HAL
open science

Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques

Nouha Gazbour

To cite this version:

Nouha Gazbour. Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques. Energie électrique. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT : 2019GREAT018 . tel-02373608

HAL Id: tel-02373608

https://theses.hal.science/tel-02373608v1

Submitted on 21 Nov 2019

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

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

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Génie Électrique**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Nouha GAZBOUR

Thèse dirigée par

Christian SCHAEFFER, Professeur, Grenoble INP- ENSE3,

Et encadrée par

Carole CHARBUILLET, Ingénieur de recherche, ENSAM

Maryline JOANNY, Ingénieur de recherche, CEA-LITEN

Préparée au sein du **Laboratoire des Modules PhotoVoltaïques silicium, CEA-LITEN** dans **l'École Doctorale Électrotechnique Électronique Automatique et Traitement du Signal (EEATS)**

Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques

Thèse soutenue publiquement le **14 Février 2019**, devant le jury composé de :

Madame, Peggy, ZWOLINSKI
Professeur des universités, INP, Grenoble (Présidente du Jury)
Monsieur, Nicolas, PERRY
Professeur des universités, I2M, ENSAM, Bordeaux, (Rapporteur)
Monsieur, Erwann, FOURMOND
Maître de conférence, INL, INSA, Lyon (Rapporteur)
Monsieur, Lucas, WEISS
Directeur de recherche, VOLTEC Solar, Alsace (Examinateur)

À mes parents

REMERCIEMENT

Ce travail n'aurait pu aboutir sans une réelle collaboration et un échange d'idées entre tous ceux qui y ont participé ; je tiens ici à les remercier.

En premier lieu, je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir pris le temps de lire, commenter et réaliser l'analyse critique de ce travail. Merci à M. Nicolas PERRY, M. Erwann FOURMOND, Mme Peggy ZWOLINSKI et M. Lucas WEISS. C'est un honneur pour moi de disposer d'un jury aussi prestigieux.

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement Anis JOUINI pour m'avoir proposé ce sujet de thèse mais surtout d'avoir toujours cru en moi pour mener à bien ces travaux.

Je tiens à remercier sincèrement Christian SCHAEFFER d'avoir accepté de diriger cette thèse.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à Guillaume RAZONGLES, pour m'avoir donné la confiance, la bienveillance et l'encadrement scientifique dont tout doctorant rêve. Merci pour ces précieux conseils, les discussions intenses et les échanges fructueux que nous avons eu tout au long de cette thèse. Son exigence à mon encontre, sa rigueur dans ses méthodes de recherche ont su faire ressortir l'originalité de ce travail. Sans lui ce mémoire ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui.

Je remercie également Carole CHARBUILLET, encadrante scientifique à l'ENSAM. Merci d'avoir supervisé ce travail de thèse du début jusqu'à la fin. Je la remercie aussi pour m'avoir énormément appris dans le domaine de l'ACV et pour ses qualités humaines qui ont rendu nos échanges particulièrement agréables, quelque-soit le sujet abordé.

Je tiens également à exprimer ma très profonde reconnaissance à Maryline JOANNY pour son engagement dans ce travail de thèse et son soutien enthousiaste. Sa vision des choses, qu'elle a su me faire partager, la rigueur de ses méthodes d'analyse et l'exigence qu'elle a su formuler à mon égard ont contribué à l'aboutissement de ce travail de thèse.

Aux personnes qui ont participé de manière ponctuelle ou plus régulière à l'aboutissement technique de ce travail tout en partageant une partie de leurs connaissances : Pierre-Jean RIBEYRON, Malek BENMANSOUR, Yannick VESCHETTI, Charles ROUX, Amal CHABLI, Romain COUDERC, Romain CARIOU, David PELLETIER, Rémi MONNA, Fabrice COUSTIER, Elise MONNIER, Stéphane GUILLEREZ, Françoise BURGUN, Eric GERRITSEN, Samuel HARRISON, Paul LEFILALSTRE…

À l'équipe des modules photovoltaïques (LMPV et LCPV) avec laquelle j'ai eu plaisir d'échanger tout au long de ces trois années.

Aux personnes qui ont partagé mon quotidien et qui m'ont soutenue pendant des moments difficiles ; Julien GAUME, Yannick ROUJOL, Lionel SICOT et Loic PEYROT (Vous êtes les meilleurs français que j'ai rencontrés dans ma vie ! Je vous aime les « loosers »).

A Ornella DAMIENI qui m'ai aidée à m'intégrer à l'équipe, m'a soutenue dans des moments durs et était là tout au long de la thèse (je t'aime ma belle). Merci pour ta tendresse et ton amour.

Dur d'être concise, mais il en manque encore. Un grand merci à mes parents, mon frère, ma sœur, à Syrine (sasouki) et à Rachel... en bref à tous ceux qui me supportent et qui n'ont jamais compris grand-chose à mes travaux. Je vous pardonne !

« Ceux qui pensent que l'intelligence a quelque noblesse n'en ont certainement pas assez pour se rendre compte que ce n'est qu'une malédiction »

Martin Page

TABLE DES MATIERES

INDEX DES FIGURES **11**
INDEX DES TABLEAUX **14**
GLOSSAIRE **15**
INTRODUCTION **17**

Chapitre 1 Contexte : les systèmes photovoltaïques solaires (PV) et l'environnement **20**

1 Les enjeux de la transition énergétique **21**
1.1 La transition écologique dans le monde 21
1.2 La transition énergétique dans le monde 23
1.2.1 Consommation de l'énergie primaire 23
1.2.2 Vers une grande transition énergétique 25
1.3 Systèmes PV cristallins 27
1.3.1 Familles technologiques 27
1.3.2 Cycle de vie des systèmes PV cristallins 28
1.4 Énoncé du premier constat 41
2 L'Éco-conception et la R&D industrielle dans le secteur PV **43**
2.1 Les enjeux de la R&D industrielle (IR&D) 43
2.1.1 Projets de IR&D 43
2.1.2 L'échelle TRL « Technology Readiness Level » : un outil de gestion des projets de R&D 44
2.2 L'éco-conception 47
2.2.1 Définition et processus 47
2.2.2 Réglementations et standards 49
2.2.3 L'éco-conception dans le secteur PV 50
2.3 Énoncé du deuxième constat 51
3 L'Analyse de Cycle de Vie des systèmes PV **52**
3.1 L'Analyse du Cycle de Vie 52
3.2 ACV des systèmes PV : une variabilité des résultats 54
3.2.1 Approche d'analyse des études ACV PV 54
3.2.2 Variabilité des résultats environnementaux des ACV PV 57
3.3 Criticité des paramètres PV et absence d'une référence dynamique 67

3.4 Énoncé du troisième constat : 68

4 Besoin pour la communauté PV 68

Chapitre 2 Problématiques & Hypothèses 72

1 Complexité de l'analyse environnementale à échelle TRL bas 73

1.1 Incertitude de l'information environnementale à échelle TRL bas 73

1.2 La qualité des données collectées 75

1.3 Niveau d'expertise pour l'analyse environnementale 77

1.4 Capitalisation des données environnementales 79

1.5 Énoncé de la première problématique 80

2 Complexité de l'intégration pérenne de l'éco-conception dans la R&D 81

2.1 Notions d'intégration pérenne et ses freins dans la IR&D 81

2.2 Les outils d'éco-conception dans la littérature : fonctions et limites 85

2.3 Énoncé de la deuxième problématique 91

Chapitre 3 Proposition d'une méthode d'intégration de l'éco-conception dès la phase de R&D 94

1 Réponse à l'hypothèse 1 : base de données de référence 95

2 Réponse à l'hypothèse 2 : méthode d'analyse et d'amélioration multicritères 104

2.1 Besoins du « partenaire industriel » 106

2.2 Analyse de la nouvelle technologie par rapport à la technologie de référence 107

2.3 Prise de décisions et proposition d'améliorations 112

3 Réponse à l'hypothèse 3 : un outil « user friendly » d'aide à la décision multicritères…. 115

3.1 Cahier des charges de l'outil d'éco-conception 115

3.2 Démarche de déploiement de l'outil 118

Chapitre 4 Expérimentations et discussions 121

1 Mise en place de la base de données de référence pour une application aux projets de R&D dans le domaine du PV 123

1.1 Analyse typologique des projets de R&D et choix de la technologie de référence 123

1.2 ACV de la technologie de la référence 126

1.2.1 Champs et périmètre de l'étude 126

1.2.2 Résultats et interprétations 134

1.3 Analyse de sensibilité des systèmes PV : niveau d'information à collecter par étape de fabrication 141

1.3.1 Définition des facteurs de liaison des composants des systèmes PV 142

1.3.2 Analyse de sensibilité des paramètres critiques dynamiques des systèmes PV 146

1.4 Capitalisation et stockage des données 149

2 Validation initiale de l'approche d'estimation des taux d'évolutions sur une technologie PV mature 149

2.1 Définition de la technologie PV mature 150

2.2 Résultats environnementaux 151

3 Utilisation de l'approche « ECO PV » dans un projet de R&D à TRL bas : étude de cas…. 157

4 Conclusion sur la phase d'expérimentation 165

Chapitre 5 Mise en place d'un outil d'éco-conception des systèmes PV « ECO PV ». 169

1 Conception de l'outil « ECO PV » 170

1.1 Introduction sur l'outil « ECO PV » 170

1.2 Fonctionnalités de l'outil « ECO PV » 172

2 Intégration de la démarche d'éco-conception au sein de l'organisme de R&D par le biais de l'outil « ECO PV » 182

2.1 Validation initiale de fonctionnement de l'outil : Alpha test 183

2.2 Déploiement de l'approche au sein de l'organisme : les Bêta-tests de l'outil « ECO PV » . 184

2.2.1 Déroulement des bêta-tests 184

2.2.2 Retour d'expérience des Bêta-tests 185

2.2.3 Pérennisation de l'outil « ECO PV » au sein de l'organisme de R&D 186

2.2.4 Exploitation de l'outil « ECO PV » : intégration de l'approche dans les projets de R&D 187

3 Limites de l'outil « ECO PV » et perspectives d'amélioration 189

3.1 Limites des fonctionnalités de l'outil 189

3.2 Limites de la pérennité de l'intégration de l'outil « ECO PV » 190

CONCLUSION 193

BIBLIOGRAPHIE 196

ANNEXES 206

INDEX DES FIGURES

FIGURE 1. LES NIVEAUX DE TRANSITION THÉORISÉS PAR GEELS ET AL. [15] 22
FIGURE 2. L'ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE [17] 23
FIGURE 3. ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE INSTALLÉE CUMULÉE DE PANNEAUX PV [26] 26
FIGURE 4. COMPARAISON DU LCOE DE L'ÉNERGIE PV EN FRANCE ET EN ALLEMAGNE PAR RAPPORT AUX COÛTS DES ÉNERGIES FOSSILES [29] 26
FIGURE 5. CYCLE DE VIE DES SYSTÈMES PV EN SILICIUM CRISTALLIN 28
FIGURE 6. (A) PROCÉDÉ DE SCIAGE AU FIL D'ACIER [36], (B) PROCÉDÉ DE SCIAGE AU FIL DIAMANT [37] 31
FIGURE 7. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE PV [38] 32
FIGURE 8. COMPOSITION DE LA FACE AVANT D'UNE CELLULE SOLAIRE 33
FIGURE 9. TENDANCES DU NOMBRE DES "BUS BARS" DES CELLULES SOLAIRES DANS LE MARCHÉ, D'APRÈS [26]. 33
FIGURE 10. (A) STRUCTURE D'UN MODULE STANDARD MONOFACIAL, (B) STRUCTURE D'UN MODULE BIVERRE 36
FIGURE 11. LES DIFFÉRENTS TYPES DE MODULES PV EXISTANTS DANS LE MARCHÉ EN FONCTION DU TYPE DE CELLULE ET DU SILICIUM 37
FIGURE 12. LES ACTIVITÉS DE RECYCLAGE DES SYSTÈMES PV À L'ÉCHELLE INTERNATIONALE [49] 40
FIGURE 13. EXEMPLE DES DIFFÉRENTS ACTEURS DANS DE LA CHAINE DE VALEUR DU SECTEUR PV ET LES DIFFÉRENTES INTERACTIONS ENTRE EUX 42
FIGURE 14. POSITIONNEMENT DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT DANS L'ÉCHELLE TRL 46
FIGURE 15. DIFFÉRENTES ÉTAPES DU PROCESSUS D'ÉCO-CONCEPTION ADAPTÉ DE LA NORME (ISO 2006,2011) [59] 47
FIGURE 16. PRINCIPAUX CRITÈRES DES OUTILS D'ÉCO-CONCEPTION PUBLIÉS DANS LA LITTÉRATURE 49
FIGURE 17. LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT 52
FIGURE 18. DIFFÉRENTES ÉTAPES DE L'ACV [76] 52
FIGURE 19. LISTE DES HYPOTHÈSES EXTRAITES DES 30 ÉTUDES ACV PV POUR L'ANALYSE DE VARIABILITÉ.. 56
FIGURE 20. RÉPARTITION DES 30 ÉTUDES ACV PV DANS LA DÉFINITION DE L'UNITÉ FONCTIONNELLE, DES CATÉGORIES D'IMPACT ET DE LA FRONTIÈRE DU SYSTÈME 57
FIGURE 21. DISTRIBUTION DES 30 ÉTUDES ACV PV EN FONCTION DES VALEURS D'ÉCLAIREMENT DÉFINIES.. 61
FIGURE 22. CARTE DES ÉCLAIREMENTS ANNUELS MOYENS EN EUROPE POUR DES MODULES À INCLINAISON ET ORIENTATION FIXES OPTIMALES À LAQUELLE ONT ÉTÉ RAJOUTÉES DES LIGNES D'ISO-ÉCLAIREMENT 61
FIGURE 23. DISTRIBUTION DES 30 ÉTUDES ACV PV EN FONCTION DES VALEURS DE LA DURÉE DE VIE DÉFINIES. 62
FIGURE 24. DISTRIBUTION DES 30 ÉTUDES ACV PV EN FONCTION DES VALEURS DU PERFORMANCE RATIO DÉFINIES. 63
FIGURE 25. DISTRIBUTION DES 30 ÉTUDES ACV PV EN FONCTION DES VALEURS DU TAUX DE DÉGRADATION DÉFINIES 64
FIGURE 26. ÉVOLUTION DE LA PART DE MARCHÉ DES COMPOSANTS PV EN 2008 ET 2017 SELON LE PAYS DE PRODUCTION 66
FIGURE 27. IMPACT DE LA VARIATION DE ±10% DES VALEURS DES PARAMÈTRES PV SUR LES RÉSULTATS DE L'EMPREINTE CARBONE DES MODULES MONO-SI. 67
FIGURE 28. TAUX DE CRITICITÉ DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES PV DANS UNE ÉTUDE ACV, ÉVALUÉE PAR LA MÉTHODE AMDEC 68
FIGURE 29. POSITIONNEMENT DES ACTIVITÉS DU DTS AU SEIN DE L'INES DANS L'ÉCHELLE TRL 70
FIGURE 30. POSITIONNEMENT DE LA QUESTION DE RECHERCHE DANS LE PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT D'UN PRODUIT. 72
FIGURE 31. COMPOSITION D'UN SYSTÈME COMPLEXE 74
FIGURE 32. NIVEAUX DE MAÎTRISE MINIMUM REQUIS POUR L'UTILISATION DES OUTILS D'ÉCO-CONCEPTION [111] 78
FIGURE 33. PROCESSUS DE CAPITALISATION DES CONNAISSANCES [113] 79

FIGURE 34. INTERACTIONS B2B DANS UN SYSTÈME COMPLEXE ENTRE LA R&D ET LES PARTENAIRES INDUSTRIELS 82
FIGURE 35. LA NOUVELLE VISION DANS LA R&D AVEC L'INTÉGRATION DE LA DÉMARCHE D'ÉCO-CONCEPTION. 84
FIGURE 36. LES DIFFÉRENTES CONTRAINTES QUI ENTOURENT LE PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT D'UN PRODUIT DANS UN PROJET, D'APRÈS [124] 84
FIGURE 37. PRINCIPE DE L'ANALYSE MULTICRITÈRES DE LA MÉTHODE AHP 89
FIGURE 38. SYNOPTIQUE DE L'ANALYSE DE LA QUESTION DE RECHERCHE 93
FIGURE 39. DÉMARCHE DE LA MISE EN PLACE DE LA BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE 96
FIGURE 40. ÉTAPES DE L'ANALYSE TYPOLOGIQUE DES PROJETS DE R&D POUR LA SÉLECTION DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 97
FIGURE 41. ÉTAPES DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALES DANS L'ACV DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 100
FIGURE 42. ANALYSE DE SENSIBILITÉ DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 103
FIGURE 43. STOCKAGE DES RÉSULTATS ET DES DONNÉES SOUS FORME D'UNE BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE 104
FIGURE 44. L'ALGORITHME DE L'APPROCHE D'ÉCO-CONCEPTION DÉVELOPPÉE POUR ORIENTER LES CHOIX TECHNOLOGIQUES DANS LES PROJETS DE R&D À TRL BAS 105
FIGURE 45. MÉTHODES DE QUANTIFICATION DES CRITÈRES ÉCONOMIQUE, TECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTAL EN FONCTION DES BESOINS DU PROJET (A, B ET C). 107
FIGURE 46. MODÉLISATION DE LA CHAINE DE VALEUR DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE ET DE LA NOUVELLE TECHNOLOGIE PAR SOUS-PRODUITS 109
FIGURE 47. SCÉNARII DE PRISE DE DÉCISION EN FONCTION DU BESOIN DU PARTENAIRE INDUSTRIEL 114
FIGURE 48. DIAGRAMME « BÊTE À CORNES » D'EXPRESSION DU BESOIN AUQUEL RÉPOND L'OUTIL D'ÉCO-CONCEPTION À DÉVELOPPER. 115
FIGURE 49. DIAGRAMME DE PIEUVRE DE L'OUTIL « ECO PV » ET LES INTERACTIONS ENTRE LES DIFFÉRENTS ACTEURS 116
FIGURE 50. LES DIFFÉRENTES SPÉCIFICATIONS DE L'OUTIL " ECO PV" VIS À VIS DES PRINCIPAUX ACTEURS 117
FIGURE 51. ÉTAPES D'INTÉGRATION DE L'APPROCHE D"ÉCO-CONCEPTION AU SEIN DE L'ORGANISME DE R&D GRÂCE SUR L'OUTIL D'ÉCO-CONCEPTION 118
FIGURE 52. SYNOPTIQUE GÉNÉRAL DE LA QUESTION DE LA RECHERCHE 120
FIGURE 53. SYNOPTIQUE DE LA DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE DE COMPARAISON DES RÉSULTATS 122
FIGURE 54. ACTIVITÉS DU DTS À L'INES 123
FIGURE 55. PARAMÈTRES CLÉS D'UN SYSTÈME PV 127
FIGURE 56. RÉPARTITION DU MARCHÉ DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS PV EN 2017 EN SE BASANT SUR DES DONNÉES PUBLIÉES DANS LE RAPPORT ANNUEL DE L'IEA [96]. 129
FIGURE 57. PARAMÈTRES CLÉS DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE MONO-SI MONOFACIAL 130
FIGURE 58. PROCÉDÉS DE FABRICATION DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE MONO-SI MONOFACIAL 131
FIGURE 59. LES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE PRISES EN COMPTE POUR LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 132
FIGURE 60. CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE FABRICATION DANS LES RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX DU SYSTÈME PV MONO-SI MONOFACIAL (RÉFÉRENCE) 135
FIGURE 61. LIAISONS ENTRE LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE FABRICATION DU SYSTÈME PV MONO-SI MONOFACIAL 142
FIGURE 62. RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES CRITIQUES DE LA CHAINE DE VALEUR D'UN SYSTÈME PV 148
FIGURE 63. DÉROULEMENT DE LA VALIDATION INITIALE DE LA MÉTHODE D'ESTIMATION 150
FIGURE 64. PARAMÈTRES CLÉS DE LA TECHNOLOGIE « MULTI-SI STANDARD » 151
FIGURE 65. COMPARAISON DE LA CHAINE DE VALEUR DE LA NOUVELLE TECHNOLOGIE MATURE « MULTI-SI STANDARD » À LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE « MONO-SI MONOFACIAL » 152
FIGURE 66. ÉVOLUTION ENVIRONNEMENTALE PAR CATÉGORIE D'IMPACT DE CHAQUE ÉTAPE DE FABRICATION DE LA TECHNOLOGIE « MULTI-SI STANDARD » PAR RAPPORT À LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE « MONO-SI MONOFACIAL » 154
FIGURE 67. TAUX D'ÉVOLUTION DES RÉSULTATS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX PAR CATÉGORIE D'IMPACT DE LA TECHNOLOGIE « MULTI-SI STANDARD » PAR RAPPORT À LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE « MONO-SI MONOFACIAL » 155

FIGURE 68. LES DIFFÉRENTS OBJECTIFS DU PROJET BIPPP 158
FIGURE 69. PARAMÈTRES CLÉS DE LA TECHNOLOGIE « MONOLIKE BIFACIAL » 160
FIGURE 70. COMPARAISON DE LA CHAINE DE VALEUR DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE « MONO-SI MONOFACIAL » ET DE LA TECHNOLOGIE « MONOLIKE BIFACIAL » 161
FIGURE 71. TAUX D'ÉVOLUTION DES RÉSULTATS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX PAR CATÉGORIE D'IMPACT DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE FABRICATION DE LA TECHNOLOGIE "MONOLIKE BIFACIAL" PAR RAPPORT À LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE. 162
FIGURE 72. TAUX D'ÉVOLUTION PAR CATÉGORIES D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA TECHNOLOGIE "MONOLIKE BIFACIAL" PAR RAPPORT À LA TECHNOLOGIE « MONO-SI MONOFACIAL » 163
FIGURE 73. TAUX D'ÉVOLUTION ÉCONOMIQUE, TECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DE LA TECHNOLOGIE " MONOLIKE BIFACIAL" PAR RAPPORT À LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 164
FIGURE 74. VARIABILITÉ EN FONCTION DE L'UNITÉ FONCTIONNELLE DE L'ÉVOLUTION ENVIRONNEMENTALE DE LA TECHNOLOGIE « MONOLIKE BIFACIAL » PAR RAPPORT À LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 165
FIGURE 75. SYNOPTIQUE GÉNÉRAL DE LA QUESTION DE RECHERCHE 168
FIGURE 76. OBJECTIFS DE L'OUTIL D'ÉCO-CONCEPTION "ECO PV " POUR RÉPONDRE AUX BESOINS DÉFINIS DANS LE CAHIER DES CHARGES DE L'OUTIL 171
FIGURE 77. PREMIÈRE VERSION DE L'OUTIL D'ÉCO-CONCEPTION "ECO PV " 172
FIGURE 78. STRUCTURE DE L'INTERFACE UTILISATEUR DANS L'OUTIL « ECO PV » 173
FIGURE 79. UN EXEMPLE DE STOCKAGE ET GESTION DES DONNÉES DE L'INVENTAIRE DANS L'OUTIL ECO PV 174
FIGURE 80. DÉFINITION DE LA NOUVELLE TECHNOLOGIE À ÉVALUER PAR ÉTAPE DE FABRICATION 174
FIGURE 81. EXEMPLE DE GESTION DE L'INVENTAIRE D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ PAR RAPPORT À LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE DANS L'OUTIL ECO PV. 175
FIGURE 82. EXEMPLE DE RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTICRITÈRES DANS L'OUTIL ECO PV 176
FIGURE 83. EXEMPLE DE DÉFINITION ET DE QUANTIFICATION DES BESOINS DU CLIENT PAR L'OUTIL « ECO PV » 176
FIGURE 84. ILLUSTRATION DE LA DÉFINITION DE L'UNITÉ FONCTIONNELLE EN FONCTION DE LA FRONTIÈRE DU SYSTÈME PV À ANALYSER DANS L'OUTIL « ECO PV » 177
FIGURE 85. EXEMPLE DE RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX AFFICHÉS DANS L'OUTIL « ECO PV » PAR ÉTAPE DE FABRICATION ET PAR SOUS-COMPOSANTS POUR CHAQUE PROCÉDÉ POUR ACCOMPAGNER LE PROCESSUS D'AMÉLIORATION 179
FIGURE 86. EXEMPLE D'INTERFACE DES PARAMÈTRES DYNAMIQUES DE L'OUTIL « ECO PV » 181
FIGURE 87. EXEMPLE DE MISE À JOUR DU MIX ÉNERGÉTIQUE DANS L'OUTIL « ECO PV » 182
FIGURE 88. ÉTAPES D'INTÉGRATION DE L'APPROCHE D'ÉCO-CONCEPTION GRÂCE À L'OUTIL "ECOPV" 183
FIGURE 89. RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX OBTENUS AVEC L'OUTIL « ECO PV » SUR LA TECHNOLOGIE "MONOLIKE BIFACIAL" DANS LE CADRE DU PROJET BIPPP (NOTRE CAS D'ÉTUDE) 183
FIGURE 90. LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DU MARCHÉ PV TESTÉS PAR L'OUTIL "ECO PV" LORS DES BÊTA-TESTS (INDIQUÉS PAR LE SIGNE ✓) 185
FIGURE 91. FLEXIBILITÉ DES MISES À JOUR DANS L'OUTIL « ECO PV » 187
FIGURE 92. EXEMPLE DE RÉSULTATS DES SIMULATIONS OBTENUES PENDANT PLUSIEURS PHASES DU PROJET POUR ESTIMER LE GAIN ENVIRONNEMENTAL DE LA TECHNOLOGIE "IBC HJT" PAR RAPPORT À LA RÉFÉRENCE. 189
FIGURE 93. SYNTHÈSE DES LIMITES DE LA DÉMARCHE D'INTÉGRATION DE L'OUTIL "ECO PV" AU SEIN DE L'ORGANISME DE R&D (DTS À L'INES) 191
FIGURE 94. SYNOPTIQUE DE LA DÉMARCHE DE RECHERCHE 192

INDEX DES TABLEAUX

TABLEAU 1. LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DES PROCÉDÉS DE CRISTALLISATION DU SILICIUM 30
TABLEAU 2. LES DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES DES TECHNOLOGIES DE CELLULES SOLAIRES PV EN SILICIUM 35
TABLEAU 3. MOYENNES DES RENDEMENTS DÉFINIS DANS LES 30 ÉTUDES ACV PV 59
TABLEAU 4. DIFFÉRENTS CRITÈRES À ÉVALUER EN MATIÈRE DE QUALITÉ DES DONNÉES, D'APRÈS [103] 75
TABLEAU 5. INDICATEURS DE QUALITÉ PRIS EN COMPTE SELON DIFFÉRENTS AUTEURS, SYNTHÉTISÉS PAR [103] 76
TABLEAU 6. CONTRAINTES EN MATIÈRE DE QUALITÉ DE DONNÉES D'UNE TECHNOLOGIE EN COURS DE DÉVELOPPEMENT 77
TABLEAU 7. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES DES OUTILS D'ÉCO-CONCEPTION DE L'ÉTAT DE L'ART ET LES DIFFÉRENTES BARRIÈRES POUR UNE INTÉGRATION DE LA DÉMARCHE D'ÉCO-CONCEPTION AU SEIN DU PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DU PRODUIT (TRL BAS) 90
TABLEAU 8. EXEMPLE DE QUANTIFICATION DE LA DISPONIBILITÉ DES DONNÉES EN FONCTION DE TYPE DE PROJET DE R&D 98
TABLEAU 9. EXEMPLE DE MATRICE DE DÉCISION POUR LE CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 99
TABLEAU 10. DÉFINITION LES CATÉGORIES D'IMPACT RETENUES DANS L'ACV DE RÉFÉRENCE, D'APRÈS [30] 101
TABLEAU 11. EXEMPLE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE DE RÉPARTITION DES NOUVEAUX INVENTAIRES (P_{NV}) EN SE BASANT SUR LES INVENTAIRES DE RÉFÉRENCE (P_{REF}) 110
TABLEAU 12. LES DIFFÉRENTS PROJETS, COLLECTÉS AUPRÈS DES DIFFÉRENTS LABORATOIRES AU SEIN DE L'ORGANISME DE R&D ET CLASSIFIÉS SELON LES CRITÈRES DE CHOIX 125
TABLEAU 13 . MATRICE DE DÉCISION POUR LE CHOIX DE LA TECHNOLOGIE PV DE RÉFÉRENCE 126
TABLEAU 14. DIFFÉRENTS SCENARII D'ÉCLAIREMENT EN EUROPE ET PR INITIAL ASSOCIÉ 127
TABLEAU 15. TABLEAU SYNTHÉTIQUE DES RECOMMANDATIONS PROPOSÉES POUR AIDER AU CHOIX DES PARAMÈTRES CLÉS DANS LA RÉALISATION DE L'ACV PV 129
TABLEAU 16. OUTILS ET MÉTHODES D'ÉVALUATION DES IMPACTS DE LA TECHNOLOGIE DE RÉFÉRENCE 132
TABLEAU 17. DIFFÉRENTS RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX DE LA TECHNOLOGIE DE 134
TABLEAU 18. BILAN DE LA CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE FABRICATION DANS LES RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX DU SYSTÈME PV 138
TABLEAU 19. EXEMPLE DE RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX RÉPERTORIÉS PAR FLUX ÉLÉMENTAIRE D'UN PROCÉDÉ DE FABRICATION DE LA CHAINE DE VALEUR PV 140
TABLEAU 20. DIFFÉRENTS PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DES COMPOSANTS PV DÉFINIS POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ 147
TABLEAU 21. DÉFINITION DE L'INVENTAIRE DU PROCÉDÉ DS EN SE BASANT SUR LE PROCÉDÉ DE RÉFÉRENCE CZ 153
TABLEAU 22. RÉSULTATS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ABSOLUS DE LA TECHNOLOGIE « MULTI-SI STANDARD » PAR LA MÉTHODE ACV STANDARD 156
TABLEAU 23. POURCENTAGE D'ERREURS ENTRES LES RÉSULTATS DE DEUX MÉTHODES 157
TABLEAU 24. QUANTIFICATION DES PRIORITÉS TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DU CLIENT EN UTILISANT LA MÉTHODE AHP 159
TABLEAU 25. LES DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES DE L'APPROCHE D'ESTIMATION DES ÉVOLUTIONS « ECO PV » POUR RÉPONDRE AUX BESOIN POUR UNE INTÉGRATION PÉRENNE DE L'ÉCO-CONCEPTION AU SEIN DE L'ORGANISME DE R&D 167
TABLEAU 26. PRINCIPE DES FORMATIONS BÊTA-TESTS DE L'OUTIL ECO PV 184
TABLEAU 27. LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES PV ÉVALUÉES PAR L'OUTIL "ECO PV " DANS LE CADRE DE PROJETS DE R&D 188
TABLEAU 28. LA VARIABILITÉ DES RÉSULTATS ET DES PARAMÈTRES DÉFINIS DANS LES ÉTUDES D'ACV DES SYSTÈMES PV CRISTALLINS (30 ÉTUDES PUBLIÉS ENTRE 2005 ET 2016) 207
TABLEAU 29 . NIVEAU DE QUALITÉ DES DONNÉES EN FONCTION DES INDICATEURS SPÉCIFIQUES [103] 208

GLOSSAIRE

Abréviations:

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AHP	Analytic Hierarchy Method
AL-BSF	Aluminium Back Surface Field
B2B	Business to Business
B2C	Business to Customer
BIPV	Building Integrated PhotoVoltaic
BOS	Balance Of System
CED	Cumulative Energy Demand
COP	Conference of Parties
c-Si	Cristalline Silicon
CTM	Cell To Module
CZ	Procédé Czochralski
DEEE	Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques
DR	Degradation Rate
DS	Directional Solidification
DWS	Diamond Wire Sawing
EPBT	Energy Pay Back Time
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate
GWP	Global Warming Potential
HJT	Heterojunction
IBC	Integrated Back Contact
IBC HJT	Integrated Back Contact - Heterojunction
IR&D	Industrial Research and Development
LCOE	Levelized Cost of Energy
MATLAB	Matrix Laboratory
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MG-Si	Silicium Métallurgique
Mono-Si	Silicium Monocristallin
Multi-Si	Silicium Multicristallin
PEF	Product Environmental Footprint
PERC	Passivated Emitter and Rear Contact
PERC+	Bifacial Passivated Emitter and Rear Contact
PERL	Passivated Emitter Rear Locally-diffused
PERT	Passivated Emitter Rear Totally-diffused
PET	PolyEthylene Terephthalate
PO	PolyOléfine

PR	Performance Ratio
PVF	PolyVinyl Fluoride
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
QFD	Quality Function Deployment
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals
SW	Sawing Wire
TRL	Technology Readiness Level
VIPV	Vehicles Integrated PhotoVoltaic
WPM	Weighted Product Method
WSM	Weighted Sum Method

Substances chimiques:

Al_2O_3	Oxyde d'aluminium
C	Carbone
CO	Oxyde de Carbone
H_2	Hydrogène
n-Si	Silicium dopé au phosphore
p-Si	Silicium dopé au bore
Si	Silicium
Si_3N_4	Nitrure de Silicium
$SiHCL_3$	Trichlorosilane
SiO_2	Dioxyde de Silicium
TCO	Transparent Conducting Oxide

Institutions:

Ademe	Agence De l'Environnement et de Maitrise d'Énergie
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Energies Alternatives
DTS	Département des Technologies Solaires
EC	European Commission
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
INES	Institut National de l'Énergie Solaire
JRC	Join Research Center
LITEN	Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies nouvelles et les Nanomatériaux
NREL	National Renewable Energy Laboratory

INTRODUCTION

Le changement climatique est devenu l'un des principaux défis mondiaux, et lutter contre ce phénomène fait aujourd'hui partie intégrante des préoccupations et programmes politiques sur le plan international, comme en témoigne l'émergence de l'accord universel issu de la COP21 adopté par plus de 195 nations en décembre 2015. La plupart des pays du monde se sont ainsi engagés dans une « transition énergétique » ou envisagent de le faire sous la double pression du public et des réglementations qui deviennent de plus en plus strictes.

Connues comme sources d'énergies « vertes », les énergies renouvelables semblent constituer l'alternative la plus appropriée dans le processus de cette transition. L'énergie photovoltaïque (PV) solaire, qui consiste à convertir le rayonnement solaire en électricité, a connu une forte croissance ces dernières années grâce à la réduction significative des coûts, positionnant ainsi l'énergie PV en concurrence directe avec plusieurs sources d'énergie fossiles.

Afin de renforcer sa position sur le marché, l'industrie PV s'investit massivement dans la recherche et le développement (R&D) depuis 2011, appelée souvent la R&D industrielle (IR&D), pour innover et améliorer les performances PV. Cet investissement est passé de 100 M$[1] en 2007 à 510 M$ en 2011 [1]. Ainsi, l'industrie PV est passée d'une industrie tributaire de subventions à une industrie concurrentielle innovante, où la R&D joue un rôle stratégique. Plusieurs technologies existent aujourd'hui et leur diversification devrait s'accroître dans le futur. Cependant, les systèmes PV sont des systèmes complexes impliquant de nombreuses étapes de fabrication. Dans le contexte de la « transition énergétique », il est donc nécessaire de s'assurer que ces nouvelles technologies répondent aux critères peu impactant sur l'environnement, dénommé ici produit Eco-conçu. Ce concept vise à résoudre les défis environnementaux tout en maintenant le dynamisme industriel et les opportunités d'innovation guidées par la réduction des coûts et l'amélioration des performances techniques. Le développement de nouvelles technologies doit ainsi être moins impactant que celles existantes sur l'ensemble de leur cycle de vie et ce pour différentes catégories d'impacts (changement climatique, énergie consommée, toxicité humaine…). Ainsi les économies d'énergie obtenues lors de la phase d'usage des systèmes PV doivent permettre de compenser les consommations d'énergie et de ressources induites par leurs phases de fabrication, d'installation et de fin de vie. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'intégrer une démarche d'éco-conception dans le secteur PV dès la phase de

[1] Millions de dollars

R&D où la technologie est en cours de développement (échelle TRL « Technology Readiness Level » bas).

L'analyse de l'état de l'art montre que les démarches environnementales dans le secteur PV (directives, réglementations, guidelines…) sont en croissance mais qu'elles agissent sur des technologies PV matures et déjà commercialisées (échelle TRL élevée) et non en amont. De plus, ces démarches sont souvent focalisées sur l'évaluation du bilan carbone, et compte-tenu de bénéfices des systèmes PV inhérents au produit (faible bilan carbone), ces démarches n'ont pas été intégrées au plus tôt dans le processus de développement.
L'analyse du Cycle de Vie (ACV) est connue comme la méthode normée la plus pertinente pour évaluer les impacts environnementaux d'un système ou d'un produit tout au long de son cycle de vie. Néanmoins, l'analyse des ACV menées dans le domaine PV montre certaines limites (variabilité du choix des paramètres, non transparence des résultats) qui rendent ainsi la prise de décision, dans un objectif d'éco-conception, difficile.
Face à tous ces enjeux, Le Département des Technologies Solaires (DTS) au sein du CEA-LITEN à l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) souhaite intégrer de façon adaptée, systématique et pérenne, la prise en compte des impacts environnementaux dans les projets de R&D en accompagnement de ses partenaires industriels dans leur effort d'innovation et de compétitivité.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de cette thèse intitulés **« Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies PV »,** et réalisés en collaboration avec l'institut ENSAM de Chambéry.

La complexité de l'étude réside principalement dans le fait qu'il s'agit de réaliser des analyses environnementales fiables pour des technologies nouvelles, dès les premières phases de R&D (TRL bas) pour lesquelles encore peu de données sont disponibles. En effet si l'ACV est la méthodologie la plus pertinente, la transparence et la fiabilité des résultats associés sont conditionnées par un niveau élevé de qualité des données. Un problème de compatibilité entre la qualité et la disponibilité des données d'une technologie non mature et les exigences de l'ACV peut alors constituer un frein à l'utilisation de cette méthode dès les toutes premières phases d'un projet de R&D.

De plus, l'état de l'art montre que plusieurs outils d'éco-conception ont été développés mais que la pérennité de ces démarches rencontre de nombreux écueils, comme (i) la nécessité d'une expertise dans le domaine environnemental, (ii) le temps requis pour l'utilisation des outils, (iii) la divergence entre le besoin de l'industrie (souvent piloté par les objectifs techniques et économiques) et les démarches environnementales proposées et enfin, (iv) l'évolution rapide des technologies.

Ces lacunes nous amènent à rechercher une nouvelle approche d'éco-conception dynamique, systémique et basée sur une analyse multicritères permettant l'amélioration et l'évaluation de la technologie pendant son processus de développement.

Dans cette optique, les objectifs de ces travaux de thèse sont les suivants :

- L'automatisation de l'analyse environnementale des technologies dès les premières phases de R&D avec une exigence de fiabilité des résultats.
- Le développement d'une méthodologie d'éco-conception au sein de l'organisme de R&D en aidant à la décision multicritères (économique, technique et environnementale)
- L'intégration pérenne de la méthodologie développée au sein de l'organisme de R&D.

Le présent manuscrit rend compte des résultats de ces travaux en cinq chapitres.
Le chapitre 1 présente les enjeux de la transition énergétique, le secteur PV aujourd'hui et le positionnement de l'éco-conception dans ce secteur. Ce chapitre permet de formuler la question de recherche : Quelle démarche faut-il développer pour réussir une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à échelle TRL bas d'un système à variables dynamiques, incluant à la fois une phase d'évaluation et une phase d'amélioration environnementales ?
Le chapitre 2 analyse cette question de recherche et identifie les différentes problématiques associées à l'intégration de la composante environnementale, dans des secteurs innovants où l'activité de R&D joue un rôle stratégique. Les hypothèses pour répondre aux problématiques sont ensuite proposées et serviront de socle de base à l'élaboration d'une méthodologie répondant aux objectifs du travail de recherche.

Le chapitre 3 présente la méthodologie proposée pour résoudre la problématique de la complexité de l'analyse environnementale et de l'intégration de cette démarche dans les projets de R&D tout en garantissant sa fiabilité et sa pérennité. La méthodologie utilise l'ACV comme un outil de pilotage pour l'analyse environnementale, basée sur l'analyse multicritères pour prendre en compte les besoins du client.

