse de sensibilité et affectations robustes

Les résultats précédents ont été obtenus pour un jeu de données spécifique. Qu'en est-il lorsque nous soumettons notre modèle d'évaluation à plusieurs jeux de données différents des données initiales ? C'est à cette question que nous essayons de résoudre par une analyse de sensibilité des résultats en faisant varier certains paramètre du problème. Étant donné que l'idée de base sur notre contribution au projet était de faire émerger les composantes importantes à la compréhension des aspects constitutifs de l'acceptabilité sociétale des technologies de l'hydrogène. Composantes qui dans le cadre de notre modèle d'évaluation se matérialise par les critères, il est donc important à ce stade de notre étude, de vérifier comment leurs importances relatives peuvent influencer le classement d'un scénario, donc sa perception et son acceptation. c'est pour cette raison que nous avons choisi de faire une étude de sensibilité sur le paramètre "poids". Nous allons générer différents jeux de poids sur une base majoritaire. Autrement dit, pour un jeu de poids sur l'ensemble des critères, nous supposerons que l'un des critères ou la combinaison de deux ou plusieurs critères ont un poids deux fois supérieur au poids cumulés du reste des critères. Pour une bonne compréhension des résultats, des critères techniques qui ont été utilisés et qui manifestement n'ont aucune signification pratique immédiate seront agrégés au sein d'unité plus significative. Cette recherche de sens nous a conduit à regrouper les critères selon les préoccupations suivantes du grand public :

- Environnement : critère emission de CO_2 (ECo)
- Sécurité et risque : critère parc nucléaire (PNu)
- Sûreté de l'approvisionnement : critère indépendance énergétique (IEn)
- Économie : critère indépendance économique (IEc) + critère utilisation dans les transport (Utr)
- Disponibilité : critère stations services (SSe) + critère autonomie de fonctionnement (AFo)

En retenant ce principe de critère majoritaire, nous avons distingué deux cas : (1) l'un des critères ou coalition de critère est majoritaire et les autres ont ceteris paribus la même valeur (cf.table 4.31) ; (2) l'un des critère ou coalition de critère est majoritaire et tous les autres gardent entre eux les mêmes rapports constants que ceux du jeu de poids initial délivré par le grand public (cf.table 4.37).

→ Etude de sensibilité

Nous envisageons deux études de sensibilité différentes portant sur le même paramètre : le poids. Dans les deux cas de figure, nous définissons pour chaque critère ou coalition de critères un seuil de majorité. Il est représenté par une valeur avec une police de couleur rouge dans la table 4.31 (étude de sensibilité I) ou police rouge encerclée dans la table 4.37 (étude de sensibilité II).

Dans la suite de notre étude, pour simplifier les expressions dans les tables, nous conviendrons d'appeler Macro-critère, tout critère ou coalition de critères pour lequel nous avons défini un seuil de majorité.

L'étude de sensibilité I obéit à la démarche classique qui consiste à faire varier un paramètre pour déterminer le domaine de robustesse de l'affectation des scénarios ; alors que l'étude de sensibilité II est une tentative rationnelle que nous avons proposé pour appréhender les quelques invariants dégagés dans l'existant des études d'acceptabilité des technologies de l'hydrogène (voir section 2.12, chapitre 2).

(a) Etude de sensibilité I :

un critère ou coalition de critères majoritaire et les autres critères égaux. Dans chaque coalition de critères, le poids le plus important représente le seuil de majorité. C'est la valeur avec une police de couleur rouge dans la table 4.31.

Macro-critère	**Environnement**	**Sécurité**	**Sûreté appro.**	**Économie**		**Disponibilité**	
critères / **n° jeu**	ECo	PNu	IEn	IEc + Utr		SSe + AFo	
⓪	0.27	0.18	0.03	0.03	0.16	0.3	0.03
①	0.52	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
②	0.08	0.52	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
③	0.08	0.08	0.52	0.08	0.08	0.08	0.08
④	0.08	0.08	0.08	0.3	0.3	0.08	0.08
⑤	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.3	0.3

TABLE 4.31 – Différents jeux de poids pour l'étude de sensibilité (profils de pondération différents)

Notation : $S_1 \equiv$ Baseline, $S_2 \equiv$ Solution H_2^+, $S_3 \equiv$ Challenge H_2^+, $S_4 \equiv$ HyFrance Pessimiste, $S_5 \equiv$ HyFrance Optimiste.

Remarque 4.2 *Nous mettrons en relief dans les tables des résultats de l'évaluation, la partie des scénarios globalement bien classés et la partie des scénarios globalement mal classés quelque soit l'horizon de temps. Cette dichotomie dans les affectations sera matérialisée par la ligne de flottaison* [7]

Il en découle de l'application des différents jeux de poids de la table 4.31 ceteris paribus [8], les résultats suivants :

⊛ Préoccupations environnementales majeures (part relative : 52%)
Jeu de poids n° ① (cf.table 4.31, page 116)

7. la ligne de flottaison est un filet rouge qui sépare les catégories ou classes en deux parties en termes d'acceptabilité des scénarios de l'évolution des technologies de l'hydrogène selon la perception du grand public : les bonnes ou acceptables et les mauvaises ou rejetées

8. $\lambda_{2020}, \lambda_{2030}, \lambda_{2050} \in [0,4; 0,6]$

Macro-critère dominant : Environnement			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux			
Confiance	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5
Inquiétude			
Catastrophe			

TABLE 4.32 – Affectation 1 avec les exigences environnementales dominantes

Dans ce cas de figure, tous les scénarios sont au-dessus de la zone de flottaison et donc ont un potentiel d'acceptabilité sociale très important.

⊛ Préoccupations sécuritaires majeures (part relative : 52%)
Jeu de poids n° ② (cf.table 4.31, page 116)

Macro-critère dominant : Sécurité			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_3, S_4	S_1
Confiance		S_5	S_3, S_4
Inquiétude			
Catastrophe			S_2, S_5

TABLE 4.33 – Affectation 1 avec les exigences sécuritaires dominantes

Dans ce cas de figure, plus de 60% scénarios sont au-dessus de la zone de flottaison et donc ont un potentiel d'acceptabilité sociale important.

⊛ Préoccupations majeures sur la sûreté de l'approvisionnement (part relative : 52%)
Jeu de poids n° ③ (cf.table 4.31, page 116)

Macro-critère dominant : Sûreté de l'approvisionnement			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux			
Confiance			
Inquiétude			S_2, S_3, S_4, S_5
Catastrophe	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1

TABLE 4.34 – Affectation 1 avec les exigences sur la sûreté de l'approvisionnement dominantes

Dans ce cas de figure, tous les scénarios sont au-dessous de la zone de flottaison et donc ont un mauvais potentiel d'acceptabilité sociale.

⊛ Préoccupations économiques majeures (part relative : 60%)
Jeu de poids n° ④ (cf.table 4.31, page 116)

Macro-critère dominant : Économie			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux	S_2, S_5	S_2, S_5	S_3, S_4
Confiance			S_2, S_5
Inquiétude	S_1, S_3, S_4	S_1, S_3, S_4	S_1
Catastrophe			

TABLE 4.35 – Affectation 1 avec les exigences économiques dominantes

Dans ce cas de figure, la moitié scénarios est au-dessus et l'autre moitié est au-dessous de la zone de flottaison et donc ont un potentiel d'acceptabilité sociale mitigé.

⊛ Préoccupations majeures sur le confort (part relative : 60%)
Jeu de poids n° ⑤ (cf.table 4.31,page 116)

Macro-critère dominant : Disponibilité			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux	S_5		S_3
Confiance	S_2	S_2, S_5	S_2, S_4, S_5
Inquiétude	S_1, S_3, S_4	S_1, S_3, S_4	
Catastrophe			S_1

TABLE 4.36 – Affectation 1 avec les exigences sur le confort dominantes

Dans ce cas de figure, la moitié scénarios est au-dessus et l'autre moitié est au-dessous de la zone de flottaison et donc ont un potentiel d'acceptabilité sociale mitigé.

Les tables 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, montrent les affectations des scénarios pour cinq profils de pondération très unilatéraux (voir table 4.31) avec un focus sur les aspects environnement, sécurité, sûreté d'approvisionnement, économie et disponibilité.

(b) Etude de sensibilité II :

Un critère ou coalition de critères est majoritaire et les autres critères gardent un rapport constant (égal au rapport du jeu de poids initial) entre eux. Dans ce cas seule la valeur du critère ou de la coalition de critères majoritaire est fixée (voir valeurs de police rouge encerclées dans la table 4.37) ; les autres valeurs sont obtenues en implémentant le système d'équations 4.7 comme l'illustre la table 4.37.

Notations : i : critères, $i = 1, 2...n$; j : jeu de critères, $j = 1, 2...m$; x_{ij} : poids du critère i dans le jeu de rang j ; $\beta_{i(i+1)}$: ratio inter-critère (entre deux critères de rang successifs i et $i+1$ appartenant au même jeu de critères) ; $x_{i_S j}$: le seuil de majorité pour le critère ou coalition de critères considéré.

$$\begin{cases} x_{iSj} = \alpha & x_{iSj}, \alpha \in [0,1] \\ \alpha + \sum_{i=1}^{n-1} x_{ij} = 1 & x_{ij} \in [0,1], \forall \text{ jeu de critères j} \\ \frac{x_{i1}}{x_{(i+1)1}} = \frac{x_{i2}}{x_{(i+1)2}} = ... = \frac{x_{(n-1)m}}{x_{(nm)}} = \beta_{i(i+1)} & \beta_{i(i+1)} \in \mathbb{R} \\ \beta_{12} = \frac{x_{11}}{x_{21}} & \\ \beta_{23} = \frac{x_{21}}{x_{31}} & j = 1 : \text{jeu initial} \\ \vdots & \\ \beta_{(n-1)n} = \frac{x_{(n-1)1}}{x_{n1}} & \end{cases} \tag{4.7}$$

Les valeurs obtenues dans la dernière équation du système 4.7 pour $j = 1$ correspondent à celles de J_0 dans la table 4.37. Les autres résultats obtenus pour des critères pris individuellement peuvent être facilement étendus à des coalitions de critères. Il suffira de réécrire la première et la deuxième équation du système 4.7 en tenant compte des coalitions de critères. En prenant par exemple une coalition de critères avec n_1 critères, on obtiendra le nouveau système d'équations 4.8 :

$$\begin{cases} x_{iSj} = \alpha & x_{iSj}, \alpha \in [0,1] \\ \alpha + \sum_{i=1}^{n-n_1-1} x_{ij} = 1 & x_{ij} \in [0,1], \forall \text{ jeu de critères j} \\ \frac{x_{i1}}{x_{(i+1)1}} = \frac{x_{i2}}{x_{(i+1)2}} = ... = \frac{x_{(n-1)m}}{x_{(nm)}} = \beta_{i(i+1)} & \beta_{i(i+1)} \in \mathbb{R} \\ \beta_{12} = \frac{x_{11}}{x_{21}} & \\ \beta_{23} = \frac{x_{21}}{x_{31}} & j = 1 : \text{jeu initial} \\ \vdots & \\ \beta_{(n-1)n} = \frac{x_{(n-1)1}}{x_{n1}} & \end{cases} \tag{4.8}$$

Dans notre cas d'étude, nous avons sept critères, donc $n = 7$ et cinq jeux, donc $m = 5$. En fait le nombre de jeux doit correspondre au nombre de critères, mais dans le cas de coalition de critères, ils peuvent être différents. C'est le cas ici où nous avons deux coalitions de critères qui permettent de réduire le nombre de jeux de sept à cinq. Nous initialisons les poids des critères dans le jeu J_0 par : $(x_{11}, x_{21}, x_{31}, x_{41}, x_{51})$. Les autres jeux attendus de critères, $\langle J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 \rangle$ sont obtenus par application des données de J_0 à l'équation 4.7.

Macro-critères	Environnement	Sécurité	Sûreté app.	Économie		Disponibilité		∑(critères)i - ai	
Critères	ECo	PNu	IEn	IEc +	UTr	SSe +	AFo	∑(critères)i	Vi
Jeu 0 (poids initiaux) J_0	**0,27**	0,18	0,03	0,03	0,16	0,30	0,03	1,00	0,73
Rapport intercritère -R0	1,50	6,00	1,00	0,19	0,53	10,00			
Jeu 1 J_1	**0,52**	0,12	0,02	0,02	0,11	0,20	0,02	**1,00**	0,48
Rapport intercritère -R1		6,00	1,00	0,19	0,53	10,00			
J_0	0,27	**0,18**	0,03	0,03	0,16	0,30	0,03	1,00	0,82
Jeu 2 J_2	0,16	**0,52**	0,02	0,02	0,09	0,18	0,02	**1,00**	0,48
Rapport intercritère -R2			1,00	0,19	0,53	10,00			
J_0	0,27	0,18	**0,03**	0,03	0,16	0,30	0,03	1,00	0,97
Jeu 3 J_3	0,13	0,09	**0,52**	0,01	0,08	0,15	0,01	**1,00**	0,48
Rapport intercritère -R3	1,50			0,19	0,53	10,00			
J_0	0,27	0,18	0,03	**0,03**	**0,16**	0,30	0,03	1,00	0,81
Jeu 4 J_4	0,13	0,09	0,01	**0,30**	**0,30**	0,15	0,01	**1,00**	0,40
Rapport intercritère -R4	1,50	6,00				10,00			
J_0	0,27	0,18	0,03	0,03	0,16	**0,30**	**0,03**	1,00	0,67
Jeu 5 J_5	0,16	0,11	0,02	0,02	0,10	**0,30**	**0,30**	**1,00**	0,40
Rapport intercritère -R5	1,50	6,00	1,00	0,19					

∑(critères)i - (a1 +a2)i

ain/ai(n-1)

a(i-1)n*Vi/V(i-1)

Valeurs fixées

i = ligne a= poids
n = rang sur la ligne de la gauche vers la droite

TABLE 4.37 – Calcul de jeux de poids à rapports constants pour l'étude de sensibilité

Il résulte de l'application des différents jeux de poids de la table 4.37 ceteris paribus [9], les résultats suivants :

⊛ Préoccupations environnementales majeures (part relative : 52%)
Jeu de poids : jeu 1 (cf.table 4.37, page 120)

Macro-critère dominant : Environnement			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux			
Confiance	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5
Inquiétude			
Catastrophe			

TABLE 4.38 – Affectation 2 avec les exigences environnementales dominantes

⊛ Préoccupations sécuritaires majeures (part relative : 52%)
Jeu de poids : jeu 2 (cf.table 4.37, page 120)

9. $\lambda_{2020}, \lambda_{2030}, \lambda_{2050} \in [0,4; 0,6]$

Macro-critère dominant : Sécurité			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_1, S_2, S_3, S_4	S_1
Confiance		S_5	S_3, S_4
Inquiétude			S_2, S_5
Catastrophe			

TABLE 4.39 – Affectation 2 avec les exigences sécuritaires dominantes

⊛ Préoccupations majeures sur la sûreté de l'approvisionnement (part relative : 52%)
Jeu de poids : jeu 3 (cf.table 4.37, page 120)

Macro-critère dominant : Sûreté de l'approvisionnement			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux	S_5		
Confiance			S_3, S_4, S_5
Inquiétude		S_5	S_1, S_2
Catastrophe	S_1, S_2, S_3, S_4	S_1, S_2, S_3, S_4	

TABLE 4.40 – Affectation 2 avec les exigences sur la sûreté de l'approvisionnement dominantes

⊛ Préoccupations économiques majeures (part relative : 60%)
Jeu de poids : jeu 4 (cf.table 4.37, page 120)

Macro-critère dominant : Économie			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux	S_5		S_3
Confiance			S_2, S_4, S_5
Inquiétude		S_5	S_1
Catastrophe	S_1, S_2, S_3, S_4	S_1, S_2, S_3, S_4	

TABLE 4.41 – Affectation 2 avec les exigences économiques dominantes

⊛ Préoccupations majeures sur la disponibilité (part relative : 60%)
Jeu de poids : jeu 5 (cf.table 4.37, page 120)

Macro-critère dominant : Disponibilité			
Horizon / **Catégories**	**2020**	**2030**	**2050**
Avenir Radieux	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5		S_1, S_3, S_4
Confiance		S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	S_2, S_5
Inquiétude			
Catastrophe			

TABLE 4.42 – Affectation 2 avec les exigences sur la disponibilité dominantes

Les tables 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, montrent les affectations des scénarios pour cinq

profils de pondération très unilatéraux (voir table 4.37) en mettant l'accent sur les aspects environnement, sécurité, sûreté d'approvisionnement, économie et disponibilité.