Le chapitre 4 présente les résultats de la validation de l'approche développée, dans un premier temps sur une technologie PV mature, et dans un second temps sur une technologie de faible maturité (TRL bas) issue d'un projet de R&D, pour valider l'aptitude de la méthodologie développée à répondre aux besoins dans un cadre d'IR&D.

Enfin, le chapitre 5 décrit l'outil « ECO PV » développé dans le cadre de ces travaux et son déploiement au sein de l'organisme de R&D.

Chapitre 1 Contexte : les systèmes photovoltaïques solaires (PV) et l'environnement

En ce début de siècle, les ressources naturelles sont soumises à des pressions croissantes, menaçant la santé publique et le développement technico-économique. L'épuisement des sols, la pollution de l'air et de l'eau et l'augmentation des déchets affectent de nombreuses régions dans le monde. Au fur et à mesure que la population mondiale s'accroît, l'amélioration de la qualité de vie sans détruire l'environnement est devenue un défi mondial. Seule la voie du développement durable peut conduire vers un avenir pérenne et soutenable : *« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs »* [2].

Ce premier chapitre, divisé en trois parties, introduit les sujets abordés dans cette thèse. Il expliquera en premier lieu la transition écologique, définie comme un modèle adopté pour répondre aux enjeux du développement durable [3], et en particulier la transition énergétique, et l'énergie solaire photovoltaïque (PV), en tant que source d'énergie renouvelable en émergence et en développement continu. La démarche d'innovation associée aux activités recherche et de développement (R&D) dans le secteur PV est l'une des clefs pour pérenniser sa position dans le marché.

La seconde partie de ce chapitre s'intéresse ensuite à comprendre le concept de l'éco-conception pour des systèmes (PV) en phase de R&D. Enfin, un bilan des analyses du cycle de vie (ACV) des systèmes PV cristallins fera l'objet de la troisième partie et démontrera le besoin d'intégrer la composante environnementale dans les projets de R&D au sein de la communauté PV.

1 Les enjeux de la transition énergétique

1.1 La transition écologique dans le monde

Le concept « socio-écologique » développé par Fischer-Kowalski et Haberl [4] définit la relation entre une société humaine et son environnement. Les principales caractéristiques de cette relation sont les ressources utilisées par la société pour satisfaire ses besoins.

La population mondiale actuelle a atteint 7,6 milliards d'habitants. Avec environ 83 millions de personnes qui s'ajoutent à la population mondiale chaque année, cette tendance d'augmentation de la population devrait ainsi se poursuivre sur le long terme ; elle devrait atteindre 8,6 milliards en 2030, 9,8 milliards en 2050 et 11,2 milliards en 2100 [5].

Par conséquent, cette augmentation engendrera une augmentation de l'extraction et de l'utilisation des ressources naturelles, et de production de déchets : la demande d'énergie primaire a été multipliée par 2,6 pendant la période 1990-2015 [6], le besoin en eau douce augmente de 64 milliards de mètres cubes chaque année [7] et la quantité de déchets est estimé à 3,5 milliards de tonnes par an et devrait augmenter de 40 % entre 2008 et 2020 [8]. Ces secteurs, comme l'énergie, l'eau..., peuvent être considérés comme « *des systèmes socio-techniques* » c'est-à-dire composés de différents acteurs (entreprises, particuliers), d'institutions (standards, réglementations) ainsi que de connaissances [9]. C'est la raison pour laquelle la dégradation croissante de l'environnement causée par ce modèle de consommation énergivore pourrait avoir ainsi des conséquences catastrophiques sur non seulement les ressources énergétiques et naturelles mais aussi l'organisation des sociétés humaines si des actions ne sont pas prises rapidement à l'échelle internationale [10].

La notion de transition implique un changement majeur selon plusieurs dimensions (technologique, organisationnelle, matérielle...), non seulement réduit à des ajustements ou améliorations incrémentales, mais aussi basé sur un nouvel état qualitatif du système. Ainsi, la « transition socio-écologique » peut être définie comme une transformation d'un régime vers un autre.

La Figure 1 illustre les interactions qui orientent les transitions en fonction de trois niveaux (niches technologiques, régimes et paysage) exerçant des pressions les uns sur les autres. Les niches, premier niveau, sont le lieu d'expérimentations et d'innovations. Les régimes et les normes (deuxième niveau) assurent la généralisation et la standardisation qui seront à la fin soumis au paysage ou environnement externe (troisième niveau). Le défi politique consiste aujourd'hui à transformer ces niches de technologies vers des configurations plus soutenables ; il s'agit « des transitions durables » [11].

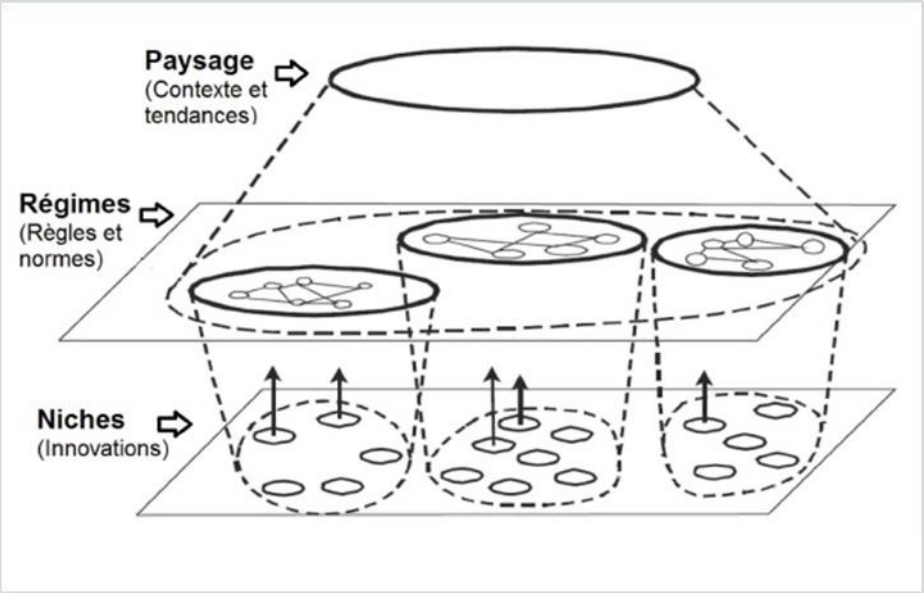


Figure 1. Les niveaux de transition théorisés par Geels et al. [15]

Une approche de transition qui se base sur la possibilité d'un changement délibératif vers la durabilité a été développé par Kip et Remp [12] puis élaboré par Rotmans et al. [13] et Martens et Rotmans [14]. Berkhout et al.[15] ont développé une approche en recherchant des moyens permettant de modifier les régimes technologiques non seulement par des transformations dans les niches, mais aussi par des interventions politiques par exemple via les processus de pressions qui pèsent sur le régime (par exemple la fiscalité environnementale, les accords négociés et les accords de la réglementation). Afin de mieux comprendre ce concept émergent, Markard et al. [9] ont réalisé une analyse bibliographique où ils ont identifié les approches, issues de 540 articles, développées dans ce domaine. Dans la majorité des études, l'environnement a été un paramètre fort dans l'approche de changement. L'analyse de Markard et al. [9] a montré également les défis de la durabilité dans le secteur de l'énergie, avec ces nouvelles technologies (sources d'énergie renouvelable), représentant le sujet le plus dominant (36 % de tous les articles), suivis des études sur les transports (8 %), l'eau (7 %), et les aliments (3 %).

Ces approches de transition énergétique sont ainsi considérées comme des stratégies politiques opérationnelles visant à forcer le développement durable des systèmes technologiques.

1.2 La transition énergétique dans le monde

1.2.1 Consommation de l'énergie primaire

Au fur et à mesure que les pays se développent, leur population a besoin de plus d'énergie, dont la consommation se partage entre différents secteurs (transport, industrie, bâtiment…). Les progrès technologiques augmentent également la disponibilité des produits qui nécessitent de l'énergie, comme les machines - outils à commande numérique.

Les dernières estimations publiées par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) en Mars 2018 [16] ont montré que la consommation mondiale d'énergie primaire était de 13511,2 Mtep[2] en 2017. Ce taux a augmenté de 2,1 % et devrait augmenter de 30 % entre 2018 et 2035 [17]. Comme le montre la Figure 2, Les combustibles fossiles représentent actuellement 83 % de la demande d'énergie primaire. La consommation du charbon, du pétrole et du gaz naturel a augmenté de 1 %, 1,6 % et 3 % respectivement en 2017. Les énergies renouvelables, en particulier l'éolien, le solaire et l'hydroélectricité, ont augmenté de 6,3 % en 2017, représentant ainsi un pourcentage record de 25 % dans le mix énergétique mondial [16]. Un constat qui vise à s'aligner avec la trajectoire nécessaire de développement durable à l'échelle globale mais qui en est encore bien éloigné.

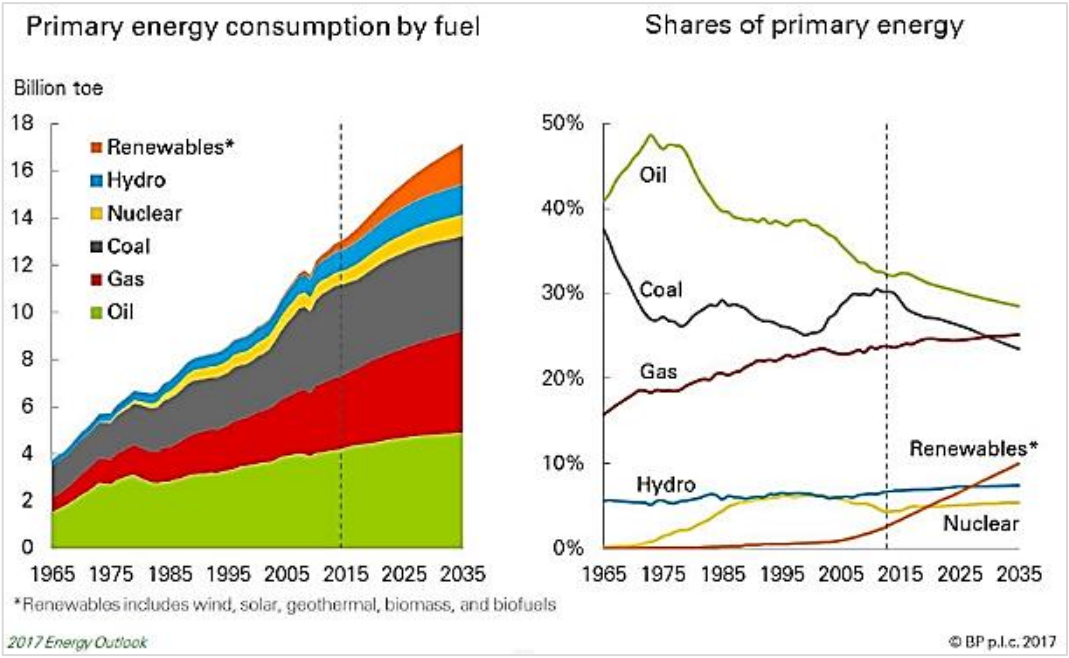


Figure 2. L'évolution de la consommation de l'énergie primaire [17]

[2] Millions de Tonnes équivalent Pétrole, unité de mesure d'énergie d'un point de vue économique et industriel

En effet, plusieurs impacts négatifs sont directement ou indirectement liés à cette utilisation intensive des combustibles fossiles [18] :

(a) **Contribution à l'épuisement des ressources d'origine fossile** : les sources d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), considérées comme sources d'énergie non renouvelables, sont destinées à s'épuiser dans un avenir proche car l'approvisionnement de ces combustibles fossiles est limité. En se basant sur l'étude Shafiee et al. [19] qui propose une méthode pour estimer le temps d'utilisation des energies fossiles avant épuisement, le pétrole, le charbon et le gaz seront épuisés dans 35, 107 et 37 ans, respectivement.

(b) **Contribution aux émissions de gaz à effet de serre :** les émissions de dioxyde de carbone dues à la combustion de combustibles fossiles sont d'environ 36 milliards de tonnes métriques par an [20]. Ces émissions augmentent l'effet de serre et contribuent par conséquent à l'augmentation de la température moyenne de la planète ce qui met en danger les espèces animales et végétales ainsi que les humains. Il est estimé que les combustibles fossiles contribuent à hauteur de 57 % dans le changement climatique, représentant ainsi la plus grande part [21].

(c) **Conflits politiques autour des combustibles fossiles :** les pays du Moyen-Orient sont caractérisés par une forte concentration et production de réserves des combustibles fossiles ; environ 56 % des réserves de pétrole brut, 41 % des réserves naturelles et des réserves de gaz sont situées au Moyen-Orient [22]. D'autre part, ces ressources représentent une priorité pour certains grands pays importateurs comme les États-Unis. De ce fait, des conflits politiques (d'appropriation des ressources, de partage de surplus pétrolier…) peuvent être ainsi engendrés entre les pays.

Cet état des lieux sur l'énergie primaire dans le monde confirme la nécessité d'un changement structurel à long terme dans les systèmes énergétiques, au niveau des sources d'énergie, des entreprises et autres acteurs de la chaine de production et consommation d'énergie, ce qui est la définition même de la transition énergétique.

1.2.2 Vers une grande transition énergétique

1.2.2.1 *Priorités environnementales des gouvernements*

Les considérations environnementales ont fortement augmenté dans les actions nationales et mondiales. Le développement durable a pris de l'importance à la fin des années 1980 (la Commission Brundtland a présenté son rapport en 1987) avec la création du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental, IPCC en anglais) sur l'évolution du climat en 1988. Il s'agit d'un organisme, composé de 195 pays, qui étudie l'impact de l'activité humaine sur l'environnement. L'ensemble de ses activités se traduit par des rapports, illustrant des alternatives et fixant des objectifs pour atténuer le changement climatique [23]. Lors de la COP21 en 2015 à Paris, les gouvernements se sont engagés à limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à 1,5 °C, afin de réduire les impacts liés au changement climatique [24]. Un tel engagement se traduit par une diminution de 40 % à 70 % des émissions des gaz à effet de serre d'ici 2050 et nécessite par conséquent un changement radical du mix énergétique mondial depuis un mix fossile vers un mix renouvelable.

1.2.2.2 *Les énergies renouvelables, élément structurant de la transition énergétique*

L'énergie renouvelable est l'énergie générée à partir de ressources renouvelables. Les principales sources d'énergie renouvelables sont : l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse.

L'année 2017 a été une nouvelle année record pour les énergies renouvelables, caractérisée par la plus forte augmentation de la capacité d'installation, la baisse des coûts et l'augmentation des investissements et des progrès technologiques. Les capacités photovoltaïques (PV) et éoliennes mondiales installées, ont atteint 1 TWh en fin de l'année 2017 [25]. En particulier, l'énergie solaire PV a subi une croissance exponentielle ces derniers années : les capacités installées de panneaux PV ont atteint plus de 99,1 GW en 2017, soit une augmentation de près de 30 % par rapport à l'année 2016, pour atteindre une capacité PV totale cumulée de 402 GW [26] comme l'illustre la Figure 3.

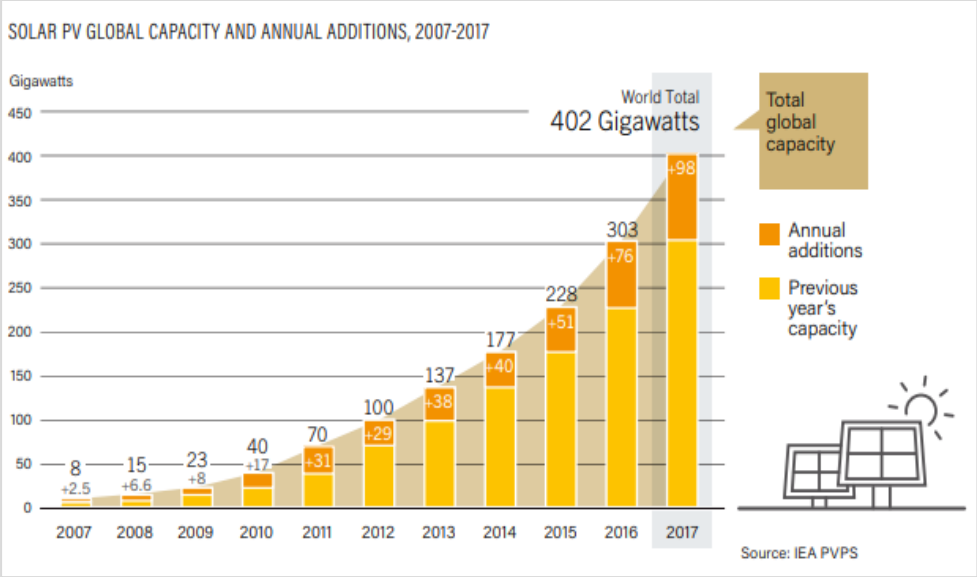


Figure 3. Évolution de la puissance installée cumulée de panneaux PV [26]

Cette croissance exponentielle est accompagnée de réductions importantes des coûts. En effet, les prix des modules PV continue de baisser pour atteindre 0,25 $/Wp en 2018 par rapport à 1,59 $/Wp en 2011 [27]. Les coûts d'installation ont également diminué dans le monde entier : le coût actualisé de l'énergie (LCOE)[3] des centrales PV à échelle industrielle est d'environ 70 $/MWh, cumulant ainsi une baisse de 73 % depuis 2010 [28]. Le LCOE des centrales PV en France et en Allemagne est estimé entre 50 et 90 $/ MWh, positionnant ainsi l'énergie PV en concurrence directe avec plusieurs sources d'énergie fossiles [29] (Figure 4).

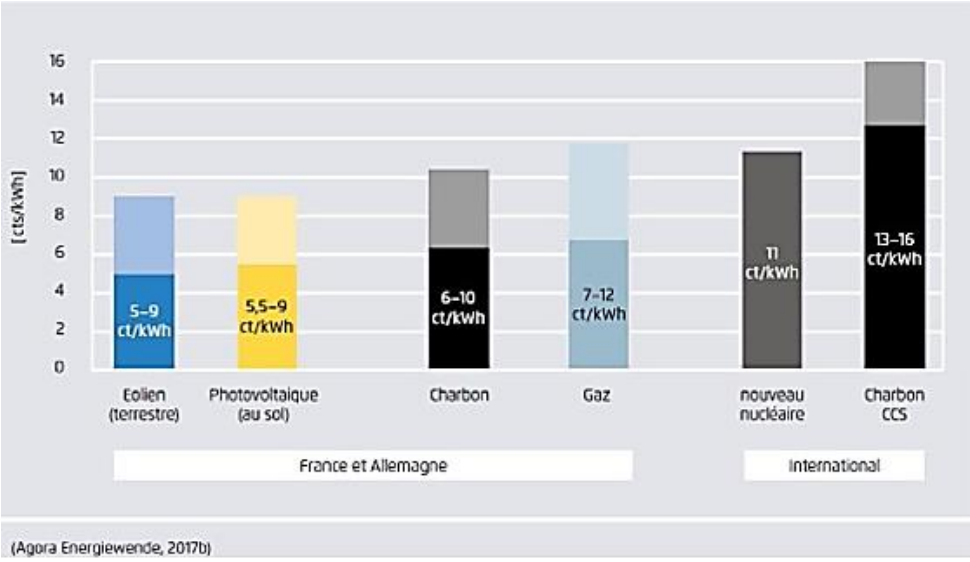


Figure 4. Comparaison du LCOE de l'énergie PV en France et en Allemagne par rapport aux coûts des énergies fossiles [29]

[3] Acronyme de "Leveliezed Cost Of Energy " est un outil qui évalue le prix de la source d'énergie par énergie produite pendant sa durée de vie et permettant ainsi la comparaison avec d'autres sources d'énergie.

Par conséquent, les innovations et les améliorations des technologies PV se sont poursuivent principalement sur l'étape de fabrication avec pour objectif principal l'augmentation des performances (Wp) et la diminution du coût ($/Wp et $/MWh) [27] .

Cette croissance exponentielle permet également de réduire les émissions de gaz à effet de serre grâce à la phase d'usage (étape de production électrique) des systèmes PV, qui ne produisent pas d'émissions de CO_2 [30]. Néanmoins, les systèmes PV, comme chaque système, sont caractérisés par un cycle de vie composé d'une phase de fabrication, d'installation, en plus de la phase d'usage. Il est donc important de considérer l'impact sur le cycle de vie complet pour s'assurer qu'il n'y a pas de transfert des impacts environnementaux d'une phase à une autre.
De plus, même si l'impact environnemental est un objectif qui a pris de l'importance face au réchauffement climatique, les émissions de CO_2 ne sont pas le seul critère de protection de l'environnement. Il existe d'autres impacts qu'il faut prendre en considération (toxicité humaine, déplétion des ressources, acidification…) pour juger le profil environnemental d'un système [31].

1.3 Systèmes PV cristallins

1.3.1 Familles technologiques

L'énergie solaire est divisée en deux grandes familles technologiques : le solaire thermique et le solaire photovoltaïque (PV).
Le premier produit la chaleur à l'aide du soleil pouvant vaporiser de l'eau et ainsi activer une turbine dynamoélectrique. Le second, qui fait l'objet de ce travail de recherche, consiste en la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par l'effet photoélectrique des matériaux semi-conducteurs, découvert par Antoine Becquerel en 1839 [32].
L'énergie PV regroupe un grand nombre de technologies qui peuvent être réparties en trois grandes familles : les technologies silicium cristallin (c-Si) (94 % du marché), les technologies couches minces (5 % du marché) [33] et les nouveaux concepts comme le PV organique et les cellules pérovskites qui sont en cours d'intégration dans le marché [27].
Compte-tenu de sa dominance dans le marché PV, ce travail de thèse sera focalisé sur la technologie (c-Si).

1.3.2 Cycle de vie des systèmes PV cristallins

Le cycle de vie d'un produit traduit l'ensemble des étapes que traverse le produit tout au long de sa durée de vie.

Comme le montre la Figure 5, le cycle de vie des systèmes PV (c-Si) est composé de :

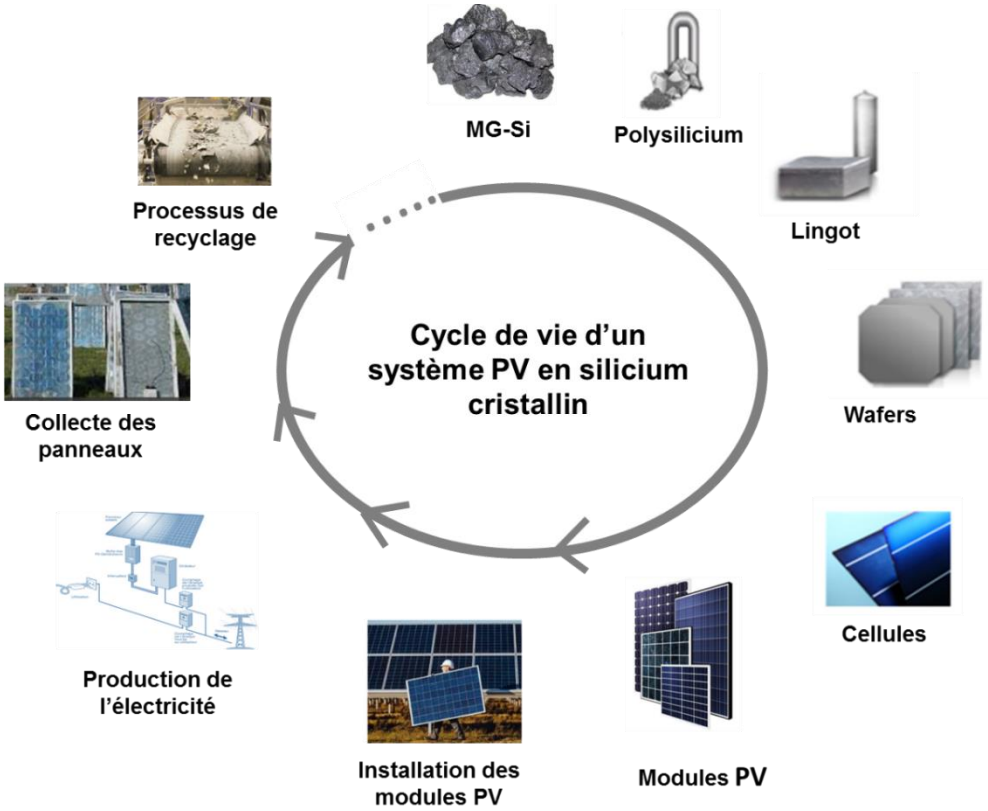


Figure 5. Cycle de vie des systèmes PV en silicium cristallin

- La **phase de fabrication** qui commence depuis l'extraction de la matière première jusqu'à la production des modules PV.
- La **phase d'installation** assurant la mise en fonctionnement des modules PV
- La **phase d'usage**, où les modules PV produisent de l'électricité.
- La **phase de fin de vie** où les modules sont désinstallés, collectés et recyclés.

1.3.2.1 *Phase de fabrication des modules PV (c-Si)*

Un module PV (c-Si) est un système complexe composé de plusieurs sous-produits (polysilicium, lingot, wafers, cellules et module) (fig.5).

Ce type de module regroupe également plusieurs technologies, dont certains sont déjà commercialisées et d'autres sont en développement [27]. Chaque technologie est caractérisée par des procédés de fabrication et des performances techniques bien définis. Pour cette raison, plusieurs procédés de fabrication peuvent exister pour une seule étape dans la chaine de fabrication des systèmes PV (c-Si).

a. Purification du silicium : le polysilicium

L'obtention du polysilicium ou du silicium de qualité solaire (SOG-Si) passe par deux étapes de purification : en premier lieu la silice, contenue dans le quartz, est transformée en silicium métallurgique (MG-Si) à l'aide d'un four à arc électrique dans lequel sont introduits des matériaux contenant du carbone. La réaction se produisant dans le four est la suivante :

$$SiO2 + 2\,C \rightarrow Si + 2\,CO \qquad (1)$$

Le silicium (MG-Si) contient encore des impuretés à hauteur de 98-99 % [34]. Afin de réduire encore ce niveau d'impureté pour obtenir un silicium de qualité du semi-conducteur (poly silicium ou silicium (SOG-Si), des procédés de purification comme le procédé Siemens (dépôt chimique) ou le procédé réacteur à lit fluidisé (FBR)[4] [27] sont alors utilisés. Le procédé Siemens représente aujourd'hui 83 % du marché poly silicium [27]. Il consiste à introduire le MG-Si dans des tiges afin d'être oxydé en trichlorosilane ($SiHCl_3$). Ce dernier sera enfin réduit à 1000°C pour obtenir un barreau de poly silicium. Le silicium obtenu est caractérisé par un taux de pureté très élevé (9 N ou 99,999999999 %) [35]. Le procédé FBR, représentant que 17 % du marché [27], utilise quant à lui des particules de silicium (au lieu des tiges de Si). Ces particules sont implémentées dans le réacteur avec les gaz porteurs (l'hydrogène (H_2) et le trichlorosilane ($SiHCl_3$)). Les gaz réagissent et le silicium se dépose sur les particules présentes dans le réacteur. Ces particules grossissent jusqu'à atteindre un poids limite pour ensuite tomber dans le conteneur prévu à cet effet [36]. Le silicium ainsi obtenu est caractérisé par un taux de pureté moins élevé (6-7 N ou 99,999999-99,9999999 %).

b. Cristallisation du silicium en lingots (c-Si)

Une fois que le silicium est purifié, il est mis sous forme solide par le procédé de cristallisation dont l'objectif est l'augmentation du rendement tout en préservant la qualité du matériau ; il s'agit du lingot (c-Si).

Trois types de lingots existent dans le marché aujourd'hui : le multi-cristallin (multi-Si) qui domine le marché avec 63 %, le monocristallin (mono-Si) avec 35 % et le « monolike » avec 2 %.

- ***Le silicium monocristallin (mono-Si) :***

Le principe de la méthode Czochralski (CZ) consiste à solidifier un monocristal en initiant la croissance à partir d'un bain fondu par un germe monocristallin d'orientation connue. Ensuite le germe est tiré verticalement avec un mouvement de rotation. En faisant varier la vitesse de rotation et la vitesse de tirage, un seul et unique cristal cylindrique est obtenu.

[4] Fluised Bed Reactor

La mise en œuvre de ce type de lingot est cher et énergivore mais les cellules obtenues sont de très haut rendement (rendement relativement de 20 % pour les cellules standards) [27].

- ***Le silicium multi cristallin (multi-Si) :***

La technique de solidification dirigée (DS) de type Bridgman consiste à faire fondre la charge du Si contenue dans un creuset et à réaliser la solidification par mouvement de l'interface solide/liquide. La composition du creuset est un facteur clé car il et peut induire des germinations et des contaminations qui déterminent la qualité cristalline du lingot.
L'élaboration de ce type de lingot est moins énergivore et moins complexe mais le rendement final des cellules reste inférieur aux cellules mono-Si (rendement de 18 % pour les cellules standards) [27].

- ***Le silicium « monolike »*** :

Les lingots « monolike » sont des lingots de silicium majoritairement monocristallins réalisés par la méthode de solidification directe dans un four de cristallisation qui contient une charge poly cristalline.

Par conséquent, les lingots « monolike » combinent la haute pureté du silicium monocristallin et le coût faible de l'élaboration des lingots multi-cristallins (rendement de 19 % pour des cellules standard). C'est un compromis idéal entre les performances et les coûts de fabrication [27].

Les différents avantages et inconvénients des procédés de cristallisation, listés auparavant, sont synthétisés dans Tableau 1.

Tableau 1. Les avantages et les inconvénients des procédés de cristallisation du silicium

Procédé	**Type de silicium**	**Part du marché**	**Avantages**	**Inconvénient**
Procédé CZ	mono-Si	30%	Très bonne qualité de silicium	Energivore et très cher
Procédé DS	multi-Si	63%	Peu cher Non énergivore	Qualité de silicium moyenne
Procédé « monolike »	monolike	2%	Bonne qualité de silicium Peu cher Non énergivore	Adaptations nécessaires pour certaines technologies des cellules

c. Découpe en briques et wafers

Une fois les lingots formés, ils sont débités en briques. Le sciage est une technique de découpe des matériaux durs. Associé au sciage, le débitage permet d'obtenir les épaisseurs demandées : les briques sont découpées ainsi en des tranches fines appelés « Wafer » comme présenté par la Figure 6 Le procédé de sciage au fil d'acier (SW) a été appliqué pendant longtemps pour assurer la découpe. Le fil de découpe est un fil d'acier transportant une boue abrasive, qui procède par compression de particules abrasives de carbure de silicium (SiC) entre le fil et le lingot de silicium [37]. Avec ce procédé, l'épaisseur de wafer varie entre 180 et 200 µm avec un rendement de matière égal à 54%. Les innovations de l'industrie permettent aujourd'hui un sciage à fil diamant à abrasif fixe (DWS) [27] ; le fil étant alors revêtu de particules de diamant. La boue abrasive est ici remplacée par un liquide de refroidissement. Le DWS occupe aujourd'hui plus de 60% des parts de marché en 2018 [27] et offre plusieurs avantages : un coût réduit, une perte de coupe réduite et des substrats plus minces qui permettent de réaliser un gain économique [38].

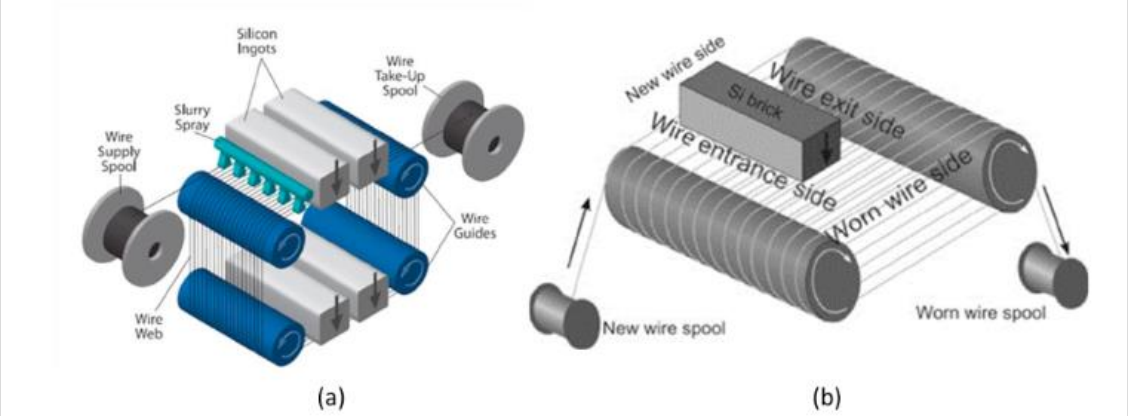


Figure 6. (a) Procédé de sciage au fil d'acier [36], (b) Procédé de sciage au fil diamant [37]

d. Réalisation des cellules

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible et son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Étant donné que le silicium est constitué d'atomes chargés d'électrons, ces derniers s'agissent dans tous les sens face au rayonnement solaire. Afin de créer un courant électrique continu, où les électrons circulent dans un sens bien précis, le silicium est alors dopé. Ce dopage consiste à obtenir d'un côté un surplus d'électrons et de l'autre un déficit d'électrons. Ainsi, une cellule solaire est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur ; ces deux couches sont dopées différemment : une couche N dopée de phosphore, un matériau dont les

atomes possèdent un surplus d'électrons par rapport au silicium, et une couche P dopée en bore, un matériau dont les atomes possèdent un déficit d'électrons par rapport au silicium. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel (jonction PN) et l'énergie des photons lumineux, captés par les électrons (couche N), permet la circulation des électrons pour engendrer par conséquent un courant électrique continu [39]. La Figure 7 présente les différentes couches et le principe de fonctionnement d'une cellule PV.

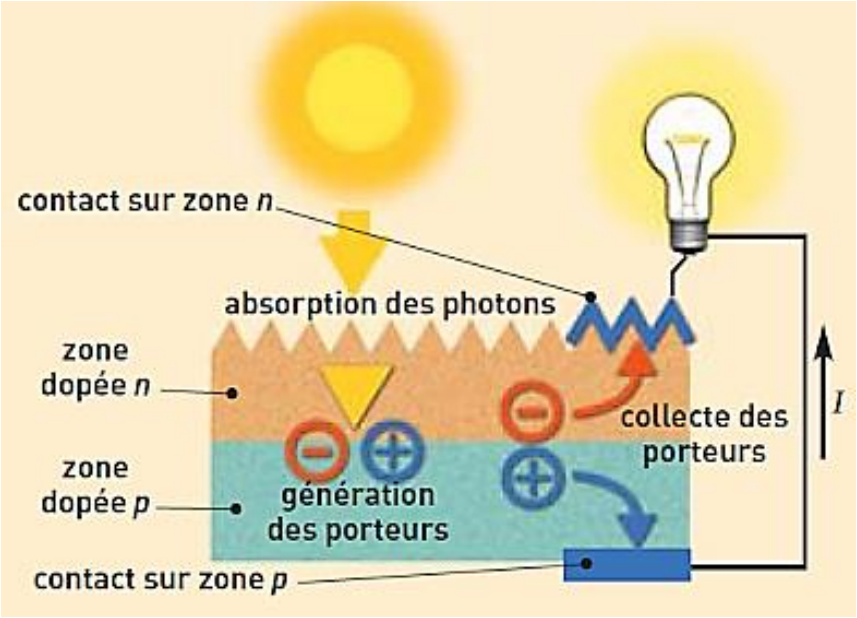


Figure 7. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire PV [38]

Afin de maximiser l'absorption des photons, des traitements sont effectués, définissant ainsi le procédé de fabrication de la cellule. Les étapes de ce dernier se résument comme suit : le nettoyage des wafers des impuretés de surfaces liés à la découpe, puis la formation de la jonction PN par diffusion gazeuse à haute température qui dépend du type du substrat du silicium (p-Si ou n-Si). L'étape suivante est le dépôt chimique de la couche antireflet de nitrure de silicium (Si_3N_4) par phase vapeur (PECVD) assisté par plasma. Cette couche permet de limiter la réflexion des rayons lumineux sur la surface des wafers. La dernière étape est la métallisation de la pâte d'argent par sérigraphie pour créer les contacts métalliques servant à collecter les photons lumineux de l'émetteur. Ces contacts métalliques sont composés de barres de collection « busbar », reliant ainsi directement aux fils externes les lignes fines « doigts » qui collectent le courant (Figure 8). L'enjeu aujourd'hui est d'augmenter le nombre des « busbars » pour réduire les pertes résistives évitant ainsi une baisse de la puissance du module (Figure 9).

La composition de la face arrière dépend de la technologie de la cellule. Pour une cellule standard, cette face est entièrement recouverte d'une pâte d'aluminium, à coté de laquelle des « ilots » d'argent sont placés.

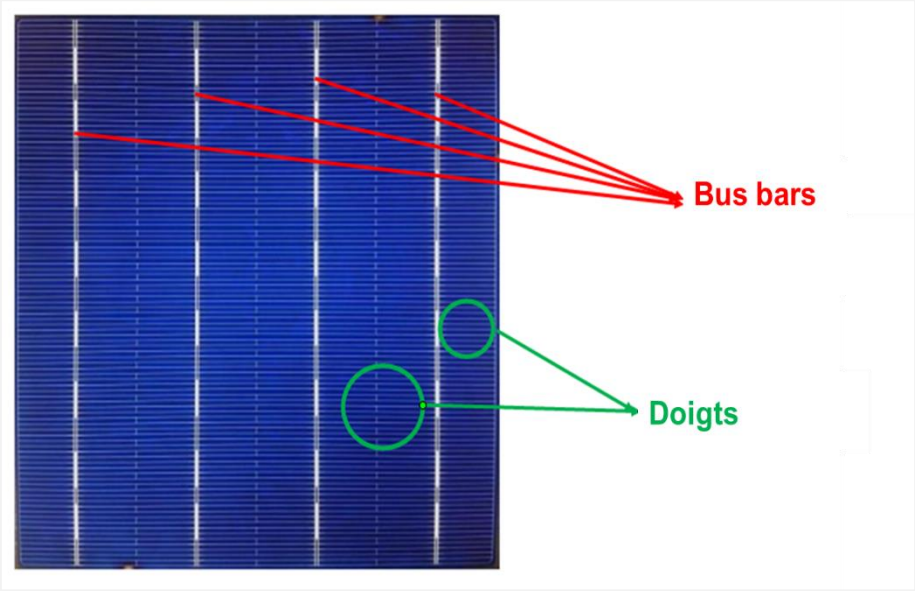


Figure 8. Composition de la face avant d'une cellule solaire

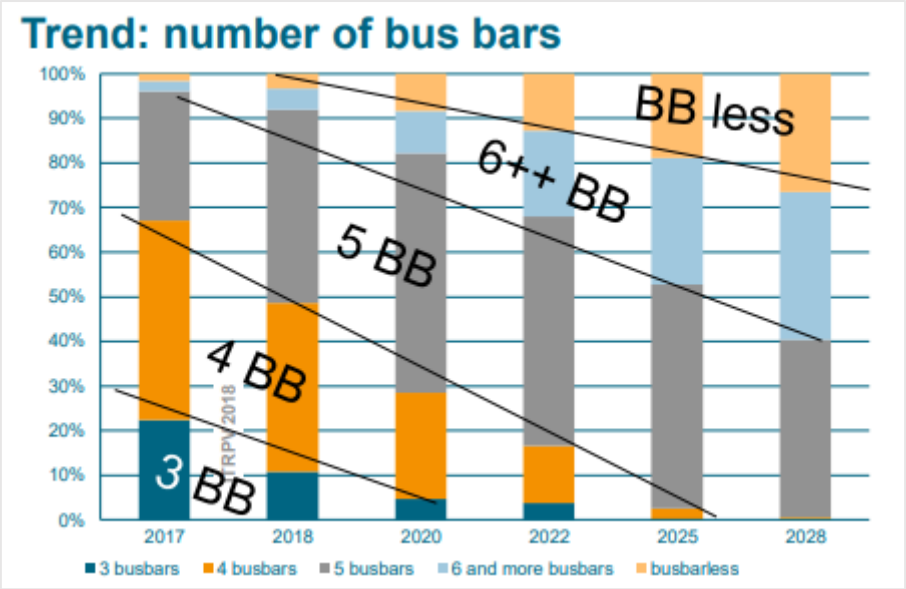
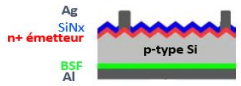
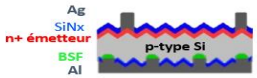
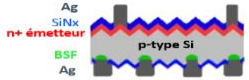
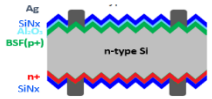
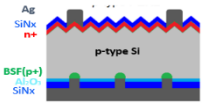
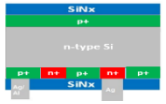
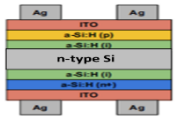
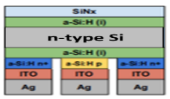
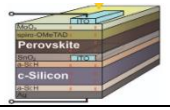


Figure 9. Tendances du nombre des "bus bars" des cellules solaires dans le marché, d'après [26].

Ces traitements peuvent varier d'une technologie à une autre en fonction : du choix des substances chimiques utilisées, du type du silicium, et du type de métallisation [27].

Plusieurs technologies de fabrication des cellules PV existent aujourd'hui dont certains sont en concurrence dans le marché et d'autre encore en développement [27], avec comme objectifs principaux, l'amélioration des performances techniques (rendement) et la réduction du coût de fabrication.
Le Tableau 2 résume les caractéristiques des différentes technologies des cellules solaires PV en silicium en identifiant la part de marché, le rendement, le type de silicium et la spécificité de la structure associée.

Tableau 2. Les différentes caractéristiques des technologies de cellules solaires PV en silicium

Technologie	Part du marché [27]	Type de silicium	Rendement [27]	Spécificité [40]	Structure : schéma descriptif
AL-BSF	62 %	p-Si	19,5 %	Contacts métalliques (argent) en face avant. Alliage aluminium pleine surface en face arrière	
PERC			21,5 %	Contact locaux en alliage d'aluminium	
PERC+		p-Si	21,5 %	Cellules bifaciales/ Pas d'alliage d'aluminium Contacts métalliques en face arrière	
PERT	31 %	n-Si	21,5 %	Cellules bifaciales / Pas d'alliage d'aluminium / Substrat type n Contacts métalliques en face arrière Passivation en face avant par l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)	
PERL		p-Si	21,5 %	Champ de surface arrière (BSF) localisé Double couche antireflet	
IBC	5 %	n-Si	22,5 %	Contacts positifs (émetteur) et négatifs (BSF) sont en face arrière	
HJT	3 %	n-Si	22,5 %	Ajout de deux couches de silicium amorphe (a:Si) à la couche de c-Si Ajout d'une couche d'oxyde conductrice (TCO)	
IBC HJT	Sous-développement	n-Si	24 %	Combinaison de la structure IBC et HJT offrant ainsi une tension et un courant de court-circuit plus élevés, et donne un meilleur rendement.	
Tandem silicium	Sous-développement	n-Si	30 %	Empilement d'une jonction en couches minces sur une cellule Si ayant déjà sa propre jonction [41]	

e. Réalisation des modules PV

Le rôle principal d'un module PV est de protéger les cellules solaires de l'environnement extérieur (humidité, contraintes mécaniques…). Les cellules y sont connectées en série le plus souvent de façon à ce que le niveau de tension du module soit adapté aux applications. Le nombre de cellules varie en fonction de l'application. Les modules les plus vendus aujourd'hui sont les modules de 60 cellules (62 % du marché) et des modules de 72 cellules (36 % du marché) [27]

L'ensemble des cellules est encapsulé dans un polymère transparent comme l'EVA (Ethylène Vinyl Acetate) ou des PO (Polyoléfines), avec du verre trempé en face avant et un film de protection « backsheet » en face arrière ; il s'agit d'un film à base de matériaux polymères comme le Fluorure de PolyVinyle (PVF) ou Poly Téréphtalate d'Éthylène (PET). La structure standard d'un module (verre – encapsulant – cellules - backsheet) est pressée et chauffée tout en faisant le vide dans un laminateur. Une boite de jonction est posée en face arrière du laminé et permet de lier les connecteurs aux sorties électriques du module. Un cadre en aluminium est enfin ajouté sur la structure finale du module. Dans un module bifacial, le « backsheet » est remplacé par du verre et la rigidité ainsi obtenue permet de s'affranchir du cadre aluminium La structure de ces deux types de module est illustrée par la Figure 10.

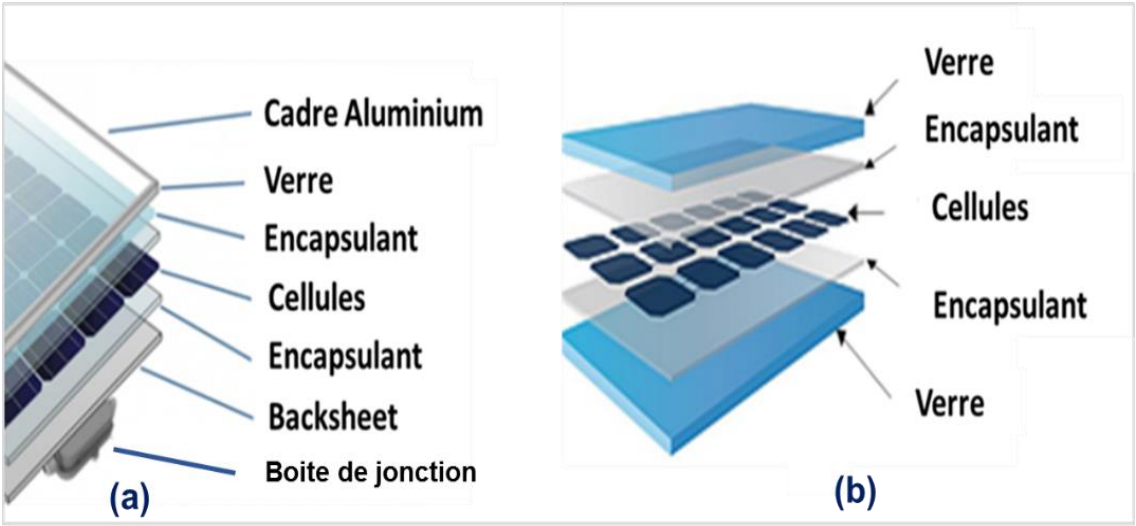


Figure 10. (a) Structure d'un module standard monofacial, (b) Structure d'un module biverre

- **Bilan :**

Pour une même technologie (c-Si), il existe plusieurs procédés de fabrication et par conséquent plusieurs types des modules PV cristallins présentés par la Figure 11.

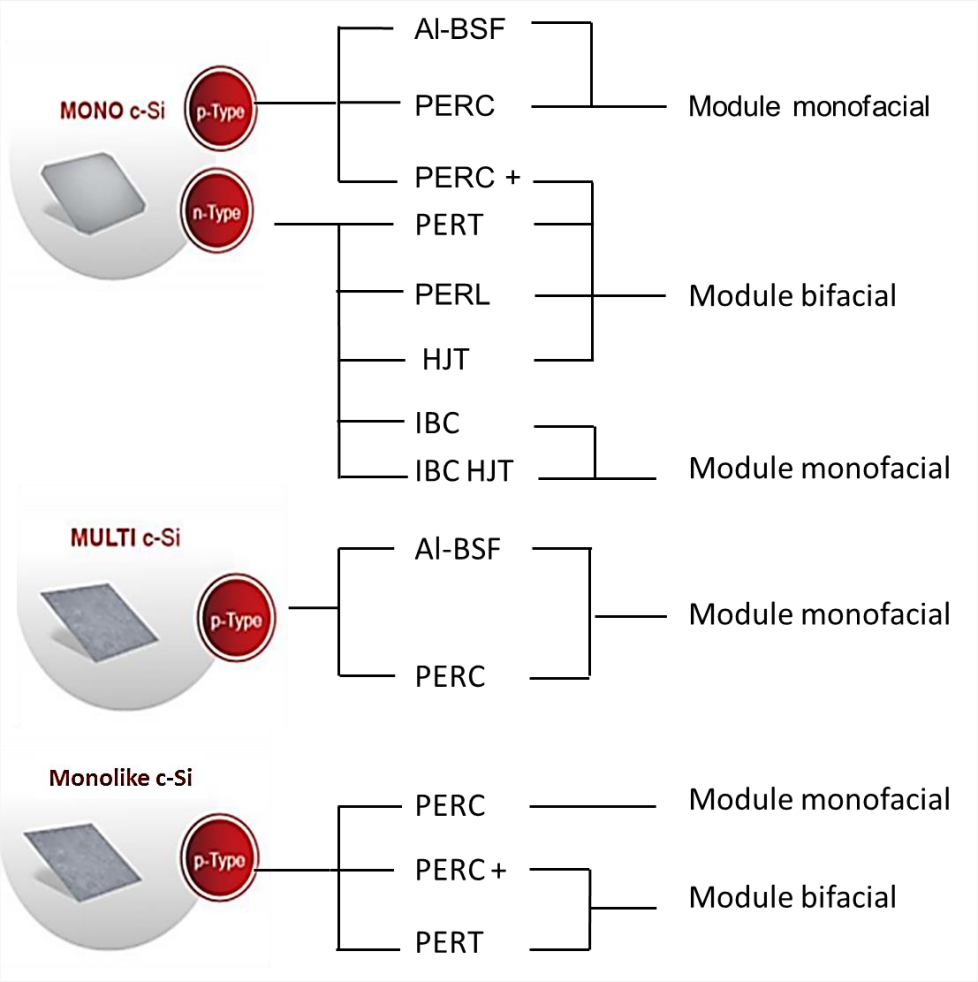


Figure 11. Les différents types de modules PV existants dans le marché en fonction du type de cellule et du silicium

L'industrie du PV est alors entrée dans une phase de transition, passant d'une industrie tributaire de subventions à une industrie concurrentielle. L'innovation technologique, visant à améliorer les performances et à diminuer les coûts, est la clé de la survie des industriels du PV aujourd'hui. Pour cette raison, plusieurs fabricants du domaine investissent massivement dans des projets de R&D « industriels », ou de recherche technologique LONGI Solar par exemple, premier fabricant mondial des modules mono-Si hautes performances [42], a multiplié son investissement en R&D par quatre au bout de deux ans, passant de 47 M$ en 2015 à 175 M$ en 2017 [43].

La R&D industrielle (IR&D) englobe ainsi l'ensemble des activités nécessaires pour faire le « pont » entre la recherche fondamentale et la commercialisation d'un produit. Ainsi, la

recherche technologique joue un rôle important pour renforcer, par l'innovation la position des organisations industrielles du PV sur le marché. Par conséquent elle peut jouer un rôle clé pour le maintien d'un secteur PV durable.

1.3.2.2 *Installation des modules PV*

Il existe une grande diversité de types d'installations des modules PV, qui se différencient par le lieu d'implantation possible :

- Les toits plats
- Les façades
- Les centrales au sol de grande puissance.

Le marché PV est dominé aujourd'hui par les installations au sol (48 % de la part du marché) et les installations en toiture (52 % de la part du marché) [26].
Les toits plats peuvent accueillir des panneaux posés sur des supports inclinés, auquel cas l'orientation et l'inclinaison des modules sont choisies de façon optimales. Quant aux panneaux au sol, ils peuvent être montés soit sur une structure fixe, soit sur une structure mobile appelée « suiveur » ou « tracker », chargée de suivre la course du soleil en tournant sur un ou deux axes.
Le système d'installation appelé aussi BOS (Balance Of System) est composé généralement d'une structure de montage, d'une installation électrique et des onduleurs

D'autres projets PV sont orientés vers de nouvelles applications qui font également l'objet de test et d'analyse dans la R&D comme le PV intégré aux véhicules (VIPV) et le PV intégrés au bâtiments (BIPV) [44].

1.3.2.3 *Phase d'usage : production de l'électricité*

L'électricité produite par un système PV dépend des paramètres techniques et peut être exprimée comme suit :

$$Epv = I \times A \times \eta \times T \times PRi \times \sum_{y=1}^{T} (1 - (y\ X\ DR)) \qquad (2)$$

Où :

- **I** est le rayonnement solaire annuel moyen (kWh/m²/an) spécifique à l'endroit.
- **A** est la surface totale des modules PV (m²).
- **ŋ** est le rendement du module qui représente le pourcentage de rayonnement solaire converti en énergie électrique.

- **PRi** est le rapport entre la production réelle et la production théorique.
- **T** est la durée de vie des modules, correspondant au temps de service d'un système (années).
- **DR** est le taux de dégradation qui correspond au pourcentage de dégradation annuelle moyenne de l'efficacité des systèmes PV.

Avec le type d'installation, ces paramètres jouent un rôle clé dans l'estimation finale du LCOE en $/MWh.

Grâce aux innovations incrémentales dans la chaine de valeur du PV et son système d'installation (centrales solaires bifaciales), par exemple, il estimé que le LCOE pourrait réduire pour atteindre des valeurs de 20 $/MWh à 30 $/MWh en 2030 par rapport à des coûts de 70 $/MWh en 2017 [45].

1.3.2.4 *Phase de fin de vie : recyclage des modules PV*

- **Démarche réglementaire :**

La quantité cumulée des déchets des systèmes PV en 2017 a été estimée à 870 tonnes. Avec l'évolution exponentielle des capacités installées, cette quantité est estimée à 60 millions de tonnes en 2050 [46]. Ces chiffres expliquent la décision de la Commission Européenne d'introduire le PV dans la filière de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) [47].

Le code de l'environnement définit les équipements électriques et électroniques comme étant des équipements **«** *fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu* » [48]. La DEEE contient également un nombre important de matériaux précieux et dangereux qui nécessitent un traitement spécial, voire des procédés de recyclage, tels que l'indium, l'argent et le palladium.

En suivant les exigences de la DEEE, les modules PV sont classés dans la catégorie 4 « équipements grand public et panneaux photovoltaïques » [49] pour laquelle :

- Le taux de récupération a été fixé à 75 % jusqu'à août 2015 et devrait passer à 85 % après août 2018.
- Le taux de recyclage a été fixé à 65 % jusqu'à août 2015 et devrait passer à 80 % en 2018.

De plus, les modules PV doivent suivre les réglementations de classification des déchets. Ces derniers tiennent compte des caractéristiques des matériaux (solubilité, inflammabilité, toxicité, etc.) des masses et volume des composants.

Sur cette base, les producteurs industriels du domaine de PV sont obligés de s'investir aujourd'hui dans la gestion de la fin de vie des panneaux PV.

- **Projets de recyclage des modules PV :**

La filière du recyclage comprend un nombre varié d'activités : le démantèlement, la collecte, le tri/stockage, le procédé de recyclage et la réutilisation des matières recyclées.
PV CYCLE, définit comme l'organisation européenne la plus connue de collecte des modules PV, a développé un réseau important de points de collecte (351 points de collecte en Europe) et de partenaires de démantèlement de modules PV [49]. Cette organisation propose des solutions de réutilisation et de recyclage conformes à la législation européenne pour tous les modules PV disponibles sur le marché.
Plusieurs projets de recyclage ont été lancés à l'échelle internationale depuis 2005, détaillés dans la Figure 12. En poids, les panneaux PV c-Si standards contiennent aujourd'hui environ 76 % de verre, 10 % de polymère (encapsulant), 8 % d'aluminium (principalement le cadre), 5% de silicium (cellules solaires), 1% de cuivre (interconnexions) et moins de 0,1 % d'argent (lignes de contact) et autres métaux. Les procédés de recyclage sont nombreux (procédés chimiques, thermiques, mécaniques…) mais l'objectif est unique : récupérer le maximum de matériaux [50].

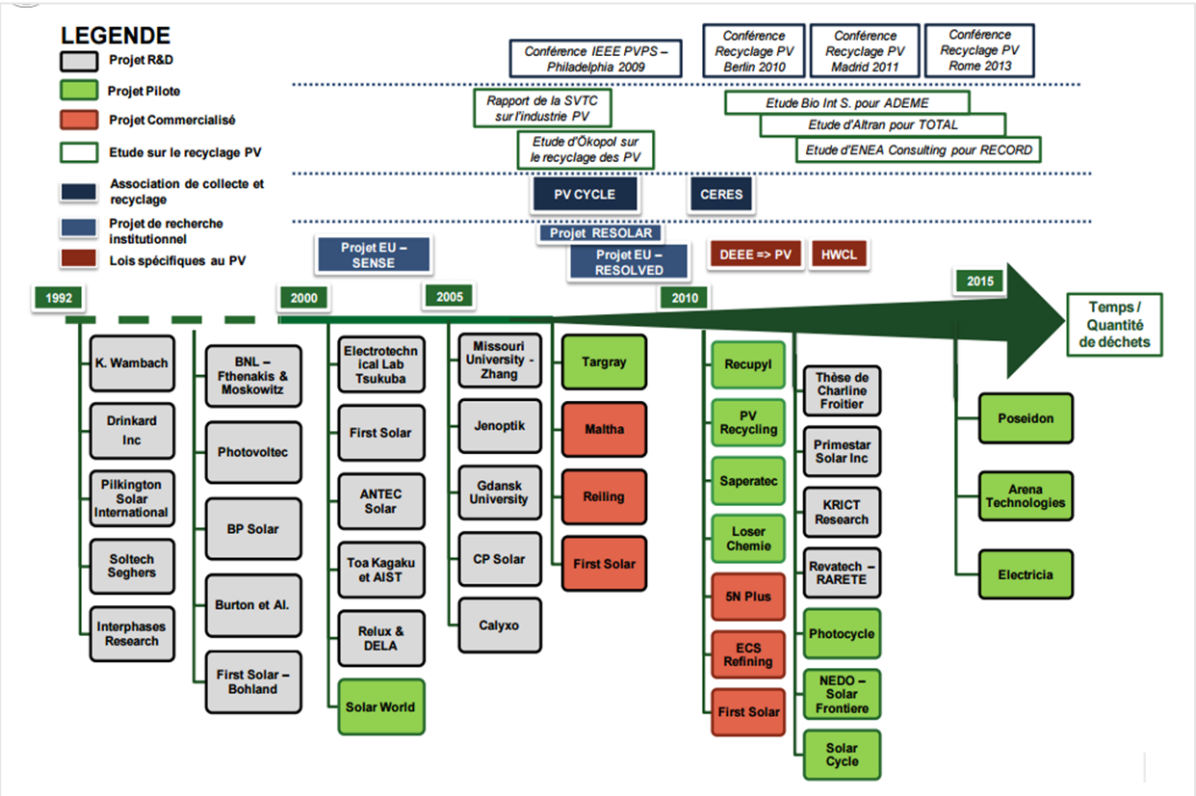


Figure 12. Les activités de recyclage des systèmes PV à l'échelle internationale [49]

- **La IR&D dans la gestion de la fin de vie des modules PV :**

La gestion de la fin de vie des modules PV est basée sur la stratégie des trois R [51] :

- **Réduire** la quantité de produits qui arrivent en fin de vie,
- **Réutiliser** des produits ou certaines parties qui deviendraient autrement des déchets,
- **Recycler** les matières premières.

L'activité de R&D peut soutenir cette stratégie et la maintenir. Étant donné que la R&D dans le secteur PV est orientée vers l'innovation et l'amélioration des performances, la réduction du taux des matières premières (la quantité d'argent), le développement de modules plus faciles à séparer et à recycler (modules sans polymère) et la réutilisation de matières recyclées (aluminium, acier…) peuvent entrer dans cette perspective [52].

1.4 Énoncé du premier constat

À l'issue de cette analyse des enjeux de la transition énergétique, en particulier parce que l'énergie PV est une alternative pour répondre aux problématiques environnementales, trois conclusions peuvent être dressées :

- Les systèmes PV sont des systèmes complexes, qui dépendent de plusieurs acteurs et plusieurs contraintes, et dont le cycle de vie ne se limite pas à la production de l'électricité (Figure 13).
- L'industrie du PV est passée d'une industrie tributaire de subventions à une industrie concurrentielle en innovation continue pour survivre et continuer à croitre.
- L'activité de IR&D joue un rôle stratégique à chacune des étapes du cycle de vie pour maintenir et soutenir ce secteur innovant (Figure 13).

Constat 1 :

Par conséquent, même si l'énergie PV est considérée comme l'une des solutions aux problématiques environnementales, le potentiel de réduction des impacts environnementaux est encore large. L'intégration d'une démarche d'éco-conception, dès la phase de R&D industrielle, pourrait être la clé pour contribuer efficacement au solutionnement de problématiques environnementales.

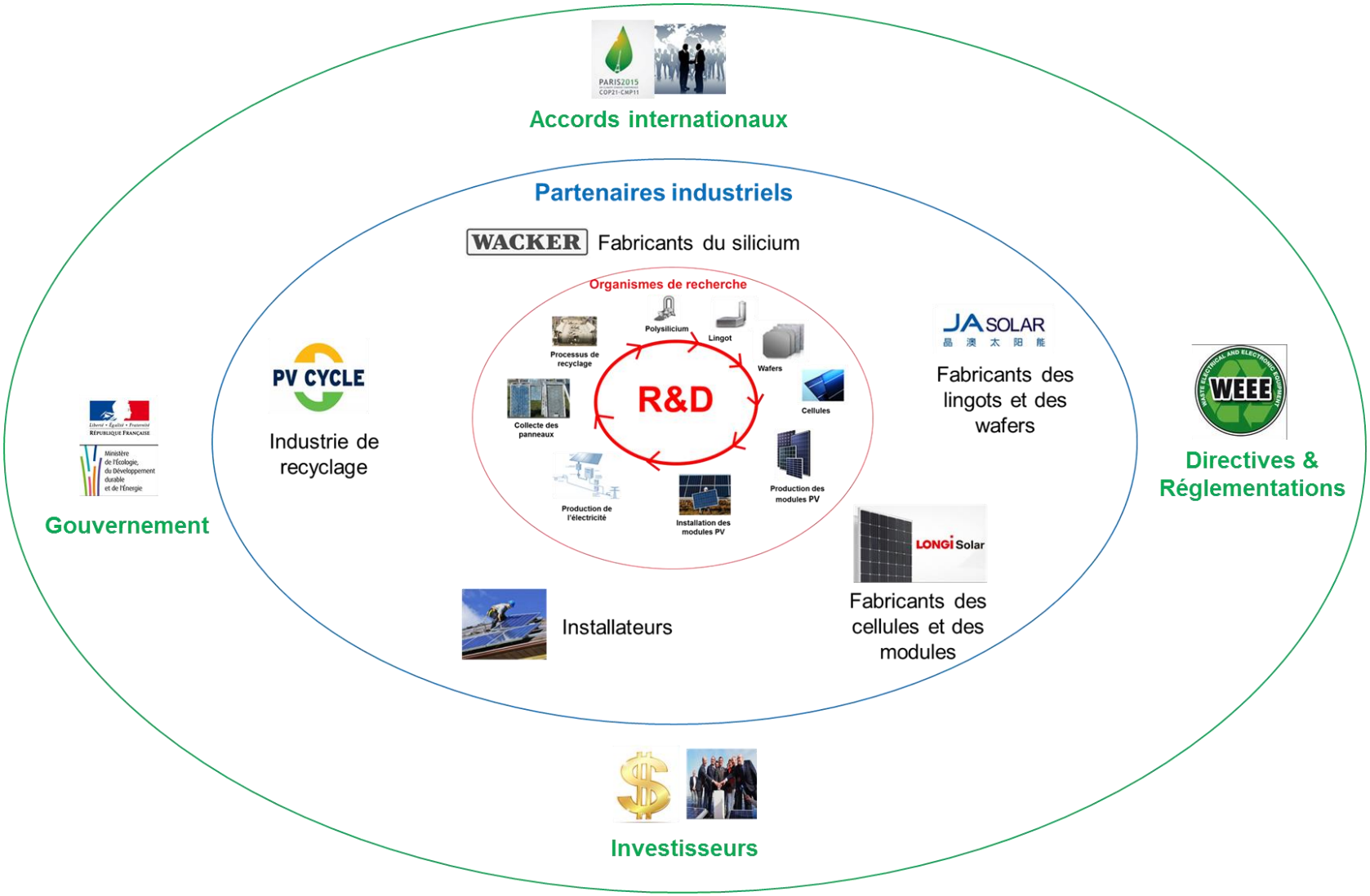


Figure 13. Exemple des différents acteurs dans de la chaine de valeur du secteur PV et les différentes interactions entre eux (Illustration par les premiers fabricants mondiaux de 2017 pour chaque brique technologique)

2 L'Éco-conception et la R&D industrielle dans le secteur PV

2.1 Les enjeux de la R&D industrielle (IR&D)

2.1.1 Projets de IR&D

La R&D offre une perspective linéaire et unidirectionnelle en trois étapes consécutives [53], qui peuvent également définir le processus de développement d'un produit :

1- La **recherche fondamentale**, visant à acquérir des nouvelles connaissances.
2- La **recherche appliquée**, orientée vers l'application dont le résultat est un modèle probatoire du produit.
3- Le **développement expérimental,** permettant de fournir des informations techniques de décision en vue du développement du produit.

La IR&D est inclue dans la troisième étape du modèle de R&D où l'idée de projet a dépassé l'étape de conception pour aboutir aux premiers prototypes, tests et expérimentations en laboratoire. Sur la base de ces prototypes, la réalisation du nouveau produit se fait sur des lignes pilotes industrielles et les premiers produits sont utilisés pour des tests finaux en environnement opérationnel. La IR&D peut être combinée avec le modèle « Design and Development » (D+D). Ce dernier qui décrit l'aspect innovation / développement et traduit souvent le succès de la R&D pour satisfaire les besoins du partenaire industriel puis déclencher le processus de production [54]. La R&D représente ainsi une partie majeure de l'investissement de l'entreprise dans l'innovation projets de R&D [55]. Selon Coombs et al. [56], les projets de R&D peuvent être classés en trois différents types : (1) projets orientés vers un nouveau produit, (2) projets orientés vers l'amélioration d'un produit ou d'une technologie déjà existante, (3) projets orientés vers la création ou le développement d'une nouvelle plateforme technologique. En se basant sur l'analyse de la section 1.2, les projets de R&D des technologies PV cristallins, investis par l'industrie PV, entrent ainsi souvent dans la catégorie (2). Le projet part alors d'une étude de la situation actuelle du marché avec une mise en évidence des lacunes des technologies existantes. Des options stratégiques pour combler ces lacunes sont par conséquent mises en œuvre.

Même si la IR&D joue un rôle primordial pour soutenir la survie des industries, les projets de R&D sont caractérisés par des résultats parfois incertains qui se traduisent par un risque élevé (faibles garanties, difficultés d'évaluation et de contrôle, etc…). D'où la nécessité d'un outil de gestion de la R&D.

2.1.2 L'échelle TRL « Technology Readiness Level » : un outil de gestion des projets de R&D

L'échelle des TRL « Technology Readiness Levels » est un modèle spécifique pour matérialiser la progression d'un projet de R&D. Il évalue le niveau de maturité d'une technologie jusqu'à son intégration dans un système complet et son industrialisation. Il est considérée comme un outil pertinent pour gérer l'innovation, notamment pour les investissements, en reliant les organisations industrielles (financeurs) et les organismes de R&D (financés) par un référentiel commun en cartographiant le portefeuille de la technologie en termes de risques potentiels [57].

De multiples déclinaisons existent, proposées par différentes agences comme le Département de la défense des États-Unis (DoD), l'Administration nationale de l'Aéronautique et de l'Espace (NASA), le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA)… Afin de standardiser cette échelle, la norme ISO 16920 a été mise en place en 2012, comme standard d'évaluation des différents niveaux de maturité des technologies [58]. Ainsi l'échelle TRL peut évaluer la maturité à travers neuf niveaux ; le TRL 1 est le plus bas et le TRL 9 est le plus haut.

En fonction de l'évolution du processus de développement du produit, les différents critères de chaque niveau sont définis selon la norme ISO 16920 comme suit [58] :

- **TRL 1 :** La recherche scientifique commence à traduire en recherche appliquée et en développement une idée, un concept.
- **TRL 2 :** Une fois que les principes physiques de base sont observés, les applications pratiques peuvent être identifiées.
- **TRL 3 :** Les activités (R&D) commencent. Ces activités doivent comprendre à la fois des études analytiques pour situer la technologie dans un contexte approprié et des études en laboratoire pour valider physiquement que les prédictions analytiques sont exactes.
- **TRL 4 :** Le concept est validé en laboratoire. Cette validation doit confirmer le concept formulé et doit être cohérente avec les exigences du système.
- **TRL 5 :** La validation se réalise dans un environnement représentatif. Les éléments technologiques de base doivent être intégrés à des systèmes raisonnablement réalistes.
- **TRL 6 :** À ce niveau, un prototype est mis en place et testé dans un milieu représentatif.
- **TRL 7 :** Un prototype doit être validé dans un environnement opérationnel. La validation doit prouver que la technologie est mature pour passer à la phase de production.

- **TRL 8 :** C'est la fin de processus du développement du produit. Le système est qualifié par des tests et la technologie est validée et reconnue mature.
- **TRL 9 :** Industrialisation et lancement de la production.

En se basant sur cette échelle et sur le concept de la IR&D, les projets de R&D sont ainsi caractérisés par une échelle TRL relativement basse (entre 3 et 7), comme indiqué par la Figure 14 . À ce niveau de TRL, les données de la technologie ne sont pas encore figées ou connues et par conséquent la technologie n'est pas complétement définie : il s'agit d'une technologie non mature. Introduire la composante environnementale dans le processus de développement de cette technologie signifie alors éco-concevoir une technologie non mature.

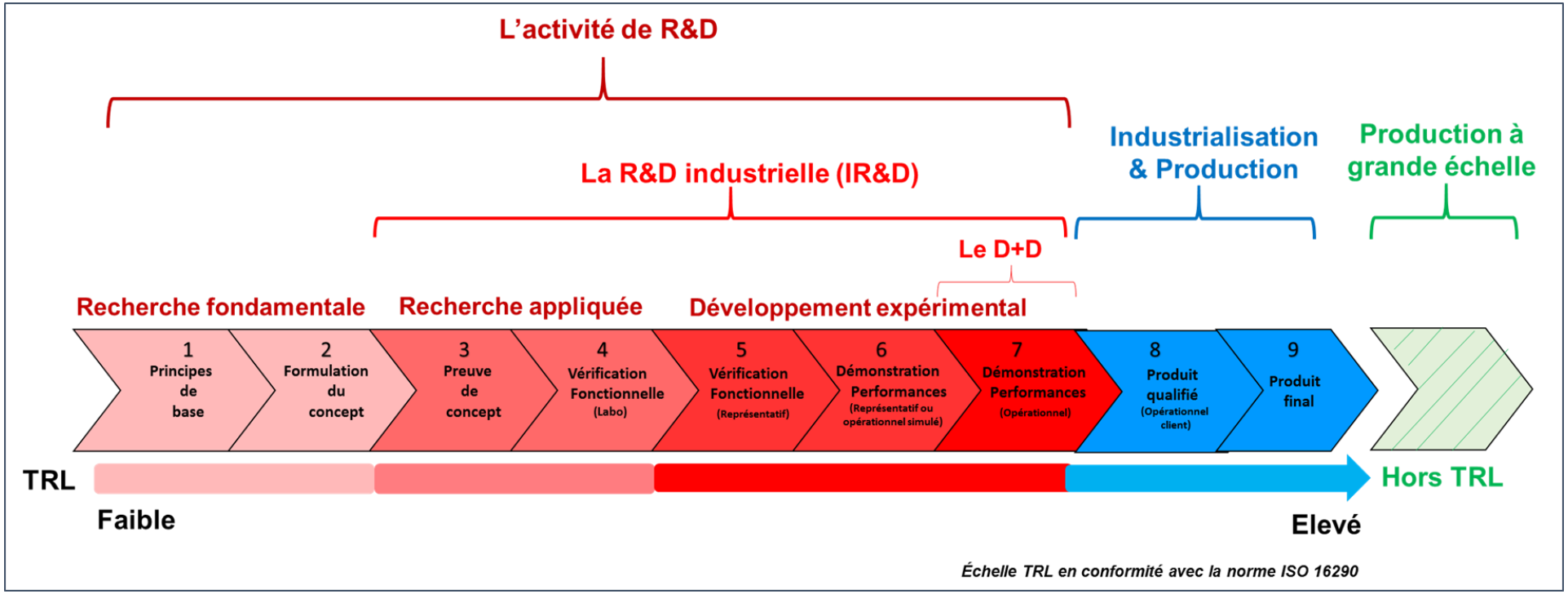


Figure 14. Positionnement des différentes étapes de développement dans l'échelle TRL

2.2 L'éco-conception

2.2.1 Définition et processus

L'éco-conception est définie l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO 14006, 2011) [59] comme *« l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement des produits, dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie d'un produit »*

Selon la norme (ISO 14006, 2011) par [59], le processus d'éco-conception commence par la spécification des fonctions du produit en précisant les objectifs et les priorités. Une évaluation environnementale des produits doit être réalisée et, en fonction des résultats environnementaux obtenus, des stratégies d'amélioration du produit seront proposées. Une communication sur les performances environnementales du produit peut être faite une fois le produit lancé. Les différentes étapes du processus d'éco-conception sont détaillées dans la Figure 15.

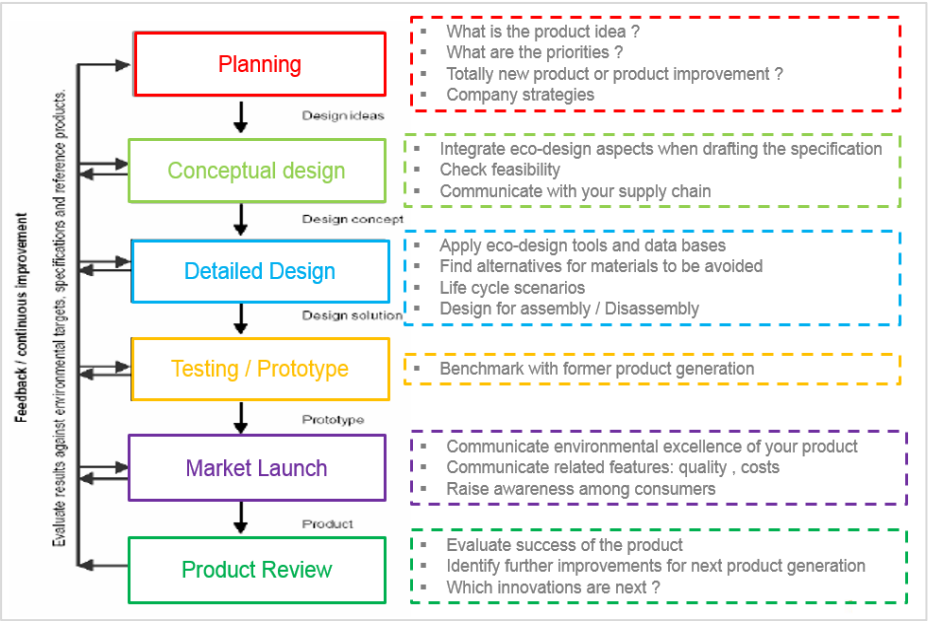


Figure 15. Différentes étapes du processus d'éco-conception adapté de la norme (ISO 2006,2011) [59]

Néanmoins, dans la norme, il n'est pas précisé d'outil spécifique pour l'analyse environnementale des produits. Étant donné que l'évaluation environnementale est l'élément clé dans le processus d'éco-conception, le choix de la méthode d'analyse est particulièrement important.

La portée de l'éco-conception d'un produit peut varier selon l'étude [60]. En effet, l'étude d'éco-conception peut être menée pour un objectif environnemental particulier (réduire les émissions de CO_2), pour développer un produit avec des perspectives sur son cycle de vie « life cycle thinking » ou pour éco-concevoir un produit.

Plusieurs outils d'éco-conception ont ainsi été développés, spécifiquement dans les secteurs automobile, électronique et bâtiment [61].

Cette approche est encore en émergence dans le secteur des énergies renouvelables, qui s'inscrivent déjà dans l'une des solutions pour le développement durable « *la volonté de concevoir des produits respectant les principes du développement durable et de l'environnement recourant aussi peu que possible aux ressources non renouvelables en leur préférant l'utilisation de ressources renouvelables ».* (ADEME) [62].

Bovea et al. [63] ont classé les différents outils d'éco-conception et ont analysé leurs fonctions ainsi que leurs limites afin de guider les concepteurs dans leur choix.

Les outils d'éco-conception plus pertinents, intégrant la composante environnementale comme critère d'analyse ont été synthétisés et englobent ainsi 86 outils qui varient en fonction de plusieurs critères [64]. La Figure 16 reformule les principaux critères considérés de ces outils que sont le type de résultats, la complexité d'analyse et le cycle de vie. Environ la moitié des outils d'éco-conception (51 %) prennent en compte le cycle de vie complet tandis que les autres ne prennent en compte que quelques étapes ou une seule étape du cycle de vie du produit.

Le type de résultats peut être classé en deux catégories : quantitatifs et qualitatifs. Le choix du type de résultats définit par conséquent la complexité d'analyse. Les outils quantitatifs nécessitent de grandes quantités d'information et du temps pour leur utilisation mais leurs résultats sont fiables. Le principal outil quantitatif est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour lequel il existe déjà plusieurs logiciels intégrés, supportés par des bases de données de matériaux et de processus de production, et des lignes directives de bonne pratique [65]. Les outils qualitatifs sont quant à eux plus simples et nécessitent ainsi moins d'information et de temps d'analyse. Malgré les inconvénients de ces derniers (taux d'incertitude élevé par exemple), les outils qualitatifs sont souvent les plus utilisés pour les concepteurs pour le développement interne des produits (60 %) (Figure 16).

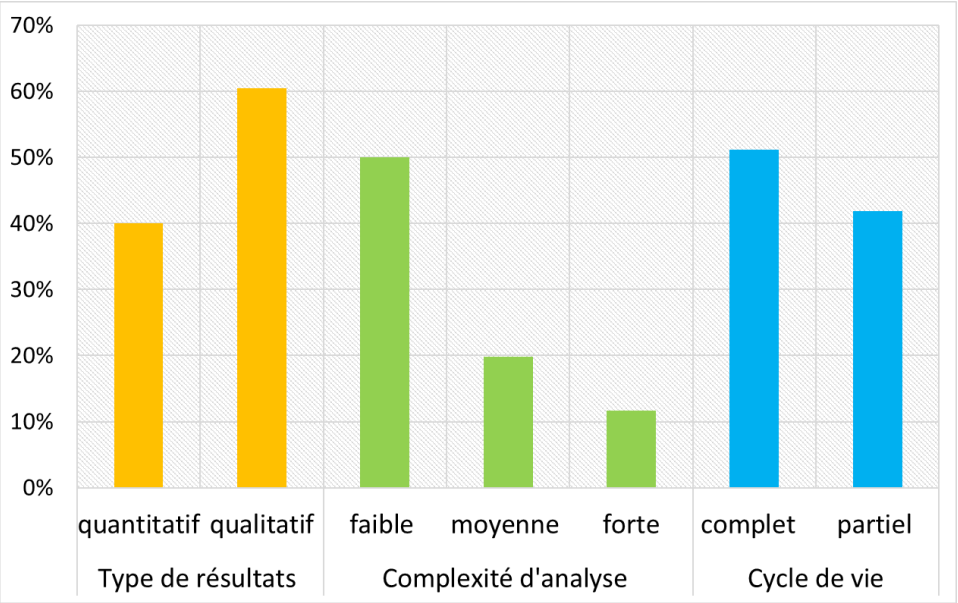


Figure 16. Principaux critères des outils d'éco-conception publiés dans la littérature

2.2.2 Réglementations et standards

Des lignes directives (ISO 14006 et 140062) ont été définies par l'Organisation Internationale de Standardisation pour aider les organismes à introduire l'aspect environnemental dans la conception et le développement des produits [59].