Conclusions :

Avec un niveau de sévérité médian sur le seuil de coupe et au vu des résultats, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Nous observons à partir des tables 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, et 4.42, trois types de comportement des composantes de la perception et de l'acceptabilité des scénarios de l'hydrogène :

- "stabilité" : le critère environnement est stable pour l'affectation des scénarios sur les trois horizons (2020, 2030, 2050)
- faible "volatilité" : les critères sécurité d'approvisionnement et économie sont faiblement instables pour l'affectation des scénarios ;
- forte "volatilité" : les critères sécurité et disponibilité sont fortement instables pour l'affectation des scénarios.

In fine, les résultats obtenus sont peu ou prou très différents selon que les préoccupations privilégiées du grand public sont d'ordre environnemental, sécuritaire, économique, d'approvisionnement ou de disponibilité.

Les éléments plus objectifs comme la maturité des technologies qui peuvent avoir une influence sur les répercussions économiques des scénarios, notamment en baissant les coûts, suivent la même évolution que la perception économique que le grand public a des scénarios. C'est le cas des tables 4.35 et 4.41 lorsque le grand public met l'accent sur les préoccupations économiques. Il en va de même de la sûreté d'approvisionnement (cf. tables 4.34, et 4.40). Des éléments plus subjectifs comme la sécurité perçue et le disponibilité (cf. tables 4.33, 4.39, 4.36, et 4.42) ont un comportement moins prévisible lorsque l'accent est mis sur l'un ou sur l'autre.

En considérant les résultats obtenus à la section 4.6.1 et consignés dans la table 4.35, l'analyse de robustesse en faisant varier le paramètre poids nous à permis d'obtenir les intervalles de stabilité de poids présentés dans les tables 4.43, 4.44, et 4.45. Par exemple, la contribution à l'indépendance énergétique (code critère IEn) peut varier entre 0% et 55% sans changer l'affectation des scénarios S_3 et S_4 à la catégorie Avenir Radieux.

Code critère	ECo	PNu	SSe	UTr	IEn	IEc	AFo
Poids	0.27	0.18	0.30	0.16	0.03	0.03	0.03
Limite inférieure	0.13	0.09	0.15	0.11	0.00	0.00	0.01
Limite supérieure	0.80	0.92	0.93	0.83	0.55	0.80	0.66

TABLE 4.43 – Intervalles de stabilité des poids pour une affectation court terme (2020) des scénarios

Code critère	ECo	PNu	SSe	UTr	IEn	IEc	AFo
Poids	0.27	0.18	0.30	0.16	0.03	0.03	0.03
Limite inférieure	0.13	0.06	0.02	0.10	0.04	0.00	0.07
Limite supérieure	0.80	0.56	0.60	0.80	0.45	0.78	0.93

TABLE 4.44 – Intervalles de stabilité des poids pour une affectation moyen terme (2030) des scénarios

Code critère	ECo	PNu	SSe	UTr	IEn	IEc	AFo
Poids	0.27	0.18	0.30	0.16	0.03	0.03	0.03
Limite inférieure	0.13	0.19	0.07	0.09	0.00	0.01	0.03
Limite supérieure	0.80	0.75	0.89	0.78	0.45	0.83	0.73

TABLE 4.45 – Intervalles de stabilité des poids pour une affectation moyen terme (2050) des scénarios

Les résultats obtenus dans les intervalles de stabilité (voir tables 4.43, 4.44, et 4.45) corroborent, les conclusions précédentes sur la typologie des comportements des composantes de l'acceptabilité sociale des scénarios des technologies de l'hydrogène. En effet les intervalles de stabilité pour IEn et ECo restent inchangés quelque soit l'horizon de temps considéré. Pendant que les intervalles de stabilité pour UTr et IEc subissent de légères variations. Les variations plus sensibles émanent des intervalles pour PNu, SSe et AFo.

4.7 Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre, nous nous sommes attelés à mettre en pratique l'intégration d'un modèle de structuration et d'un modèle d'évaluation à travers une application concrète. La méthodologie développée a permis de réaliser un modèle d'évaluation intégré et de tester sa validité opérationnelle sur un problème réel. Nous avons structuré ce modèle intégrant deux modules, donc l'un de structuration et l'autre d'évaluation, en nous appuyant sur un ensemble d'outils que nous avons synthétisé dans la table 4.46. En plus nous avons proposé une approche permettant de paramétrer les composantes de l'acceptabilité sociale de l'hydrogène en exploitant l'étude de sensibilité obtenue par modélisation multi-critère. Cette dernière approche peut être généralisée pour paramétrer les décisions sociales. Notamment pour celles dont le régime de décision se fonde sur la délégation.

Aperçu des outils utilisés et étapes de leur utilisation													
Etapes / **Outils**	Définition et formulation du problème	Identification des acteurs	Identification des objectifs des acteurs	Construction des scénarios	Construction de valeurs	Établissement des critères	Construction des indicateurs	Définition des paramètres seuils	Définition des poids	Construction des performances	Évaluation	Analyse de sensibilité	Recommandations
Arbres de valeurs (acteurs de la filière H_2)					✓								
Cartes cognitives (grand public)			✓										
Cartographie (filière hydrogène)	✓			✓									
Cartographie (acteurs de la filière hydrogène)		✓											
Checklists (scénarios, critères, etc.)		✓		✓		✓	✓						
ELECTRE TRI (évaluation des scénarios)											✓		
Élicitation d'expert (évaluation des scénarios)				✓				✓		✓			
État de l'art (Hydrogène, PSM's [1] et MCDA [2])		✓		✓									
Jugement d'expert (évaluation des scénarios)				✓				✓		✓			
Groupes de discussion (grand public)	✓		✓										
Matrice des résultats (catégorie-temps)											✓		✓
Questionnaire et enquête (grand public)									✓				
Remue-méninges (multidisciplinaire)	✓			✓				✓		✓			
Simulation (poids des scénarios)												✓	✓
Tableur excel (construction des scénarios)				✓									

TABLE 4.46 – Sommaire des outils et techniques utilisés dans le processus d'aide à la décision sur l'acceptabilité sociale de l'hydrogène

1. PSM's (Problem Structuring Methods) : Méthodes de Structuration des Problèmes.
2. MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) : AMCD (Aide Multi-Critère à la Décision).

Conclusion générale et perspectives

Les recherches menées dans ce travail de thèse ont pour objectif de fournir un cadre qui permet de prendre en compte la dimension sociale dans un modèle d'évaluation, de définir un modèle d'intégration des cartes cognitives à un modèle d'évaluation multi-critère et les mécanismes de raisonnement qui en permettent l'exploitation. Elles ont également permis de dégager les invariants de l'acceptabilité de l'hydrogène et d'en formaliser le domaine par un modèle de sensibilité que nous avons proposé. L'idée qui sous-tend cette intégration est que dans un processus de décision qui implique un nombre important de parties prenantes, il est nécessaire d'adopter un outil de collecte d'informations qui soit adapté et efficace ; mais qu'en même temps il faut pouvoir, à partir de ces informations, construire une structure de données pertinentes pour un modèle d'évaluation multi-critère. Dans la littérature de l'aide à la décision, la question de l'intégration des cartes cognitives bien que n'étant pas nouvelle, s'est posée et a été abordée de différentes façons. L'approche que nous avons proposée est tout à fait différente de celles présentes dans la littérature où l'on rencontre des méthodes qui permettent soit une évaluation directe des options avec des cartes cognitives floues, soit la génération de l'arbre de valeurs par une liste de souhaits. Nous proposons une utilisation conjointe des deux techniques dans un unique modèle qui englobe leurs paradigmes dans un cadre capable d'appréhender un contexte décisionnel avec de multiples parties prenantes et éventuellement avec des objectifs conflictuels. Ce modèle intégré est basé sur un ensemble de considérations théoriques, de règles, d'heuristiques et d'algorithmes. En réalité cette thèse a donné lieu a deux modèles : un modèle de structuration qui ajoute une ontologie aux cartes de process et permet de construire des scénarios en rapport avec le contexte décisionnel, et un modèle d'intégration qui ajoute la possibilité d'exploiter et d'organiser les informations des cartes cognitives de sorte à fournir essentiellement une structure de données adaptée aux besoins de l'évaluation multi-critère ou multi-attribut. Ces deux modèles ont été appliqués sur des exemples issus des projets PROTEC H_2, HyFrance et Hyways.

En dépit de la pertinence des solutions que les travaux que nous avons effectués dans notre thèse proposent, il convient de relever quelques critiques opposables. La première critique concerne la construction de la famille de critères à partir des objectifs où nous n'avons pu véritablement vérifier ni la cohérence, ni l'efficacité au sens de Bouyssou et al. [Bouyssou et al., 2006]. La difficulté étant de se heurter à une ou plusieurs parties prenantes qui veuillent reviser leurs valeurs, ce qui par conséquent pourrait avoir une incidence sur la cohérence de la famille de critères. Cela pose plus généralement le problème de l'intégration des révisions dans un processus de décision qui admet souvent des retours en arrière ; ce qui n'est pas explicitement pris en compte dans notre modèle.

La deuxième critique porte sur la non prise en compte de manière appropriée de l'information négative fournie par l'analyse des controverses sur l'hydrogène. En effet, en dépit de nombreux avantages qui lui sont reconnus tels que sa capacité à stocker de l'énergie, un bon rendement, pas d'emission ni de polluants ni de gaz à effet de serre, les technologies de l'hydrogène soulèvent quelques controverses :

– **La controverse sur les technologies de production de l'hydrogène-énergie** :
Toutes les technologies de production de l'hydrogène-énergie pour un usage grand public ne sont pas "vertueuses" des points de vue environnement et sécurité. En effet si produire de l'hydrogène par des technologies issues du procédé photolytique est neutre par rapport à l'environnement, il faut admettre que les quantités produites restent marginales par rapport aux besoins en hydrogène-énergie (moins de 1%). Au regard de l'état d'avancement des technologies de production actuelle, seules les procédés de gazéification et de reformage des énergies fossiles ainsi que les cycles thermochimiques couplés à des générateurs nucléaires de 4ième génération devraient être en capacité, à terme de satisfaire les besoins en hydrogène. Il faut cependant noter qu'il est tout de même plus vertueux de transformer le charbon en hydrogène pour une utilisation dans des véhicules à pile à combustible que d'extraire et transformer le pétrole en essence ou gazole pour le brûler dans des véhicules à moteurs thermique. Or ces technologies de production (thermochimique ou nucléaire) suscitent de nombreux débats quant à leurs conséquences qui peuvent constituer autant de points d'achoppement pour l'acceptation grand public de l'hydrogène comme vecteur d'énergie :
Primo, vouloir satisfaire la demande en hydrogène en le produisant par électrolyse de l'électricité d'origine nucléaire aurait pour conséquence immédiate d'augmenter le nombre de tranches de type EPR de manière significative à l'horizon 2050 dans l'hypothèse d'une demande uniquement tirée par les transports et quelques soit les scénarios retenus. Ce qui poserait de facto le problème de la gestion des déchets et de la sécurité des tranches supplémentaires. L'actualité du nucléaire japonais a exacerbé cette controverse en remettant la question du nucléaire au centre du débat. De ce point de vue on peut se demander ce que la prise en compte d'un évènement inattendu analogue à celui de Fukushima changerait au modèle qui nous a permis d'évaluer les scénarios des technologies de l'hydrogène si il se produisait en France. En outre on peut également se demander de quelle manière notre modèle tiendrait compte des nouvelles conséquences de cette information. Notons que dans notre précédent modèle, l'information sur les tranches nucléaires constituait une composante importante de la perception et de l'acceptabilité des technologies de l'hydrogène par le grand public. Cette information (nombre de tranches supplémentaires) bien qu'ayant eu une influence négative sur l'évaluation des scénarios, à pu dans une certaine mesure être contrebalancée par certaines informations à influence positive dans notre modèle. Alors que dans l'optique d'un événement catastrophe comme celui que nous avons mentionné ci-dessus, le simple fait d'envisage des tranches supplémentaires (donc de l'information négative) indépendamment de la présence et de la puissance des informations positives seraient rédhibitoire pour le scénario concerné. Dans notre modèle, un exemple typique est celui du scénario Hyfrance optimiste qui malgré l'utilisation des technologies qui augmente le nombre de tranches nucléaires de 67 % (horizon 2050), garde un classement relativement bon (catégorie « confiance »).

Secundo, envisager la production de l'hydrogène-énergie par reformage (technologies thermochimiques) des matières premières fossiles (gaz naturel, charbon, méthane) pose un problème de nature différente mais donc les conséquences sont proches de celles du nucléaire : la gestion des émissions de gaz carbonique. Pour le modèle, cette information est de nature à avoir une incidence négative sur l'évaluation d'un scénario. Toutefois cette controverse a déjà fait l'objet de nombreux débats autour desquels l'idée de la capture et de la séquestration du CO_2 dans des cavités naturelles a émergé comme solution pour les partisans de cette technologie. Mais ses opposants n'y voient qu'un moyen de gagner du temps car selon eux le CO_2 séquestré n'aura pour autant pas disparu. il s'agirait donc d'une fuite en avant qui ne réglerait pas le problème définitivement.