La règlementation sur les produits répond à trois grands enjeux environnementaux : (i) rendre les produits plus efficaces sur le plan énergétique, (ii) interdire la consommation des substances chimiques toxiques, (iii) s'assurer que l'élimination du produit en fin de vie peut être réalisée d'une manière appropriée.

Ainsi, la directive sur l'éco-conception (directive, 2008/98/EC) [66] a fixé les règles relatives à l'efficacité énergétique, comme l'étiquetage énergétique des produits pour consommer moins d'énergie. La réglementation REACH « Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals » (règlement européen, n° 1907/2006) [67] et la directive RoHS « Restriction of Hazardous Substances » (directive, 2011/65/UE) [68] visent à contrôler le contenu des substances chimiques et à éliminer / réduire les substances dangereuses. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (EEE), contenant souvent des substances dangereuses (piles, batteries…), sont quant à eux généralement réglementés par la directive (DEEE) (directive, 2012/19/UE) [69]. De nombreux EEE, tels que les appareils électroménagers et les aspirateurs sont également soumis à l'étiquetage énergétique obligatoire, réglementé par le biais de la directive (2010/30/UE) [70].

Des séries de normes, fusionnées dans les deux normes ISO 14040 et ISO 14044 et dédiées à la bonne pratique de l'ACV, ont été également mises en place. Elles décrivent les caractéristiques principales de l'ACV, et les exigences pour mener chaque étape de l'ACV. C'est dans ce cadre que s'inscrit la déclaration environnementale produit (PEF) « Product Environmental Footprint » définie par la commission européenne en 2013, et relative à l'utilisation de méthodes communes pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits et des organisations sur l'ensemble du cycle de vie [71]. Il vise à normaliser la manière dont les fabricants de produits font des déclarations environnementales. Les rapports publiés, déclarant les performances environnementales réelles d'un produit, se basent souvent sur l'ACV comme outil d'analyse en cohérence avec les exigences définies par la commission européenne (type et qualité des données, cycle de vie…) [30]. D'autres outils comme les Écolabels, les approches volontaristes où l'industriel s'engage à respecter un cahier des charges environnemental pour la conception et la fabrication de son produit, ont été établis pour compléter ces règlementations.

2.2.3 L'éco-conception dans le secteur PV

Des démarches environnementales ont été imposées par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire en France sur les installations PV [72]. Par exemple, les installations PV au sol supérieures à 250 kWp[5] sont soumises à une étude d'impact environnemental et doivent respecter certaines considérations environnementales comme l'implantation en zone non inondable, le risque d'incendie, la législation sur l'eau… Une déclaration environnementale pour les systèmes PV (PEF) a été également publiée en 2015 [30], présentant les impacts environnementaux des technologies PV standard (mono-Si, multi-Si et Cdte) tout au long du cycle de vie. Des « guidelines » sur l'impact environnemental des systèmes PV, ont été également publiés par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) dans le cadre de la tâche 12 qui vise à aider les décideurs en matière de politique énergétique et environnementale [73]. Des projets européens visant à implémenter l'économie circulaire[6] dans le secteur PV, ont également été lancés, comme par exemple le projet CABRISS qui « *vise à développer un écosystème, inexistant à ce jour, permettant de récupérer les matériaux à forte valeur ajoutée et les réinjecter dans la production de panneaux PV et d'autres secteurs industriels* » [75]. Enfin, un grand nombre d'études ACV des technologies PV ont été publiées, présentant ainsi le profil environnemental des systèmes PV [76].

[5] Puissance délivré par un système PV

[6] Un modèle économique dont l'objectif est de produire des biens et des services de manière durable [74]

Cependant, même si les démarches environnementales pour les systèmes PV commencent à croître, ces démarches agissent sur des technologies PV matures et déjà commercialisées (échelle TRL fort).

2.3 Énoncé du deuxième constat

À L'issue de cette analyse, deux conclusions peuvent être dressées :

- L'activité de IR&D, et en particulier l'innovation dans le secteur du PV se fait à échelle TRL bas, où la technologie n'est pas mature et les données ne sont pas encore figées ou connus.
- Les réglementations environnementales, spécifiquement dans le secteur PV, s'appliquent à des technologies matures et commercialisées où la qualité des données est importante, et le profil environnemental d'une technologie standardisés.

Constat 2 :

Intégrer la composante environnementale dans le secteur PV signifie éco-concevoir des technologies non matures, pour lesquelles un manque de méthodologies et de guides peut se faire ressentir.

Un bilan des ACV PV publiées pourrait aider à comprendre comment les évolutions technologiques peuvent impacter le bilan environnemental des systèmes PV, et accompagner ainsi la démarche d'innovation.

3 L'Analyse de Cycle de Vie des systèmes PV

3.1 L'Analyse du Cycle de Vie

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation normalisée (ISO 14040 et ISO 14044) qui permet « *l'évaluation des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits tout au long de son cycle de vie* » (ISO, 2006a) [77].

Comme le montre la Figure 17, le cycle de vie d'un produit passe par plusieurs phases ; extraction de la matière première, fabrication, distribution, usage et fin de vie.

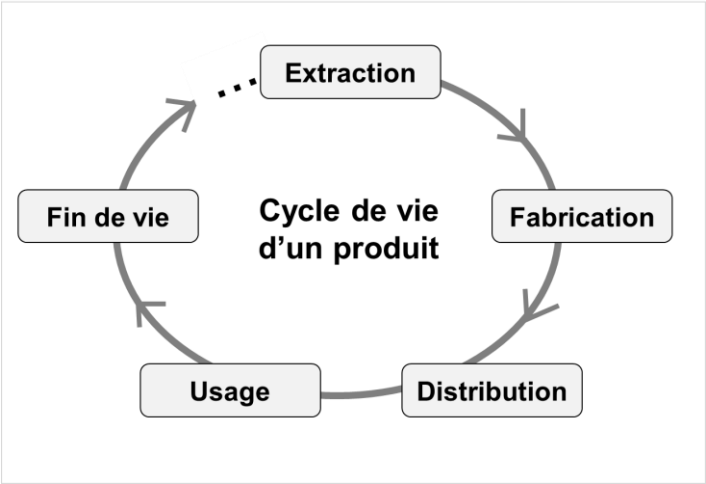


Figure 17. Les différentes étapes du cycle de vie d'un produit

Cette méthode est articulée en quatre phases bien distinctes mais interdépendantes, comme l'illustre la Figure 18.

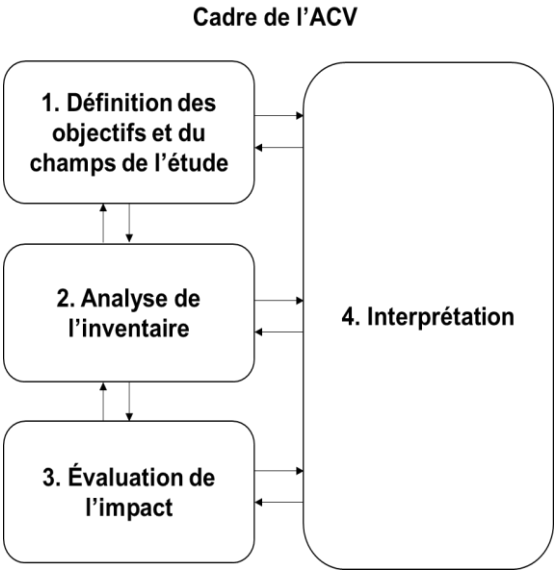


Figure 18. Différentes étapes de l'ACV [76]

- **Etape1 : définition des objectifs et du champ de l'étude**

Chaque ACV est construite pour répondre à des questions précises. La définition des objectifs et du champ de l'étude est primordiale dans la réalisation de l'ACV parce qu'elle conditionne les choix méthodologiques de chaque étape (inventaire, évaluation des impacts, interprétation) et par voie de conséquence les résultats.

On retrouvera :

- La définition des frontières de l'étude : les phases du cycle de vie à prendre en compte
- La définition des fonctions du produit
- Les types et sources des données
- L'exigence de la qualité des données : les résultats doivent servir de base à une re-conception du produit et peuvent ainsi conduire à des choix de nouveaux procédés, matériaux, lieu de fabrication… Les données doivent être représentatives de la situation actuelle (bonne corrélation temporelle, géographique et technologique). L'exigence de la qualité est d'autant plus importante si les résultats peuvent être en partie communiqués au public.
- Les catégories d'impacts et les indicateurs associés nécessaires à leur évaluation
- L'unité fonctionnelle : c'est l'unité à laquelle sera rapporté l'ensemble des flux représentatifs de la fonction du produit ou service étudié. Elle permet une comparaison objective de produits équivalents sur une même base de référence.

- **Étape 2 : analyse de l'inventaire**

Les flux de matière et d'énergie entrants et sortants sont ensuite quantifiés. On constitue ainsi l'inventaire, un véritable travail de comptabilité analytique des flux. Les limites initialement fixées peuvent être élargies et la qualité des données redéfinies. Le recueil et le traitement des données se font conformément à la définition des objectifs.

- **Étape 3 : évaluation des impacts environnementaux**

La démarche d'ACV s'efforce de rendre l'évaluation aussi objective que possible en comptabilisant des flux quantifiables et mesurables. L'étape d'évaluation des impacts a pour but de traduire les consommations et les rejets recensés lors de l'inventaire en impacts environnementaux (effet de serre, destruction de la couche d'ozone, acidification, eutrophisation, toxicité …). Pour cela, ces flux sont classés dans les différentes catégories d'impact auxquelles ils participent. Ces ensembles de flux sont ensuite caractérisés, à partir

des indicateurs, en impacts environnementaux. Le choix des catégories d'impact et des indicateurs associés se fait en relation avec les objectifs et les systèmes étudiés ; il est possible de réaliser une ACV dont l'objectif est la réduction des émissions de CO_2 et par conséquent l'analyse porte sur un seul impact. Selon le système étudié, les résultats peuvent être significatifs pour certains impacts et négligeables pour d'autres.

- **Étape 4 : interprétation des résultats**

L'interprétation a pour objectif d'analyser les résultats et d'expliquer les limites de l'inventaire et/ou de l'évaluation des impacts, afin de fournir des recommandations de manière la plus transparente possible. L'interprétation des résultats est obtenue en fonction des objectifs retenus : cette étape est itérative avec les 3 précédentes de manière à toujours valider que les résultats obtenus permettent de répondre aux objectifs de l'étude (par exemple, il arrive que le non disponibilité de certaines données puisse conduire à des résultats non fiables. C'est également ici que l'on tentera d'évaluer la robustesse des résultats (en réalisant par exemple des analyses de sensibilité), notamment pour s'assurer que les incertitudes et variabilités qui y sont liées sont bien d'un ordre de grandeur inférieur à celui des différences constatées entre les performances environnementales des différents systèmes étudiés.

3.2 ACV des systèmes PV : une variabilité des résultats

3.2.1 Approche d'analyse des études ACV PV

Étant donné que plusieurs études ACV PV ont été publiées dans la littérature, l'objectif de cette partie est d'analyser et comprendre la méthodologie adoptée, les hypothèses définies et identifier également les paramètres critiques des modules PV qui pourraient limiter l'éco-conception à échelle TRL bas par la suite.

Pour cela, 30 études d'ACV des systèmes PV cristallins, publiées entre 2005 et 2016, ont fait l'objet d'une analyse détaillée [78] (Annexe 1). L'année 2005 a été choisie comme seuil parce que, d'une part, la production mondiale de cellules photovoltaïques a dépassé 1 GWp cette même année [79] et d'autre part, la méthodologie de l'ACV PV a été structurée par quelques études majeures dans cette période.
Comme le montre la Figure 19, trois aspects ont été identifiés et analysés pour chacune des 30 études :

1) La **méthode ACV implémentée** regroupant la frontière du système défini, les catégories d'impact et l'unité fonctionnelle choisie.
2) Les **paramètres PV** comme les résultats environnementaux sont souvent exprimés par unité d'électricité produite (kWh), le choix des paramètres a été basé sur les variables qui définissent l'électricité produite du système PV, comme exprimé par l'équation (2), à savoir le rendement du module, l'éclairement, le performance ratio, la durée de vie et le taux de dégradation.
3) La **qualité des données** de modélisation de l'inventaire (procédés de fabrication, mix énergétiques, caractéristiques des composants PV…) a été également étudiée.

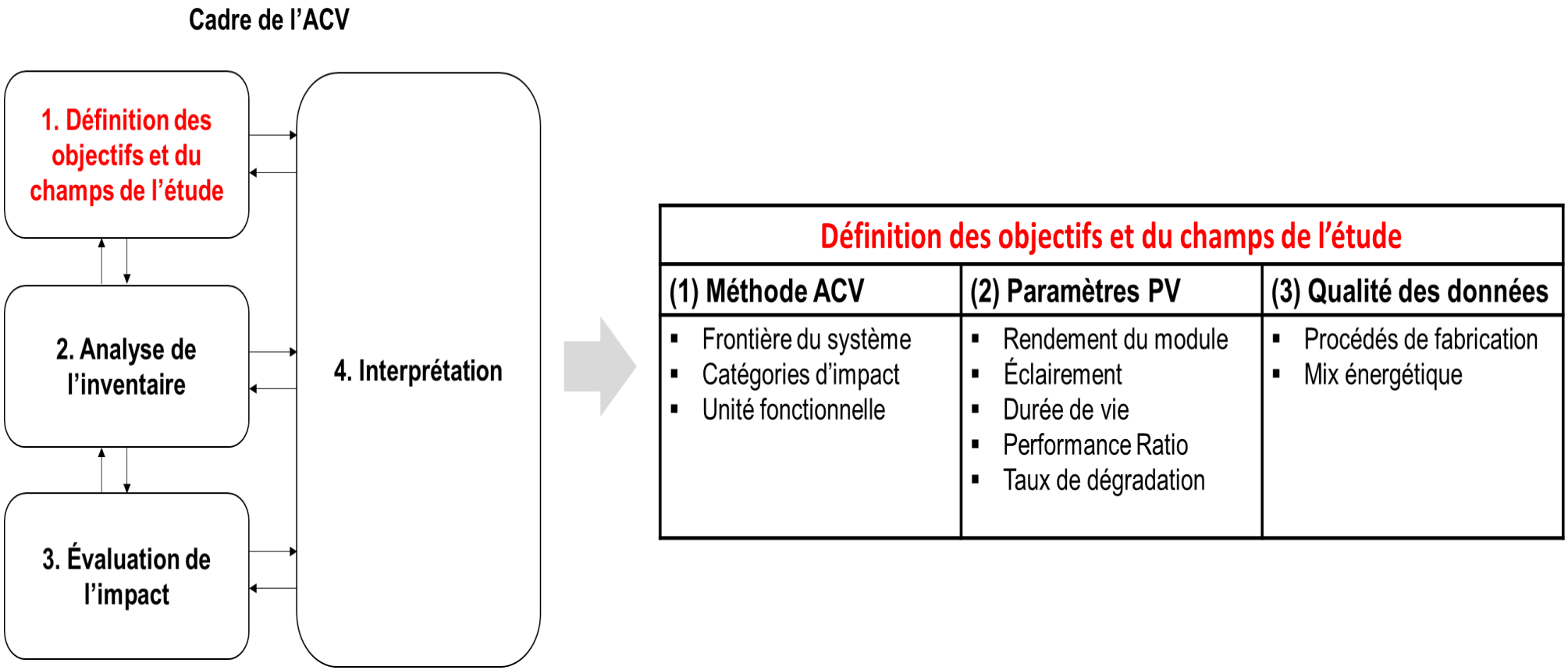


Figure 19. Liste des hypothèses extraites des 30 études ACV PV pour l'analyse de variabilité

3.2.2 Variabilité des résultats environnementaux des ACV PV

L'analyse de l'état de l'art a montré que les hypothèses, les choix méthodologiques et les résultats des études ACV PV publiées présentent d'importantes divergences.

(1) Variabilité dans le choix de la méthode ACV :

L'analyse des 30 études d'ACV PV, présenté par la Figure 20 a montré une variabilité dans le choix de définir la frontière du système, les catégories d'impact et l'unité fonctionnelle.

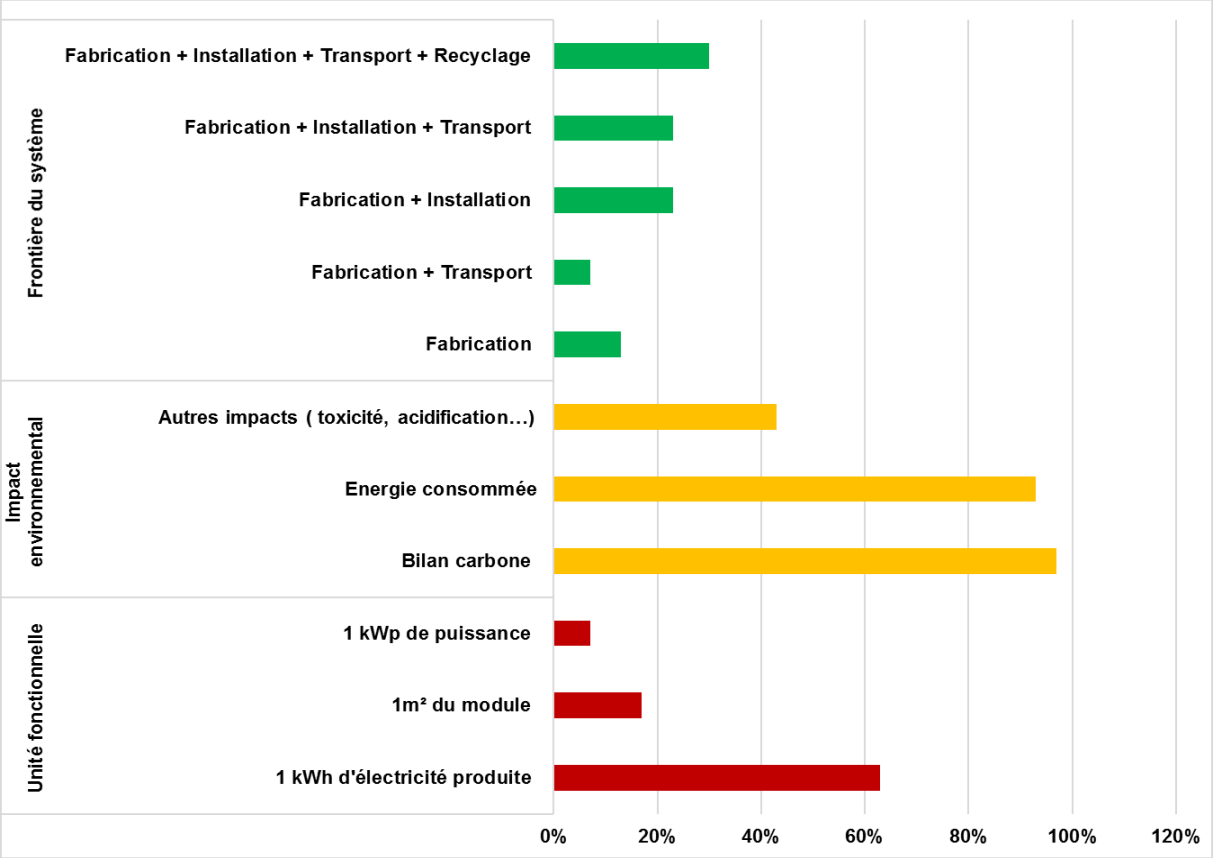


Figure 20. Répartition des 30 études ACV PV dans la définition de l'unité fonctionnelle, des catégories d'impact et de la frontière du système

A. <u>Frontière du système :</u>

Comme le montre la Figure 20, les frontières du système définies dans les 30 études ACV PV varient d'une étude à l'autre ; 13 % des études ont limité l'analyse à la phase de fabrication, 23% ont pris en compte la phase d'installation. Les frontières du système ont été étendues dans d'autres études pour inclure le transport, qui relie ces différentes étapes, et la fin de vie

du PV, en tenant compte du traitement des déchets et du recyclage de certains matériaux. La fin de vie a été prise en compte par 30 % des études traitées. Certaines études ont adopté des scénarios de recyclage des panneaux PV [80] [30], alors que d'autres ont considéré que les panneaux en fin de vie étaient mis en décharge sans récupération de matière ou d'énergie [81] ou ont exclu cette étape de la limite du système en le justifiant par le manque de données.

Cette variabilité dans le choix des phases à inclure dans la frontière du système a un impact significatif sur les résultats de l'ACV. Wyss et al. [30] ont ainsi évalué l'impact environnemental par étape du cycle de vie pour le même système PV : sur l'ensemble du cycle de vie, l'empreinte carbone atteint 53,8 gCO_2éq/kWh et pour uniquement l'étape de fabrication, cette valeur est égale à 45,9 gCO_2éq/kWh. D'autres exemples peuvent être cités, comme Raugei et al. [82] qui ont étudié l'impact du BOS sur différentes catégories d'impact. Les résultats ont montré une augmentation d'environ 35 % de l'énergie consommée CED (Cumulative Energy Demand) et d'environ 13 % de l'empreinte carbone GWP (Global Warning Potential) par l'intégration du BOS dans l'ACV. Wyss et al. [30] ont effectué une analyse de sensibilité sur l'inclusion de l'onduleur dans le BOS et ont montré que selon les catégories d'impact, l'impact de ce composant varie entre 0 % et 84 %.

B. Catégories d'impact :

La majorité des études traitées dans ce travail ont évalué l'empreinte carbone et le CED (Figure 20). Cependant, seulement 43 % ont évalué d'autres impacts tels que l'acidification, l'appauvrissement de la couche d'ozone, la toxicité humaine et l'épuisement des ressources. Comme les résultats de l'ACV varient selon les catégories d'impact, il convient de mentionner que l'empreinte carbone et la consommation d'énergie ne sont pas les seuls arguments à prendre en compte lors de la prise de décision concernant le profil environnemental d'un système photovoltaïque. Il existe un risque que les résultats liés à certains autres impacts, ignorés dans ce cas, soient élevés.

C. Unité fonctionnelle :

Pour un système PV, l'unité fonctionnelle peut être définie comme l'énergie produite (kWh), la puissance nominale (kWp) ou la surface du module (m^2) [83] :

- L'énergie produite par le système PV est adaptée pour comparer une technologie PV à une autre ou à une autre source d'énergie.
- Le taux de puissance délivrée par le système PV est adapté pour évaluer l'étape de fabrication d'une technologie PV et comparer deux technologies PV.

- La surface du module est intéressante lorsque la surface est un facteur important dans l'étude ACV, comme la quantification de l'impact environnemental d'un bâtiment équipé de panneaux photovoltaïques.

Comme le montre la Figure 20, le kWh a été défini comme unité fonctionnelle dans la majorité des études ACV PV, permettant ainsi le positionnement de l'énergie PV par rapport aux autres sources d'énergie.

Cette analyse montre qu'il y a une grande variabilité dans le choix de la méthode d'ACV qui dépend principalement des objectifs de l'étude, ce qui pourrait ainsi complexifier voire bloquer la prise de décision concernant le profil environnemental d'une technologie PV.

(2) Variabilité des paramètres PV :

A. Rendement du module PV :

Le rendement des modules PV évolue rapidement et devrait continuer à évoluer avec les progrès réalisés dans le domaine [84].
Le choix de la valeur de rendements varie d'une étude à une autre [78] : le Tableau 3 illustre les rendements utilisés dans les 30 études traitées en fonction de leur date de publication.

Tableau 3. Moyennes des rendements définis dans les 30 études ACV PV

	2005 - 2008	**2009 - 2012**	**2013 - 2016**	**Moyenne 2005 - 2016**
Nombre des études	15	7	8	30
Multi-Si	12,3 %	13,5 %	13,6 %	13,1 %
Mono-Si	12,8 %	14,2 %	14,3 %	13,8 %

La moyenne de rendement est de 13,2 % pour les modules multi-Si et de 13,8 % pour les modules mono-Si. Ces valeurs sont très faibles par rapport aux améliorations significatives de l'industrie photovoltaïque depuis 2008, où le rendement du multi-Si a déjà dépassé 14 % [85]. De plus, les moyennes estimées pour les publications sur 2013-2016 (13,6 % pour le multi-Si et 14,4 % pour le mono-Si) sont très faibles par rapport aux rendements des modules standards dans le marché PV aujourd'hui (environ 16,3 % pour le multi-Si et 17,2 % pour le mono-Si pour l'année 2017). Il faut noter que ce paramètre est aussi lié à la technologie de

cellule utilisée : par exemple un module mono-Si avec une cellule Al-BSF a un rendement de 17,2 %, alors que le rendement d'un module mono-Si PERC est à 18,5 %.

Certaines études ont effectué une analyse de sensibilité pour étudier l'impact du rendement sur les profils environnementaux des systèmes PV [86] [87]. Les résultats ont montré que le rendement est inversement proportionnel à l'empreinte environnementale.
Par conséquent, le choix de ce paramètre a un impact significatif sur les résultats.

B. L'Éclairement :

Toutes les études d'ACV PV doivent définir une irradiation annuelle moyenne, spécifique à la zone géographique étudiée. Selon le lieu, les valeurs d'éclairement peuvent être définies à partir du système d'information PVGIS[7] (Photovoltaic Geographical Information System) du Centre Commun de Recherche (JRC).
La variabilité du choix de ce paramètre dans les études traitées a été étudiée (Figure 21). L'analyse a permis de déduire qu'environ 60 % des valeurs d'irradiation définies dans les 30 études d'ACV varient entre 1400 et 1900 kWh/m²/an ; 12 études supposant que 1700 kWh/m²/an représentent le sud de l'Europe. Cependant, la valeur d'irradiation solaire dans le sud de l'Europe peut être étendue jusqu'à 2400 kWh/m²/an (Figure 22).
Certains travaux ont défini des valeurs d'éclairement qui correspondent à des lieux géographiques spécifiques, comme Fthenakis et Kim [88] qui ont choisi 1800 kWh/m²/an comme valeur moyenne d'éclairement aux États-Unis, ou Kim et al [89] qui ont défini 1310 kWh/m²/an pour leur étude en Corée. Wyss et al.[30] ont estimé à 1331 kWh/m²/an une valeur moyenne d'irradiation représentative de l'Europe à un angle optimal, pondérée par le lieu d'installation du système PV.

Enfin, Stoppato [90] a étudié l'influence de ce paramètre sur le temps de retour énergétique EPBT (Energy Pay Back Time). Pour le même type de système PV, l'EPBT varie de 1,7 ans pour 2200 KWh/m²/an à 3 ans pour 1100 kWh/m²/an. L'impact par conséquent sur les résultats environnementaux est significatif.

[7] Outil gratuit mis en place par la commission Européenne pour accéder à des données climatiques dans toute l'Europe

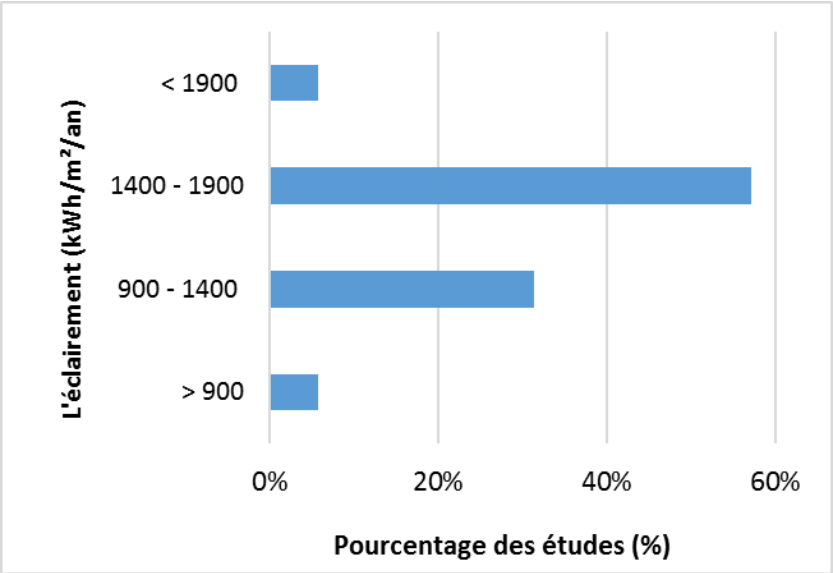


Figure 21. Distribution des 30 études ACV PV en fonction des valeurs d'éclairement définies

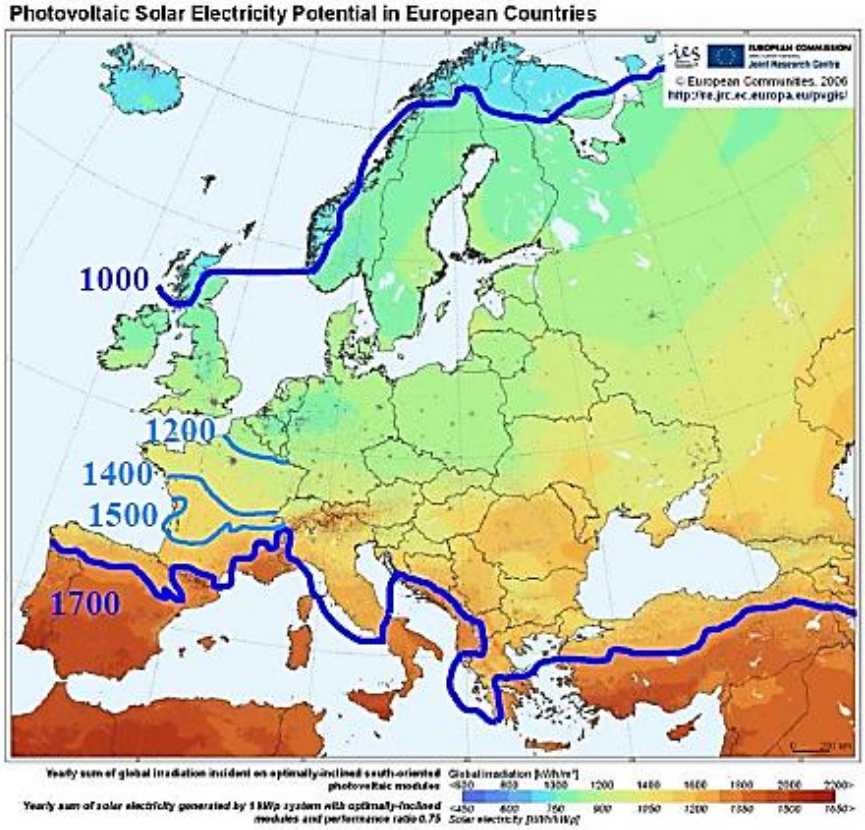


Figure 22. Carte des éclairements annuels moyens en Europe pour des modules à inclinaison et orientation fixes optimales à laquelle ont été rajoutées des lignes d'iso-éclairement

C. *La durée de vie des systèmes PV :*

La durée de vie d'un module PV est une notion relativement ambigüe. En effet, à la fin de cette durée, ce n'est pas le module qui cesse de fonctionner mais le décideur qui choisit de le remplacer, à cause d'un rendement devenu trop faible. Il s'agit donc d'une valeur non scientifique, fondée sur la rentabilité économique. Une valeur de référence de 30 ans est proposée pour les modules cristallins [83] et est largement utilisés dans les études ACV PV comme le montre la distribution des études considérées en fonction de cette valeur sur la Figure 23. Quelques études ont néanmoins choisi 20 ans et 25 ans comme durée de vie pour leurs systèmes. Par exemple, Stoppato [90] a choisi 28 ans comme valeur moyenne rapportée par de nombreux auteurs. Pacca et al [91] ont considéré que la durée de vie du module dépend de la technologie PV et ont supposé 25 à 30 ans pour les modules cristallins. Pehnt [92] a estimé à 25 ans la durée de vie utile des modules multi-Si et s'attend à une augmentation de cette valeur pour atteindre 30 ans d'ici 2030 avec le progrès des procédés de fabrication.
La moyenne de la durée de vie dans ces études est estimée à 28 ans alors que l'enjeu technologique aujourd'hui dans le secteur PV est d'augmenter la durée de vie pour atteindre 40 ans en 2050 [93].

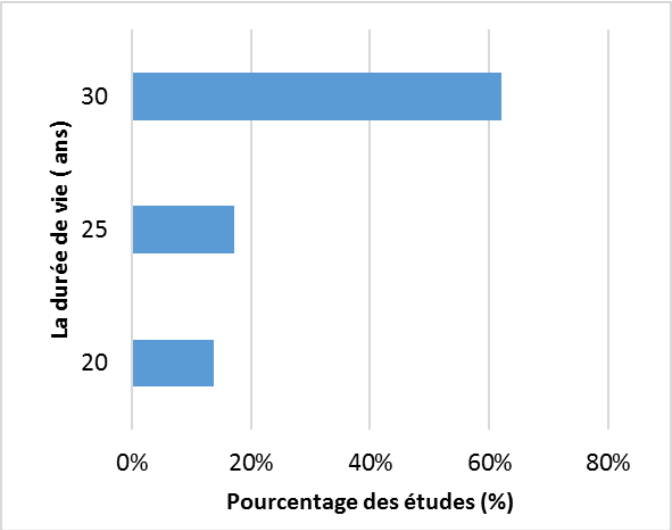


Figure 23. Distribution des 30 études ACV PV en fonction des valeurs de la durée de vie définies.

D. *Performance Ratio (PR) des systèmes PV :*

Le PR définit les pertes du système. Ce rapport est influencé par de nombreux facteurs tels que le rendement de l'onduleur, la température de fonctionnement des modules et le rendement des modules sous différentes valeurs d'éclairement.

Comme ce facteur est difficile à estimer, une valeur de 0,75 pour les installations de toiture et de 0,8 pour les installations au sol a été recommandée [83]. Les valeurs de PR estimées dans la majorité des études se situaient entre 0,75 et 0,79 (Figure 24). Cependant, il est important de mentionner que le PR augmente avec les améliorations récentes des onduleurs et la prédominance des installations au sol, qui ont un PR plus élevé lié aux températures plus basses des modules, par rapport à une installation en toiture.

Certaines études ont défini des valeurs spécifiques comme Ito et al. [94] qui ont étudié la performance environnementale d'un système PV à grande échelle dans le désert de Gobi et ont défini un PR autour de 0,78 où les conditions du désert et le coefficient de température des modules PV ont été pris en compte. Lenzen [86] a estimé 0,85 comme valeur de référence pour les systèmes PV à grande échelle puis a varié la valeur du PR entre 0,8 et 0,9.

Il faut aussi mentionner que 30% des études n'ont pas mentionné la valeur du PR choisie même si ce paramètre a des conséquences significatives sur l'estimation de l'électricité annuelle produite et donc sur les résultats de l'impact environnemental.

Enfin, de nombreuses études d'ACV n'ont pas indiqué dans leur choix si la valeur PR était considérée comme valeur initiale ou moyenne tout au long de la durée de vie. Cependant, une telle précision est nécessaire afin d'utiliser correctement les valeurs PR dans les calculs, puisqu'elle évite le double comptage de la dégradation du système PV au cours de la durée de vie.

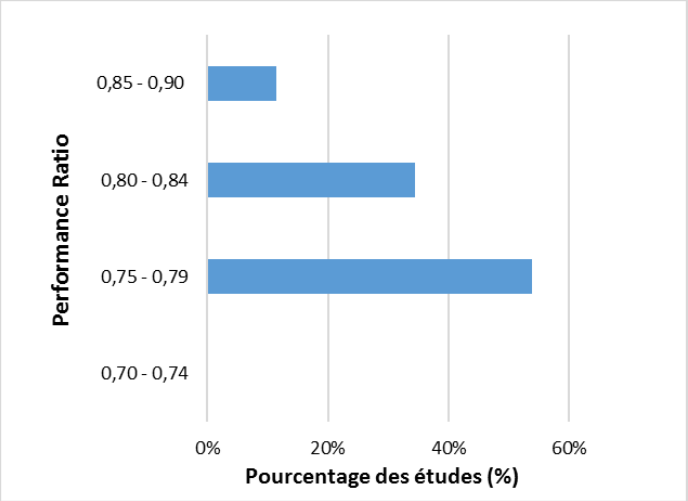


Figure 24. Distribution des 30 études ACV PV en fonction des valeurs du performance ratio définies.

E. Taux de dégradation (DR) des systèmes PV :

Le DR est la dégradation annuelle moyenne de l'efficacité du système pendant sa durée de service. Au fur et à mesure que les modules et les composants des systèmes vieillissent, ils perdent graduellement de leur performance.

D'après l'analyse des 30 études, peu d'études ont pris en compte ce paramètre (Figure 25) ; Wild-Scholten [95] a estimé un taux de mortalité de 0,67 % par an. Selon Frischknecht et Itten [30] une dégradation de 0,7 % par an peut être estimée et par conséquent la performance du panneau est réduite de 21 % au cours des 30 ans. Palanov [96] a supposé un facteur de DR de 0,5 % par an pour les modules mono-Si.

En plus de cette variabilité dans la définition de ce paramètre, la littérature mentionne rarement le facteur DR, ce qui rend difficile la comparaison entre les études et réduit donc la fiabilité des résultats de l'ACV.

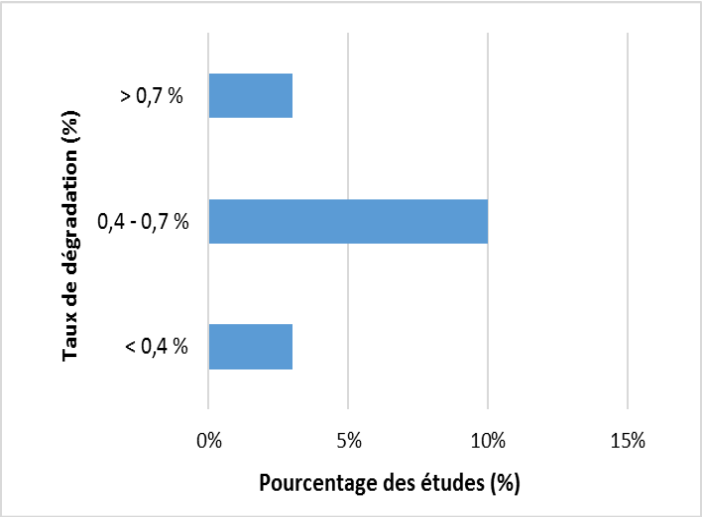


Figure 25. Distribution des 30 études ACV PV en fonction des valeurs du taux de dégradation définies

Cette analyse montre qu'il existe une variabilité importante du choix des paramètres PV qui n'est pas forcément en alignement avec l'état de l'art et les progrès technologiques dans le secteur PV.

(3) Qualité des données :

A. <u>Composants PV et procédés de fabrication :</u>

Comme démontré dans la section 3.2.1, le système PV est un système complexe qui nécessite une grande quantité de données, ce qui peut être source d'incertitude si les données ne sont pas bien référencées. L'analyse des études ACV PV a montré que les caractéristiques des composants PV ainsi que leurs procédés de fabrication ne sont pas souvent détaillés et certaines études ont utilisé des données relativement anciennes, comme par exemple Kim et al. [89] et Fthenakis et Kim [88] où des wafers de 240 µm et 270-300 µm d'épaisseur respectivement ont été définis, alors que cette valeur a été rapportée à 180 µm depuis 2012 [27]. Les procédés de fabrication étaient également basés, dans la plupart des études, sur

d'anciens procédés tels que le sciage au fil d'acier (SW) qui est remplacé aujourd'hui par le sciage au fil diamants (DWS) [27]. Or de tels changements peuvent conduire à des améliorations significatives du profil environnemental d'un système PV.

B. Mix énergétique :

L'empreinte environnementale des panneaux photovoltaïques provient en grande partie (à plus de 70%) de la phase de fabrication [30] . Cette contribution s'explique par l'importance de l'énergie électrique nécessaire à cette étape. Le part des sources d'électricité variant d'un pays à l'autre, a également un impact en termes d'empreinte environnementale. Par exemple, les combustibles fossiles auront un impact plus important car ils émettent 100 fois plus de gaz à effet de serre que l'hydroélectricité ou l'électricité nucléaire. C'est pourquoi le mix électrique est un paramètre important à considérer dans l'analyse environnementale des systèmes PV.
Plusieurs mix électriques ont été définis dans les études ACV traitées. Par exemple, le choix du mix électrique de Frischknecht et al. [83] a été basé sur la part de marché pour la production des différents composants du module (lingots, wafers, cellules, modules) en 2011 (78 % en Chine, 14 % en Europe et 6 % en Asie et Pacifique). Desideri et Yan [80] ont évalué un système spécifique installé en Italie et ont choisi l'électricité chinoise pour la fabrication des modules. Palanov [96] a choisi le mix électrique européen pour modéliser les différentes parties et processus du système PV attendus pour la phase d'assemblage.
Par ailleurs, Il est important de souligner que de nombreux auteurs n'ont pas mentionné la source d'électricité utilisée dans leurs études.

Considérant l'impact de ce paramètre sur les résultats de l'ACV, Fthenakis et al. [63] ont ajouté trois scénarios dans leur étude utilisant de l'électricité en provenance d'Europe, de Corée et de Malaisie. Les résultats ont montré une variabilité selon les pays : les résultats de l'empreinte carbone étaient les plus faibles en Europe (269 kgCO_2éq/m² par rapport au 307 kgCO_2éq/m² pour la Malaisie) en raison de la part faible des combustibles fossiles dans la production d'électricité. Wild-Scholten [95] a réalisé une analyse de sensibilité où la modélisation a été réalisée par le mix européen et le mix chinois. Les résultats ont montré une empreinte carbone deux fois plus élevée (environ 80 gCO_2eq/kWh) qu'avec un mix européen (environ 40 gCO_2eq/kWh) mettant en évidence l'impact significatif de ce paramètre.

Dans la Figure 26, la part de marché des composants PV en 2008 et 2017 est représenté [97]. Un changement important peut ainsi être observé depuis 2008 : la prédominance récente de l'Asie de l'Est dans la fabrication des matériaux photovoltaïques exige par conséquent de faire preuve de prudence lorsqu'il s'agit d'adapter les hypothèses en termes du mix énergétique.

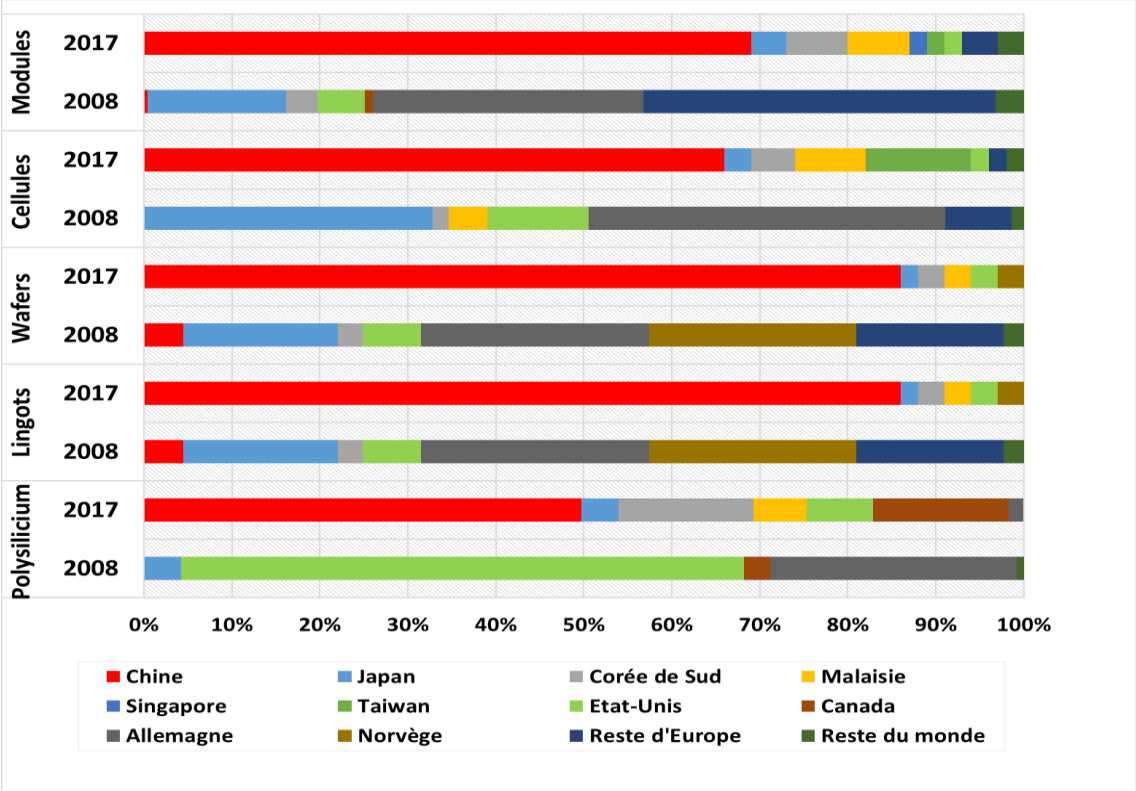


Figure 26. Évolution de la part de marché des composants PV en 2008 et 2017 selon le pays de production

À l'issue de cette synthèse bibliographique, plusieurs lacunes ont été identifiées sur le plan méthodologique des études ACV PV :

- **La variation du champ de l'étude pour l'évaluation environnementale des systèmes PV.**
- **Le manque de transparence et de cohérence dans les paramètres clés des systèmes PV définis.**
- **La variabilité de la qualité des données collectées pour la modélisation des composants du système PV.**

Ces limites peuvent impacter la fiabilité des résultats environnementaux, ce qui rend la prise de décision, dans un objectif d'éco-conception, difficile.

3.3 Criticité des paramètres PV et absence d'une référence dynamique

Afin d'identifier l'impact des paramètres analysés dans la section précédente (rendement, éclairement, PR, durée de vie, DR), une analyse de sensibilité a été réalisée. En se basant sur les résultats de l'empreinte carbone des modules mono-Si [98], chaque paramètre a été modifié de ±10%. Les résultats sont présentés dans la Figure 27.

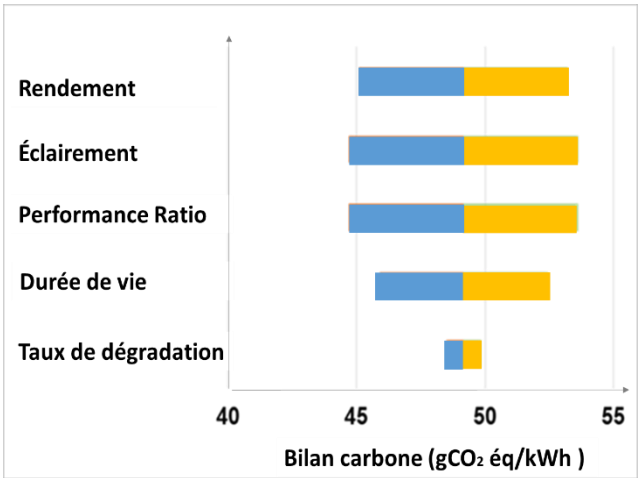


Figure 27. Impact de la variation de ±10% des valeurs des paramètres PV sur les résultats de l'empreinte carbone des modules mono-Si.

Les résultats de l'empreinte carbone sont presque linéairement affectés par l'irradiation solaire, le PR, l'efficacité et la durée de vie. Cette analyse de sensibilité montre que, à l'exception du DR, tous ces paramètres PV ont un impact significatif sur le changement climatique. Il convient donc d'aller plus loin et de proposer une classification de ces paramètres par ordre de criticité. Le taux de criticité des paramètres PV a ainsi été estimé en se basant sur la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). En se basant sur les valeurs des paramètres définis dans les 30 études d'ACV, le coefficient de variation a été également calculé pour chaque paramètre.

L'impact d'un paramètre multiplié par son coefficient de variabilité donne l'ordre de grandeur de sa criticité. La normalisation de cette criticité est représentée dans la Figure 28.
Les résultats montrent que l'éclairement est le principal paramètre critique qui doit être pris en compte dans l'étude ACV. Le choix de la durée de vie et de l'efficacité est deux fois moins critique mais reste significatif par rapport au choix du PR et du DR, quatre fois moins critique.

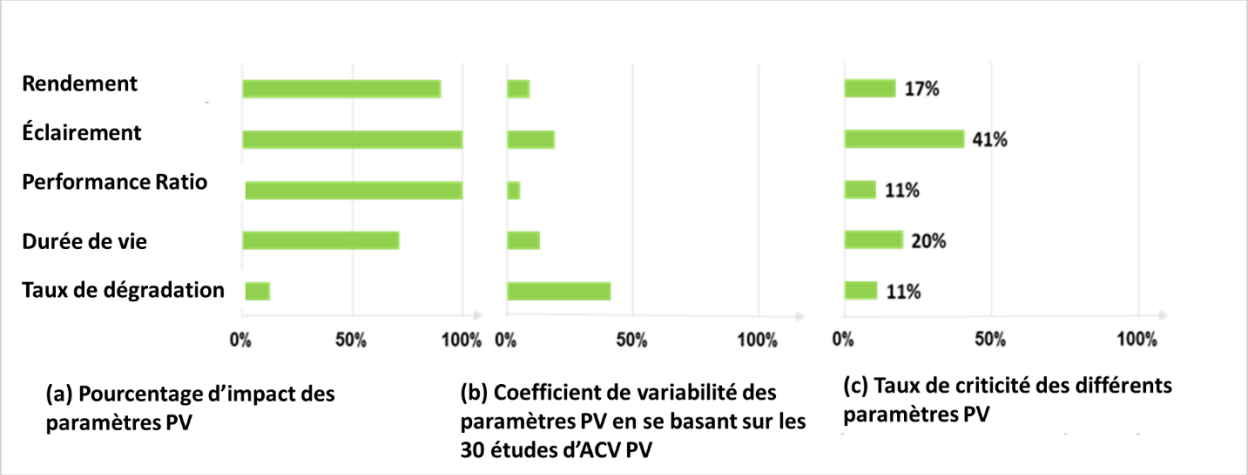


Figure 28.Taux de criticité des différents paramètres PV dans une étude ACV, évaluée par la méthode AMDEC

3.4 Énoncé du troisième constat :

À partir des résultats obtenus, deux conclusions peuvent être faites :

- La variabilité dans la définition des paramètres PV observée dans la littérature associée aux taux de criticité de ces paramètres, montre la nécessité de chercher les bons paramètres à définir pour obtenir des résultats environnementaux fiables.
- Le système PV est un système complexe à variables dynamiques qui évoluent d'une façon continue. Se baser sur la littérature pour réaliser une analyse environnementale des systèmes PV ne permet pas d'obtenir des résultats environnementaux fiables et pertinents.

Constat 3 :

Il n'existe pas dans l'état de l'art « de référence » pour définir des paramètres PV pertinents et dynamiques, qui peuvent s'adapter automatiquement aux progrès continus dans le domaine de l'énergie photovoltaïque.

4 Besoin pour la communauté PV

Les principales missions des organismes de R&D dans le domaine du PV sont :

- Le développement des cellules PV innovantes et leur intégration en modules PV.
- L'augmentation des performances et de la fiabilité des modules et la réduction des coûts (€/kWh).
- Le développement des modules innovants pour de nouvelles applications.

Pour certains organismes de R&D, comme le Département des Technologies Solaires (DTS) du CEA Tech au sein de l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) [99] et dont les activités couvrent toute la chaine de la valeur, depuis les matériaux, les cellules, les modules PV, et leur installation en systèmes, cette vision est élargie pour intégrer l'aspect environnemental dans les projets de R&D, et in fine aboutir à des technologies éco-conçus.

La mission de CEA Tech étant d'accompagner ses partenaires industriels dans un effort d'innovation et de compétitivité, le DTS adresse principalement des activités dont le TRL varie de 3 à 7, et constitue donc un organisme de R&D particulièrement adapté à ce travail de recherche.

À long terme, la R&D orientée vers le développement durable peut ainsi contribuer de manière considérable à la compétitivité des partenaires industriels : intégrer l'éco-conception dès la phase de R&D sera bénéfique sur la conception et le développement des produits, mais aussi sur leur comportement tout au long de leur cycle de vie (Figure 29).

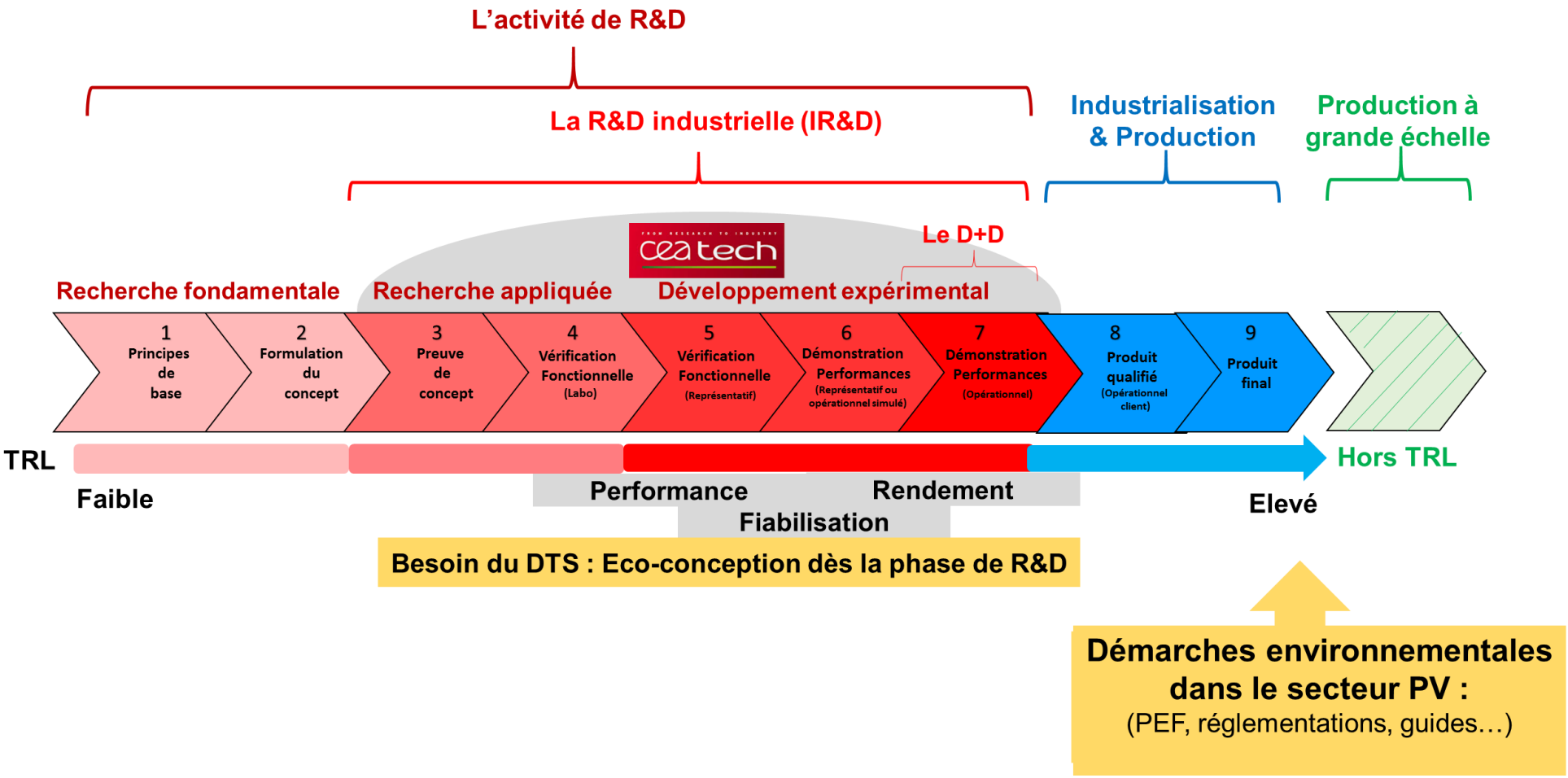


Figure 29. Positionnement des activités du DTS au sein de l'INES dans l'échelle TRL

➢ ***Question de Recherche***

Au regard du contexte de la recherche et du positionnement de l'industrie dans le domaine photovoltaïque, la synthèse du premier chapitre nous conduit à 3 conclusions :

- Les panneaux photovoltaïques ont été développés pour répondre à des enjeux énergétiques et environnementaux internationaux. L'énergie solaire fournie par les systèmes PV est une énergie renouvelable considérée comme plus respectueuse pour l'environnement. Cependant, il est important de s'assurer que le développement de ces technologies est bien moins impactant sur l'ensemble de leur cycle de vie que les autres technologies de production d'énergie et ce pour différentes catégories d'impacts.

- L'intégration de l'éco-conception dans les projets de R&D joue un rôle primordial dans l'orientation des organisations industrielles vers le développement durable de nouvelles technologies.

- La variabilité constatée dans les ACV PV de la littérature constitue une limite à la fiabilité des résultats environnementaux et rend la prise de décision en termes de choix méthodologiques pour l'analyse environnementale, difficile.

De plus, l'analyse environnementale d'une technologie en cours de développement à TRL bas pourrait être limitée par :

a) La complexité à mettre en place une ACV à ce niveau de TRL où les données ne sont pas figées ou connues

ii) La nécessité de faire appel à des experts du domaine environnemental pour réaliser une ACV.

Par ailleurs, les conclusions d'une démarche d'éco-conception pourraient ne pas être en adéquation avec les objectifs des économiques et techniques, encore souvent prioritaires dans leur processus décisionnel.

D'où, la question à laquelle nous allons répondre dans ce travail de recherche :

Quelle démarche faut-il développer pour réussir une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de recherche à échelle TRL bas d'un système à variables dynamiques, incluant à la fois une phase d'évaluation et une phase d'amélioration environnementale?

Chapitre 2 Problématiques & Hypothèses

En se basant sur le contexte de recherche détaillé dans le chapitre précédent, la question de recherche se positionne au milieu du processus de développement d'un produit, à échelle TRL bas comme le montre la Figure 30.

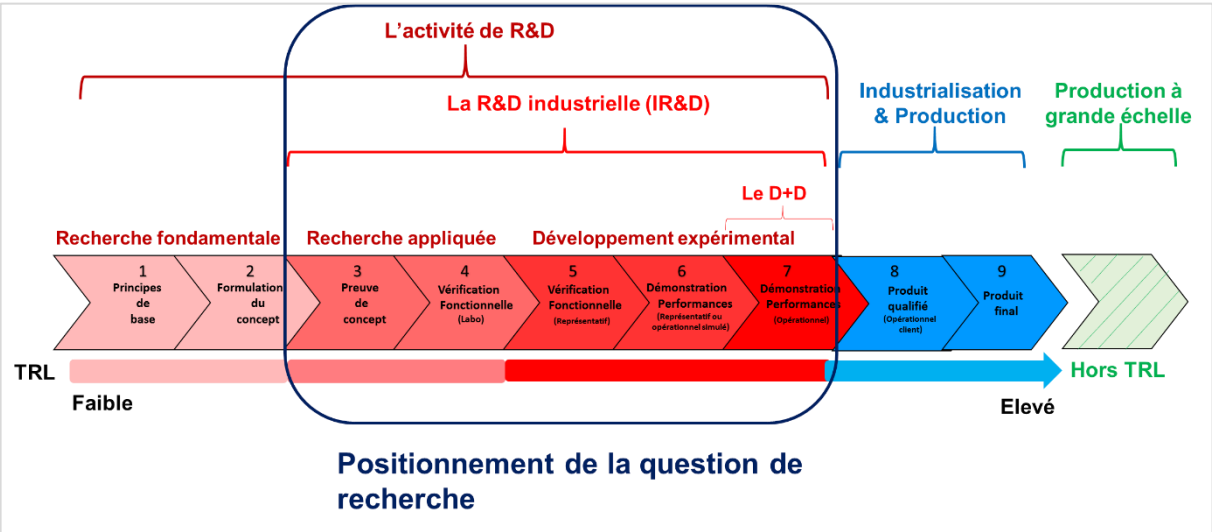


Figure 30. Positionnement de la question de recherche dans le processus de développement d'un produit.

L'analyse de la question de recherche met en évidence plusieurs points à étudier :

- La complexité de l'analyse environnementale des technologies en cours de développement (TRL bas).
- Les méthodes d'aide à la décision multicritères pour intégrer l'aspect environnemental tout en tenant compte des contraintes des projets de R&D (cahier des charges souvent dirigé par des besoins technico-économiques).
- Les méthodes de démocratisation des connaissances environnementales pour assurer une intégration pérenne de l'éco-conception au sein de l'organisme de R&D.

Cette partie va permettre d'analyser la question de recherche et les différents points à étudier. Ce travail d'analyse nous conduira à définir les différentes problématiques auxquelles nous allons répondre ainsi que les hypothèses en regard de ces problématiques.

1 Complexité de l'analyse environnementale à échelle TRL bas

Comme analysé dans le chapitre précédent, parmi les outils d'analyse environnementale développés, l'ACV offre l'approche la plus fiable et globale pour l'évaluation environnementale des produits. Néanmoins, quand il s'agit d'un système complexe en cours de développement (TRL bas), un problème de compatibilité entre les exigences de cette méthode (ACV) et la maturité de la technologie dans l'organisme de R&D est soulevé.

Vis-à-vis des exigences de l'ACV illustrées par Reap et al. [100], quatre points bloquants peuvent être identifiés pour la réalisation de l'ACV d'un système complexe à TRL bas :

- Incertitude de l'information environnementale.
- Qualité des données collectées.
- Niveau d'expertise requis pour l'analyse et l'interprétation des résultats environnementaux.
- Capitalisation des connaissances environnementales.

1.1 Incertitude de l'information environnementale à échelle TRL bas

Les données d'entrée pour le modèle d'ACV sont l'ensemble des informations nécessaires pour la modélisation du système étudié. Par étape de modélisation, deux types de données sont nécessaires :

- Des données pour définir le champ d'étude : il s'agit des paramètres qui permettent de définir l'unité fonctionnelle du système étudié.
- Des données pour la phase d'inventaire : il s'agit des données techniques qui décrivent quantitativement les procédés de fabrication du système (flux de matières, flux d'énergie et flux de déchets)

Dans le cas d'un système complexe composé par plusieurs sous-systèmes, chaque sous-produit est composé par des entrées (Ei), des sorties (Si) et des paramètres génériques (Pi) qui doivent être pris en compte pour la modélisation du produit complet (Figure 31). Ainsi, la quantité de données à collecter est d'autant plus importante que chaque sous-produit doit être traité comme un produit final, avec ses propres entrées, sorties et paramètres.

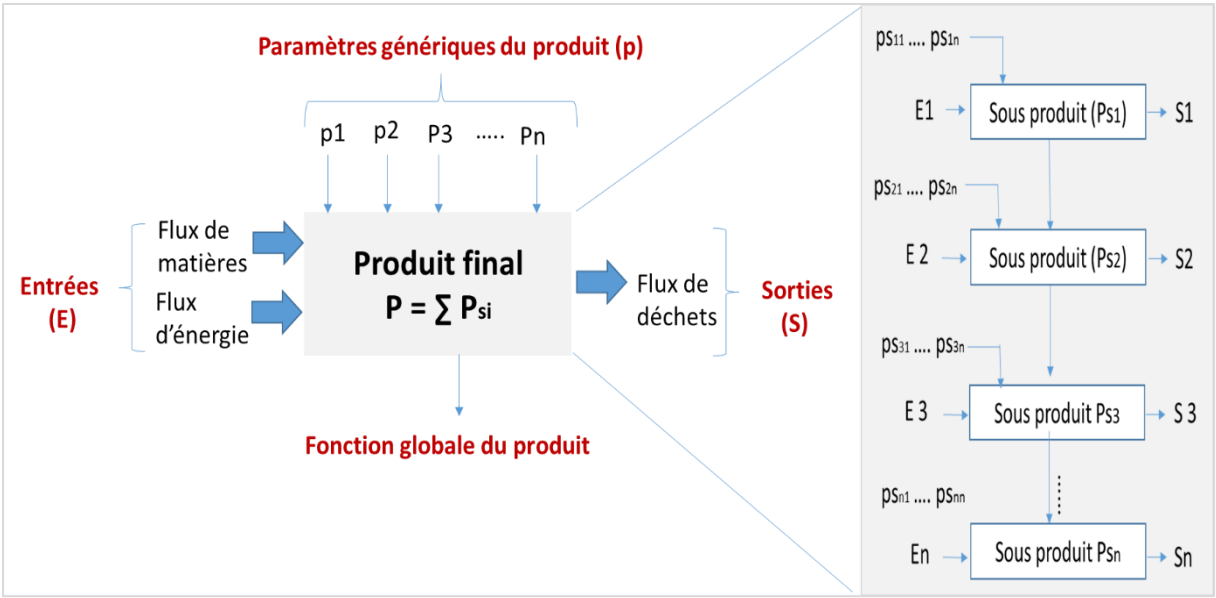


Figure 31. Composition d'un système complexe

En début de processus de développement, la technologie est en cours de définition et tests, et ses paramètres spécifiques peuvent se modifier avec l'avancement du développement. Il s'agit donc, d'un point de vue de l'ACV, d'une information soumise à des incertitudes, liées à un manque de connaissances.

Heijungs et al. [101] ont classifié les données environnementales soumises à des incertitudes en 3 catégories :

- Données pour lesquelles aucune valeur n'est disponible.
- Données pour lesquelles des valeurs inappropriées sont disponibles.
- Données pour lesquelles seule une valeur est disponible.

A échelle TRL bas, la non disponibilité des données pour l'inventaire peut être justifiée par le fait que ces données n'ont jamais été collectées auparavant ou sont inconnus. D'autre part, la technologie est encore en cours de validation dans un environnement de type laboratoire ; le recueil des données ne peut donc s'appuyer sur une production industrielle réelle. De plus, à ce stade de développement, plusieurs valeurs possibles peuvent être associées à certains paramètres génériques dans le champ d'étude.

Par conséquent, à ce stade, ces données présentent un taux élevé d'incertitude, ce qui peut impacter la crédibilité des résultats de l'ACV et la prise de décision associée.

1.2 La qualité des données collectées

Dans une étude ACV, la modélisation du système se traduit par la mise en œuvre de l'inventaire des données. Ce dernier nécessite le recueil d'un volume important de données qui peut augmenter en fonction de la complexité du système. Ainsi, la fiabilité des résultats repose principalement sur la qualité des données fournis.

L'ISO14044 [102] définit la qualité des données comme suit : « Les caractéristiques des données qui traduisent leur capacité de satisfaire aux exigences fixées ».

Weidema et Wesnoes [103] ont identifié des indicateurs de qualité des données (IQD) qui ont été adoptés plus tard par la norme ISO 14040 (Tableau 4). Ces indicateurs ont ensuite complétés ou ajustés par d'autres auteurs (Tableau 5)

Tableau 4. Différents critères à évaluer en matière de qualité des données, d'après [103]

Indicateur	Définition
Corrélation temporelle	Cet indicateur représente la corrélation entre l'âge des données et la période de réalisation de l'étude.
Corrélation géographique	Cet indicateur représente la corrélation entre le lieu de production et les données. Les méthodes de production et les conditions de production peuvent être très différentes entre les pays.
Corrélation technologique	Les données doivent être spécifiques à la technologie étudiée sans approximation avec d'autres technologies.
Fiabilité	Cet indicateur représente les sources des données et les méthodes d'acquisition.
Complétude (exhaustivité)	Cet indicateur se rapporte à un indicateur statistique (qui traite la quantité des données disponibles) et son impact, comme par exemple les flux négligés ou exclus de l'analyse.

Tableau 5. Indicateurs de qualité pris en compte selon différents auteurs, synthétisés par [103]

Weidema et Wesnaes (1996)	Wrisberg (1997)	RECORD (1998)	US EPA (2000)
Fiabilité **Exhaustivité** **Cor. Temporelle** **Cor. Géographique** **Cor. technologique**	**Fiabilité** **Exhaustivité** Représentativité 13 paramètres de qualité relatifs aux flux, processus et système	**Fiabilité** **Exhaustivité** Représentativité 13 paramètres de qualité relatifs aux flux, processus et système	Précision **Exhaustivité** Représentativité Consistance Reproductibilité
ISO 14040-44	**Ecoinvent**	**Pré-consultant (SimaPro)**	**Commission Européenne (2012)**
Cor. Temporelle **Cor. Géographique** **Cor. Technologique** **Exhaustivité** Représentativité Consistance Précision Reproductibilité Sources des données Incertitude	**Fiabilité** **Exhaustivité** **Cor. Temporelle** **Cor. Géographique** **Cor. Technologique** Taille de l'échantillon	**Cor. Temporelle** **Cor. Géographique** **Cor. Technologique** Règle d'allocation Règle de troncatures Règle de substitution Périmètre de l'étude	**Cor. Temporelle** **Cor. Géographique** **Cor. Technologique** **Exhaustivité** Représentativité Consistance méthodologique et paramètre relatif à l'incertitude

Des méthodes d'évaluation du niveau de qualité des données ont également été proposées. On peut distinguer deux approches d'évaluation de la qualité des données [104] :

- Une approche semi quantitative basée sur **les IQD** cités dans le Tableau 4, telle que en fonction d'une matrice de qualification définie par Weidema [103] (Annexe 2), un score est attribué à chaque IQD permettant ainsi d'évaluer le niveau de qualité des données fournies.
- Une approche probabiliste basée sur un seul critère qui est **le niveau d'incertitude des données**. Cette approche part du principe que seul l'incertitude peut évaluer la qualité des données [105]. Ainsi, Plusieurs méthodes d'évaluation d'incertitude ont été développées comme la technique Monte Carlo (Leory et al. 2009 [106]), les analyses de sensibilité (Steen,1997 [107], ISO,2006 [108]) et l'approche statistique classique (Coulon et al. 1997 [109]), permettant ainsi d'analyser la qualité des données en ACV.

Le manque d'accès aux données est considéré comme l'une des limites majeures dans une étude ACV. Ce problème a fait l'objet de plusieurs études dans la littérature (Guinnée et al.

[110], Reap et al. [100], Finnveden [111]…). Il peut s'imposer particulièrement dans le traitement des données spécifiques à une technologie en cours de développement (TRL bas). En effet, plusieurs contraintes en matière de qualité des données peuvent se présenter en modélisant une technologie non mature. Ces contraintes sont résumées dans le Tableau 6.

Tableau 6. Contraintes en matière de qualité de données d'une technologie en cours de développement

Indicateur	Contraintes d'une technologie à échelle TRL bas
Corrélation temporelle	Technologie dont les flux et paramètres fluctuent rapidement dans le temps.
Corrélation géographique	Technologie testée en laboratoire dont les méthodes et les conditions de fabrication peuvent être différentes des conditions industrielles réelles de production.
Corrélation technologique	Technologie nouvelle qui nécessite parfois une agrégation avec d'autres technologies.
Fiabilité	Les sources de données peuvent être variables puisque la technologie est en début de processus de développement. A TRL bas, la reproductibilité n'a pas encore été établie.
Complétude	Technologie souvent innovantes dont certaines données n'ont jamais été collectées.

Par conséquent, le niveau de qualité des données peut être dégradé pour une technologie à échelle TRL bas, fragilisant ainsi les résultats environnementaux obtenus.

1.3 Niveau d'expertise pour l'analyse environnementale

La notion d'expertise désigne la capacité d'analyser et évaluer quelque chose ; elle est généralement produite par un expert qui possède une expérience dans le domaine concerné. La pleine compréhension des besoins, des méthodes et des résultats de l'évaluation environnementale requiert une expertise significative.

Le Pochat [112] a identifié les différents niveaux d'expertise et a classifié les outils d'évaluation et amélioration environnementales en fonction de cette échelle d'expertise (Figure 32).

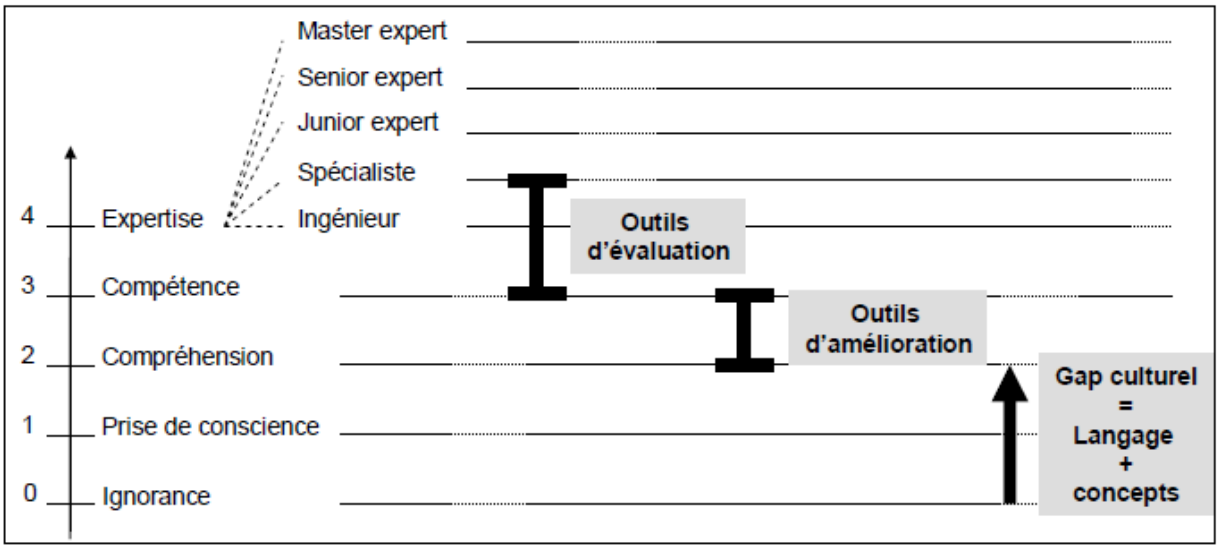


Figure 32. Niveaux de maîtrise minimum requis pour l'utilisation des outils d'éco-conception [111]

Comme le montre la Figure 32., les outils d'évaluation environnementale, notamment l'ACV, requiert un haut niveau d'expertise qui peut augmenter également avec la complexité et le niveau de conception du produit.

Non seulement la complexité est illustrée dans l'application de la méthode mais aussi au niveau de l'interprétation des résultats. Le but de l'interprétation du cycle de vie est de comprendre les résultats finaux pour prendre les décisions adéquates et pouvoir les communiquer par la suite d'une manière pertinente, complète et exacte. Reap et al [100] ont considéré l'interprétation des résultats comme l'une des limites de l'implémentation de la méthode ACV. La complexité de cette étape de l'ACV réside dans la prise de décision face aux multi-indicateurs (plusieurs impacts environnementaux). Il est donc nécessaire de comprendre les impacts, leurs effets et leurs causes, en lien avec les méthodes d'analyse environnementales proposées aujourd'hui dans les guides [31]

Ainsi, l'analyse environnementale d'une technologie nécessite l'accompagnement d'un expert ACV, afin d'aider à orienter les choix technologiques du point de vue environnemental, en particulier dans les organismes de R&D où l'enjeu stratégique est souvent guidé par des objectifs technico-économiques.

1.4 Capitalisation des données environnementales

La gestion des connaissances est une démarche visant à percevoir, analyser et capitaliser les connaissances stratégiques afin d'amplifier l'utilisation et la création des connaissances dans une organisation [113].

Deux types de connaissances peuvent exister dans une organisation : des **connaissances explicites** qui sont des savoirs spécifiques à l'organisation et des **connaissances tacites** qui décrivent le savoir-faire individuel (adaptation des idées, capacité d'innovation et actions).

Le processus de capitalisation des connaissances consiste à pérenniser et valoriser le savoir-faire des connaissances acquises. Ce processus s'articule en 4 phases définies par Grundestein [113], illustrées par la Figure 33 : la première étape consiste à **identifier** les savoirs (connaissances explicites) et les savoir-faire (connaissances tacites) au sein de l'organisation. Une fois identifiées, ces connaissances doivent être **préservées** en les modélisant ou en les archivant. Pour les connaissances tacites. Grundestein [113] propose la méthode de transfert de type « maitre-apprenti ». Ces connaissances doivent être valorisées en les intégrant dans les différents projets de l'organisation pour les rendre accessibles aux différents acteurs. Afin d'assurer la continuité d'évolution et d'amélioration associée à chaque alternative, les connaissances doivent être actualisées régulièrement au fur et à mesure de l'évolution des nouvelles connaissances, du progrès technologique et des retours d'expérience.

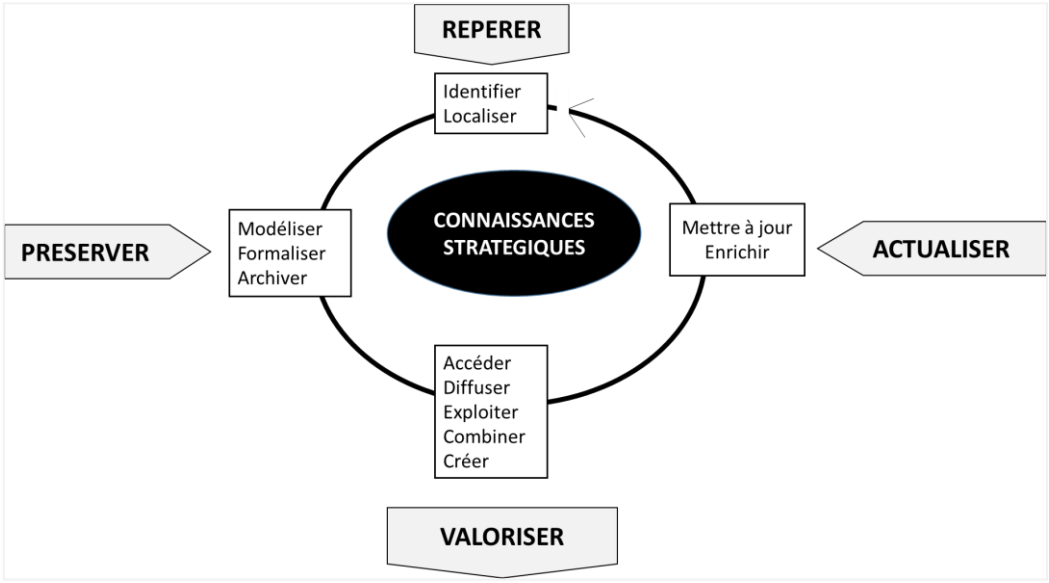


Figure 33. Processus de capitalisation des connaissances [113]

Dans les organismes de R&D où l'innovation et l'amélioration des technologies sont deux aspects stratégiques, **préserver et valoriser** l'analyse environnementale d'une technologie

ainsi que **repérer** les paramètres critiques, permet d'orienter les choix technologiques dans un projet et d'avoir une référence environnementale pour les nouveaux projets. De plus, à TRL bas où la technologie varie tout au long du projet, un besoin d'une **actualisation** continue est également nécessaire. Ainsi, le besoin d'un processus de capitalisation s'amplifie dans les organismes de R&D.

1.5 Énoncé de la première problématique

La discussion précédente met en évidence la complexité de l'intégration des critères environnementaux dans les projets de R&D à échelle TRL bas. Tout d'abord l'évaluation environnementale exige la définition des hypothèses claires et la connaissance des limites du système et des paramètres spécifiques du produit, ce qui nécessite la collecte d'une grande quantité de données. Néanmoins, à TRL bas, les concepteurs sont faces à des technologies en cours de développement dont les données ne sont pas forcément accessibles. D'autre part, les ingénieurs dans la R&D ont besoin d'une méthode adaptée au contexte industriel, qui n'exige pas un haut niveau d'expertise, afin de pouvoir associer systématiquement l'aspect environnemental aux analyses technico-économiques. De plus, ces nouvelles connaissances nécessitent une méthode de capitalisation pour assurer leur pérennité.

La première problématique est ainsi reformulée comme suit :

Problématique 1 :

L'évaluation environnementale, telle qu'exigée dans les standards, est trop contraignante pour permettre d'intégrer l'éco-conception dans les projets de R&D à échelle TRL bas, car elle nécessite :

- **Une disponibilité des données rendue difficile à TRL bas pour un système complexe.**
- **Un haut niveau de qualité des données, peu réaliste pour une technologie dont les paramètres fluctuent rapidement dans le temps.**
- **Une expertise environnementale spécifique pas toujours accessible à des technologues non spécialistes du domaine.**
- **Une méthode de capitalisation des données environnementales pour assurer le transfert, la capitalisation et la valorisation de l'information au sein des projets de R&D**

L'hypothèse proposée pour répondre à cette problématique est la suivante :

Hypothèse 1 :

L'utilisation de l'ACV comme un outil de pilotage pour la mise en place d'une base de données de référence, fiable, simple à actualiser, et contenant des résultats de référence compréhensibles et interprétables par des non spécialistes, est une condition nécessaire pour faciliter la démarche d'intégration de la dimension environnementale dans les projets de R&D à TRL bas.