– **La controverse sur les modes d'utilisation de l'hydrogène-énergie** :
Un autre sujet de discussion sur l'hydrogène porte sur son mode de conversion. Deux visions s'opposent : la conversion directe dans les moteurs à explosion, et la conversion indirecte dans les piles à combustibles. Cette controverse est de nature plus technique mais elle a une incidence importante sur certaines dimensions de la perception et de l'acceptabilité (coût, mode de distribution, et autonomie de fonctionnement) de l'hydrogène par le grand public. D'où l'intérêt que nous attachons à examiner cette controverse. Les tenants de la conversion directe dans les moteurs à explosion mettent en avant l'argument d'un possible fonctionnement de façon hybride avec de l'essence ou du GPL. Cette dernière possibilité permettrait une adaptation relativement peu compliquée aux moteurs préexistant, donc réduirait les coûts notamment ceux d'acquisition d'éventuels nouveaux moteurs. Leurs opposants et partant tenant de la thèse de la conversion indirecte dans les piles à combustible (PàC) rejettent cette idée en arguant des mauvais rendements dans les moteurs à explosion par rapport aux rendements élevés des PàC. Cependant les prix encore prohibitifs des matériaux utilisés dans les piles à combustible auraient un effet désastreux sur les coûts. Suivant que l'on opte pour une utilisation directe de l'hydrogène dans les moteurs à explosion ou que l'on choisisse une utilisation indirecte sous forme de PàC, les composantes de l'acceptabilité comme le coût, le mode de distribution, et l'autonomie de fonctionnement des moteurs varieraient différemment. On le voit bien, selon la direction dans laquelle ce débat sur le mode de conversion de l'hydrogène peut être tranché, certaines composantes de l'acceptabilité sociale auront des comportements différents, voire inverses. Il peut également être intéressant de voir comment traduire cela dans notre premier modèle.

– **La controverse sur les modes de stockage de l'hydrogène-énergie** :
Enfin, le dernier sujet de controverse que nous avons retenu sur l'hydrogène est inhérent à son mode de stockage. Cette discussion s'articule autour des dimensions de l'acceptabilité sociale comme le coût, le confort et la sécurité. Notons que dans le cadre de notre étude, la sécurité renvoie à la sécurité perçue ou plus précisément au sentiment de sécurité en présence des technologies de l'hydrogène. Ça peut être le sentiment de sécurité perçu par l'usager d'un véhicule à hydrogène par combustion directe ou à PàC ; ça peut aussi bien être le sentiment de sécurité perçu par les habitants du voisinage directe d'une station service à hydrogène ; ou bien celui de l'utilisateur d'un ordinateur portable donc la batterie est une PàC par exemple. Selon l'utilisation souhaitée (mobile ou stationnaire), deux points de vues'opposent :

1. Soit produire de l'hydrogène et le stocker sous pression (gazeux) ou à basse température (liquide)
2. Soit produire l'hydrogène à la demande ou le stocker sous formes d'hydrures métalliques (solide)

Si la première option répond très exactement aux exigences d'une utilisation mobile de l'hydrogène (transport, appareils potables), toutefois elle a d'indéniables inconvénients qui peuvent influer négativement sur les coûts, la sécurité et le confort des usagers. En effet le poids, la pression, l'encombrement et la nature des matériaux des réservoirs dans le cas d'une application dans les véhicules légers contribuent à cette influence négative pour le stockage gazeux. La deuxième option qui permet de produire de l'hydrogène "juste à temps" pour être consommé réduit considérablement les risques liés à son utilisation. Mais elle est plutôt adaptée aux applications stationnaires notamment dans le résidentiel, utilisation marginale selon nos hypothèses orientées application transport.

D'un point de vue économique par exemple, le débat se focalise sur les conditions qui permettraient d'atteindre un coût compétitif pour l'hydrogène une fois qu'il sera produit pour satisfaire une demande massive. En dépit du fait que l'utilisation de l'hydrogène n'induit ni déchets, ni polluants, sa production, son stockage et son utilisation posent les problèmes de propreté de la source, de sécurité, de rendement et de maturité technologique. Autant de sujets de débats non encore définitivement tranchés qui nourrissent les controverses autour de la filière hydrogène. En dépit de cette diversité des controverses autour des technologies de l'hydrogène, la plus prégnante est celle liée aux modes de production de l'hydrogène-énergie. Elle s'appuie sur les aléas qu'engendrerait le choix d'un mode de production en termes de conséquences environnementale et de sécurité notamment. Au regard de l'analyse des controverses, il apparaît nécessaire de présenter aux parties prenantes du processus de décision un modèle d'évaluation où les conséquences de ces controverses ne soient ni diluées (effet de compensation), ni rédhibitoires (effet de veto) pour juger une alternative (ou scénario).

Dans cette optique, il est possible d'explorer deux pistes de réflexions pour un développement ultérieur de cette question. La première piste consiste à utiliser les controverses comme source d'information pour construire les vétos : au demeurant cette approche n'apporte pas une modification sensible de notre modèle car elle informe juste un paramètre supplémentaire du modèle déjà existant. La deuxième piste envisage de traiter l'information positive et l'information négative (liée aux controverses) de manière totalement indépendante l'une vis-à-vis de l'autre : cette approche est de nature à induire un changement de paradigme notable dans notre modèle.

La troisième critique concerne l'expérimentation de notre méthodologie sur un nombre restreint de scénarios afin de démontrer davantage la pertinence et les lacunes de notre modèle d'intégration d'outils. En effet au regard du regain relativement récent d'intérêt pour l'hydrogène comme vecteur d'énergie, les projets pilotes sur ce sujet ne sont pas légion et par conséquent les scénarios sont tout aussi limités. Cependant cette critique n'entache en rien l'intérêt de la méthodologie que nous proposons. Elle s'avère plutôt être un outil qui peut doublement servir en amont et en aval de tels projets : dans le premier cas elle permet de dimensionner techniquement les scénarios et dans le deuxième cas elle permet de les soumettre à l'appréciation du grand public ou vice-versa. Ils peut donc être perçu comme un outil de communication

entre les experts et la "clientèle cible" (le grand public).

La quatrième critique porte le fait que nous n'ayons pas pris en compte dans notre modèle d'acceptabilité les corrélations que nous avons identifiées entre certaines parties du modèle. En effet nous avons exclu de notre champs d'investigation la détermination du type de corrélation par exemple entre les connaissances et la perception l'hydrogène, ou entre la perception et l'acceptation de l'hydrogène.

La cinquième et dernière critique est intrinsèquement liée à la nature même des technologies. En effet, certains facteurs inhérents à la complexité des nouvelles technologies ne sont pas toujours perçus, ne se dévoilant qu'à l'usage, et par conséquent l'information qui sert de base à l'évaluation à priori reste partielle voire insuffisante. A moins de placer les individus dont on désire prendre en compte la perception dans une situation de quasi usage réel. Seule une boucle pouvant à partir du paramétrage des composantes de l'acceptabilité, comme nous avons essayé de le faire au chapitre 4 par l'analyse de sensibilité, peut informer la construction des scénarios en intégrant une meilleure prise en compte de l'acceptabilité sociale.

Malgré tout il manque de pouvoir regrouper tous les modules développés dans la méthodologie au sein d'une interface utilisateur pour en faciliter l'usage par un utilisateur informaticien ou non informaticien.

Bibliographie

[Ackermann and Eden, 2001] Ackermann, F. and Eden, C. (2001). Contrasting single user and networked group decision support systems for strategy making. *Group Decision and Negociation*, 10(1) :47–66.

[Ackermann et al., 2004] Ackermann, F., Eden, C., and Brown, I. (2004). *"Practice of Making Strategy : A Student Handbook"*. Sage Publications.

[Ackoff, 1974] Ackoff, R. (1974). *Redesigning the future*. Wiley, New York.

[Ackoff, 1979] Ackoff, R. L. (1979). The future of the operational research is past. *Journal of the Operational Research Society*, 30(2) :93–104.

[Adelman et al., 1986] Adelman, L., Sticha, P., and Donnell, M. (1986). An Experimental Investigation of the Relative Effectiveness of two Techniques for Structuring Multiattribute Hierarchies. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 37 :188–196.

[Agator and Avril, 2006] Agator, J. and Avril, S. (2006). Towards a French Hydrogen Energy Roadmap : the Hyfrance Project. Lyon, France. WHEC.

[Altmann et al., 2004] Altmann, M., Mattias, Schmidt, and Patrick (2004). Accept h_2 : Public Perception of Hydrogen Buses in Five Countries. pages 143–178, Essen. Proceedings of the International German Hydrogen Energy Congress.

[Amgoud et al., 2008] Amgoud, L., Cayrol, C., Lagasquie-Schiex, M., and Livet, P. (2008). On bipolarity in argumentation frameworks. *International Journal of Intelligent Systems*, 23 :1062–1093.

[Amir and Werey, 2009] Amir, N. and Werey, C. (2009). Aide à la décision multicritère :introduction aux méthodes d'analyse multicritère de type ELECTRE. ingénierie financière. notes de cours du Cemagref-Engees.

[Archbold and Marschall, 1994] Archbold, R. and Marschall, K. (1994). *Hindenburg : An Illustrated History*. Warner Books.

[Argyris and Schön, 1996] Argyris, C. and Schön, D. (1996). *Organizational Learning II : Theory, Method and Practice*, volume 2. Addison - Wesley, Massachusetts.

[Axelrod, 1976] Axelrod, R. (1976). *Structure of Decision : The Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton University, 1st edition.

[Baker et al., 2002] Baker, D., Bridges, D., Hunter, R., Johnson, G., Krupa, J., Murphy, J., and Sorenson, K. (2002). *Guidebook to Decision Making Methods*. Department of Energy, USA. http://emi-web.inel.gov/Nissmg/Guidebook_2002.pdf (accessed April 11, 2011).

[Bellevrat et al., 2009] Bellevrat, E., Kitous, A., and Château, B. (2009). The role of Hydrogen in Long-Term Energy System : An Updated Quantitative Analysis with the POLES Model. Présented at IEW/Venice (Italy), and ENERDATA/Grenoble (France) conferences.

[Bello and Junker, 2004] Bello, B. and Junker, M. (2004). Codes, standars, and regulations for hydrogen and fuel cell systems in Europe : Different approaches between France and Germany. Presented at the 15th World Hydrogen Energy Conference, Yokohama, Japan.

[Belton et al., 1997] Belton, V., Ackermann, F., and Shepherd, I. (1997). Integrated support from problem structuring through to alternative evaluation using COPE and VISA. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6 :115–130.

[Belton and Stewart, 2001] Belton, V. and Stewart, T. (2001). *Multiple Criteria Decision Analysis : An integrated approach*. Kluwer Academic Publishers.

[Benferhat et al., 2002] Benferhat, S., Dubois, D., Kaci, S., and Prade, H. (2002). Bipolar representation and fusion of preferences in the possibilistic logic framework. In *Proceedings of the 8th International Conference on Principle of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 421–432.

[Bennet et al., 2001] Bennet, P., Bryant, J., and Howard, N. (2001). Drama Theory and Confrontation Analysis. In Rosenhead, J. and Mingers, J., editors, *Rational analysis for a problematic World revisited : Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*, pages 215–222. Wiley, London.

[Bijker and al, 1989] Bijker, W. and al (1989). The Social Construction of Technological Systems : New Directions in the Sociology and History of Technology. MIT Press.

[Bijker and Law, 1994] Bijker, W. and Law, J. (1994). *Shaping Technology / Building Society : Studies in Sociotechnical Change (Inside Technology)*. MIT Press.

[Borcheding and Winterfeldt, 1988] Borcheding, K. and Winterfeldt, D. V. (1988). The Effect of Varying Value Trees on Multiattribute Evaluations. *Acta Psychologica*, 68 :153–170.

[Bouallou et al., 2010] Bouallou, C., de Castro, J., and Werkoff, F. (2010). How to improve the public perception of hydrogen ? In *Proceedings of World Hydrogen Energy Conference*, pages 89–92.

[Bougon, 1983] Bougon, M. (1983). Uncovering Cognitive Maps : The Self-Q Technique. In Morgan, G., editor, *Beyond Method : Strategies for Social Research*, pages 173–188. CA : Sage, Beverly Hills.

[Bougon et al., 1977] Bougon, M., Weick, K. E., and Binkhorst, D. (1977). Cognition in organizations : an analysis of the Utrecht Jazz Orchestra. *Administrative Science Quarterly*, 22(4) :606–639.

[Bouyssou, 1986] Bouyssou, D. (1986). Some remarks on the notion of compensation in MCDM. *European Journal of Operational Research*, 26 :150–160.

[Bouyssou, 1990] Bouyssou, D. (1990). Building criteria. In e Costa, C. B., editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 58–80, Berlin. Springer-Verlag.

[Bouyssou et al., 2000] Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Perny, P., Tsoukiàs, A., and Vincke, P. (2000). *Evaluation and Decision Models : A Critical Perspective*. Kluwer Academic Publishers.

[Bouyssou et al., 2006] Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., and Vincke, P. (2006). *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria : Stepping stones for the analyst*. Springer, Berlin.

[Brans et al., 1984] Brans, J., Mareschal, B., and Vincke, P. (1984). PROMETHEE : A new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Operational Research*, 84 :408–421.

[Brunson, 1996] Brunson, M. (1996). A definition of "Social Acceptability" in Ecosystem Management. In *Defining Social Acceptability in Ecosystem Management*, pages 7–17. Pacific Northwest Research Station, United States Department of Agriculture. Forest Service.

[Caciappo and Berntson, 1999] Caciappo, J. and Berntson, G. (1999). The affect system : architecture and operating characteristics. *Current Directions in Psychological Sciences*, 8 :133–137.

[Caciappo et al., 1997] Caciappo, J., Gardner, W., and Berntson, G. (1997). Beyond bipolar conceptualizations and measures : The case of attitudes and evaluative space. *Personality and Social Psychology Review*, 1 :3–25.

[CAN, 2010] CAN (2010). Canadian hydrogen and fuel cell sector profile. Technical report, Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association.

[CGDD, 2010] CGDD (2010). Bilan énergétique de la france pour 2009. Technical report, Commissariat Général au Développement Durable. Service de l'observation et des statistiques. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/spipwwwmedad/pdf/Reference-cle7212c4.pdf (accessed June 10, 2011).

[Chader et al., 2007] Chader, S., Hacene, H., Belhamel, M., and Agathos, S. (2007). Etude des procédés de production biologiques de l'hydrogène. *Revue des Energies Renouvelables*, 10(4) :497–505.

[Checkland, 1981] Checkland, P. (1981). *Systems Thinking, Systems Practice*. Wiley, Chichester, 1st edition.

[Chen and Pu, 2004] Chen, L. and Pu, P. (2004). *Survey of Preference Elicitation Methods*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Human Computer Interaction Group. http://www.http://grpupc1.epfl.ch/~luis/teaching/dt/docs/IC_TECH_REPORT_200467.pdf (accessed December 10, 2010).

[Clark and Lane, 2008] Clark, K. and Lane, L. (2008). L'art de faire avaler la pilule, enquête sur l'acceptabilité sociale. *Revue Z*, (1) :1–7.

[Clemen and Reilly, 2001] Clemen, R. and Reilly, T. (2001). *Making Hard Decisions with Decision Tools*. Duxbury Press, 1st edition.

[Coban and Secme, 2005] Coban, O. and Secme, G. (2005). Prediction of socio-economical consequences of privatization at the firm level with fuzzy cognitive mapping. *Information Sciences*, 169 :131–154.

[Cossette, 2003] Cossette, P. (2003). *Cartes cognitives et organisation*. Les Editions de l'ADREG, 2ème edition.

[Damart, 2010] Damart, S. (2010). Cognitive Mapping Approach to Organizing the Participation of Multiple Actors in Problem Structuring Process. *Group Decision and Negociation*, 19(5) :505–526.