2 Complexité de l'intégration pérenne de l'éco-conception dans la R&D

2.1 Notions d'intégration pérenne et ses freins dans la IR&D

Comme discuté dans le chapitre précédent, la complexité croissante des technologies dans plusieurs secteurs innovants, comme le secteur PV, amène souvent les industriels à nouer des relations de partenariat avec les organismes de recherche.

Il s'agit d'une transaction « Business – to – Business » (B2B) où le partenaire industriel est le client et le consommateur de la R&D. En effet, ce type de transactions définit les relations commerciales entre entreprises, en opposition avec le « Business - to – Consumer » (B2C).

Dans le B2B, le consommateur final est une autre entreprise où la relation entre le client/fournisseur se traduit par un cahier des charges où le client fixe ses objectifs et ses besoins. Cette relation est plus compliquée lorsque le système est complexe et composé de plusieurs sous-produits entrainant plusieurs interactions entre différents acteurs ayant leurs propres besoins (Figure 34), comme dans le cas des systèmes PV.

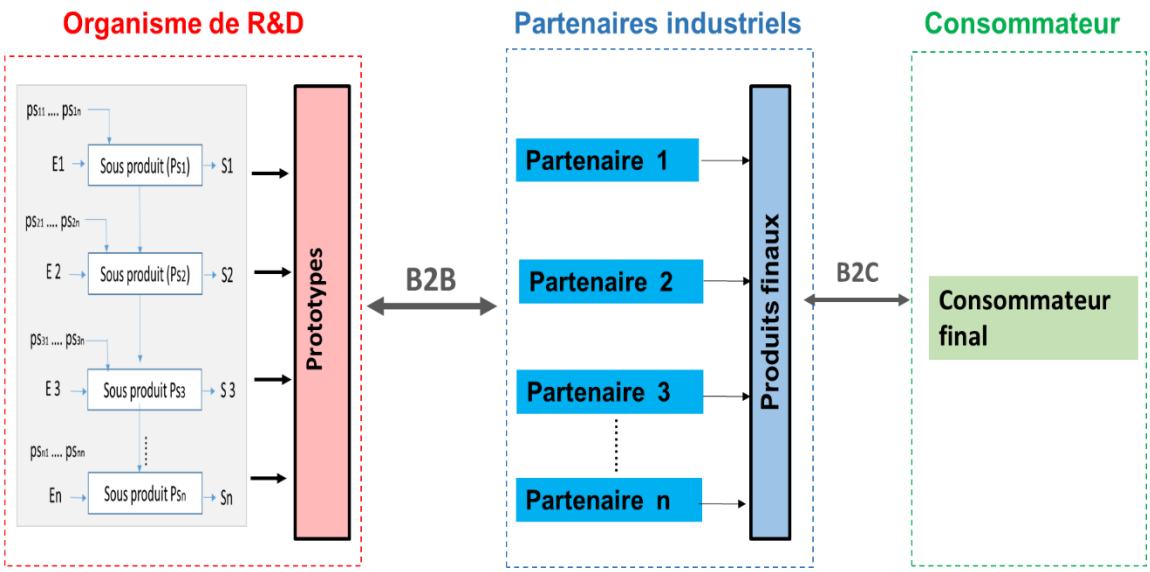


Figure 34. Interactions B2B dans un système complexe entre la R&D et les partenaires industriels

La notion d'« intégration » a été définie par Le Pochat [112] comme le changement d'état de l'organisation passant d'un état X à un état Y. Millet [114] a analysé l'intégration informationnelle dans les organisations industrielles et a définit l'intégration comme suit « *l'intégration est l'effort d'une organisation pour des relations interindividuelles, inter-fonctionnelles et inter-entreprises plus étroites. Elle se fonde sur une coordination plus étroite des tâches, sur la coopération et sur le partage des informations et des prises de décisions. La gestion de cette interdépendance organisationnelle au niveau intra ou inter entreprise devient ainsi une intégration « informationnelle ».*

La pérennité, d'autre part, décrit la durabilité et la continuité dans le temps. Ainsi un changement ou une intégration devient pérenne s'il est intégré systématiquement dans l'activité quotidienne au sein de l'organisme. Et par conséquent une intégration pérenne de l'éco-conception dans la R&D signifie adopter une nouvelle vision au sein de l'organisme.

L'intégration de l'éco-conception dans la démarche stratégique des industriels est encore un phénomène émergent [115] [116], et il existe un écart entre la théorie et la pratique de l'éco-conception. Plusieurs lacunes empêchent d'adopter cette démarche d'implémentation au sein de l'entreprise comme par exemple l'absence d'une feuille de route pour supporter les industriels dans une démarche d'éco-conception [117] [118] [119]. De ce fait, la composante environnementale n'est pas souvent exigée dans le processus de développement du produit. Dans leur étude sur la pratique de l'éco-conception dans le cadre d'un processus de conception, Deutz et al.[120] ont montré que les critères de coûts de production et fiabilité sont

considérés par plus de 85 % des entreprises dans le processus de développement du produit ; par contre les critères environnementaux comme le recyclage, les déchets et la pollution sont considérés par moins de 40% des entreprises. Étant donnée la relation clé entre l'organisme de R&D et le partenaire industriel, et les contraintes qui peuvent entourer le processus de développement, l'intégration du paramètre environnemental dans les projets de R&D peut ainsi être considérée comme un réel défi. En effet, cette intégration signifie un changement dans l'organisation des projets de R&D, par l'ajout de nouveaux besoins, qui aujourd'hui ne sont pas (ou peu) inscrits dans les cahiers des charges (Figure 35). Ce changement va impacter la relation « fournisseur / client » (acteur de la R&D / partenaire industriel) et peut être soumis à l'échec, surtout dans le cas où il y a une résistance au changement du processus de développement déjà fixé ([120], [122], [123]). Ceci est souvent associé à des besoins déjà observés dans certains projets de R&D du secteur PV, où les cahiers des charges sont souvent technico-économiques, les systèmes PV étant considérés comme des produits intrinsèquement « vert ».

Il existe également d'autres obstacles qui limitent cette intégration comme l'investissement en temps et argent pour la mise en place d'un outil adapté au sein de l'organisme, et les ressources humaines pour initier et suivre la démarche [124] (Figure 36). De plus, le grand nombre d'outils existants aujourd'hui pour l'éco-conception peut rendre le choix de l'outil le plus pertinent difficile [125].

L'échec de l'intégration et sa pérennité peut également être dû à la résistance des acteurs de la R&D eux même (équipe du projet), pouvant être justifié par un manque de connaissances et/ou d'expertise dans la maîtrise des nouveaux outils et l'application de nouvelles méthodes [126]. De plus, étant donné que cette intégration n'entre pas souvent dans les cahiers des charges et donc dans le cadre des exigences des projets, la résistance du concepteur peut être considérée comme légitime.

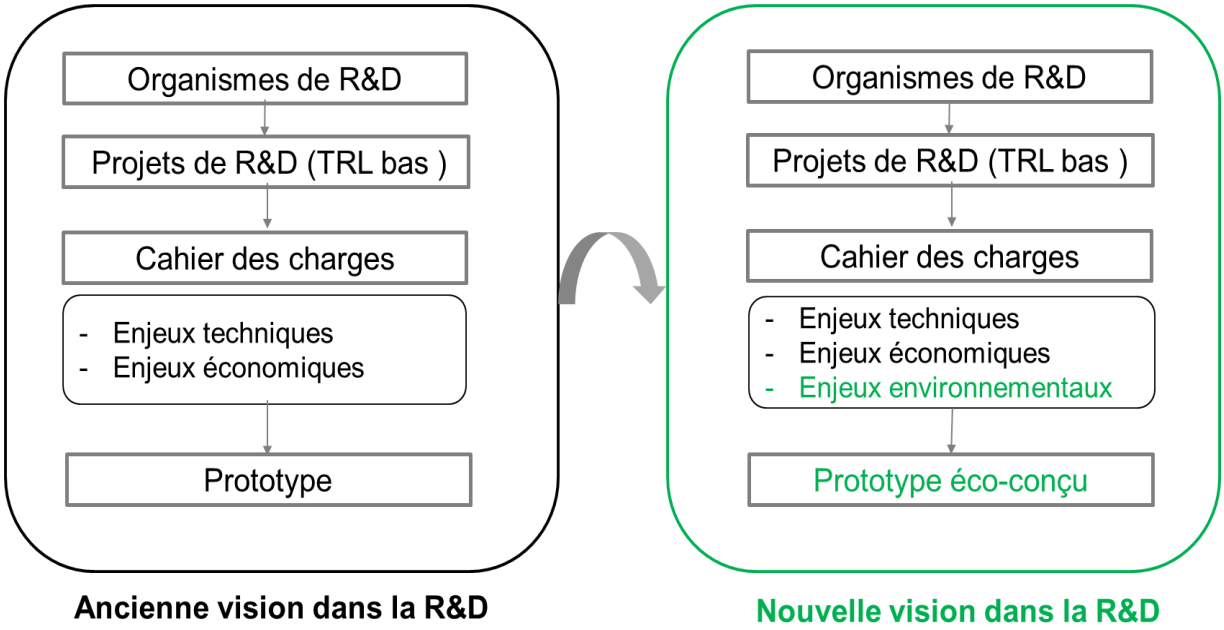


Figure 35. La nouvelle vision dans la R&D avec l'intégration de la démarche d'éco-conception.

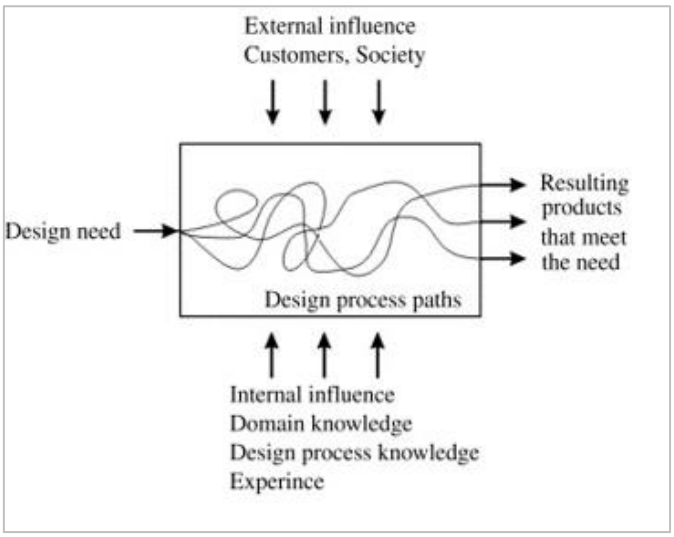


Figure 36. Les différentes contraintes qui entourent le processus de développement d'un produit dans un projet, d'après [124]

Donc, plusieurs barrières existent, limitant ainsi une implémentation efficace et pérenne de la démarche d'éco-conception dans l'organisme de R&D, qui sont synthétisées comme suit :

- **Expertise spécifique,** non seulement pour l'application de la démarche mais aussi pour la compréhension des résultats pour la prise de décision finale.

- **Temps requis,** pour l'application de ces méthodes et la réalisation des analyses.
- **Investissement économique,** pour la mise en place de la démarche au sein de l'organisme.
- **Diversité et grand nombre d'outils existants,** rendant le choix difficile.
- **Formalisation excessive des méthodes,** créant une divergence entre le besoin réel de l'industrie et la démarche théorique proposée et un cahier des charges non souvent en adéquation avec la démarche d'éco-conception.

Même si le besoin d'intégration existe, un outil d'éco-conception qui franchit ces obstacles est alors nécessaire pour garantir sa pérennité. Cet outil doit également satisfaire des caractéristiques bien spécifiques qui sont :

- Une démarche à la fois **objective** et **subjective** pour évaluer le profil environnemental de la technologie dès la phase de R&D tout en respectant le besoin de l'industriel.
- Des résultats **quantitatifs** pour pouvoir argumenter la prise de décision.
- Une démarche d'analyse **multicritères** permettant **l'évaluation** et **l'amélioration** d'une technologie éco-conçu pendant le processus de développement.

2.2 Les outils d'éco-conception dans la littérature : fonctions et limites

Comme discuté dans le chapitre précédent, plusieurs outils d'éco-conception ont été développés et ont été classifiés en fonction de plusieurs critères comme le type de la démarche (objectif ou subjectif), le type de résultats (quantitatif ou semi-quantitatifs) et le type d'analyse (analyse multicritères, amélioration ou évaluation) [127].
Ces outils seront analysés dans cette partie selon leurs objectifs et leur contexte d'utilisation en lien avec les objectifs du travail de la recherche.

On peut distinguer quatre catégories d'outils qui ont été le plus souvent abordés dans la littérature.

1) Outils basés sur l'ACV :

Ces outils sont basés sur la méthode ACV pour évaluer l'impact environnemental d'un produit. Néanmoins, en raison de la complexité de l'ACV, surtout au niveau de la collection des données, un certain nombre de méthodes simplifiées basées sur l'ACV ont été développées, visant à fournir une analyse rapide et "rentable", et à soutenir la prise de décision. Ces méthodes permettent aux technologues de tirer des conclusions fiables avec un niveau

acceptable d'incertitude et sans devoir y consacrer trop de temps ([128], [129], [130]). Plusieurs outils existent pour le calcul de l'impact environnemental ; GaBi [131] et SimaPro [132] représentent la plus grande part des outils d'ACV vendus sur le marché et sont les plus couramment utilisés par les chercheurs [133], mais ils **exigent des experts** pour leur usage.

2) Outils basé sur les checklists et les guidelines :

Les outils d'éco-conception basés sur les checklists sont des outils qualitatifs et simples à utiliser. L'évaluation de l'impact environnemental d'un produit consiste à répondre à un questionnaire. Il s'agit des questions auxquelles le concepteur doit répondre au début du processus de développement et qui concernent l'ensemble du produit et ses composants [134].

Les questionnaires décrits dans la littérature sont relativement variés. Wimmer [134] a défini un ensemble d'objectifs qui doivent être pris en compte dans le formulaire comme la possibilité de réutilisation de certaines parties, la possibilité de recycler le produit et la durabilité du produit.

Giudice et al. [135] ont proposé une méthodologie pour guider le concepteur à choisir la meilleure solution pour la fin de vie des produits. Ljungberg [136] a présenté des lignes directrices pour la conception durable des produits, avec une attention particulière aux sélection des matériaux. Plusieurs ouvrages proposent ainsi des méthodes et des suggestions pour améliorer la performance environnementale d'un produit grâce aux choix bien guidés.

L'inconvénient de cette méthode est **sa subjectivité**. Par ailleurs, elle nécessite une grande connaissance et **expertise** du domaine pour obtenir des résultats fiables.

3) Outils basés sur le déploiement de la fonction qualité (QFD) :

Le déploiement de la fonction qualité (QFD) est une approche d'éco-conception orientée vers le client pour l'innovation du produit. L'approche consiste à développer une corrélation entre les besoins du clients et les besoins environnementaux collectés [127].

Pour satisfaire les besoins du client, le principe de la méthode consiste à chercher les besoins exprimés et non exprimés, puis essayer de traduire ces besoins en matrice d'action « House of Quality » qui sera prise en considération dans le processus de conception. Cette matrice représente les caractéristiques et paramètres critiques pour le client (attentes, besoin du marché…). Certains chercheurs ont adapté cette méthode pour développer leurs propres outils d'éco-conception ; Masui et al. [137] ont développé un outil d'aide à la décision en se basant sur la méthode QFD. Cristofari et al.[138] ont développé la méthode « Green QFD » qui combine la QFD avec la méthode ACV. Zhang et al. [139] ont développé un outil d'éco-

conception (GQFD-II) qui intègre l'ACV et le coût du cycle de vie (LCC) puis les combine aux besoins du client.
Les inconvénients de ces outils sont le **temps requis**, **l'expertise** spécifique et la diversité des outils qui existent aujourd'hui.

4) Outils d'aide à la décision multicritères (MCDM)

Les méthodes d'aide à la décision multicritères sont généralement définies comme suit *« une aide à la décision est un outil mathématique permettant la comparaison des différentes alternatives ou scénarii selon de nombreux critères, souvent contradictoires, afin de guider le décideur vers un choix judicieux* » [140]. Dans le cadre de l'éco-conception, les critères évalués sont souvent les critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux. A partir de ces critères, la méthode MCDM permet d'identifier la solution la plus adéquate qui satisfait les besoins et qui prend en compte tous les aspects, en particulier la dimension environnementale. Souvent des indicateurs techniques, économiques et environnementaux sont combinés en un indicateur composite quantifiable et nécessaire pour aider à la prise de décision.
Les méthodes les plus utilisées pour cette approche sont les suivantes [141] :

- ***La méthode WSM (Weight Sum Method)*** :

Il s'agit de définir une note pour chaque critère d'évaluation. Pour chaque critère est associée une valeur de pondération. Chaque alternative est la somme de la note associée au critère multipliée par la valeur de pondération en fonction de son importance (Équation 3). La meilleure alternative est celle dont la somme est la plus élevée.

$$Ai = \sum wi\ aij\ , \boldsymbol{For\ i = 1 \dots n} \qquad (3)$$

Où *Ai* sont les alternatives, ai les performances associées à l'alternative *Ai* par rapport au critère *Ci*, *Wj* le poids défini pour chaque critère, *n* le nombre de critères et *m* le nombre des alternatives.

- ***La méthode WPM (Weighted Product Method)*** **:**

Le principe de cette méthode est proche de la méthode WSM. La seule différence est que l'addition est remplacée par la multiplication. Il s'agit d'une comparaison entre les alternatives sous forme de ratios. Chaque ratio est porté à la puissance équivalente au poids relatif du critère correspondant (Équation 4). Le ratio final est comparé à 1 pour sélectionner l'alternative favorable.

$$\left(\frac{Ak}{Al}\right) = \boldsymbol{\Pi}\left(\frac{\boldsymbol{akj}}{\boldsymbol{alj}}\right)^{\boldsymbol{wj}}, \boldsymbol{For\ k, l = 1 \ldots m\ et\ j = 1..n} \qquad (4)$$

Où *Ai* sont les alternatives, *ai* les performances associées à l'alternative Ai par rapport au critère *Ci*, *Wj* le poids défini pour chaque critère, *n* le nombre de critères et *m* le nombre d'alternatives.

- ***La méthode AHP (Analytic Hiearchy Method) :***

La méthode repose sur la comparaison de paires. Les principales étapes de cette méthode sont : (1) la structuration hiérarchique, composée de 4 niveaux (l'objectif principal, les critères, les sous critères et les alternatives); (2) la structuration des priorités, en se basant sur les comparaisons des critères par paires du décideur. Cette méthode génère un poids pour chaque critère évalué selon une échelle numérique de 1 à 9 ; (3) la cohérence logique (plus le poids est élevé, plus le critère correspondant est important).

Les critères peuvent à la fin être pondérés par les pourcentages de priorités obtenus à l'étape (2) pour avoir un indicateur composite qui aide à la prise de la décision finale (Figure 37).

Cette méthode permet la simplification d'un problème complexe et l'obtention d'une décision la plus objective possible.

Les inconvénients de cette catégorie d'outil sont **la subjectivité**, l**'expertise** spécifique et le grand nombre des outils disponibles.

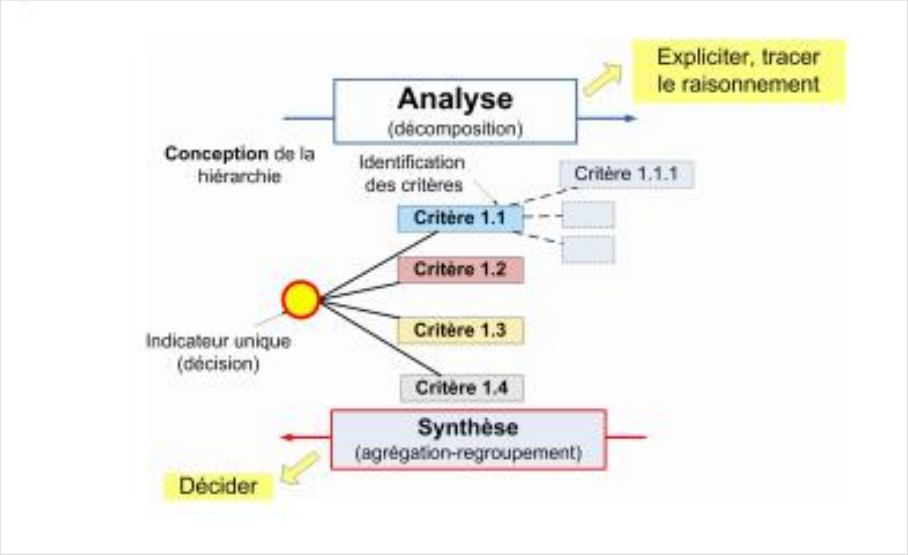


Figure 37. Principe de l'analyse multicritères de la méthode AHP

Afin de pouvoir faire le lien entre les besoins et l'état de l'art, le Tableau 7 résume les caractéristiques des outils d'éco-conception, ainsi que les barrières qui bloquent leur implémentation au sein d'un organisme de R&D, mettant par conséquent en évidence le manque des méthodes aujourd'hui pour assurer une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas au sein d'un organisme de R&D.

Tableau 7. Synthèse des caractéristiques des outils d'éco-conception de l'état de l'art et les différentes barrières pour une intégration de la démarche d'éco-conception au sein du processus de développement du produit (TRL bas)

Outils basés sur :	Méthode d'analyse		Type de résultats		Type d'analyse			Barrières, d'après [142]
	Objective	Subjective	Quantitatif	Semi-quantitatifs	Multicritère	Évaluation	Amélioration	
ACV et l'ACV simplifié	✓		✓			✓		Expertise spécifique. Beaucoup de temps requis. Investissement économique. Grand nombre d'outils existants
Checklist		✓		✓		✓		Expertise spécifique.
QFD		✓						Expertise spécifique. Investissement économique. Grand nombre d'outils existants. Formalisation excessive des méthodes.
MCDM		✓	✓		✓			Expertise spécifique. Grand nombre d'outils existants.
Besoin	✓	✓	✓		✓	✓	✓	Pas de barrières

2.3 Énoncé de la deuxième problématique

La synthèse des différentes caractéristiques des outils d'éco-conception montre que les outils actuels ne permettent pas une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas pour les raisons suivantes :

- La subjectivité de certains outils (checklist, QFD, MCDM) dégrade la fiabilité des résultats.
- La complexité d'analyse, le temps requis, la non prise en compte des besoins du client par certaines méthodes et la formalisation excessive de certaines méthodes constituent des limites à l'intégration de l'éco-conception dans la R&D et en particulier dans la IR&D.
- La difficulté de l'interprétation des résultats de certaines méthodes complique la prise de décision au début du processus de développement et freine ainsi la recherche d'améliorations par des solutions éco-conçues.
- L'absence de l'approche d'amélioration du produit dans les outils, en plus de celle d'évaluation environnemental.
- La non prise en compte d'une façon systématique de l'évolution continue des variables et des procédés.

Le bilan de l'étude des outils d'éco-conception existants et de leurs limites pour une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas, permet d'écrire la problématique suivante :

Problématique 2 :

Les projets de R&D, particulièrement dans le secteur des énergies renouvelables, sont souvent dirigés par des considérations économiques et techniques, et non environnementales.
Développer une méthode d'éco-conception pour orienter les choix dans ce type de projet doit prendre en compte en premier lieu les besoins du client, puis satisfaire plusieurs critères pour l'acteur de la R&D, comme la rapidité d'utilisation, la simplicité, la fiabilité, l'objectivité de l'analyse, la facilité de l'interprétation et de la communication des résultats.
Chacun des outils d'éco-conception présents dans la littérature est caractérisé par des avantages propres à ses fonctions, mais il n'existe pas un outil qui combine toutes les caractéristiques nécessaires pour une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas des systèmes complexes.

Les conclusions précédentes amènent à l'hypothèse suivante :

Hypothèse 2 :

Une méthode dynamique et systématique basée sur l'ACV et l'analyse multicritères, qui prend en compte les besoins du client et répondant aux critères simplicité, rapidité, fiabilité de l'analyse ainsi que facilité de communication et d'interprétation des résultats, est nécessaire pour une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas.

Combinant les problématiques 1 et 2 ainsi que leurs hypothèses, nous pouvons énoncer l'hypothèse 3 :

Hypothèse 3:

L'intégration de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas nécessite la mise en place d'un outil à usage simple « user friendly » assurant une représentation dynamique des données, élément important pour suivre l'innovation, et une démocratisation des connaissances environnementales, point encore bloquant aujourd'hui.

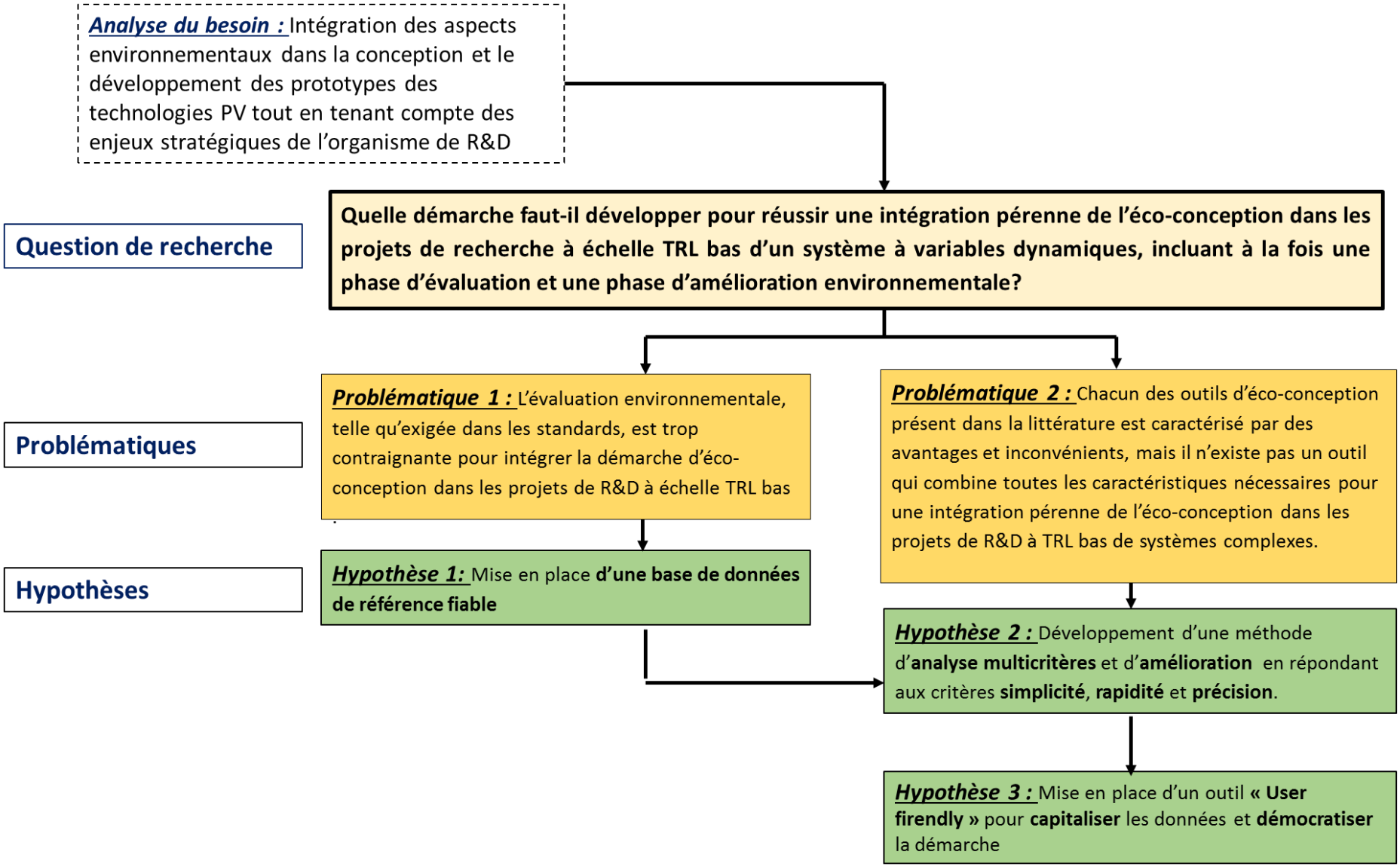


Figure 38. Synoptique de l'analyse de la question de recherche

Chapitre 3 Proposition d'une méthode d'intégration de l'éco-conception dès la phase de R&D

L'analyse de la question de recherche a mis en évidence deux problématiques qui constituent les limites au processus d'intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas : la complexité de l'évaluation environnementale d'une technologie en début de processus de développement en assurant la fiabilité et la transparence des résultats, et la complexité de lier d'une façon simple et pérenne les enjeux stratégiques fixés dans un projet de R&D à TRL bas dynamique à la démarche d'éco-conception.

Les hypothèses définies pour répondre à ces problématiques consistent à mettre en place en premier lieu une démarche de capitalisation de l'information environnementale par le biais d'une base de données de référence dynamique. Liée aux enjeux technico-économique des projets de R&D, cette base de données servira à réaliser une analyse multicritère pour à la fois évaluer et améliorer la technologie dans son processus de développement. Pour répondre aux critères de pérennité et simplicité, l'hypothèse proposée est d'implémenter cette démarche d'éco-conception dans un outil « user friendly » d'aide à la décision multicritères.

L'approche d'éco-conception développée pour valider les hypothèses sera présentée dans ce chapitre puis évaluée dans une phase d'expérimentation présentée au chapitre 4.

1 Réponse à l'hypothèse 1 : base de données de référence

Afin de répondre à la problématique 1, l'idée proposée est de mettre en place une base de données de référence. Une base de données est définie comme : *« Un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation (ajout, mise à jour, recherche de données). »* [143]

Dans le contexte de ce travail de recherche, l'objectif de la base de données est de résoudre le problème de la complexité d'analyse environnementale d'une technologie non mature (TRL bas). Ainsi, l'hypothèse formulée est d'implémenter dans cette base de données les inventaires et les résultats de l'ACV d'une technologie mature déjà existante, dont les données sont disponibles, respectant ainsi les exigences de l'ACV pour garantir la fiabilité des résultats. La variabilité identifiée dans l'état de l'art des études ACV (comme pour le cas des études ACV PV analysées dans le chapitre1) confirme la nécessité de réaliser une ACV avec des inventaires spécifiques à l'organisme de R&D sur une technologie de référence à la fois pertinente vis-à-vis de l'état de l'art et adaptée à l'organisme de R&D. Afin de sélectionner la technologie de référence, une « analyse typologique » des projets de R&D est réalisée dans un premier temps, puis, une fois le profil environnemental (inventaires et résultats) sauvegardé, une analyse de sensibilité est menée permettant d'identifier les paramètres critiques des technologies d'un point de vue environnemental.

Deux types de paramètres critiques pourront ainsi être identifiés :

- Des paramètres considérés comme « génériques » pour lesquels le manque des données à TRL bas pourra être compensé par les données issues de la référence.
- Des données considérées comme « spécifiques », qui différencient la nouvelle technologie (TRL bas) de la technologie de référence et dont l'étude de sensibilité permettra de se focaliser sur les données ayant le plus d'incidence sur les résultats environnementaux, ce qui facilitera le processus d'amélioration environnementale souhaité dès la phase de R&D, non seulement en agissant sur ces paramètres mais aussi en se comparant à la référence.

Cette base de données constituera alors un support de base et de comparaison pour l'évaluation et l'amélioration des nouvelles technologies innovantes d'un point de vue environnemental. La mise en place d'une référence permettra aussi de s'adapter au TRL bas et de répondre ainsi au problème de compatibilité entre les caractéristiques de la technologie non mature et la fiabilité des résultats.

La démarche de la mise en place de cette base de données de référence est reformulée dans la Figure 39.

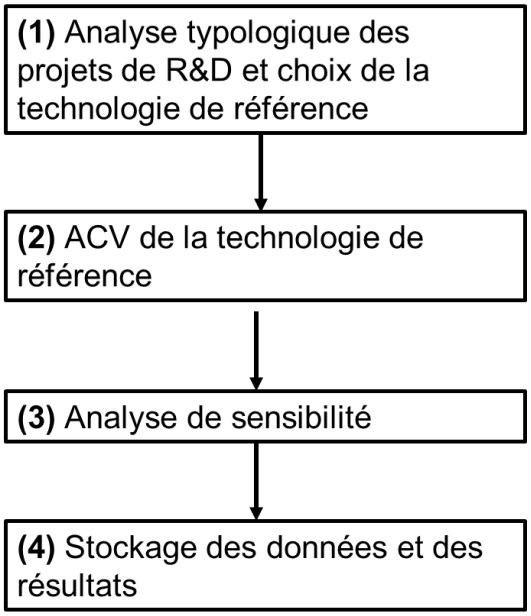


Figure 39. Démarche de la mise en place de la base de données de référence

1) **Analyse typologique des projets de R&D et choix de la technologie de référence :**

Dans l'organisme de R&D, les projets peuvent adresser plusieurs types de technologies pour produire un même système. L'enjeu principal est de sélectionner une technologie de référence à la fois pertinente vis-à-vis de l'état de l'art et adaptée à l'organisme de R&D dont les données de modélisation pour l'ACV sont disponibles. Le choix de la technologie de référence à évaluer peut ainsi être relativement compliqué.

Ainsi, l'approche proposée pour la sélection de la technologie de référence est basée sur l'analyse typologique (Figure 40).

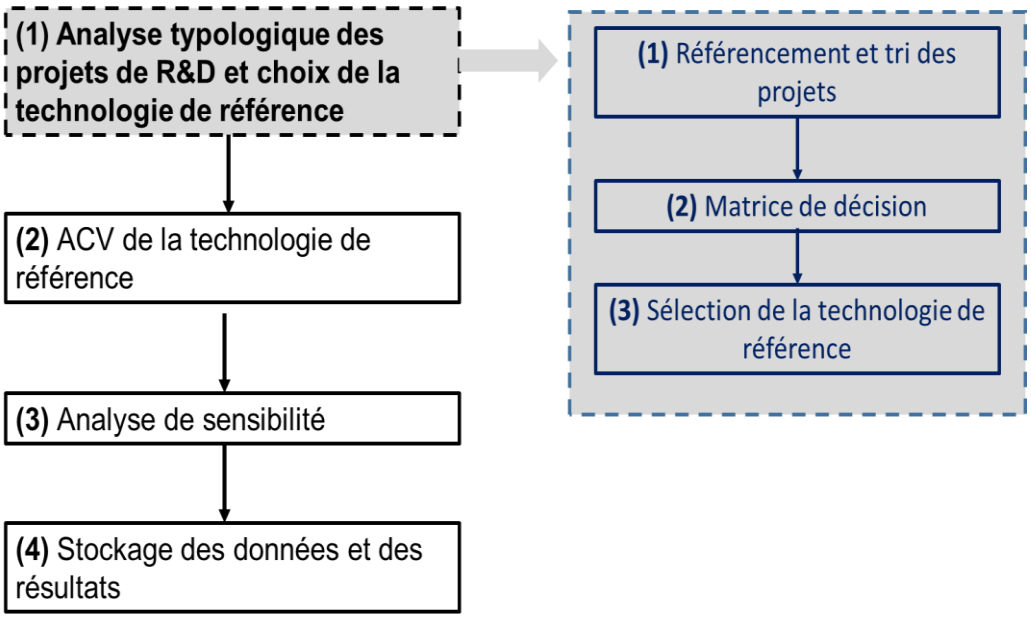


Figure 40. Étapes de l'analyse typologique des projets de R&D pour la sélection de la technologie de référence

Cette analyse consiste à regrouper les projets de R&D en fonction des technologies traitées et en fonction de plusieurs critères de choix qui répondent à différents critères dont la qualité des données disponibles.

Elle s'articule en 3 étapes :

a) **Référencement des projets :** L'organisme de R&D est souvent composé de plusieurs laboratoires qui peuvent traiter de projets indépendamment les uns des autres, ou qui peuvent être parfois impliqués dans le même projet de R&D. L'implication de plusieurs laboratoires permet d'avoir accès à plus de données accessibles sur la technologie étudiée. Ainsi cette étape de référencement consiste à rassembler les projets de R&D existants dans l'organisme de R&D puis faire un premier tri selon le nombre de laboratoires impliqués dans le projet de R&D pour s'assurer en premier lieu du taux de disponibilité de données.

b) **Matrice de décision :** Une fois référencés et triés, ces projets seront classés dans une matrice de décision en fonction de plusieurs critères de choix, souvent issus du cahier des charges :

- *L'échelle TRL* : Ce critère permet d'évaluer le degré de maturité de la technologie. Un TRL bas signifie que les données ne sont pas encore figées alors qu'un TRL élevé traduit un degré de maturité élevé et par conséquent des données connues et fixées. La qualité des données et leur taux de disponibilité

peuvent être ainsi définis. Le niveau attribué suit les règles définies par les normes (de 0 à 9)

- *Type de projet :* Ce critère traduit le degré d'action de l'organisme de R&D dans le projet. Dans le cadre de projets industriels, la confidentialité peut limiter l'accès à certaines données. En bilatéral (deux acteurs seulement), le degré d'action est élevé, mais pour des projets institutionnels, regroupant de nombreux partenaires, le degré d'action est souvent plus limité. Ce degré d'action traduit ainsi le niveau de disponibilités des données (non, oui sous condition, oui). Le Tableau 8 présente un exemple de quantification de la disponibilité des données en fonction du type de projet de R&D et attribue un facteur (entre 0 et 1) qui constitue une moyenne évaluée, mais pouvant varier au cas par cas selon le domaine et les acteurs.
- Obligations environnementales *:* Dans certains projets de R&D, l'évaluation environnementale de la technologie est imposée par le client dans le cahier de charge. Dans ce cas, l'accès aux données est souvent plus facile car un partenaire devrait fournir les données pour la réalisation de la tâche et le technologue devrait collecter les données. Ce critère est traduit par un choix binaire (1 si l'obligation est définie dans le cahier des charges et 0 si elle n'est pas définie).

Tableau 8. Exemple de quantification de la disponibilité des données en fonction de type de projet de R&D

Type de projet de R&D	Degré d'action	Disponibilité des données	Facteur associé
Industriel à plusieurs acteurs	Faible à moyen	Oui sous condition	0,5
Institutionnel	Moyen	Oui sous condition	0,5
Bilatéral	Fort	Oui	1

c) **Sélection de la technologie de référence :** C'est la dernière étape dans cette analyse. La technologie ayant la note la plus élevée sera ainsi sélectionnée comme référence (ex. la technologie B du projet 2 dans le Tableau 9)

Tableau 9. Exemple de matrice de décision pour le choix de la technologie de référence

Critères de choix	**Score attribué à chaque projet**		
	Projet 1 (Technologie A)	**Projet 2 (Technologie B)**	**Projet 3 (Technologie C)**
Échelle TRL	3	7	5
Type de projet	1	0,5	1
Obligations environnementales	0	0	1
Somme des scores	4	**7,5**	7

2) ACV de la technologie de référence :

- *Objectif de l'étude :*

Il s'agit d'une étude complète d'ACV sur la technologie sélectionnée dans l'étape 1, jouant le rôle de référence pour les analyses comparatives ultérieures.