[Damart, 2011] Damart, S. (2011). Focus groups de l'acceptabilité de l'hydrogène : rapport de synthèse, phase qualitative. Technical report, M-Lab, Paris.

[Damart et al., 2007] Damart, S., Dias, L., and Mousseau, V. (2007). Supporting groups in sorting decisions : Methodology and use of a multicriteria aggregation/disaggregation DSS. *Decision Support Systems*, 43(4) :76–89.

[DeMarchi et al., 2012] DeMarchi, G., Lucertini, G., and Tsoukiàs, A. (2012). From Evidence - Based Policy - Making to Policy Analytics. *Cahier du LAMSADE*, 319 :1–32.

[Deo, 1974] Deo, N. (1974). *Graph theory with applications to engineering and computer science*. Prentice Hall.

[Dewey, 1998] Dewey, J. (1998). *How we think*. Dover Publications Inc.

[Dias and Clímaco, 2000] Dias, L. and Clímaco, J. (2000). ELECTRE TRI for groups with imprecise information on parameter values. *Group Decision and Negotiation*, 9 :355–377.

[Dias and Mousseau, 2003a] Dias, L. and Mousseau, V. (2003a). IRIS : A DSS for multiple criteria sorting problems. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12 :285–298.

[Dias and Mousseau, 2003b] Dias, L. and Mousseau, V. (2003b). *IRIS-Interactive Robustness Analysis and Parameters : inference for multicriteria sorting problems*. INESC, Coimbra. User Manual-Version 2.0.

[Dias and Tsoukiàs, 2004] Dias, L. and Tsoukiàs, A. (2004). On constructive and other approaches in decision aiding. In *Proceedings of the 56th meeting of the EURO MCDA working group, Coimbra, Portugal*, pages 13–28.

[Diaz, 2000] Diaz, G. (2000). Decision Explorer. *Social Science Computer Review*, 18(3) :344–350.

[Diestel, 2000] Diestel, R. (2000). Graph theory. *Graduate Texts in Mathematics Series*, 173 :25–178. electronic edition,`http://www.math.uni-hambourg.de/home/diestel/books/graph.theory` (accessed February 15, 2012).

[Dillon, 2000] Dillon, S. (2000). Defining problem structuring. Lecture notes of Departement of Management Systems, University of Waikato, New Zealand.

[Dubois and Fargier, 2008] Dubois, D. and Fargier, H. (2008). On the qualitative comparison of decisions having positive and negative features. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 32(1) :385–417.

[Dubois et al., 1997] Dubois, D., Fargier, H., and Prade, H. (1997). *Beyond min aggregation in multicriteria decision : (ordered) weighted Min, Discrimin, Leximin. In The Ordered Weigthed Averaging Operators - Theory and Applications*, pages 181–192. Kluwer Academic Publishers, Boston.

[Dubois and Prade, 2002] Dubois, D. and Prade, H. (2002). Bipolarité dans un processus d'interrogation flexible. In *Actes Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications*, pages 174–182, Montpellier. Cépadues.

[Dubois and Prade, 2009] Dubois, D. and Prade, H. (2009). An overview of the asymmetric bipolar representation of positive and negative information in possibility theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 160 :1355–1366.

[Dufoix et al., 2004] Dufoix, M., Mastrangelo, J.-F., and Valmage, F. (2004). Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques ? Technical report, Ecole des Ponts ParisTech ENPC.

[ECTOS, 2004] ECTOS (2004). Assessment of Socio-Economic Factors with Emphasis on : Public Acceptance of Hydrogen as a Fuel. Technical report, University of Iceland. ECTOS deliverable 12.

[Eden, 1979] Eden, C. (1979). *Thinking in Organizations*. Macmillan, London.

[Eden, 1988] Eden, C. (1988). Cognitive mapping : a review. *European Journal of Operational Research*, 36 :1–13.

[Eden and Ackermann, 2001] Eden, C. and Ackermann, F. (2001). SODA-journey making and mapping in practice. In Rosenhead, J. and Mingers, J., editors, *Rational Analysis for a Problematic World Revisited : Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*, pages 43–60. Wiley, London.

[Eden and Ackermann, 2004] Eden, C. and Ackermann, F. (2004). Cognitive mapping expert views for policy analysis in the public sector. *European Journal of Operational Research*, 152 :615–630.

[Eibenschutz, 2007] Eibenschutz, J. (2007). Towards a cleaner planet : Energy, present and future. *Springer, http://www.springerlink.com/content/ln42618t706144x7/fulltext.pdf (accessed April 6, 2011)*.

[Einhorn, 1970] Einhorn, H. (1970). The use of nonlinear, noncompensatory models in decision making. *British Psychological Society Bulletin*, pages 35–47.

[Figueira et al., 2004] Figueira, J., Greco, S., and Ehrgott, M. (2004). *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*. Springer, New York.

[Fiol and Huff, 1992] Fiol, C. and Huff, A. (1992). Maps for managers : where are we ? where do we go from here ? *Journal of Management Studies*, 29(3) :267–285.

[Friend and Hickling, 2004] Friend, J. and Hickling, A. (2004). *Planning under Pressure : the Strategic Choice Approach*. Butterworth-Heinemann Ltd, 3rd edition.

[Galves, 2005] Galves, M. (2005). structuring decision situations : a brief overview. In Barthélemy, J.-P. and Lenca, P., editors, *Advances in Multicriteria Decision Aid*, pages 32–40. GET/ENST Bretagne.

[Godet, 2007] Godet, M. (2007). *Manuel de prospective stratégique, l'art de la méthode*, volume 2. Dunod, Paris, 3th edition.

[Gondran and Minoux, 1985] Gondran, M. and Minoux, M. (1985). *Graphes et algorithmes*. Eyrolles, 2ème edition.

[Grabisch and Labreuche, 2005] Grabisch, M. and Labreuche, C. (2005). Bi-capacities I : definition, Möbius transform and interaction. II The choquet integral. *Fuzzy Sets and Systems*, 151 :211–259.

[Grabisch et al.,] Grabisch, M., Prade, H., Raufaste, E., and Terrier, P. Application of the choquet integral to subjective mental workload evaluation. In Proceedings of the Ninth IFAC symposium on Automated Systems Based on Human Skill and Knowledge (ASBoHS'06).

[Hämäläinen, 2003] Hämäläinen, R. (2003). Decisionarium - Aiding Decisions, Negotiating and Collecting Opinions on the Web. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12(2-3) :101–110.

[Hämäläinen, 2008] Hämäläinen, R. (2008). *Introduction to Value Tree Analysis*. Helsinki University of Technology - Systems Analysis Laboratory. http://www.eLearning.sal.hut.fi (accessed February 15, 2011).

[Heiskanen et al., 2007] Heiskanen, E., Mourik, R., Raven, R., Feenstra, C., Alcantud, A., Brohmann, B., Daniels, A., Fiore, M. D., Farkas, B., Fritsche, U., Fucsko, J., Hunecke, K., Jolivet, E., Maack, M., Matschoss, K., Polawska, A. O., Poti, B., Prasad, G., Schaefer, B., and Willemse, R. (2007). Factors influencing the societal acceptance of new energy technologies. *Meta-analysis of recent European projects*, 58(7) :2–41.

[Horn, 2001] Horn, R. E. (2001). Knowledge Mapping for Complex Social Messes. A presentation to the "Foundations in the Knowledge Economy" at the David and Lucile Packard Foundation [Online]. Available on http://www.stanford.edu/~rhorn/a/recent/spchKnwldgPACKARD.pdf (accessed October 16, 2011).

[IAE, 2009] IAE (2009). Energy policies of IEA countries-France 2009. Technical report, International Energy Agency.

[Jabeur and Martel, 2005] Jabeur, K. and Martel, J. M. (2005). La décision de groupe : l'application de méthodes de surclassement de synthèse. *Bulletin du Groupe de Travail Européen "Aide Multicritère à la Décision*, 3(11) :1–5.

[Jonchère, 2008] Jonchère, J. (2008). *Mémento de l'hydrogène, Fiche 3.1.1*. Association Française de l'Hydrogène (AFH2). http://www.afh2.org (accessed november, 2008).

[Jones et al., 1990] Jones, M., Hope, C., and Hughes, R. (1990). A Multi-Attribute Value Model for the Study of UK Energy Policy. *Journal of Operational Research Society*, 41(10) :919–929.

[Jouvel, 1999] Jouvel, H. D. (1999). Sur la méthode prospective, un bref guide méthodologique. *Futuribles*, (247) :47–68.

[Junker, 2003] Junker, M. (2003). Hydrogène et piles à combustible, règlementation : cas de la France et de l'Allemagne. Présenté à la Journée Sécurité Hydrogène de l'INERIS, Paris, France.

[Keeney, 1982] Keeney, R. (1982). Decision Analysis : An overview. *Operations Research*, 30(5) :803–838.

[Keeney, 1992] Keeney, R. (1992). *Value Focused Thinking : A Path to Creative Decisionmaking*. MA : Harvard University Press.

[Keeney and Raiffa, 1976a] Keeney, R. and Raiffa, H. (1976a). *Decision with Multiple Objectives : preferences and value tradeoffs*. Wiley, New York. Reprinted, Cambridge University Press (1993).

[Keeney and Raiffa, 1976b] Keeney, R. and Raiffa, H. (1976b). *Decision with Multiple Objectives :Preferences and Value Tradeoffs*. Wiley, New York.

[Keller and Ho, 1988] Keller, L. and Ho, J. (1988). Decision Problem Structuring : Generating Options. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18(5) :715–728.

[Kelly, 1995] Kelly, G. (1995). *The Psychology of Personal Constructs*. Norton.

[Kelly, 2001] Kelly, G. (2001). The psychology of personal constructs. In Rosenhead, J. and Mingers, J., editors, *Rational Analysis for a Problematic World Revisited : Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*, pages 43–60. Wiley, London.

[Kleindorfer et al., 1993] Kleindorfer, P., Kunreuther, H., and Schoemaker, P. (1993). *Decision Science :* A*n* I*ntegrative* P*erspective*. Cambridge University Press.

[Komocar, 1985] Komocar, J. M. (1985). *Participant cause maps of a work setting : an approach to cognition and behavior in organizations*. PhD thesis, Urbana IL : University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.

[Kosko, 1986] Kosko, B. (1986). Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine studies*, 24 :65–75.

[Kosko, 1991] Kosko, B. (1991). *Neural Networks and Fuzzy Systems : A dynamic system approach to machine intelligence*. Prentice Hall, New Jersey.

[Kosko, 1996] Kosko, B. (1996). *Fuzzy Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.

[Kpoumié, 2007] Kpoumié, A. (2007). Etude d'un outil multicritère d'analyse des offres constructeurs relatives au confort dans les trains. Master's thesis, Université Paris Dauphine, LAMSADE et Direction de l'Innovation et de la Recherche SNCF (Unité de Recherche Confort & Services), Paris.

[Kpoumié et al., 2012] Kpoumié, A., Damart, S., and Tsoukiàs, A. (2012). Integrating Cognitive Mapping Analysis into Multi-Criteria Decision Aiding. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. Submitted.

[Kwahk and Kim, 1999] Kwahk, K.-Y. and Kim, Y.-G. (1999). Supporting business process redesign using cognitive maps. *Decision Support systems*, 25 :155–178.

[Langfield, 1992] Langfield, S. (1992). Exploring the need for a shared cognitive map. *Journal of Management Studies*, 29(3) :349–368.

[Latour and Woolgar, 1979] Latour, B. and Woolgar, S. (1979). *Laboratory Life : The Social Construction of Scientific Facts*. Sage, Beverly Hills.

[LeDuigou, 2009] LeDuigou, A. (2009). L'hydrogène chimique et énergétique : Les Projets Hyways et Hyfrance. Technical report, CEA-I-tésé, Paris.

[LeDuigou, 2010] LeDuigou, A. (2010). Synthèse du projet PROTEC H_2. Technical report, CEA-I-tésé.

[Lee et al., 1992] Lee, S., Courtney, J., and O'Keefe, R. (1992). A system for organizational learning using cognitive maps. *Omega*, 20(1) :23–36.

[Linneman and Klein, 1993] Linneman, R. and Klein, H. (1993). The use of multiple scenarios by U.S industrial companies : a comparison study. *Long Range Planning*, 16(6) :94–101.

[Matsumoto et al., 2005] Matsumoto, Y., Uemura, H., and Kai, T. (2005). Public acceptance of hydrogen energy, case study in Yakushima, Yasuo Matsumoto, Hirokazu Takanashi Yoshimitsu, Takami Kai. pages 98–131. Proceedings of the 5th Asian Pacific Conference on sustainable energy and environmental Technology.

[Maystre et al., 1994] Maystre, L. Y., Pictet, J., and Simos, J. (1994). Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environementale. *Presses Polytechnique et Universitaires Romandes*, pages 193–212.

[Merad, 2008] Merad, M. (2008). Aide à la dcision pour l'identification et l'accompagnement aux transformations sociétales induites par les nouvelles technologies de l'hydrogène : AIDHY. Technical report, INERIS.

[Millet, 2006] Millet, P. (2006). Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau sur membrane acide. *Découvertes*, (343) :17–25.

[Montibeller, 2005] Montibeller, G. (2005). From (and to) a New Generation of Multi-Criteria Decision Analysts : An Introduction to the Field and a Personal View on its Future. *The Operational Research Society, Birmingham*, pages 17–30. Meyer E (Ed.) Keynote Papers YOR 14 Conference, University of Bath.

[Montibeller et al., 2008] Montibeller, G., Ackermann, F., Belton, V., and Ensslin, L. (2008). Reasoning Maps for Decision Aiding : an integrated approach for problem structuring and multi-criteria evaluation. *Journal of the Operational Research Society*, 59 :575–589.

[Montibeller et al., 2007] Montibeller, G., Belton, V., and Lima, M. (2007). Supporting Factoring Transactions in Brazil using Reasoning Maps : a language-based DSS for evaluating accounts receivable. *Decision Support Systems*, 42(4) :2085–2092.

[Montignac, 2007] Montignac, F. (2007). An MCDA approach for evaluating hydrogen storage systems for futur vehicles. pages 1–2. Université Paris Dauphine. 2nd Decision Deck Workshop.

[Montignac et al.,] Montignac, F., Mousseau, V., Aloulou, M., Buyssou, D., Rousval, B., and Damart, S. An MCDA approach for evaluating hydrogen storage systems for future vehicles. In Raymond Bisdorff, Luis Dias, V. M. M. P., editor, *Evaluation and decision model : real case studies*. Springer. to appear.

[Moreau, 2001] Moreau, A. (2001). Quelle énergie pour demain ? Support de cours de troisième cycle [en ligne]. Disponible sur http://ww.elma.univ-bpclermont.fr/moreau/energie.pdf (accessed October 16, 2011).

[Moy,] Moy, R. Tort law considerations for hydrogen economy. *Energy Law Journal*, 24(2) :96–104.

[Munda, 2004] Munda, G. (2004). Social Multi-Criteria Evaluation : Methodological Foundations and Operational Consequences. *European Journal of Operational Research*, (158) :662–677.

[Mustajoki and Hämäläinen, 2000] Mustajoki, J. and Hämäläinen, R. (2000). Web-HIPRE : Global Decision Support by Value Tree and AHP Analysis. *INFOR*, 30(3) :208–220.

[Neumann and Morgenstern, 1947] Neumann, J. and Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behaviour*. Princeton University Press, Princeton, 2nd edition.

[Noirot et al., 2005] Noirot, I., Mercier, A., Chabot, B., Nicolleau, C., Pouet, J., Goyeneche, O., and Thiénard, H. (2005). HyFrance Renewable Energy Sources. Présenté par le Groupe HyFrance (CEA, ADEME, BRGM, DGEMP), Paris, France.

[Nouredine et al., 2012] Nouredine, T., Liétard, L., and Rocacher, D. (2012). Bipolar SQL : a Flexible Query Language for Relational Databases. pages 112–145. Proceedings of the 9th International Conference On Flexible Query Answering Systems, Belgium.

[Nutt, 1998] Nutt, P. (1998). Framing Strategic Decisions. *Organization Science*, 9(2) :55–62.

[Osgood et al., 1957] Osgood, C., Suci, G., and Tannenbaum, P. (1957). *The Measurement of Meaning*. Univ. of Illinois Press, Chicago.

[Ozturk and Tsoukiàs, 2004a] Ozturk, M. and Tsoukiàs, A. (2004a). Modelling continuous positive and negative reasons in decision aiding. In *Proceedings of the 10th International Workshop on Non-Monotonic Reasoning, Whistler, Canada*, pages 45–56.

[Ozturk and Tsoukiàs, 2004b] Ozturk, M. and Tsoukiàs, A. (2004b). Positive and negative reasons in interval comparisons : Valued PI interval orders. In *Proceedings of 10th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU'04)*, pages 983–989.

[Ozturk and Tsoukiàs, 2008] Ozturk, M. and Tsoukiàs, A. (2008). Bipolar preference modeling and aggregation in decision support. *International Journal of Intelligent Systems*, 23(9) :970–984.

[Phdungslip and Wuttipornpun, 2011] Phdungslip, A. and Wuttipornpun, T. (2011). Decision Support for the Selection of Electric Power Plants Generated from Renewable Sources. *World Academy of Sciences*, 75(6) :143–168.

[Pöyhönen et al., 2001] Pöyhönen, M., Vrolijk, H., and Hämäläinen, R. (2001). Behavioral and Procedural Consequences of Structural Variation in Value Trees. *European Journal of Operational Research*, 134 :216–227.

[Raiffa, 1968] Raiffa, H. (1968). *Decision Analysis : Introductory Lectures on Choice under Uncertainty*. Mcgraw-Hill College.

[Rittel and Webber, 1973] Rittel, H. and Webber, M. (1973). Dilemmas in a General Theory of Planning. *Elsevier*, pages 155–169.

[Rosenhead, 1996] Rosenhead, J. (1996). What's the problem ? An introduction to problem structuring methods. *Interfaces*, 26(6) :117–131.

[Rosenhead, 2001] Rosenhead, J. (2001). Robustness Analysis : Keeping your Options Open. In Rosenhead, J. and Mingers, J., editors, *Rational analysis for a problematic World revisited : Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*, pages 113–123. Wiley, London.

[Rosenhead and Mingers, 2001] Rosenhead, J. and Mingers, J. (2001). *Rational Analysis for a Problematic World Revisited :Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*. Wiley, Chichester.

[Rossi et al., 2005] Rossi, F., Bistarelli, S., Pini, M., and Venable, K. (2005). Positive and Negative Preference. Presented at the Maths CSP workshop on 7th International Workshop on Preferences and Soft Constraints, Sitges, Spain.

[Rossi et al., 2006] Rossi, F., Bistarelli, S., Pini, M., and Venable, K. (2006). Bipolar preference problems. Poster presented at ECAI-06.

[Roussel and Rouch, 2010] Roussel, E. and Rouch, F. (2010). Étude connaissance/usage/image/acceptabilité de l'hydrogène : rapport de synthèse. Technical report, Cohesium, Paris.

[Rousval and Maurin, 2008] Rousval, B. and Maurin, M. (2008). Evaluation de l'impact des transports sur l'environnement : quels modèles utiliser ? *Revue Recherche Transports Sécurité, Inrets*, (100).

[Roy, 1990] Roy, B. (1990). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. In e Costa, C. B., editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 155–183, Berlin. Springer-Verlag.

[Roy, 1996] Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers.

[Roy, 2002] Roy, B. (2002). Présentation et interprétation de la méthode ELECTRE TRI pour affecter des zones dans des catégories de risque. *Cahier du LAMSADE, Université de Paris Dauphine*, (124) :2–34.

[Roy, 2005] Roy, B. (2005). Paradigms and challenges. In J. Figueira, S. Grecco, M. E., editor, *Multiple Criteria Decision Analysis - State of the Art Surveys*, pages 3–24. Springer.

[Roy, 2009] Roy, B. (2009). Robustness in operational research and decision aiding : a multi-faceted issue. *Journal of Operational Research*, 200(3) :629–638.

[Roy and Bouyssou,] Roy, B. and Bouyssou, D. *Aide muticritère à la décision : méthodes et cas*.

[Saaty, 1980] Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

[Saaty, 1990] Saaty, T. (1990). *Multicriteria Decision Making : The Analytic Hierarchy Process*. RWS, Pittsburgh, PA.

[Sahin et al., 2004] Sahin, S., Ulengin, F., and Ulengin, B. (2004). Cognitive mapping expert views for policy analysis in the public sector. *European Journal of Operational Research*, 152 :615–630.

[Salo and Hämäläinen, 1997] Salo, A. and Hämäläinen, R. (1997). On the Measurement of Preferences in the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 6 :309–319.

[Savage, 1954] Savage, L. J. (1954). *The Foundations of Statistics*. Wiley.

[Scharlig, 1985] Scharlig, A. (1985). Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide à la décision multicritère. *Presses Polytechnique Universitaires Romandes*, pages 12–24.

[Scharlig, 1998] Scharlig, A. (1998). Pratique Electre et Prométhée. *Presses Polytechnique Universitaires Romandes*, pages 104–135.

[Schnaars, 1987] Schnaars, S. (1987). How to develop and use scenarios. *Long Range Planning*, 20(1) :105–114.

[Schoemaker, 1995] Schoemaker, P. (1995). Scenario planning : A Tool for Strategic Thinking. *Sloan Management Review*, 36(2) :25–40.

[Schwartz, 1993] Schwartz, P. (1993). La planification stratégique par scénario. *Futuribles*, (176) :45–63.

[Simon, 1956] Simon, H. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review*, 63(2) :129–152.

[Simon, 1969] Simon, H. (1969). *The science of the artificial*. MIT Press, 2nd edition.

[Slovic, 1995] Slovic, P. (1995). The construction of preferences. *American Psychologist*, 50(5) :75–89.

[Slovic et al., 2002] Slovic, P., Finucane, M., Peters, E., and MacGregor, D. (2002). Rational actors or rational fools ? implications of the affect heuristic for behavorial economics. *The Journal of Socio-Economics*, 31 :329–342.

[Somat, 2008] Somat, A. (2008). Acceptabilité sociale des systèmes technologiques. Notes de Cours du CRPCC/LAUREPS-Université de Rennes 2.

[Stankey, 1996] Stankey, G. (1996). Defining the social acceptability of forest management practices and conditions : integrating science and social choice. In *Defining Social Acceptability in Ecosystem Management*, pages 99–111. Pacific Northwest Research Station, United States Department of Agriculture. Forest Service. a workshop proceedings.

[Stankey and Shindler, 2006] Stankey, G. and Shindler, B. (2006). Formation of social acceptability judgments and their implications for management of rare and little-known species. *Wiley*, 20(1) :28–37.

[Stuart, 2004] Stuart, A. (2004). Hydrogen Systems. Technical report, Canadian Hydrogen Association.

[Takakuni, 2007] Takakuni, I. (2007). Demonstration Project for Hydrogen Stations and Fuel Cell Vehicles in Japan. Technical report, Japan Automobile Research Institute.

[Thery et al., 2009] Thery, P., Raphaele, P., and Zarate, P. (2009). Energy planning : a multilevel and multicriteria decision making structure proposal. *European Journal of Operations Research*, 17(3) :265–274.

[Tietje, 2008] Tietje, O. (2008). Identification of a small reliable and efficient set of consistent scenarios. *Journal of Operational Research*, 162(2) :418–432.

[Tolman, 1948] Tolman, E. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55 :189–208.

[Tsoukiàs, 2007a] Tsoukiàs, A. (2007a). From Decision Theory to Decision Aiding Methodology. *European Journal of Operational Research*, 187(1) :138–161.

[Tsoukiàs, 2007b] Tsoukiàs, A. (2007b). On the concept of decision aiding process : an operational perspective. *Annals of Operations Research*, 154(1) :3–27.

[Tsoukiàs and Paschetta, 2000] Tsoukiàs, A. and Paschetta, E. (2000). A real world MCDA application : evaluating software. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 9(5) :205–226.

[Tsoukiàs et al., 2002] Tsoukiàs, A., Perny, A., and Vincke, P. (2002). From concordance-discordance to the modelling of positive and negative reasons in decision aiding. In Bouyssou, D., Jacquet-Lagrèze, E., Perny, E., Slowinski, R., Vanderpooten, D., and Vincke, P., editors, *Aiding Decisions with Multiple Criteria : Essays in Honour of Bernard Roy*, pages 147–174. Kluwer Academic, Dordrecht.

[Tsoukiàs and Vincke, 1997] Tsoukiàs, A. and Vincke, P. (1997). Extended Preference Structures in MCDA. In Clímaco, J., editor, *Multi-Criteria Analysis*, pages 37–50. Springer-Verlag.

[Tversky and Kahneman, 1992] Tversky, A. and Kahneman, D. (1992). Advances in prospect theory : Cumulative representation of uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, 5 :297–323.

[Ulengin and Topcu, 1997] Ulengin, F. and Topcu, Y. (1997). Cognitive Map-KBDSS integration in transportation planning. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11) :1065–1076.

[Ulengin et al., 2001] Ulengin, F., Topcu, Y., and Sahin, S. (2001). An integrated decision aid system for Bosphorus water-crossing problem. volume 134, pages 179–192.

[Vanderpooten, 1990] Vanderpooten, D. (1990). The construction of prescriptions in outranking methods. In edited by C.A Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 184–215, Berlin. Springer-Verlag.

[Vincke, 1992] Vincke, P. (1992). *Multicriteria Decision Aid*. Wiley, New York.

[Vincke, 1995] Vincke, P. (1995). A short node on a methodology for choosing a decision method. In *Multicriteria Analysis*, pages 3–7. Kluwer Academic Publishers.

[Vincke, 1998] Vincke, P. (1998). *L'aide multicritère à la décision*. Ellipses Marketing, Bruxelles.

[Volkema, 1988] Volkema, R. (1988). Problem formulation in planning and design. *Behavioral Science*, 33(4) :292–300.

[Weick and Bougon, 1986] Weick, K. and Bougon, M. (1986). Organizations as cognitive maps : charting ways to success and failure. In H.P., S. and D.A, G., editors, *The Thinking Organization : dynamics of organizational social cognition*, pages 102–135. Jossey-Bass.

[Werkoff et al., 2005] Werkoff, F., Avril, S., Mansilla, C., and Sigurvinsson, J. (2005). Process of hydrogen production, coupled with nuclear reactors : economic perspectives. Number 227. European Nuclear Conference.

[Wilson, 1996] Wilson, R. (1996). *Introduction to Graph Theory*. Addison Wesley, New-York.

[Winterfeldt, 1980] Winterfeldt, D. V. (1980). Structuring decision problems for decision analysis. *Acta Psychologica*, 45(1-3) :71–93.

[Woolley and Pidd, 1981] Woolley, R. and Pidd, M. (1981). Problem structuring - A literature review. *Journal of the Operational Research Society*, 32 :197–206.

Annexe A

Données physico-chimiques sur l'hydrogène

Source : Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC) [1]

1. http ://www.afhypac.org/fr

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10 800 kJ/Nm^3 119 930 kJ/kg (gaz naturel 50 020 kJ/kg) 3.00 kWh/Nm^3 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770 kJ/Nm^3 141 860 kJ/kg 3.55 kWh/Nm^3 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m^3
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm^3 (gaz naturel 0.6512 kg/Nm^3)
Densité liquide à 20.3K	70.79 kg/m^3
Chaleur spécifique (C_p)	14 266 J/kg.K (293K)
Chaleur spécifique (C_v)	10 300 J/kg.K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/(m.K)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante du gaz	4 124.5 J/kg.K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20.268K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (µJ)	20 (gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m^3 de gaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)
Surpression de détonation (mélange stœchiométrique)	14.7 bars (gaz naturel 16.8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm²/s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

Autres caractéristiques

- Teneur dans l'air : 0,5 ppmv ou 0,00005%
- Solubilité dans l'eau : 0,0214 vol/vol (à 1,013 bar et 0°C)
- Compatibilité avec les matériaux : il existe des données complètes (cf. le site Web Air Liquide) de compatibilité avec tous les matériaux connus.
  Pour les plus répandus, cette compatibilité est :
  - Bonne avec : aluminium, cuivre et leurs alliages
  - Moyenne avec l'acier inoxydable (risques de fragilisation),
  - Bonne avec certains aciers (pipelines existants), et risque de fragilisation avec d'autres,
  - Bonne avec les plastiques (PTFE, PVDF, polyamide), malgré une légère porosité à prendre en compte (cas des liners thermoplastiques utilisés dans les réservoirs composites haute pression),
  - Bonne avec les élastomères.