- *Démarche d'analyse :*

L'objectif de cette ACV est non seulement de stocker les résultats environnementaux mais aussi d'identifier les données/ paramètres contribuant le plus dans l'impact environnemental (Figure 41), parmi :

- Les phases de cycle de vie
- Les sous-produits (procédés de fabrication)
- Les composants des sous-produits (flux élémentaires)

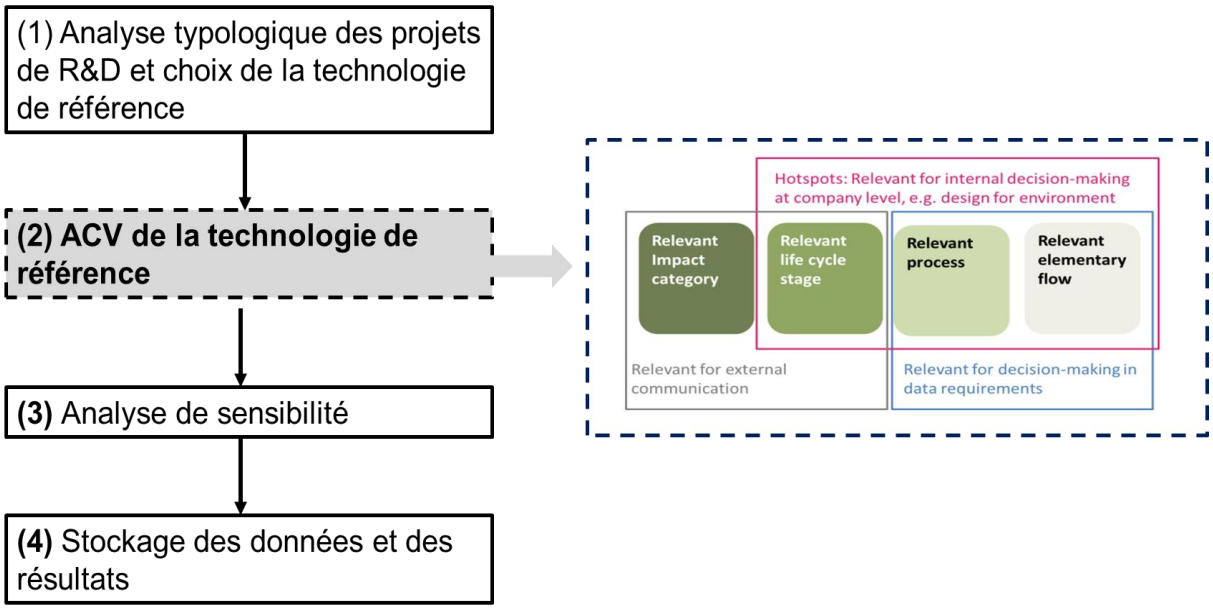


Figure 41. Étapes de l'évaluation environnementales dans l'ACV de la technologie de référence

Pour le choix des catégories d'impact, plusieurs indicateurs et méthodes sont recommandés par « l'international Reference Life Cycle Data System » (ILCD) [31]. L'objectif dans notre cas est d'évaluer l'ensemble des catégories d'impact pour avoir une vision globale du profil environnemental.

Les différentes catégories d'impact, leurs modèles d'analyse et les indicateurs associés sont représentés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Définition les catégories d'impact retenues dans l'ACV de référence, d'après [30]

Catégorie d'impact	Modèle d'analyse environnementale	Unité de l'indicateur	Substances de référence
« Climate change »	**Le potentiel de réchauffement planétaire** (PRP) calcule le forçage radiatif sur un horizon temporel de 100 ans. Il évalue l'impact potentiel des différentes émissions gazeuses sur le changement climatique.	kg CO2 éq	Dioxide de carbone (CO2)
« Ozone depletion »	Le **potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)** calcule les effets destructeurs sur la couche d'ozone stratosphérique sur un horizon temporel de 100 ans. La couche d'ozone stratosphérique réduit la quantité de rayonnement UV qui atteint le sol et qui peut causer des dommages aux humains, aux animaux, aux plantes et aux matériaux.	kg CFC-11 eq	Le trichlorofluorométhane(CFC -11)
"Human toxicity, cancer effect & non cancer effect"	Définit **la toxicité humaine**. L'unité "CTUh" (Comparative Toxic Unit for Humans) exprime l'augmentation estimée de la morbidité dans la population humaine totale due aux différents types d'émissions entrant dans l'environnement. Le calcul est basé sur USEtox, un modèle qui décrit le devenir chimique, l'exposition, l'effet et éventuellement la gravité des émissions.	CTUh	Unité toxique comparative pour l'homme (CTUh)
« Particulate matter »	Cette catégorie estime **l'effet potentiel des émissions de poussières** fines sur la santé humaine : quantification de l'impact de la mort prématurée ou de l'invalidité que les particules et les substances inorganiques respiratoires ont sur la population. Il comprend l'évaluation des particules primaires (PM10 et PM2,5) et secondaires (y compris la création de particules secondaires dues aux émissions de SOx, NOx et NH3) et de CO	kg PM2.5 eq	Particules fines de diamètre 2,5 µm
« Ionizing radiation HH »	Cette catégorie estime **l'effet des émissions radioactives sur la santé humaine**. La plupart des rayonnements proviennent de l'exploitation normale des centrales nucléaires, y compris la production de combustible nucléaire. La quantification de l'impact des rayonnements ionisants sur la population est effectuée en se référant à l'Uranium 235.	kBq U235 eq	Uranium 235
« Ionizing radiation E (interim) »	Cette catégorie estime **l'effet des émissions radioactives sur l'éco-système**	CTUe	Unité toxique comparative pour l'homme (CTUh)
« Photochemical ozone formation »	Expression de la contribution **potentielle à la formation photochimique de l'ozone près du sol**. La méthode évalue les effets de l'ozone sur la santé humaine et d'autres composés oxygénés réactifs (modèle LOTOS-EUROS) développés dans la basse atmosphère en raison des émissions de dioxydes d'azote, par exemple.	kg NMVOC eq	Composés organiques volatils non méthaniques

Catégorie d'impact	Modèle d'analyse environnementale	Unité de l'indicateur	Substances de référence
« Acidification »	Cette catégorie d'impact décrit **les impacts potentiels sur le sol et l'eau douce** qui deviennent plus acides en raison du dépôt de certains polluants de l'air : le modèle "Dépassement cumulé" caractérise la variation du dépassement des charges critiques de la zone sensible dans les écosystèmes terrestres et les principaux écosystèmes d'eau douce, dans lesquels les substances acidifiantes se déposent.	molc H+ eq	la concentration en ions hydrogènes
« Terrestrial eutrophication »	**L'eutrophisation** signifie que trop d'éléments nutritifs atteignent les écosystèmes et nuisent aux plantes et aux animaux vivant dans des systèmes sensibles : le modèle "Dépassement cumulé" caractérise la variation du dépassement des charges critiques de la zone terrestre sensible, dans laquelle les substances eutrophisantes ("nutriments excédentaires") se déposent.	molc N eq	Nutriment excédentaires
« Freshwater eutrophication »	Expression du degré auquel **les nutriments émis en Europe atteignent l'eau douce** et conduisent au problème de l'eutrophisation. Seules les émissions de phosphore sont évaluées puisqu'il est considéré comme le facteur limitant dans l'eau douce. Le Modèle EUTREND est utilisé pour modéliser les émissions atmosphériques.	kg P eq	Phosphore
« Marine eutrophication »	Expression du degré auquel **les nutriments émis en Europe atteignent les océans** et conduisent à l'eutrophisation. Seules les émissions d'azote sont évaluées puisqu'il est considéré comme le facteur limitant dans l'eau de mer.	kg N eq	Azote
« Freshwater ecotoxicity »	Mesure de **la toxicité environnementale dans l'eau douce** en raison des émissions : l'unité "CTUe" (Comparative Toxic Unit for ecosystems) est l'expression d'une estimation de la fraction potentiellement affectée des espèces (PAF) intégrée dans le temps, et du volume par unité de masse d'un produit chimique émis (PAF m3 année/kg).	CTUe	Unité toxique comparative pour l'homme (CTUh)
« Land use »	**L'utilisation des terres** fait généralement référence à la quantité et au déficit de qualité des terres occupées ou transformées. Ce modèle est basé sur les changements dans la matière organique du sol (SOM) en raison des différentes catégories d'utilisation des terres. Le SOM est un indicateur clé de la qualité du sol et influence les propriétés telles que la structure du sol et la fertilité.	kg C deficit	Déficit des terres occupées
« Mineral, fossil & ren resource depletion »	Le modèle couvre **l'épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables**. Le modèle tient compte à la fois de la production annuelle et de la disponibilité de la ressource.	kg Sb eq	Antimoine
« Water Depletion »	Évaluation de **l'utilisation de l'eau** liée à la rareté locale de l'eau dans différents pays.	m3	Eau
« Cumulative Energy Demand «	Cet impact décrit **la consommation de sources d'énergie fossile, nucléaire et renouvelable** tout au long du cycle de vie d'un bien ou d'un service.	MJ	Energie

- *Exigences de qualité des données :*

Afin de s'assurer de la conformité des données de la technologie de référence aux exigences de qualité, les différents critères, détaillés dans le chapitre 2 (Tableau 4) (facteur temporel, facteur géographique, complétude, cohérence, incertitude), seront évalués.

3) Analyse de sensibilité :

L'analyse de sensibilité est souvent réalisée suite à une ACV pour juger la robustesse des résultats (Figure 42). Elle peut aussi contenir différents scénarii permettant de faciliter l'interprétation des résultats principaux. Dans le cas de cette ACV de référence, l'objectif est plutôt d'identifier le niveau d'information à collecter à chaque étape de fabrication, facilitant ainsi l'analyse environnementale à TRL bas et aboutissant à une analyse efficiente. Comme discuté auparavant, deux types des paramètres critiques sont identifiés : des paramètres génériques et des paramètres spécifiques.

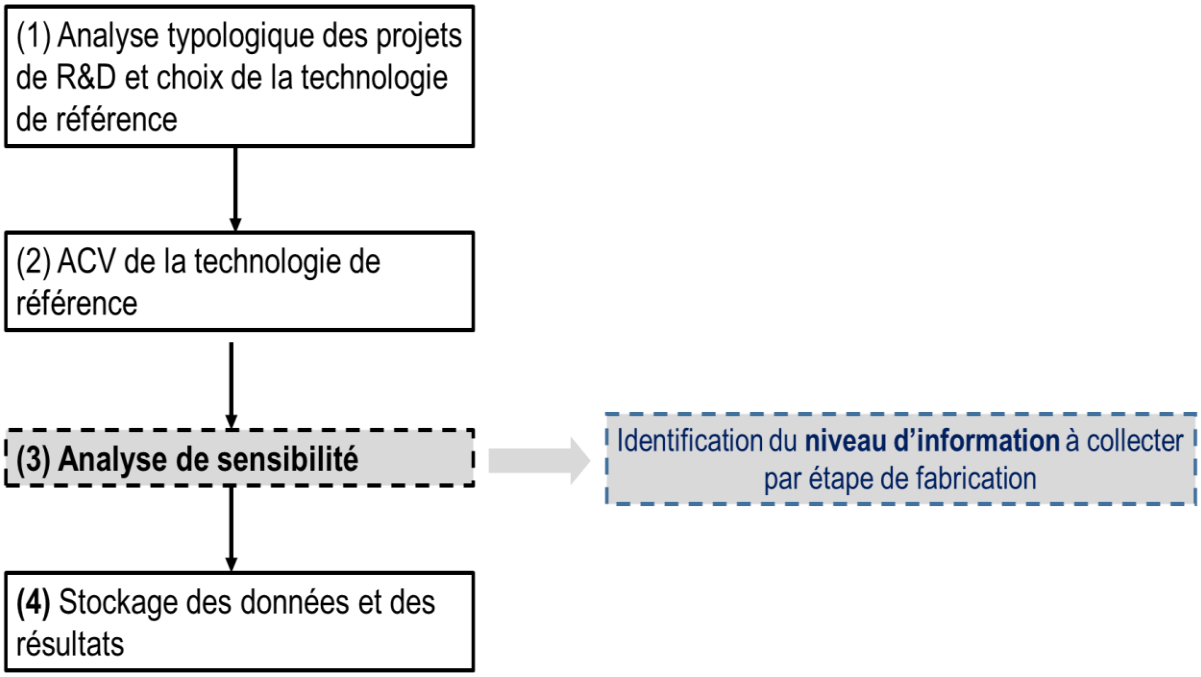


Figure 42. Analyse de sensibilité de la technologie de référence

4) Stockage des données et des résultats :

Il s'agit de stocker les résultats obtenus et de capitaliser les données collectées et les paramètres critiques identifiés dans une base de données (Figure 43). Les résultats et les données peuvent être stockés sous forme des tableaux.

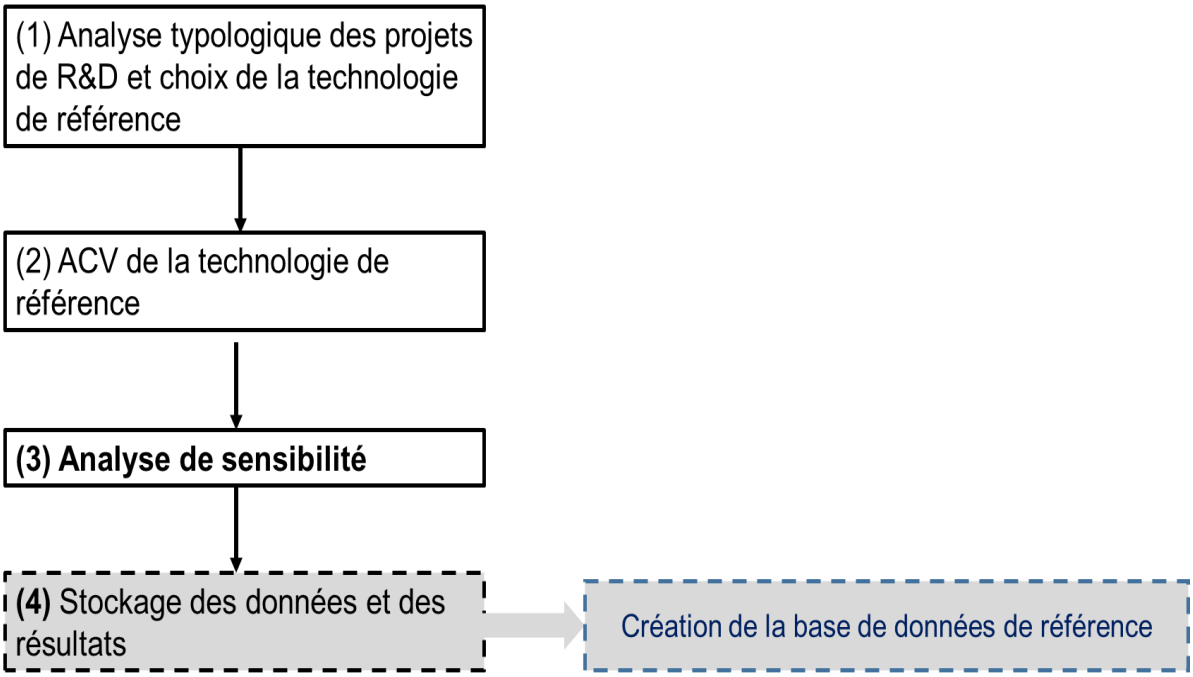


Figure 43. Stockage des résultats et des données sous forme d'une base de données de référence

2 Réponse à l'hypothèse 2 : méthode d'analyse et d'amélioration multicritères

À partir de l'hypothèse 2, détaillée dans le chapitre 2, la méthode proposée est basée sur la quantification des taux d'évolution techniques, économiques et environnementaux d'une nouvelle technologie par rapport à une référence. La méthode proposée regroupe à la fois des outils d'évaluation environnementale et des outils d'aide à la décision multicritères (MCDM). L'algorithme de l'approche est décrit dans la Figure 44.

L'approche s'articule en trois étapes principales :

1) Définition du besoin du client.
2) Analyse de la nouvelle technologie par rapport à la technologie de référence.
3) Prise de décision et proposition d'améliorations.

Par la suite, le cas du partenaire industriel, en tant que client de l'organisme de R&D sera considéré, car dans ce cas, l'objectif est le plus souvent d'aboutir au développement de la technologie jusqu'à sa maturité et sa commercialisation.

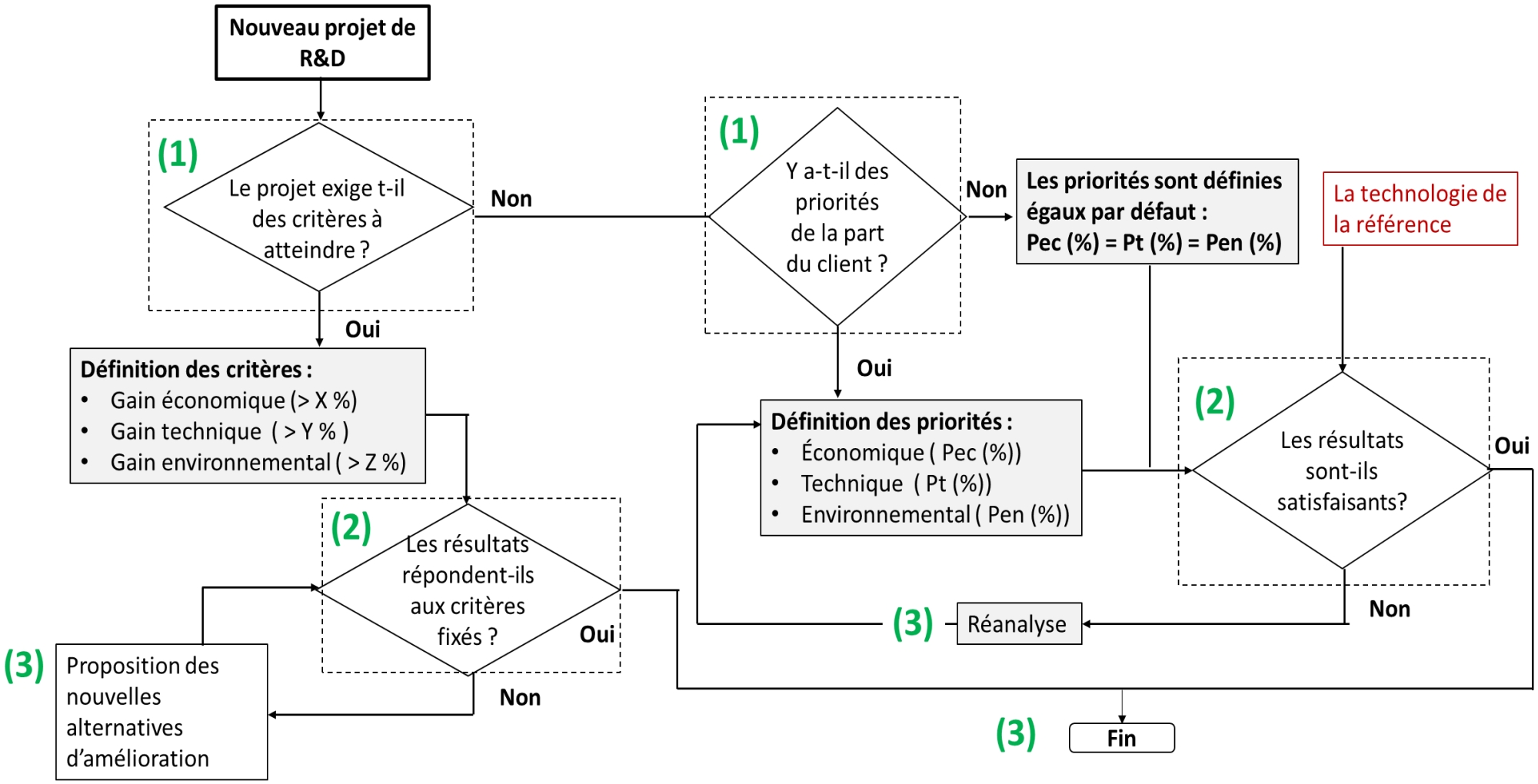


Figure 44. L'algorithme de l'approche d'éco-conception développée pour orienter les choix technologiques dans les projets de R&D à TRL bas

2.1 Besoins du « partenaire industriel »

Les besoins du partenaire industriel peuvent différencier d'un projet à un autre.
L'objectif de cette étape est de quantifier les objectifs du projet de R&D de sorte d'avoir in fine un vecteur **P** composé de trois critères économique, technique et environnemental avec, pour chacun de ces critères, un pourcentage traduisant son taux d'importance (**Pec (%)**, **Pt (%)** et **Pen (%)**). Il s'agit d'apporter plus de rationalité dans les choix effectués en ajoutant une stratégie de d'éco-conception tout en tenant compte des impératifs de l'efficacité technique et économique. Ainsi, même si l'importance environnementale est faible dans le projet, l'intégration de cet indicateur dans les priorités permet de capitaliser l'information et d'introduire ainsi la démarche d'éco-conception. Cette étape de quantification facilite également la prise de décision en passant d'un choix multiple à un choix unique basé sur un gain composite.

Dans l'organisme de R&D, un projet de R&D peut être classé en trois types selon les besoins / objectifs du partenaire industriel (Figure 45) :

A. **Projet avec exigences :** Les objectifs à atteindre sont bien déterminés : avant le processus de développement, l'industriel quantifie ses besoins (par exemple une réduction de X % du coût de la technologie, une augmentation de Y % des performances techniques et une réduction de Z % du bilan carbone dans le cahier des charges. L'équipe projet doit tester la nouvelle technologie et évaluer l'évolution technique, économique et environnementale jusqu'à atteindre ces objectifs. La prise de décision est conditionnée par ces exigences. Ainsi, le vecteur des critères P est défini par défaut en fonction des exigences déjà fixées par le client.

B. **Projets avec priorité :** L'industriel n'a pas d'exigences quantifiés bien définies mais il priorise tel(s) critère(s) par rapport aux autres par ordre d'importance (par exemple, la priorité du projet est la réduction du coût de fabrication). Pour quantifier les besoins, les priorités du projet doivent être classées par ordre d'importance. En utilisant la méthode d'analyse hiérarchique (AHP) **« Analytic Hiearchy Process »,** détaillée dans le chapitre 2, un score sera associé à chaque critère de priorités.

C. **Projet sans priorités :** Certains projets visent un objectif global de développer une nouvelle technologie suite à une idée pour répondre à un besoin (par exemple développer des modules PV légers). Dans ce type de projet, l'industriel peut s'investir dans cette nouvelle idée sans garantie technique ou économique. L'intégration de la composante environnementale est ainsi simplifiée car l'équipe projet peut guider

l'industriel dans la prise de décision avec de multiples choix, y compris liés à l'aspect environnemental. Ainsi, la quantification des besoins est basée sur l'hypothèse que les priorités du projet sont égales d'un point de vue technique, économique et environnemental. Ainsi, le score 33 % est associé à chacun des critères.

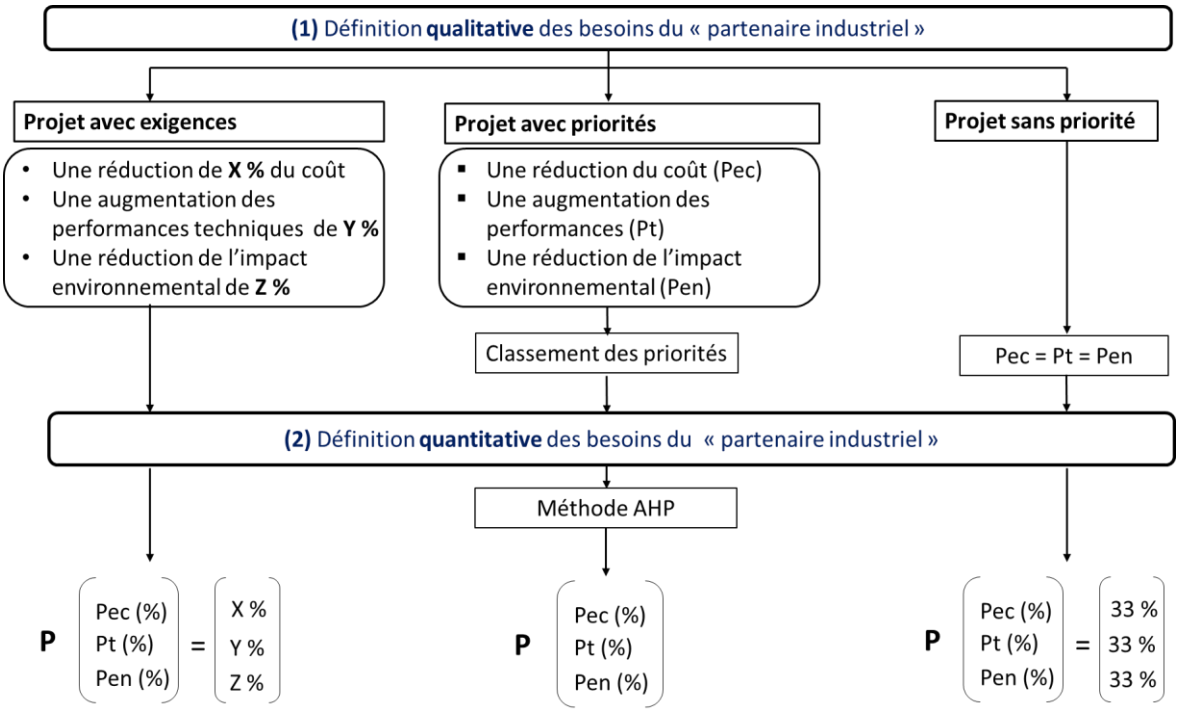


Figure 45. Méthodes de quantification des critères économique, technique et environnemental en fonction des besoins du projet (A, B et C).

2.2 Analyse de la nouvelle technologie par rapport à la technologie de référence

Rappelons ici que l'un des objectifs de la méthode à développer est la simplicité d'analyse et d'interprétation des résultats, en particulier pour l'aspect environnemental afin de garantir la démocratisation des connaissances environnementales tout en gardant la transparence et la fiabilité des résultats. Ainsi, la méthode d'analyse proposée, est basée sur l'estimation des évolutions techniques, économiques et environnementales d'une nouvelle technologie par rapport à la technologie de référence afin de prendre une décision à multiple critères dont les unités varient. Il est donc nécessaire de pouvoir rassembler ces critères en une même unité

d'une façon objective et facile grâce à une en une évolution composite positive (gain) où négative (perte).

La simplicité d'analyse d'une telle approche réside dans le fait que la comparaison par rapport à la technologie de référence fait appel à la base de données déjà conçue en réponse à l'hypothèse 1 où tous les paramètres critiques, les résultats environnementaux des procédés de référence ainsi que les inventaires sont déjà stockés. Ainsi, se comparer à une technologie de référence permet de résoudre le problème de la collecte des données non seulement d'un point de vue de la disponibilité des données, mais aussi du point de vue de la gestion du temps.

- *Estimation des taux d'évolution technique et économique :*

En se basant sur les données de la technologie de référence, les taux d'évolution économique (**E_{EC} (%)**) et technique (**E_{TE} (%)**) sont estimés en se basant sur la formule suivante :

$$\boldsymbol{E}(\%) = \frac{\boldsymbol{Fnew} - \boldsymbol{Fref}}{\boldsymbol{Fref}} \qquad (5)$$

Où :

F new = Indicateur économique ou technique de la nouvelle technologie.

F ref = Indicateur économique ou technique de la technologie de référence.

Pour une même technologie, plusieurs indicateurs peuvent être définis comme indicateurs économiques et techniques.

- *Estimation du taux d'évolution environnemental :*

L'objectif dans cette étape est de pouvoir estimer l'impact environnemental d'une nouvelle technologie non mature sans passer par les outils d'analyse environnementaux existants et tout en répondant au critère de fiabilité des résultats. L'idée proposée est d'utiliser l'ACV de référence, stockée déjà dans la base de données de référence, comme un outil de pilotage pour cette analyse. Les résultats seront ensuite comparés à ceux de la référence pour obtenir le taux d'évolution environnemental (**G_{EN} (%)**).

Ainsi la première étape dans cette estimation consiste à définir la nouvelle technologie en termes de paramètres et de procédés de fabrication, puis estimer l'évolution environnementale par rapport aux résultats environnementaux des inventaires de référence.

- **Définition des nouveaux procédés de fabrication :**

Chaque système complexe est composé de plusieurs sous-produits dont chacun est le résultat d'un procédé de fabrication bien spécifique. Ainsi, chaque sous-produit peut être considéré comme un produit final, dont l'inventaire est composé par des paramètres spécifiques **(p)**, flux de matières (consommables) **(C)**, d'énergie (électricité) **(Elec)** et de déchets **(D)** comme illustré par la Figure 46.

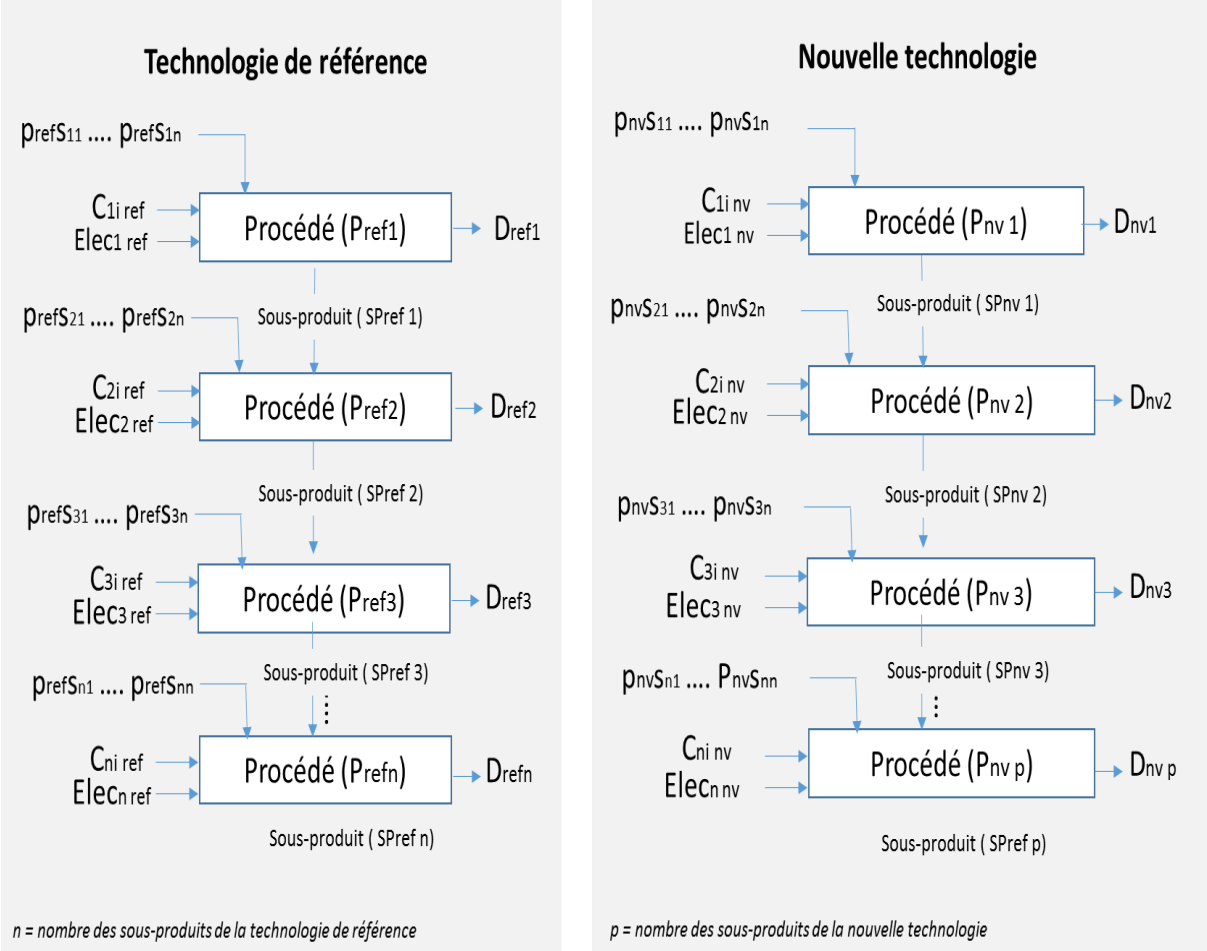


Figure 46. Modélisation de la chaine de valeur de la technologie de référence et de la nouvelle technologie par sous-produits

Afin d'assurer la comparaison entre la nouvelle technologie et la technologie de référence, il est nécessaire d'avoir le même nombre de sous-produits pour les deux technologies. Cependant, certains procédés peuvent être retirés et des nouveaux procédés peuvent être rajoutés dans la nouvelle technologie, rendant ainsi la comparaison plus difficile.

Ainsi, l'idée est de modéliser les deux technologies de façon à avoir le même nombre des sous-produits où l'inventaire de chaque sous-produit est estimé en fonction de son équivalent de la référence.

Comme le montre le Tableau 11 la définition des nouveaux inventaires des procédés de fabrication **(P_{nv})** pour la nouvelle technologie à évaluer consiste à classifier ces composants en fonction des inventaires des procédés de référence (**P_{ref}**) en trois catégories :

- Consommables communs **(C_c)** et déchets communs **(D_c)** entre les deux inventaires
- Consommable retirés **(C_r)** et déchets retirés **(D_r)** du nouvel inventaire.
- Consommables ajoutés **(C_a)** et déchets ajoutés **(D_a)** dans le nouvel inventaire.

L'électricité consommée **(Elec)** dans le nouveau sous produit sera également définie.

Tableau 11. Exemple d'application de la méthode de répartition des nouveaux inventaires (**P_{nv}**) en se basant sur les inventaires de référence (**P_{ref}**)

	P_{ref}	**P_{nv}**
Flux de matière (C) (kg/unité)		
Consommables communs	$C_{(cref)\,i}$	$C_{(cnew)\,i}$
Consommables retirés	$C_{(rref)\,i}$	0
Consommables ajoutés	0	$C_{(nnew)\,i}$
Flux d'énergie (Elec) (kWh/unité)		
Électricité consommée	$Elec_{ref}$	$Elec_{new}$
Flux des déchets (D)		
Déchets communs	$D_{(cref)\,j}$	$D_{(cnew)\,j}$
Déchets retirés	$D_{(rref)\,j}$	0
Déchets ajoutés	0	$D_{(nnew)\,j}$

∀ i = 1 … n, n = nombre des consommables dans la nouvelle recette du sous-produit.

∀ j = 1 … m, m = nombre des déchets rejetés dans la nouvelle recette du sous-produit.

- **Estimation des impacts environnementaux des nouveaux procédés :**

Une fois que l'ensemble des **P_{newS}** dans la chaine de valeur sont définis, les résultats environnementaux de chaque inventaire sont calculés à partir des résultats stockés de l'ACV de référence, tel que pour :

- **Les consommables communs (C_c) :** les résultats des impacts environnementaux seront proportionnels aux résultats des impacts de la référence.

- **Les consommable retirés (C_r) :** les résultats des impacts environnementaux seront retirés
- **Les consommables ajoutés (C_a) :** les résultats des impacts environnementaux seront ajoutés de la base donnée. Les résultats des impacts des nouveaux matériaux ayant été au préalable importés de la base de données ; Ecoinvent, leader international des données d'écobilan [144], stockés dans la base de données de référence, et disponibles pour l'utilisation dans la modélisation des nouveaux flux élémentaires.

Ensuite, si le lieu de la production du sous-produit est le même, l'impact de l'électricité est proportionnel à l'impact de la référence. Sinon, l'impact est estimé en fonction du pays de la production et de son mix énergétique, déjà importé de la base de données Ecoinvent. Par ailleurs, la mise à jour de ces données est importante pour assurer la qualité des données.
Enfin, la même méthode du calcul des nouveaux résultats d'impact est également appliquée pour exprimer l'impact du flux de déchets.

Une fois que les résultats des impacts environnementaux de chaque flux élémentaire du procédé (p) sont évalués, l'impact de ce procédé est égal à la somme de ses flux (consommables, énergie et déchets), défini comme **($ImpactP_{nv\ (j)\ (17,1)}$)** (Équation 6); Il s'agit d'une matrice d'une colonne et de 17 lignes représentant les résultats des 17 impacts environnementaux listés auparavant (Tableau 10).

$$\boldsymbol{ImpactPnv(j)\ (1,17) = \sum_{i=1}^{17} C(1,i) + \sum_{i=1}^{17} Elec(1,i) + \sum_{i=1}^{17} D(1,i) \quad \nabla\, j : 1 \ldots p} \qquad (6)$$

Il faut noter que l'impact de chaque procédé est exprimé en unité d'impact par l'unité fonctionnelle propre au sous-produit, qui peut être différente de l'unité fonctionnelle de la technologie finale. Étant donné que l'objectif est d'évaluer l'impact des procédés intégrés dans le système global, l'étape suivante consiste à ramener ces impacts en une unité fonctionnelle préalablement choisie pour évaluer la technologie finale. Pour chaque sous-produit, il s'agit de définir un facteur de conversion **(F_j)** par lequel les impacts seront multipliés. Ce facteur de conversion représente le facteur liant les différents sous-produits du système entre eux.
L'impact final du sous-produit **($Impact\ P_{nvf\ (j)\ (17,1)}$),** exprimé en unité fonctionnelle du produit final, est décrit dans la formule suivante :

$$\boldsymbol{Impact\ Pnvf(j)\ (1,17) = \sum_{i=1}^{17} ImpactPnv(j)(1,i) * Fj \quad \nabla\, j: 1 \ldots p} \tag{7}$$

Cette formule permet de définir l'impact global de la technologie (**Impact $T_{nvG\ (17,1)}$**) comme suit :

$$\boldsymbol{Impact\ T\ nvG\ (1,17) = \sum_{j=1}^{p} Impact\ Pnvf(j) \quad , \qquad \nabla\, j: 1 \ldots p} \tag{8}$$

Ainsi le taux d'évolution environnemental par catégorie d'impact de la nouvelle technologie par rapport à la référence **Genf** est exprimé comme suit :

$$\boldsymbol{Genf(i)}(\%) = \frac{\boldsymbol{Impact\ T\ nvG(i,1) - Impact\ TrefG(i,1)}}{\boldsymbol{Impact\ TrefG(i,1)}} \quad , \qquad \boldsymbol{\nabla\, i : 1 \ldots 17} \tag{9}$$

Tel que $\boldsymbol{i}$ représente les catégories d'impact évaluées.

Par conséquent, le taux d'évolution environnemental final (**G_{enf}**) est calculé en sommant les évolutions environnementales par impacts (**G_{en}(i)**) multiplié par le vecteur de pondération qui (1/17 = 5.9 %) qui donne la même importance aux différents impacts pour assurer l'objectivité et la transparence des résultats environnementaux.
Ce choix de pondération peut varier selon les besoins du projet et selon l'importance donnée aux impacts environnementaux à prendre en compte.

2.3 Prise de décisions et proposition d'améliorations

En fonction des besoins du « partenaire industriel » fixés et quantifiés au début du projet (section 2.1), on peut distinguer deux scénarii de prise de décision illustrés dans la Figure 47. Si les besoins sont déjà prédéfinis par le client (scénario 1), la prise de décision est conditionnée par ces exigences, sinon (scénario 2) la décision est prise en fonction d'un taux d'évolution composite estimé en fonction des taux d'évolution économique, technique et environnemental pondérés par les besoins du client.

L'approche de l'analyse environnementale par procédé permet d'identifier l'impact environnemental de chaque procédé par unité fonctionnelle du système, permettant ainsi d'identifier les procédés contributeurs à l'impact et même aller plus loin pour identifier les flux élémentaires dans le procédé qui contribuent le plus à l'impact.

Une telle identification offre des possibilités d'amélioration des procédés de la technologie qui peuvent être adoptés dans le même projet de R&D.