FIGURE A.1 – Données physico-chimiques sur l'hydrogène gazeux

Annexe B

Rendements et puretés en hydrogène

	Vaporeformage + méthanation	Vaporeformage + PSA	Oxydation partielle (Procédé Texaco)	Oxydation partielle (Procédé Shell)
Pureté de H_2	95 à 98%	99,9%	99,9%	99,9%
Rendement*	~ 98%	85 à 90%	85 à 88%	85 à 88%

** Rendement : taux de récupération de l'hydrogène présent dans le gaz de synthèse*

FIGURE B.1 – Comparaison des puretés et rendement en hydrogène selon les procédés [Jonchère, 2008]

Annexe C

Schémas de principe de l’électrolyse

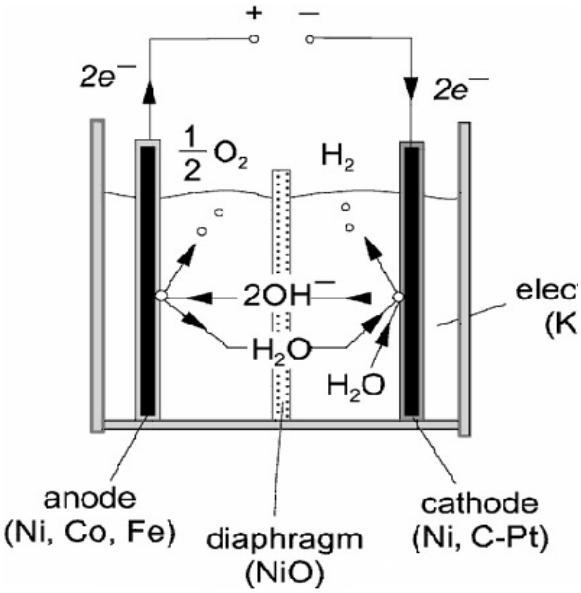


FIGURE C.1 – Schéma de l'électrolyse avec la technologie alcaline.
[Millet, 2006]

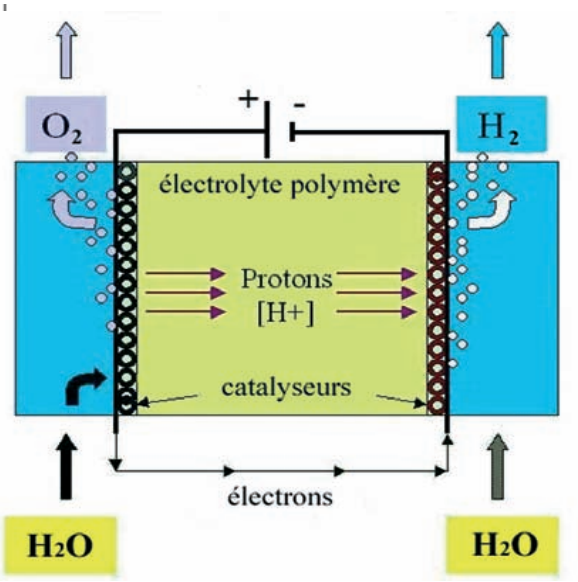


FIGURE C.2 – Schéma de l'électrolyse avec la technologie PEM.
[Millet, 2006]

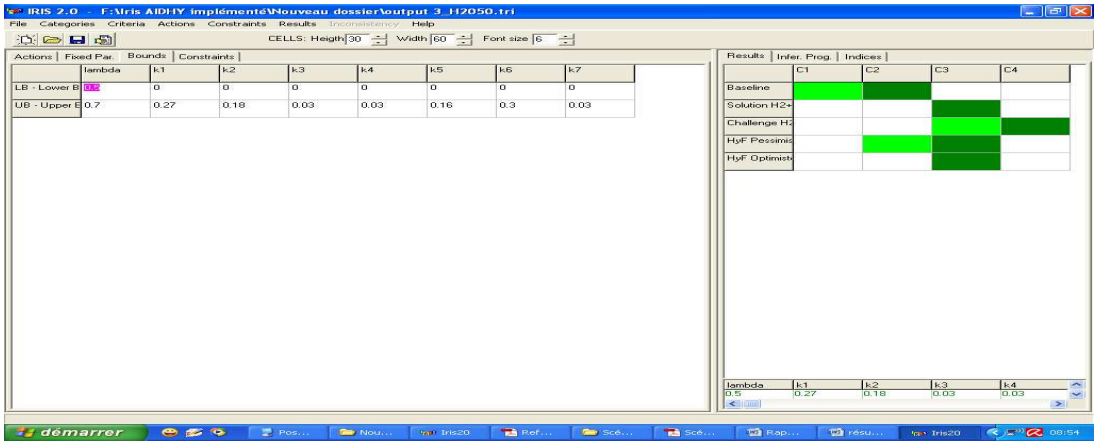
Annexe D

Résultats de l'analyse de sensibilité sur Iris 2.0

Analyse de sensibilité

Résultats pour l'horizon 2050

►$\lambda_{2050} \in [0{,}5\ 0{,}7]$ => un nombre de critères compris entre 50% et 70% valident la relation de surclassement σ entre deux scénarios.



$\lambda_{2050} = 0{,}7$ => 70% des critères valident une relation de surclassement σ entre deux scénarios.

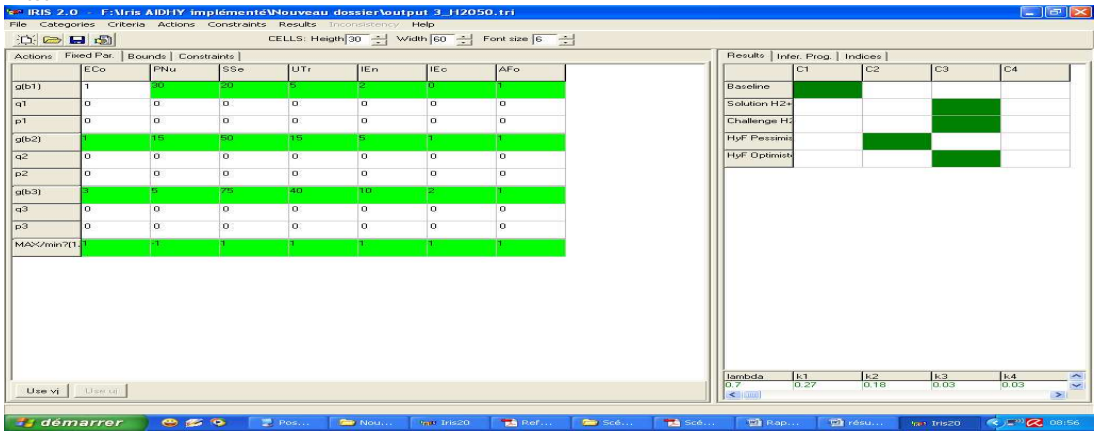
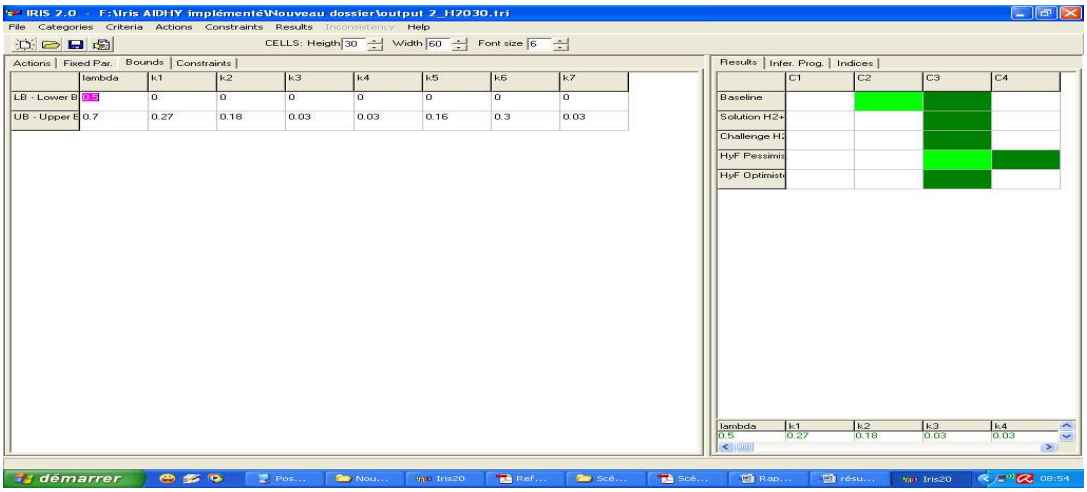


FIGURE D.1 – Résultats d'affectation pour λ_{2050} sur IRIS 2.0.

Résultats pour l'horizon 2030
$\lambda_{2030} \in [0{,}5 \quad 0{,}7]$



$\lambda_{2030} = 0{,}7$

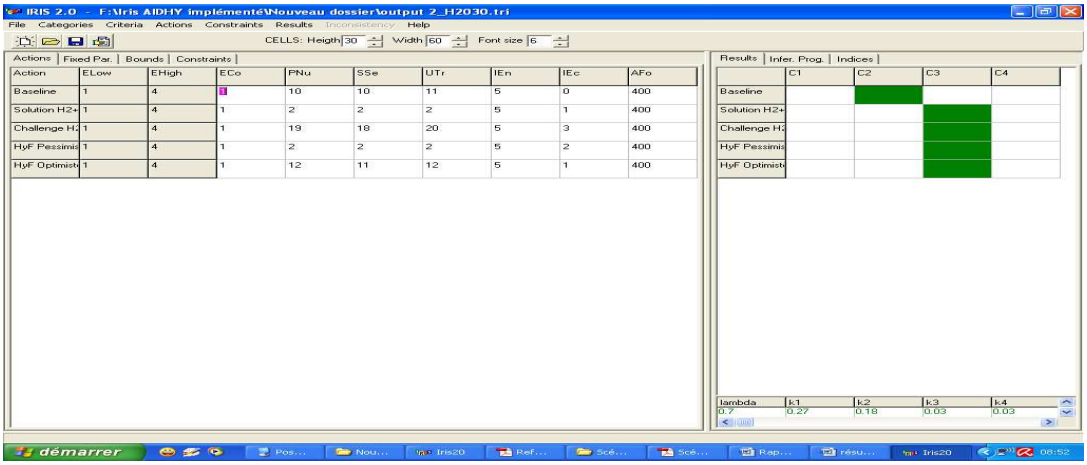
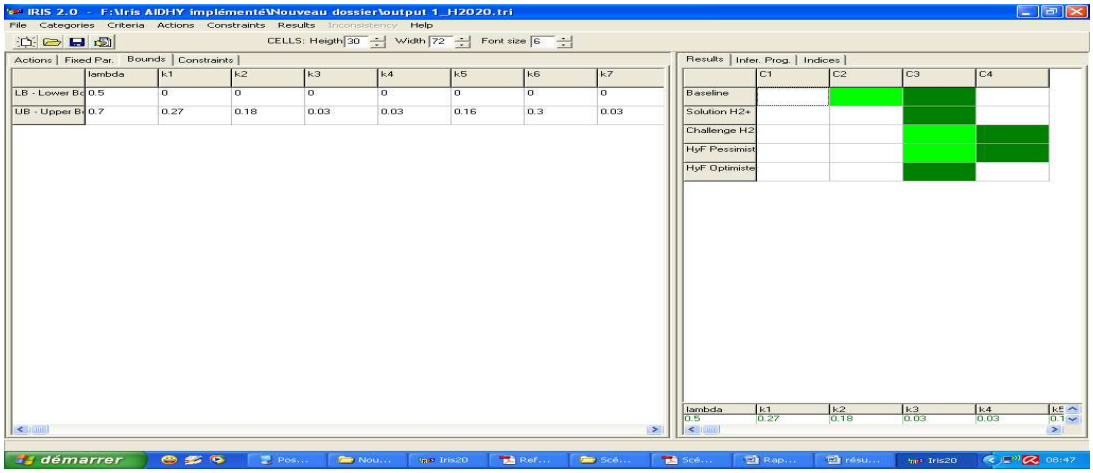


FIGURE D.2 – Résultats d'affectation pour λ_{2030} sur IRIS 2.0.

Résultats pour l'horizon 2020

$\lambda_{2020} \in [0{,}5 \quad 0{,}7]$



$\lambda_{2020} = 0{,}7$

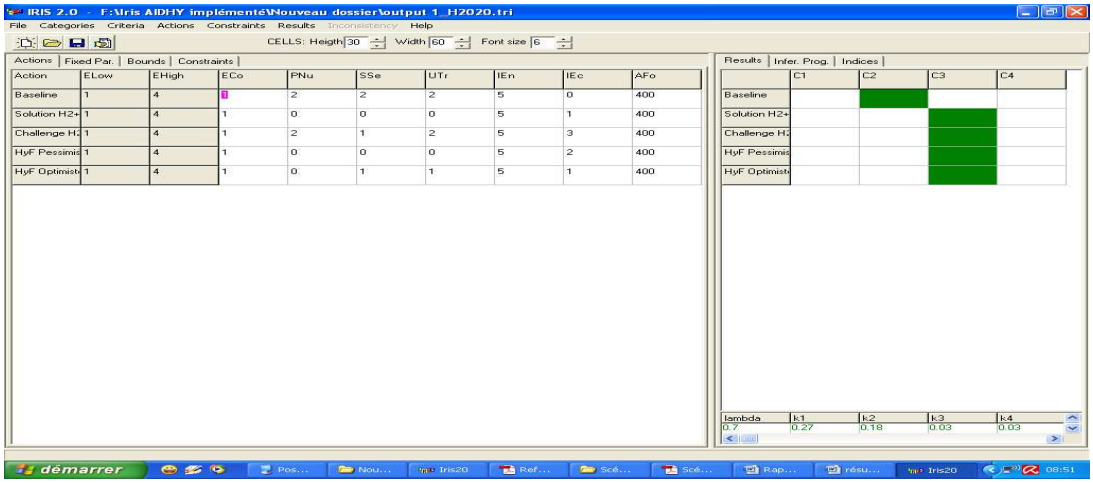


FIGURE D.3 – Résultats d'affectation pour λ_{2020} sur IRIS 2.0.

Annexe E

Représentations cognitives des focus groups

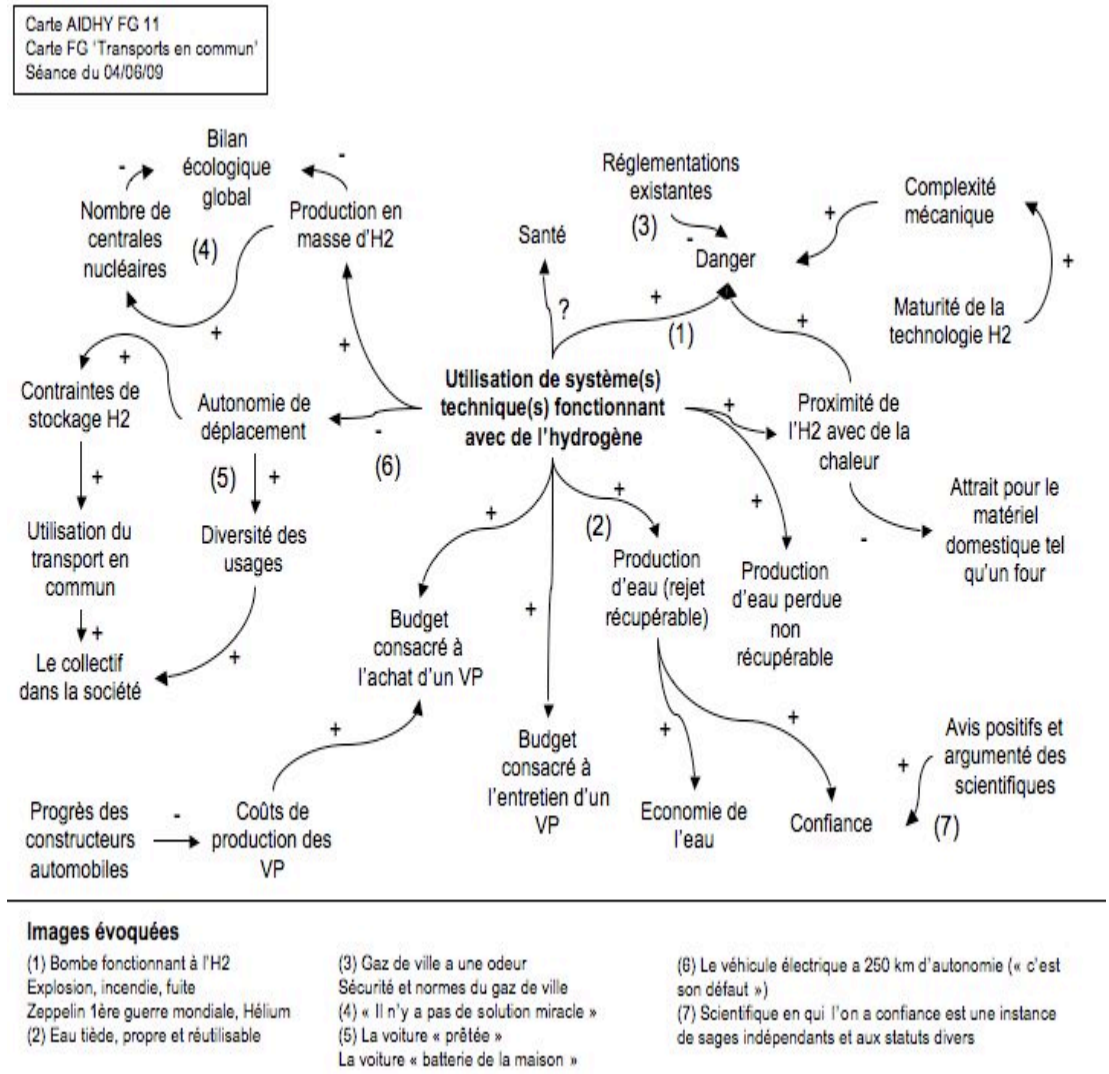


FIGURE E.1 – Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus groups (session I) transport en commun du 04/06/09

[Damart, 2011]

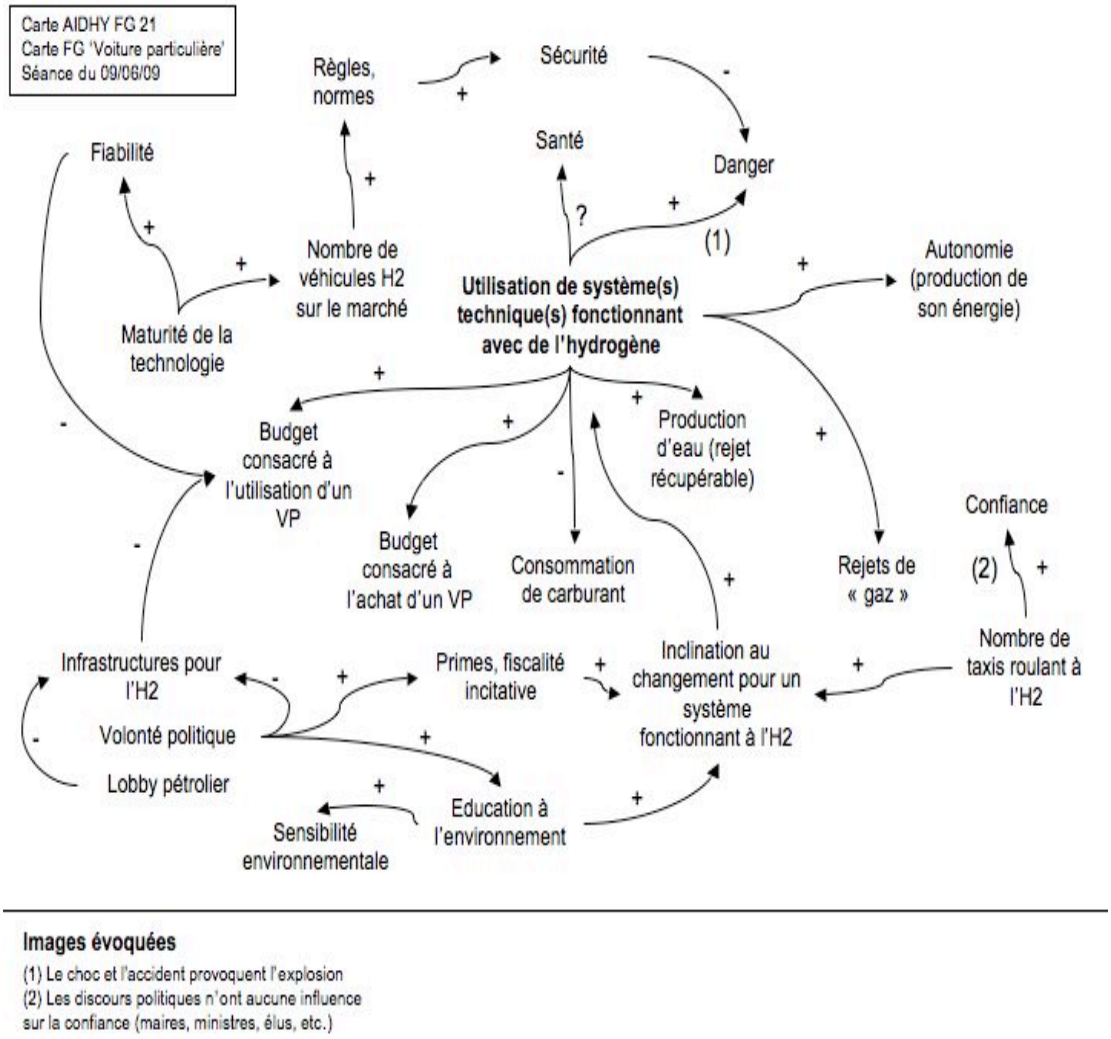
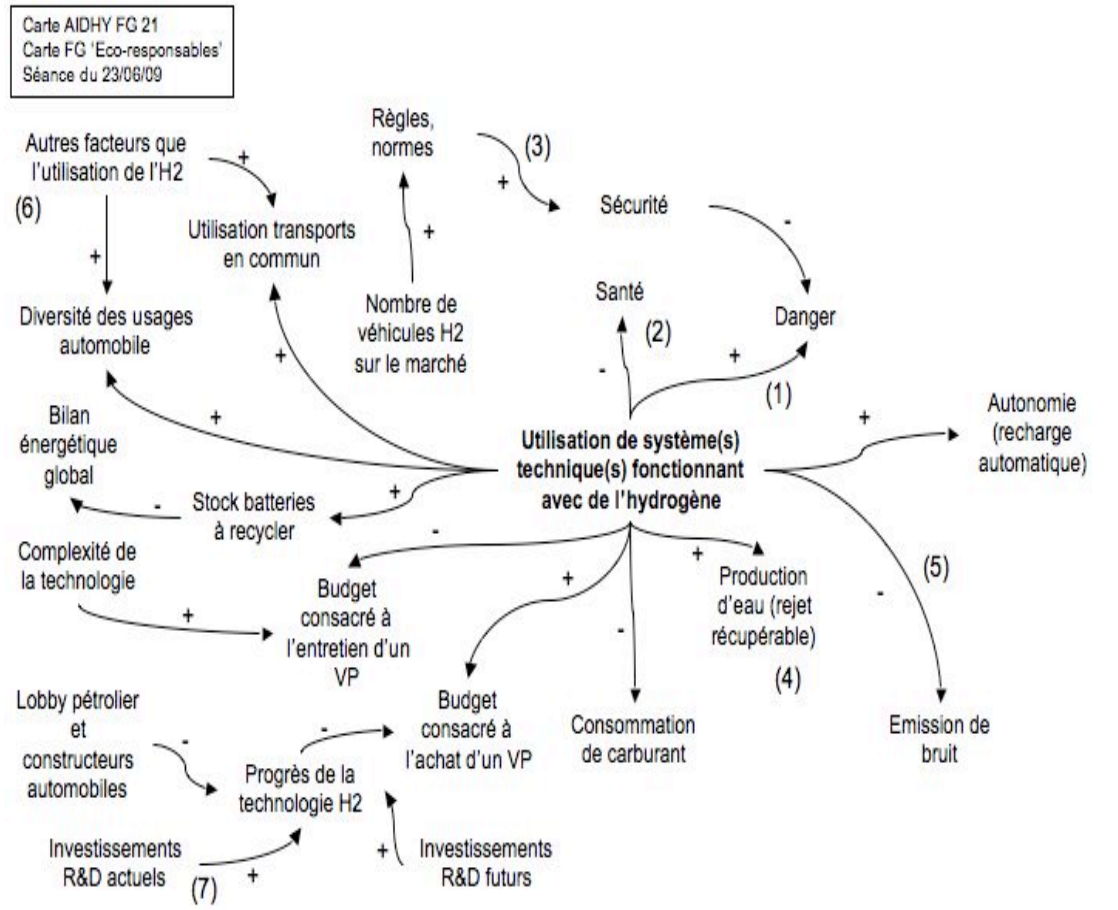


FIGURE E.2 – Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus groups (session I) voiture particulière du 09/06/09

[Damart, 2011]



Images évoquées

(1) « Explose à tout moment »
N'explose néanmoins que si mauvaise utilisation (contradiction assumée)
(2) Risque de nocivité si mélange de l'H2 avec un autre composant

(3) « Comme les médicaments »
(4) L'eau est récupérable non polluée
« Ce ne serait pas logique que l'eau récupérée soit **en plus** polluée »

(5) Au plus même niveau sonore que le moteur à essence
(6) L'urbanisation par exemple
(7) Le niveau actuel des investissements des constructeurs automobiles est insuffisant

FIGURE E.3 – Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus groups (session I) éco-responsables du 23/06/09

[Damart, 2011]

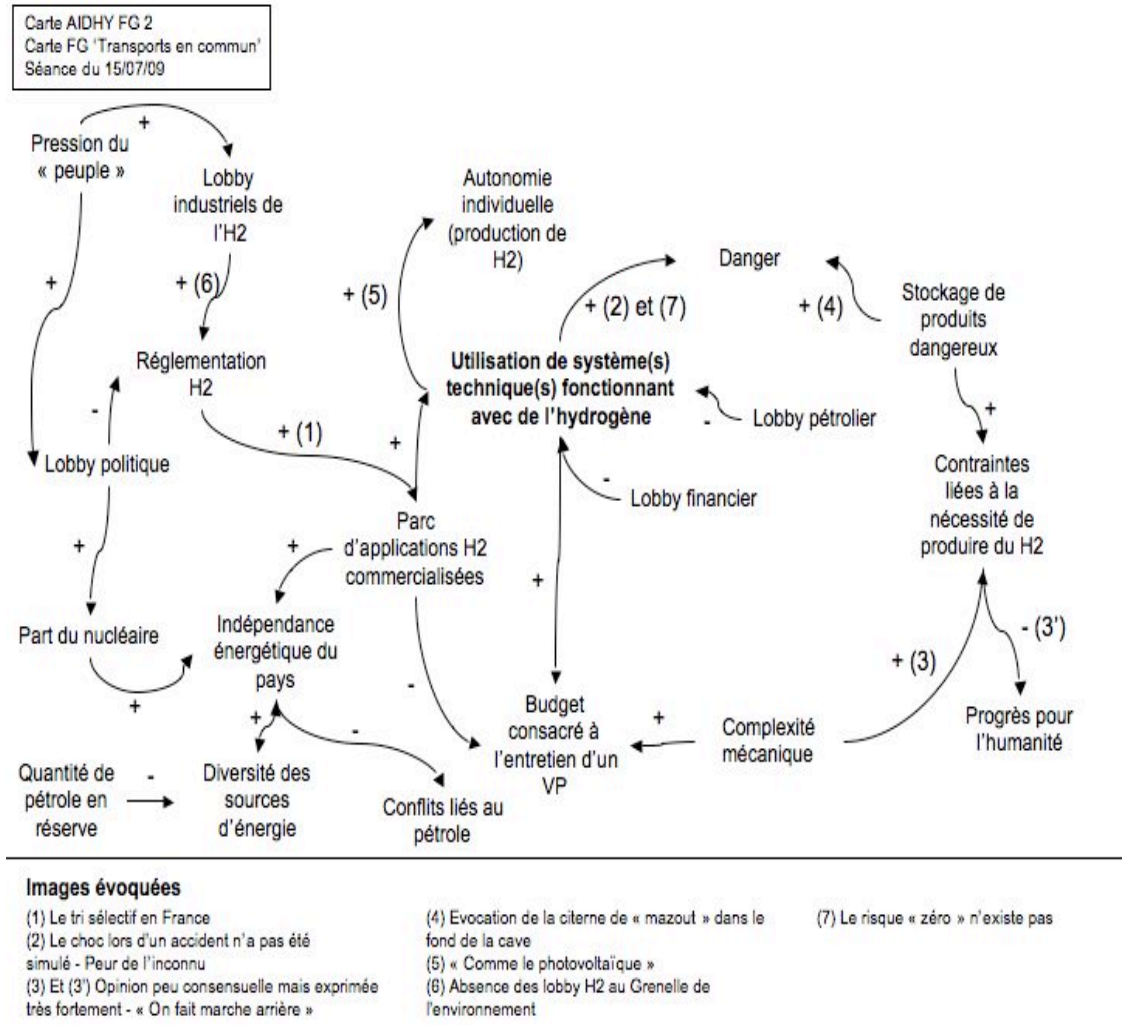


FIGURE E.4 – Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus group (session II) transport en commun du 15/07/09

[Damart, 2011]

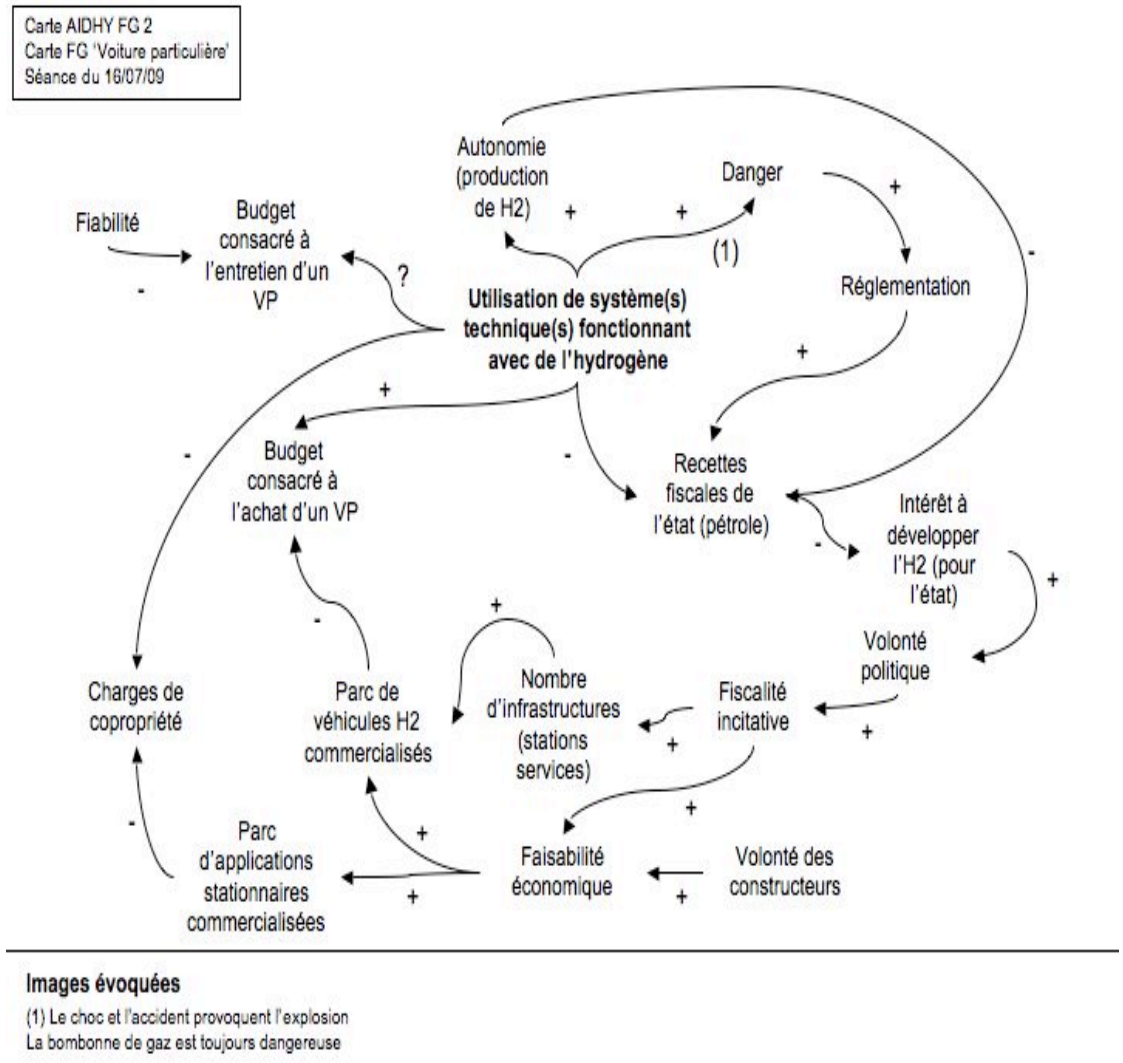


FIGURE E.5 – Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus group (session II) voiture particulière du 16/07/09

[Damart, 2011]

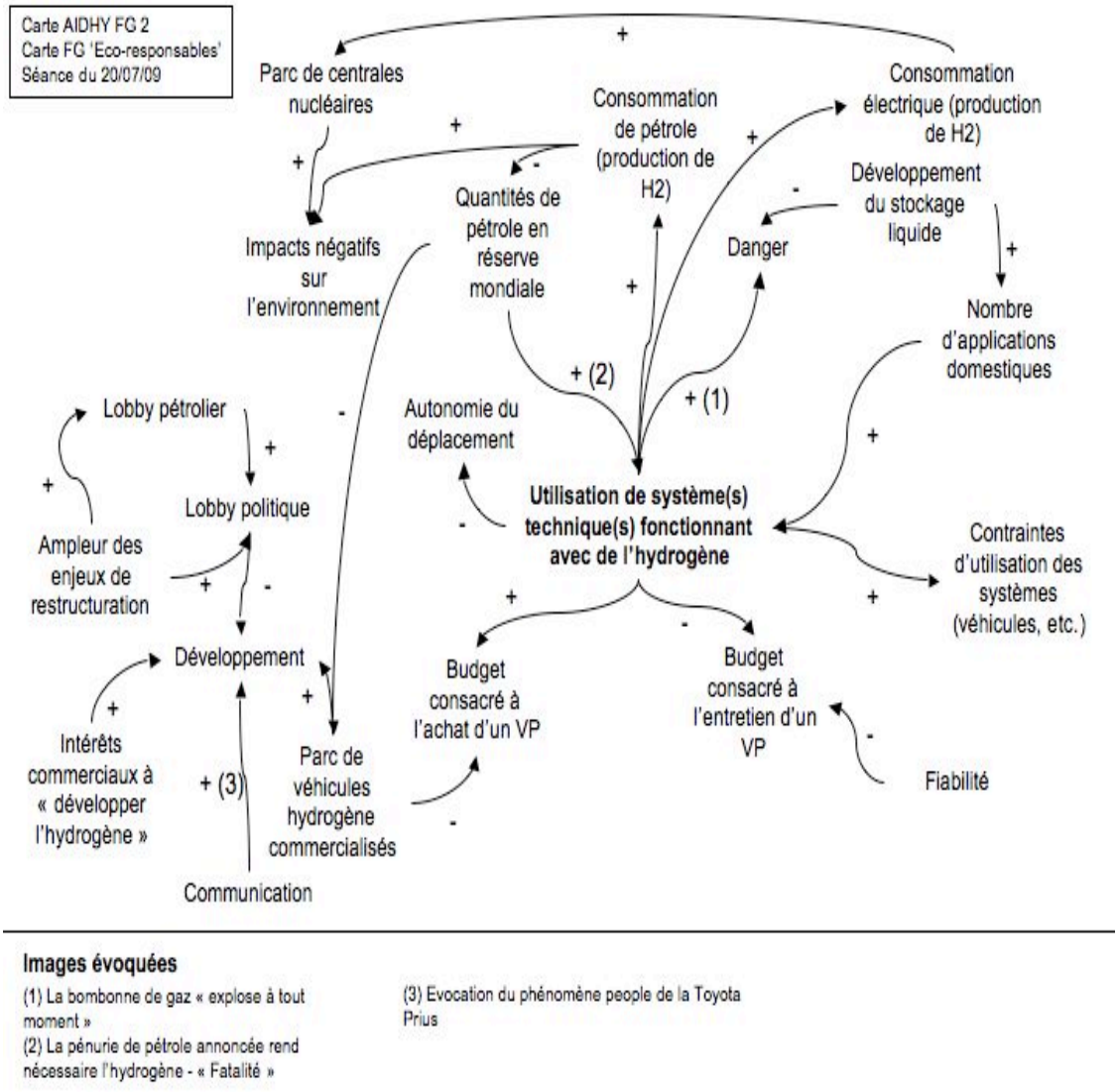


FIGURE E.6 – Carte cognitive élaborée à partir des échanges du focus group (session II) éco-responsables du 20/07/09

[Damart, 2011]

Annexe F

Graphiques des mix énergétiques en France

HyFrance :

Figures issues du rapport final HyFrance

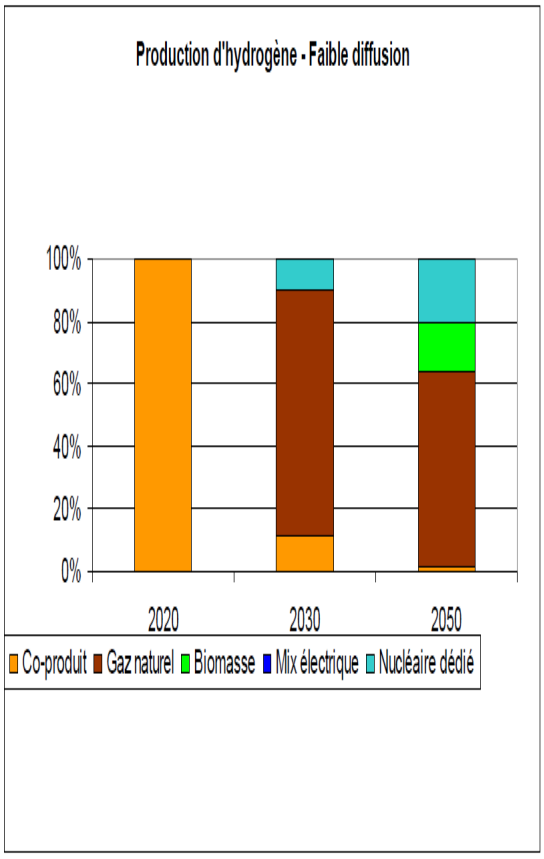


Figure 5.4 : Mix de production d'hydrogène (faible diffusion)

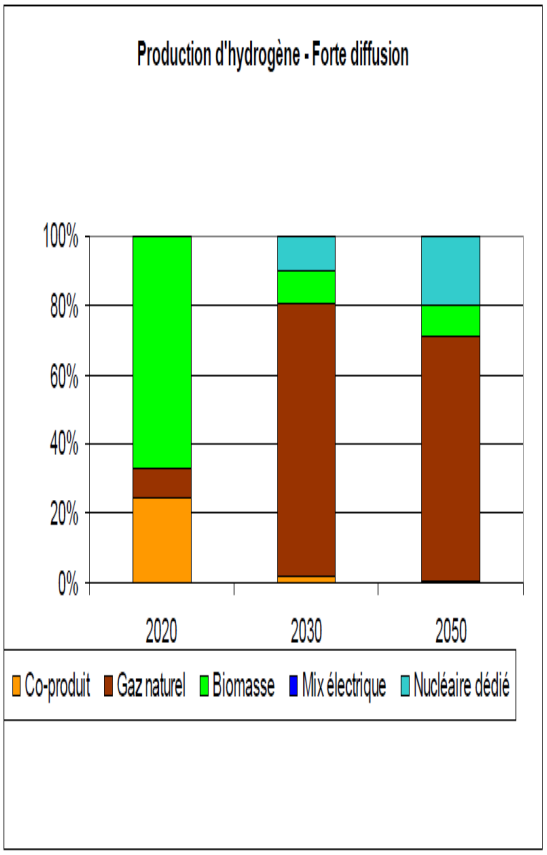


Figure 5.5 : Mix de production d'hydrogène (forte diffusion)

FIGURE F.1 – Répartition du mix d'énergie pour les scénarios Hyfrance [LeDuigou, 2009]

PROTEC H2:

Figures issues du séminaire final Protec H2

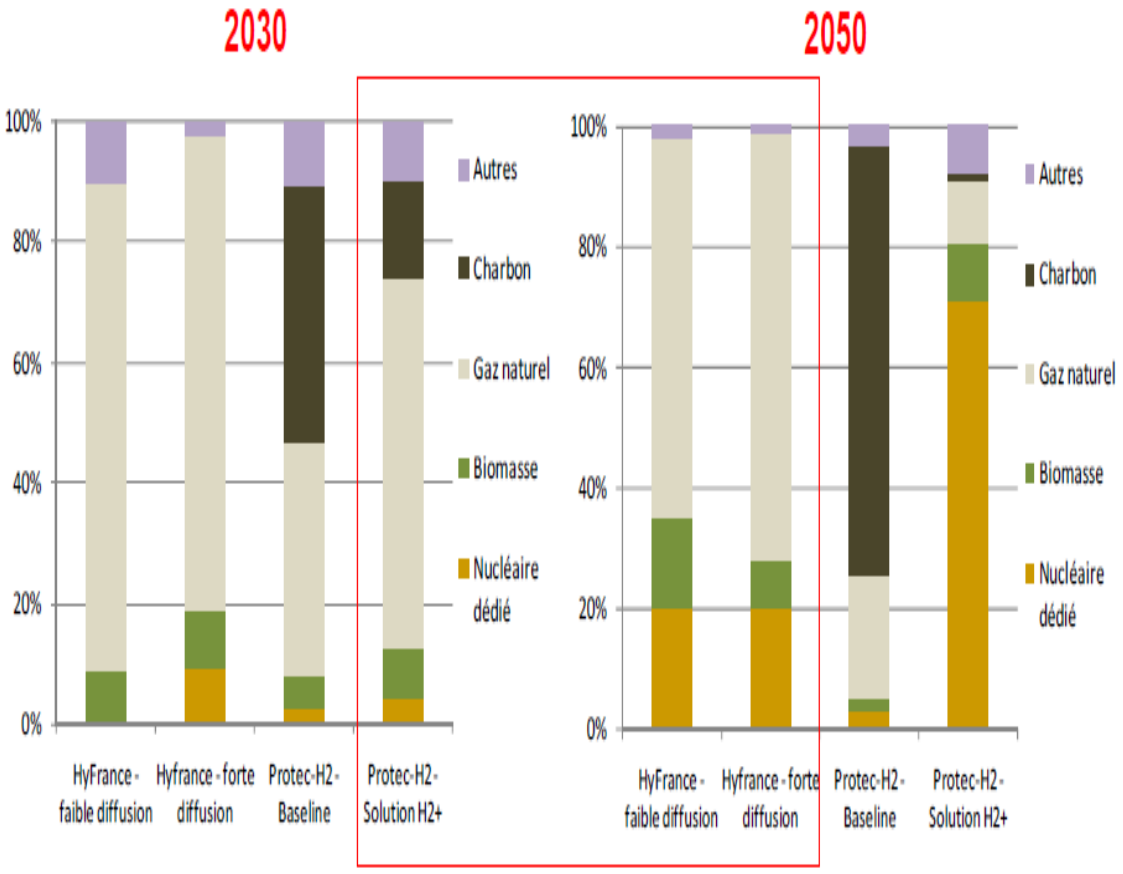


FIGURE F.2 – Répartition du mix d'énergie pour les scénarios Protec H_2 [LeDuigou, 2009]

Vu :
Le Président
M.

Vu :
Les Suffrageants
M.

Vu et permis d'imprimer :
Le Vice-Président du Conseil Scientifique Chargé de la Recherche de l'Université Paris Dauphine

Résumé

Cette thèse porte sur l'aide à la décision dans un contexte décisionnel très complexe. Classiquement, pour résoudre de telles situations, on utilise des méthodes de structuration de problèmes. Cependant ces méthodes bien qu'appliquées dans le cadre multi acteur ou dans les décisions de groupe, n'aboutissent pas toujours à des résultats directement exploitables dans un modèle d'évaluation. Ou, lorsque c'est le cas, les données obtenues par structuration sont utilisées comme si elles provenaient d'un seul décideur, tendant à réduire par conséquent l'efficacité de la décision prise et son acceptabilité. Dans cette thèse nous nous sommes attelés à concevoir un modèle d'intégration d'outils conciliant le choix approprié d'outils de structuration pour les décisions de groupe et son exploitation efficace dans un modèle d'évaluation multi-critère. En particulier nous nous sommes focalisés sur les modalités du passage des cartes cognitives aux arbres de valeurs. Ensuite nous avons appliqué notre démarche sur le cas pratique du projet AIDHY. Enfin, la dernière partie de notre thèse est axée sur l'apport d'une modélisation multicritère pour appréhender formellement le problème d'évaluation à priori des scénarios, formulé comme un problème de tri multicritère. Par conséquent, nous avons construit une approche permettant d'observer et de paramétrer le comportement des invariants d'une décision sociale sous un régime de délégation (acceptabilité sociale), par le biais d'une extension de l'analyse de sensibilité à partir du cas de l'hydrogène énergie.

Mots clés : *Hydrogène-énergie, acceptabilité sociale, scénarios des technologies de l'hydrogène, aide à la décision, structuration de problème, cartes cognitives, arbre de valeurs, évaluation multicritère, analyse de sensibilité.*

Abstract

This thesis focuses on decision support in a very complex decision-making context. Typically, to solve such situations, methods of problem structuring are used. However, these methods, although applied in the multi-stakeholder framework or group decisions, do not always lead to results directly used in an evaluation model. Even when this is the case, the data obtained by problem structuring are used as if they came from a single decision maker, thus tending to reduce the effectiveness of the decision as well as its acceptability. In this thesis we attempted to develop a model that incorporates tools that reconcile the appropriate choice of tools for structuring group decision choice and its effective operation in a model of multi-criteria evaluation. In particular, we focused on how to process cognitive maps into value trees. Then we have applied our approach to the practical case of the "AIDHY" project. Finally, the last part of the thesis is focused on providing a multi-criteria modeling to formally approach the problem of evaluating scenarios a priori, formulated as a multi-criteria sorting problem. Therefore, we constructed an approach that allows to observe and configure the behavior of common invariants of social decision under a delegation scheme (social acceptability), through an extension of the sensitivity analysis based on the case of hydrogen energy.

Keywords : *Hydrogen energy, scenarios of hydrogen technologies, decision support, problem structuring, cognitive maps, value tree, multi-criteria evaluation, sensitivity analysis.*