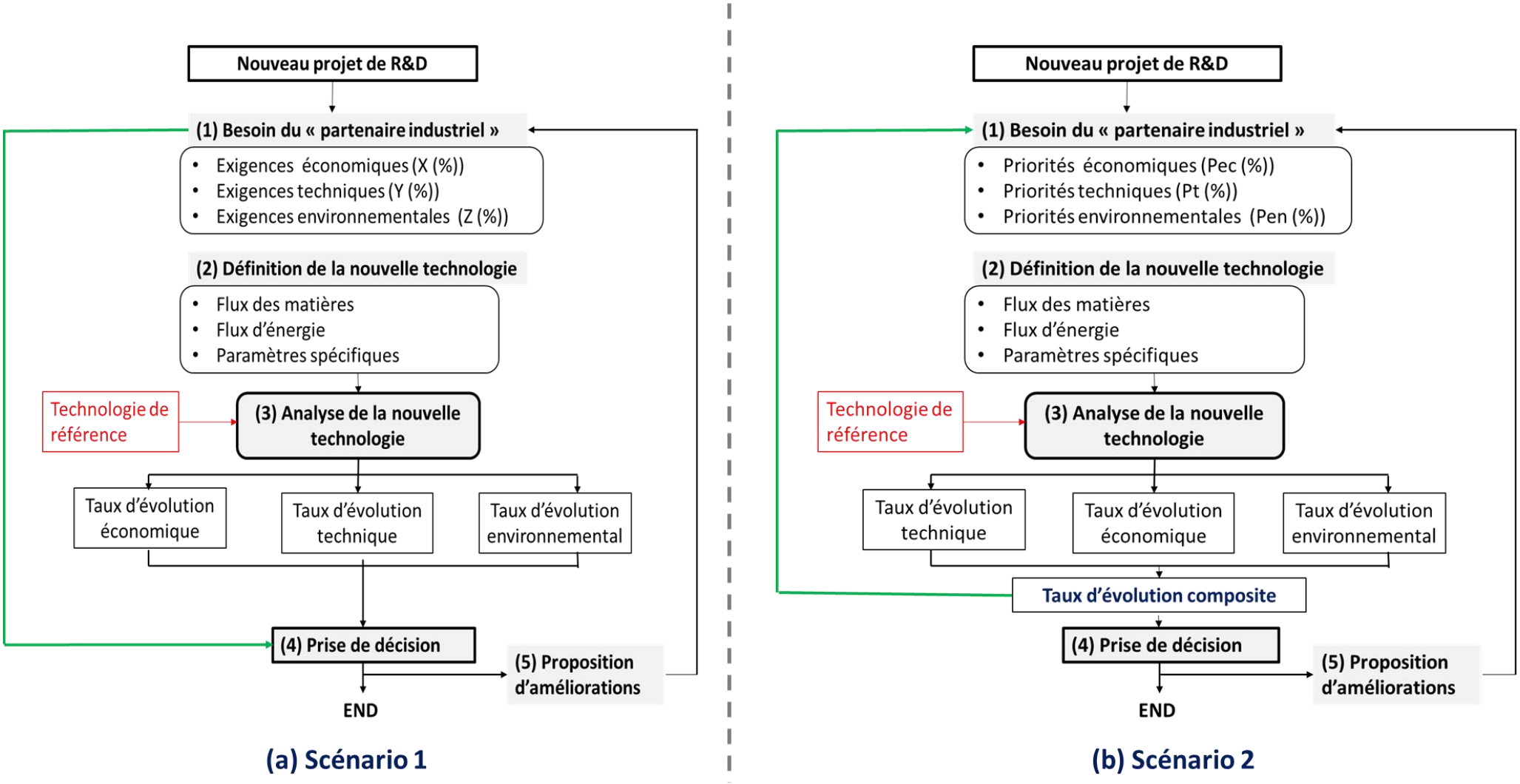


Figure 47. Scénarii de prise de décision en fonction du besoin du partenaire industriel

3 Réponse à l'hypothèse 3 : un outil « user friendly » d'aide à la décision multicritères

La réponse à la problématique de l'intégration pérenne de l'approche d'éco-conception développée dans les projets de l'organisme de R&D est son implémentation dans un outil informatique « User Fiendly » qui peut être utilisé par l'ensemble des ingénieurs au sein de l'organisme.

La Figure 48, définit le besoin principal de l'outil en identifiant la cible et le produit sur lequel il va agir.

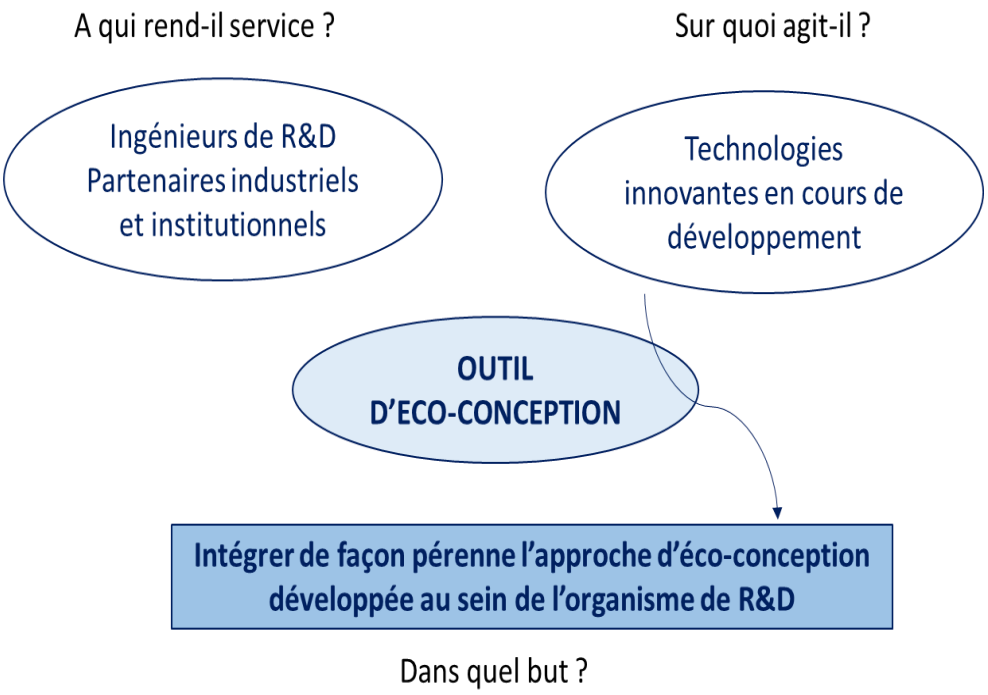


Figure 48. Diagramme « bête à cornes » d'expression du besoin auquel répond l'outil d'éco-conception à développer.

3.1 Cahier des charges de l'outil d'éco-conception

Pour répondre au besoin principal, l'outil interagit avec un environnement défini pour réaliser les différentes fonctions principales et fournir des résultats. Le diagramme ci-dessous, illustré par Figure 49 présente les relations entre les éléments environnants et le logiciel développé :

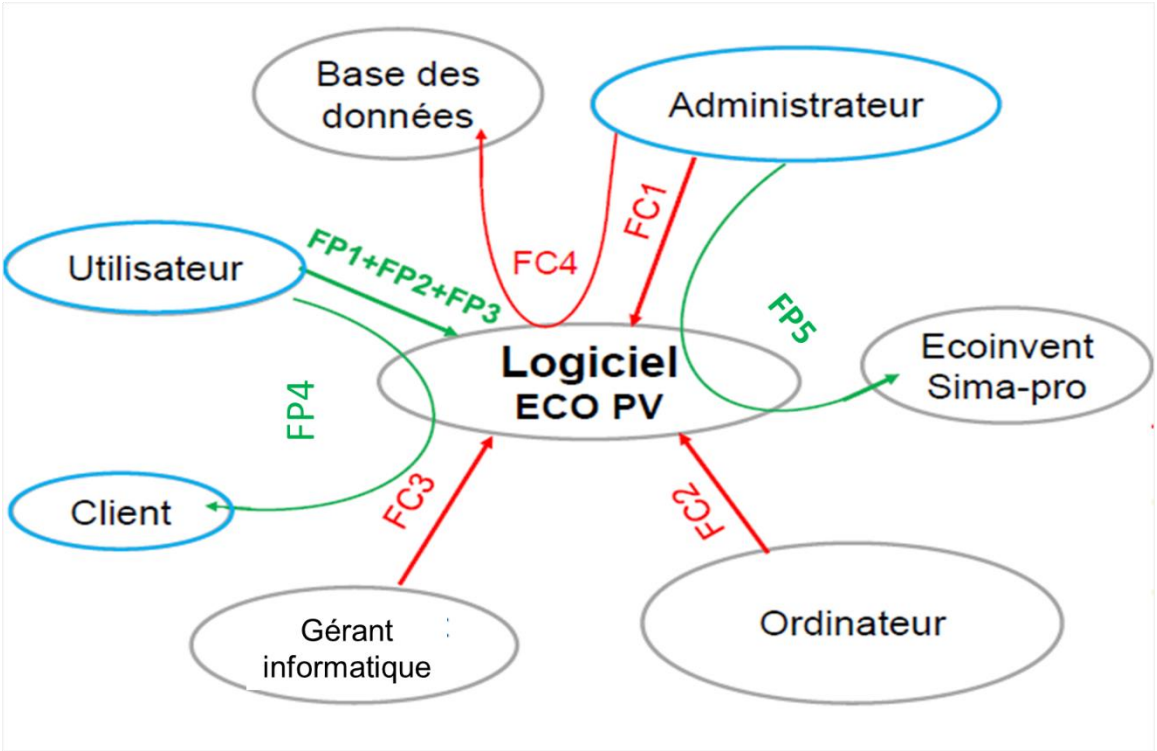


Figure 49. Diagramme de pieuvre de l'outil « ECO PV » et les interactions entre les différents acteurs

Les **(FP)** désignent les fonctions principales qui satisfont les objectifs de l'outil et les **(FC)** représentent les fonctions contraintes qui définissent les conditions qui doivent être vérifiées par l'outil.

- **Fonctions principales :**

FP1 = Évaluation multicritères de la nouvelle technologie

FP2 = Description de la nouvelle technologie

FP3 = Définition des besoins du client

FP4 = Prise de décision et proposition des améliorations

FP5 = Mise à jour des données

- **Fonctions contraintes :**

FC1 = Intervention en cas de défaillance

FC2 = Compatibilité avec le système d'exploitation disponible

FC3 = Gestion du niveau d'accès des utilisateurs

FC4 = Stockage des données

Ces fonctions doivent être implémentées tous en répondant aux besoins des différents utilisateurs de l'outil (Figure 50) qui sont **l'ingénieur de R&D** qui réalise les différentes analyses dans le cadre d'un projet de R&D, **le partenaire industriel** qui a investi dans ce

projet et qui doit prendre les décisions en fonction des résultats fournis par la R&D et **l'administrateur** qui assure la maintenance de l'outil, notamment la mise à jour des données. Ainsi, l'ingénieur de R&D a besoin d'un outil fiable, simple à utiliser, rapide et dont les résultats sont transférables pour les présenter à l'industriel pour prendre une décision selon ses besoins Afin que les résultats transmis soient fiables, l'administrateur réalise la mise à jour des données grâce à la flexibilité dans l'outil qui permet de faire les modifications nécessaires.
Ainsi, l'outil doit constituer un compris entre ces trois ces exigences : fonctionnalité, usage et maintenance, comme illustré par la Figure 50.

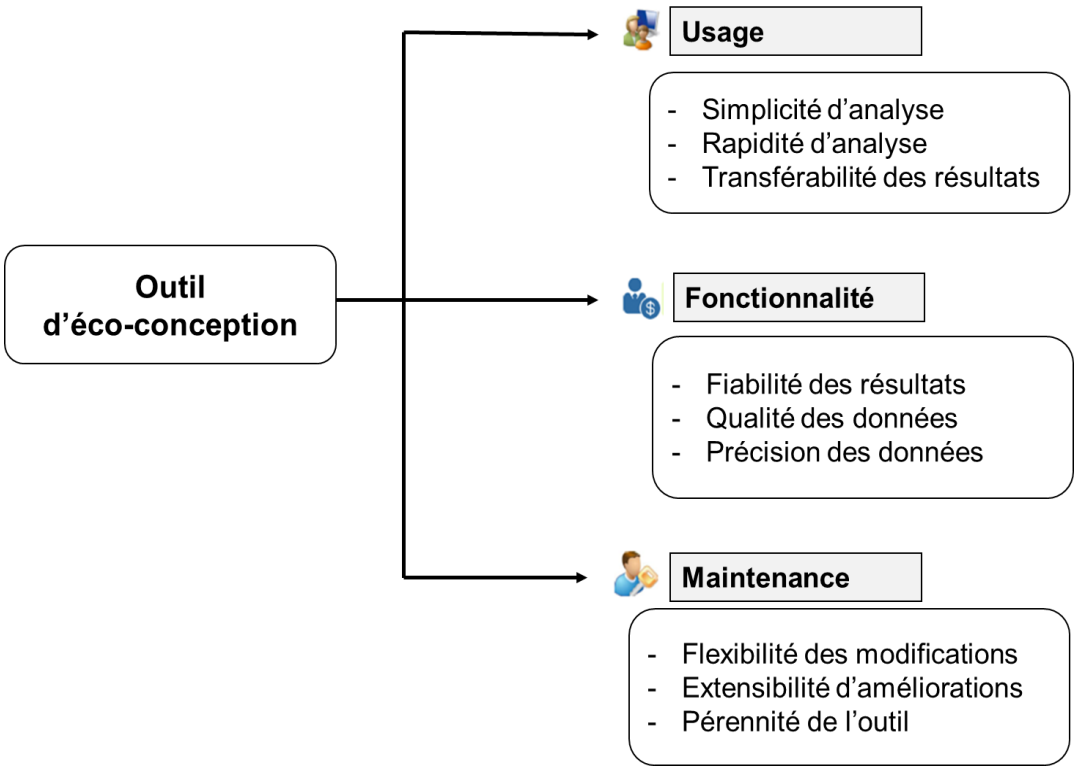


Figure 50. Les différentes spécifications de l'outil " ECO PV" vis à vis des principaux acteurs

L'architecture de l'outil doit répondre aux besoins suivants pour assurer son appropriation au sein de l'organisme de R&D :

- Une interface qui automatise la méthode de **quantification des besoins du client** en répondant au critère rapidité et simplicité.
- Une interface de définition de la nouvelle technologie **découpée par procédés de fabrication**.
- Les **paramètres critiques** pour chaque procédé doivent être présentés d'une façon dynamique permettant la modification avec les évolutions du marché et de la technologie en développement.

- **Une session pour l'administrateur** afin de faciliter la gestion et la mise à jour des données
- Des résultats **sous forme de graphiques** faciles à comprendre et à transférer.

3.2 Démarche de déploiement de l'outil

Une fois l'outil conçu, il est nécessaire de l'intégrer dans toutes les activités au sein de l'organisme pour valider la démarche développée. Ainsi une démarche de déploiement de l'outil au sein de l'organisme de R&D a été mise en place comme décrite dans la Figure 51.

Figure 51. Étapes d'intégration de l'approche d''éco-conception au sein de l'organisme de R&D grâce sur l'outil d'éco-conception

La première étape consiste en **une validation initiale *« Alpha test »*** de la méthode développée, une fois que l'algorithme est implémenté dans l'outil sur un projet pilote de R&D. Cette première validation permet de montrer le bon fonctionnement de l'outil et évaluer la cohérence des résultats obtenus avec l'outil à ceux déjà calculés avec l'outil d'ACV standard. La deuxième étape consiste en **la validation « bêta-test »**, dont l'objectif est de former les utilisateurs issus de l'intégralité de la chaine de fabrication, et d'identifier les limites et les pistes d'amélioration de l'outil. Une telle démarche permet d'assurer un premier déploiement de la méthode et par conséquent débuter la capitalisation des connaissances au sein de l'organisme. Un fois que l'outil est validé, des collaborations avec des experts du métier (référents PV et référents environnementaux) seront réalisées pour **la maintenance et la pérennisation de l'outil**. Ainsi, tous les besoins seront satisfaits pour l'**intégration pérenne de l'éco-conception** dans les projets de R&D au sein de l'organisme de recherche.

En conclusion, les bases de la méthodologie sont les suivantes:

- Base de données de référence
- Méthode d'estimation des taux des évolutions technique, économique et environnementale

- Outil informatique « user friendly »

Ces méthodes ont permis permettant ainsi une première validation des hypothèses formulées dans le chapitre 3 pour répondre aux problématiques de la question de recherche, comme présenté dans la Figure 52.
La deuxième validation de ces hypothèses consiste à implémenter ces méthodes dans un cas d'étude pour valider leur robustesse des méthodes.

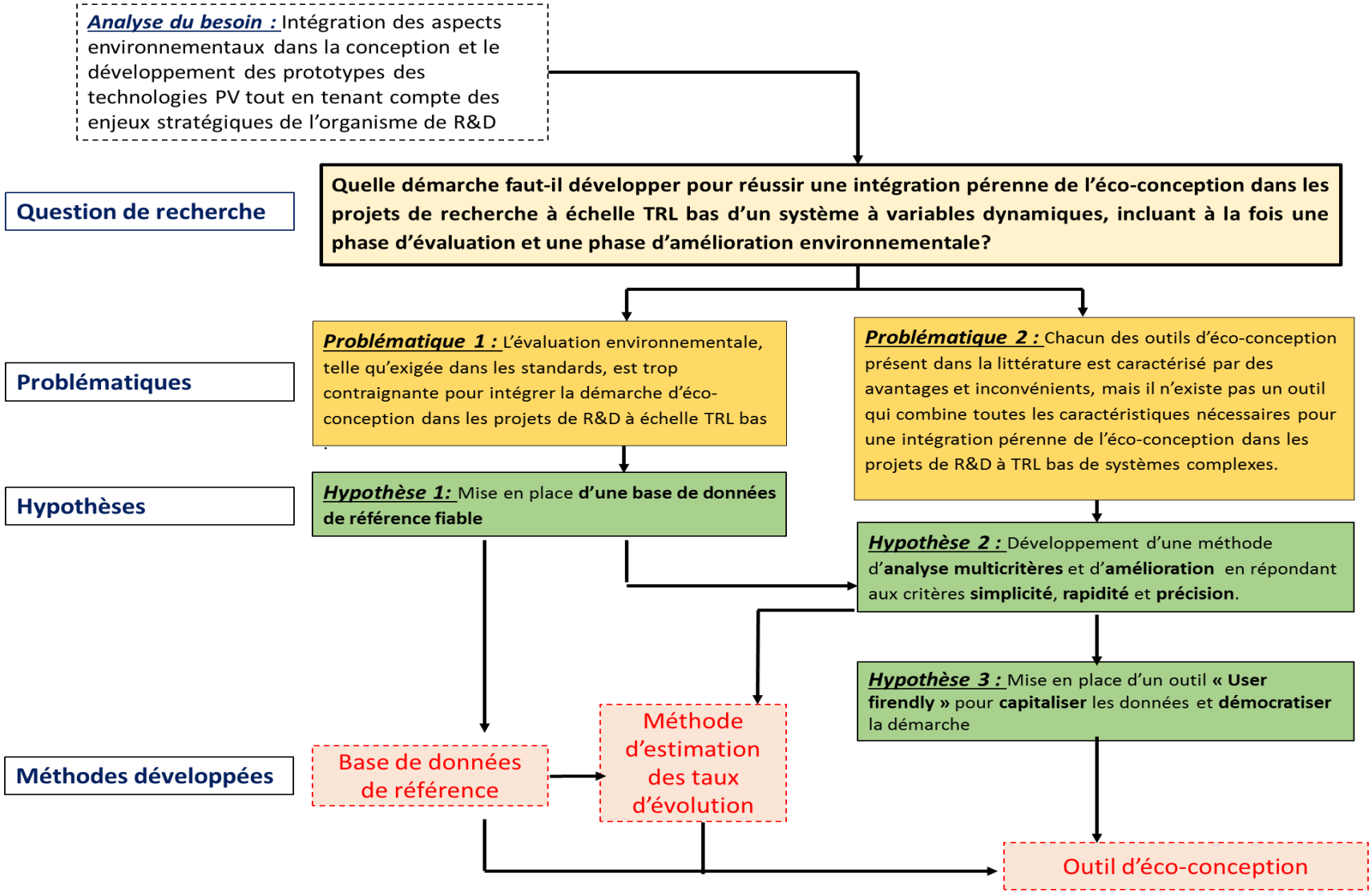


Figure 52. Synoptique général de la question de la recherche

Chapitre 4 Expérimentations et discussions

La phase d'expérimentions a pour objectif de tester les approches présentées au chapitre 3 pour répondre aux problématiques de recherche et valider les hypothèses formulées.
Pour cette phase, le domaine PV a été sélectionné comme cas d'étude pour valider la démarche développée. Ce choix est justifié par un double argument :

1) D'une part, l'activité dans la R&D des systèmes PV offre un terrain d'expérimentation favorable en termes de TRL bas dynamique, comme discuté dans le chapitre 1 :
   - La variabilité des études ACV PV publiées, la criticité de certains paramètres ainsi que la diversité technologies PV démontrent l'intérêt de la mise en place d'une base de données de référence.
   - Les systèmes PV sont considérés comme étant des produits plus respectueux pour l'environnement de part de leur nature. Cependant, les cahiers des charges qui définissent les projets de R&D ne sont pas souvent en adéquation avec la démarche d'éco-conception. L'intégration de la méthode développée dans ces projets peut ainsi apporter un argument fort en faveur de cette approche.

2) D'une part, certains organismes de R&D du domaine PV, comme répond le CEA - LITEN à l'INES, souhaitent intégrer la démarche d'éco-conception dans son activité

Pour cela, la démarche d'expérimentations suivante, illustrée dans la Figure 53, est mise en place : une base de données de référence et l'ACV d'une technologie PV de référence, seront réalisées dans un premier temps. La méthode d'estimation des évolutions par rapport à la technologie de référence est ensuite validée sur une technologie mature. L'objectif de cette étape initiale est de valider la méthode en comparant ses résultats environnementaux à ceux obtenus avec l'outil d'analyse environnementale de référence du domaine (Sima Pro). Enfin la méthode développée est expérimentée sur un projet PV de R&D à TRL bas comme première étude de cas, validant ainsi l'approche avant de l'automatiser pour atteindre l'objectif

d'intégration pérenne de la démarche par le biais d'un outil informatique, qui sera l'objet du chapitre 5.

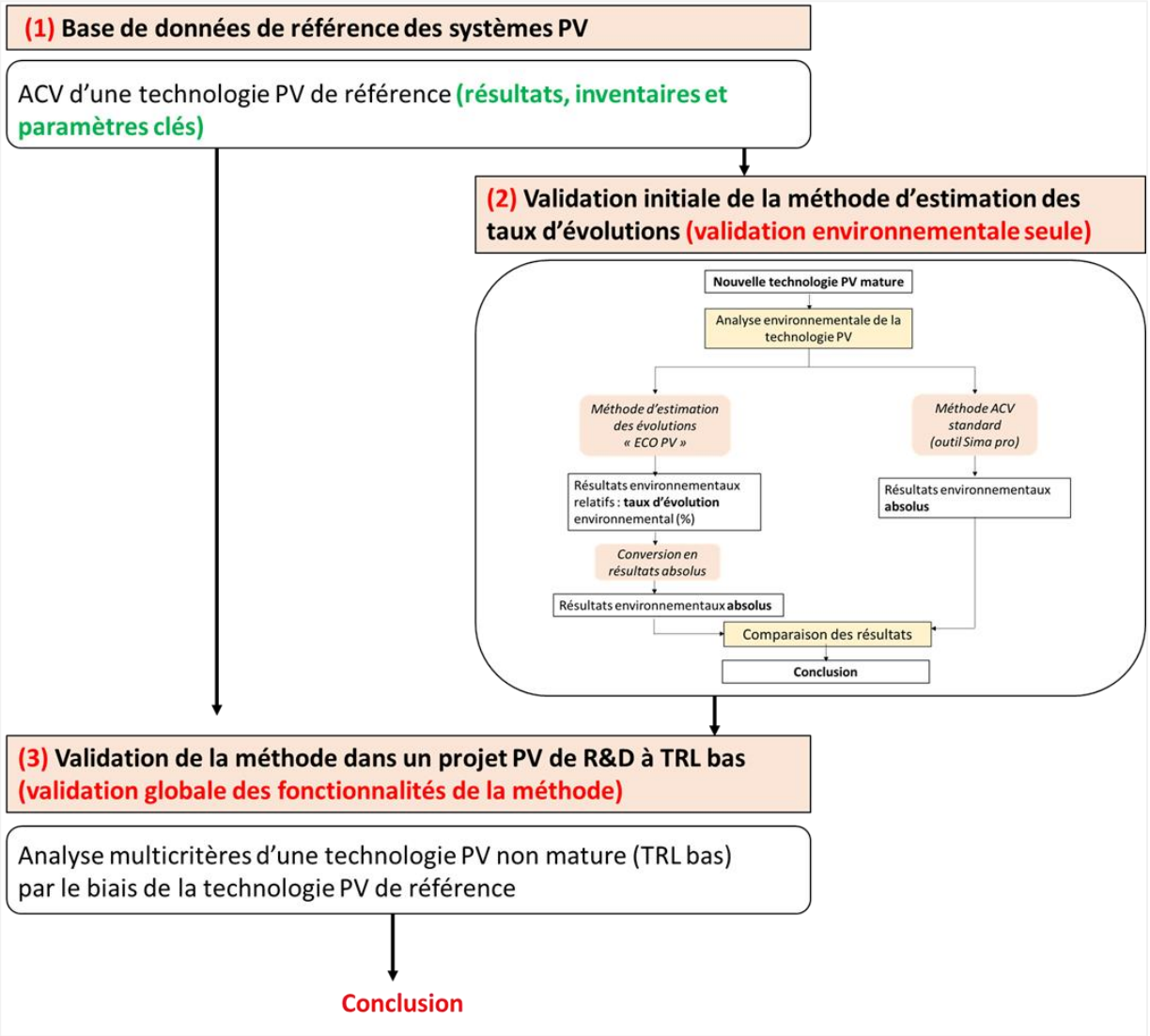


Figure 53. Synoptique de la démarche expérimentale de comparaison des résultats

1 Mise en place de la base de données de référence pour une application aux projets de R&D dans le domaine du PV

Rappelons ici que la mise en place de la base de données de référence dédiée aux systèmes PV se base sur la démarche, détaillée dans le chapitre 3 (Figure 39), constituée des quatre étapes suivantes : l'analyse typologique des projets de R&D pour choisir la technologie de référence, l'ACV de référence, l'analyse de sensibilité et enfin la capitalisation et le stockage des données et des résultats.

1.1 Analyse typologique des projets de R&D et choix de la technologie de référence

Les étapes d'analyse typologique des projets de R&D (référencement et tri des projets, matrice de décision et sélection de la technologie), détaillées dans le chapitre 3, ont été appliquées pour le choix de la technologie PV de référence.

Le DTS à l'INES travaille sur l'intégralité de la chaine de valeur du PV, depuis les matériaux et les cellules PV, jusqu'aux modules PV et leur installation en système (Figure 54).
Ainsi le département est composé de plusieurs laboratoires répartis par brique technologique (matériaux, cellules, modules et systèmes)

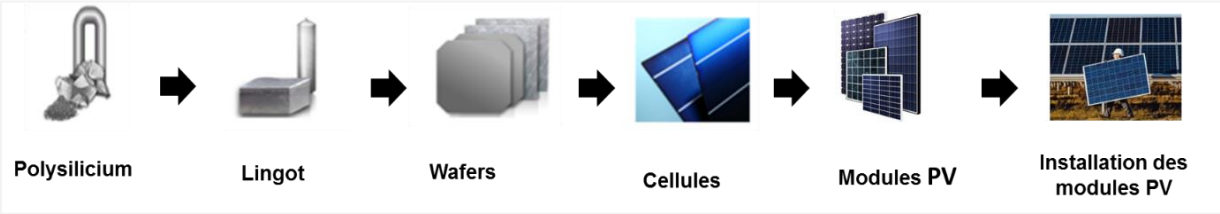


Figure 54. Activités du DTS à l'INES

De nombreux projets de R&D sont menés ; si certains projets de R&D sont destinés à améliorer un sous-produit spécifique du système PV (comme par exemple « développer un matériaux silicium plus performant et plus compétitif »), d'autres projets peuvent agir sur les différents sous-produits de la chaine de valeur du PV, où l'objectif est le développement d'une nouvelle technologie PV.

Ainsi, les différents projets PV de R&D au sein des différents laboratoires ont été recensés, collectés et renseignés selon différents critères (laboratoires impliqués, type de matériaux, technologie cellule, etc.) (Tableau 12). Sur le critère le nombre de laboratoires impliqués trois projets (projets 1, 2 et 14)[8] ont ainsi été sélectionnés dans un premier temps pour avoir un taux de disponibilité de données significatif.

[8] Numération justifiée par la confidentialité des projets.

Tableau 12. Les différents projets, collectés auprès des différents laboratoires au sein de l'organisme de R&D et classifiés selon les critères de choix

Réf des projets	Laboratoires du DTS				Les technologies PV							
					Matériaux			Cellule			Module	
	LMPS	LHMJ	LHJT	LMPV	Mono-Si	Multi-Si	Monolike	Monofacial	Bifacial	HJT	Standard	Biface
1	X	X		X			X		X			x
2	X	X		X	En fonction des résultats des tests							
3		X						X				
4		X						X				
5				X							X	
6			X	X					X	X		x
7		X						X				
8		X							X		X	
9				X	En cours de test pour toutes les technologies							
10				X								x
11				X								x
12			X	X						X		x
13			X	X						X		
14	X	X		X	X			X			X	

LMPS = Laboratoire des matériaux et procédés pour le solaire
LHMJ = Laboratoire des cellules à homojonction
LHJT = Laboratoire des cellules à hétérojonction
LMPV = Laboratoire des modules photovoltaïques

Une fois ces projets sélectionnés, le niveau de disponibilité des données est quantifié en se basant sur le type de projet, qui traduit le degré d'action de l'organisme de R&D (détaillée dans le Tableau 8, chapitre 3), l'échelle TRL et les obligations environnementales telles que spécifiées dans le cahier des charges. En se basant sur la matrice de décision illustré dans le Tableau 13, la technologie choisie comme technologie de référence est celle traitée dans le projet 14 ; **la technologie mono-Si monofacial (Al-BSF)**

Tableau 13 . Matrice de décision pour le choix de la technologie PV de référence

Cirières de choix	**Score attribué à chaque projet**		
	Projet 1 (Technologie A)	**Projet 2 (Technologie B)**	**Projet 14 (Technologie C)**
Échelle TRL	6	5	6
Type de projet (degré d'action)	0,25	0,25	1
Obligations environnementales	0	0	1
Somme des scores	6,25	5,25	**8**

Une fois la technologie sélectionnée, l'étape suivante est la réalisation de l'ACV de référence.

1.2 ACV de la technologie de la référence

1.2.1 Champs et périmètre de l'étude

1.2.1.1 *Définition des paramètres clés du système PV*

Étant donnée la variabilité dans le choix de certains paramètres clés des systèmes PV, identifiée dans la littérature (Chapitre 1. Section 3.2) et synthétisés dans la Figure 55 et la criticité de ces paramètres sur les résultats environnementaux, des recommandations pour définir les valeurs des paramètres appropriés ont été proposées pour assurer la pertinence des résultats d'ACV.

Les valeurs retenues dans le cadre de cette étude ont été déterminées sur la base de la recherche bibliographique approfondie, couplée aux recommandations des experts PV du DTS. Ces paramètres vont aider en premier lieu à définir la technologie de référence, et leur implémentation dans la base de données permettra de compléter la définition des technologies non matures en développement pour lesquelles certains paramètres (la durée de vie, le taux

de dégradation, le mix énergétique…) ne peuvent pas être définis dès la phase de R&D.

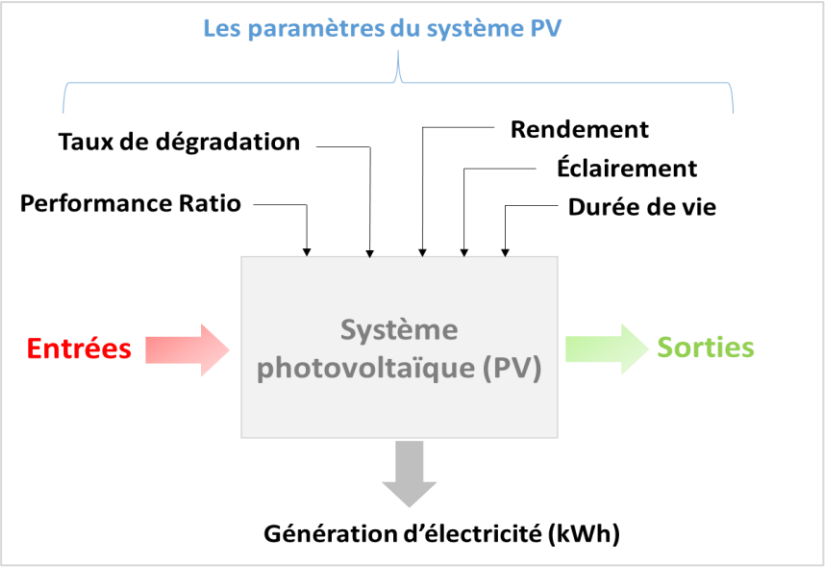


Figure 55. Paramètres clés d'un système PV

- **Éclairement et performance ratio (PR)**

L'éclairement est le paramètre le plus critique dans l'étude ACV d'un système PV, comme démontré dans l'étude de sensibilité du chapitre 1.
Différents scénarii pertinents pour l'Europe, dépendant de l'emplacement géographique, du type d'installation, du type d'orientation et la valeur du rayonnement solaire, ont été proposés sur la base des données PVGIS et des données de Huld et al. [145] (Tableau 14).

À partir de ces valeurs d'éclairement, une valeur de PR a été attribuée à chaque scénario en tenant compte de plusieurs facteurs impactants comme la température et le type d'installation.

Tableau 14. Différents scenarii d'éclairement en Europe et PR initial associé

Estimation CEA / INES des valeurs d'éclairement pour l'Europe, basé sur les données PVGIS		
Lieu/ Scénario	**Éclairement (kWh/m²/an)**	**PR initial (%)**
Systèmes PV **au sol** et pondérés par lieu réel d'installation avec un angle optimal	1496	85
Systèmes PV installés sur **toiture** et pondérés par une orientation et lieu d'installation réels	1402	80,6
Moyenne **Européenne** géographique pondérée par lieu et type d'installation	1425	81,8
Moyenne **française** géographique avec une orientation optimale	1520	80

Étant donné que les installations au sol dominent le marché PV aujourd'hui [79], un éclairement de 1496 kWh/m²/an avec une valeur de PR de 85 % sont alors recommandées.

- **Taux de dégradation (DR) :**

En se basant sur la bibliographie et le retour d'expérience, la valeur de 0,91 % est recommandée comme valeur de dégradation annuelle pour les systèmes cristallins. En effet, cette valeur est issue de l'étude de Jordan et al. [146] où sont rassemblées puis filtrées 10 572 valeurs de DR mesurées sur des modules cristallins individuels ou des systèmes entiers.

- **Rendement :**

Étant donné que le rendement des modules évolue d'une façon continue, la méthode proposée est de définir un rendement représentatif du marché PV en calculant la moyenne des rendements des modules vendus par les 10 premiers fabricants dans le monde inscrits dans le rapport annuel du JRC (Join Research Center) publié chaque année par la commission européenne (EC) [79].

Par exemple, la moyenne estimée pour le rendement des modules mono-Si et multi-Si standard pour l'année 2017 est 17,2 % et 16,3 % respectivement.

- **Durée de vie :**

En se basant sur la bibliographie et le retour d'expérience des systèmes installés au CEA Cadarache depuis 1978, la valeur de 30 ans est sélectionnée pour définir la durée de vie des systèmes PV cristallins.

- **Mix énergétique :**

Un autre paramètre critique dans l'étude ACV PV est le mix énergétique. Dans le cas où les données sont indisponibles, la méthode proposée pour le choix du mix énergétique est basée sur la répartition géographique des productions des composants du système PV (Figure 56).

Par exemple, pour l'année 2017, le mix proposé pour modéliser la production du poly silicium est composé de 50 % du mix chinois, 4% du mix japonais, 15% du mix sud-coréen, 15% du mix canadien, 8% du mix américain, 6% du mix de la Malaisie et 2% du mix allemand.

Étant donné que cette distribution évolue d'une façon continue, une mise à jour annuelle des données est alors nécessaire en se basant sur les rapports des tendances du marché PV publiées chaque année par l'IEA [97].

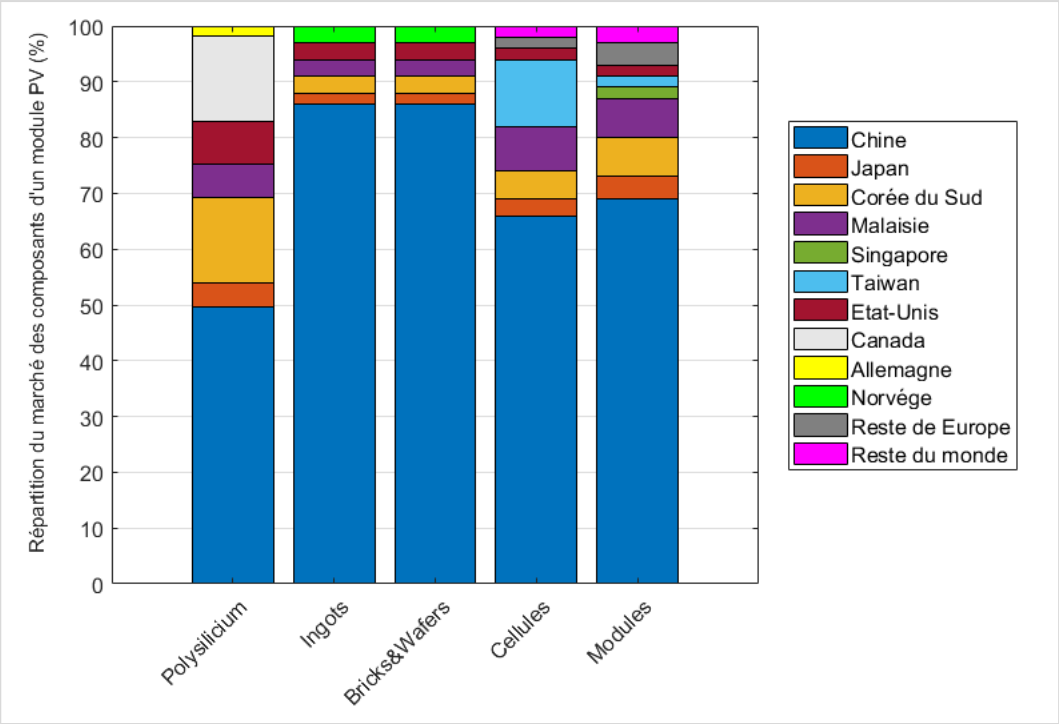


Figure 56. Répartition du marché des différents composants PV en 2017 en se basant sur des données publiées dans le rapport annuel de l'IEA [96].

Les différentes recommandations que nous proposons sont synthétisées dans le Tableau 15.

Tableau 15. Tableau synthétique des recommandations proposées pour aider au choix des paramètres clés dans la réalisation de l'ACV PV

	Unité	Recommandations CEA/INES
Période		**2017**
Éclairement	kWh/m²/an	1496
Performance Ratio (PR)	%	85
Taux de dégradation (DR)	%	0,91
Rendement mono-Si	%	17,2
Rendement multi-Si	%	16,3
Durée de vie	ans	30
Mix d'électricité		Marché PV (68% chinois en 2017)

L'étape suivante consiste à définir le système PV de référence à évaluer (mono-Si monofacial) en se basant sur ces recommandations

1.2.1.2 *Définition du système PV (Mono-Si monofacial)*

Pour le système PV de référence, la technologie est le silicium mono-Si installé au sol. Ce module PV est composé de 6x10 cellules de 156 mm de côté, d'épaisseur 180 µm et doté de 4 bus bars. Ces cellules sont de type p, dopées n sur la face avant, texturées et recouvertes d'une couche antireflet composée de Si_3N_4. Le module est constitué de la superposition d'une couche de verre, une couche d'encapsulant des cellules (EVA) en faces avant et arrière et d'une couche de « backsheet » (PVF/PET), d'une boîte de jonction et un cadre en aluminium viennent compléter la structure du module. Tous ces paramètres correspondent au standard de la technologie présente sur le marché en 2017.

Les paramètres clés associés à cette technologie ainsi que les procédés de fabrication associés sont présentés dans les Figure 57 et Figure 58.

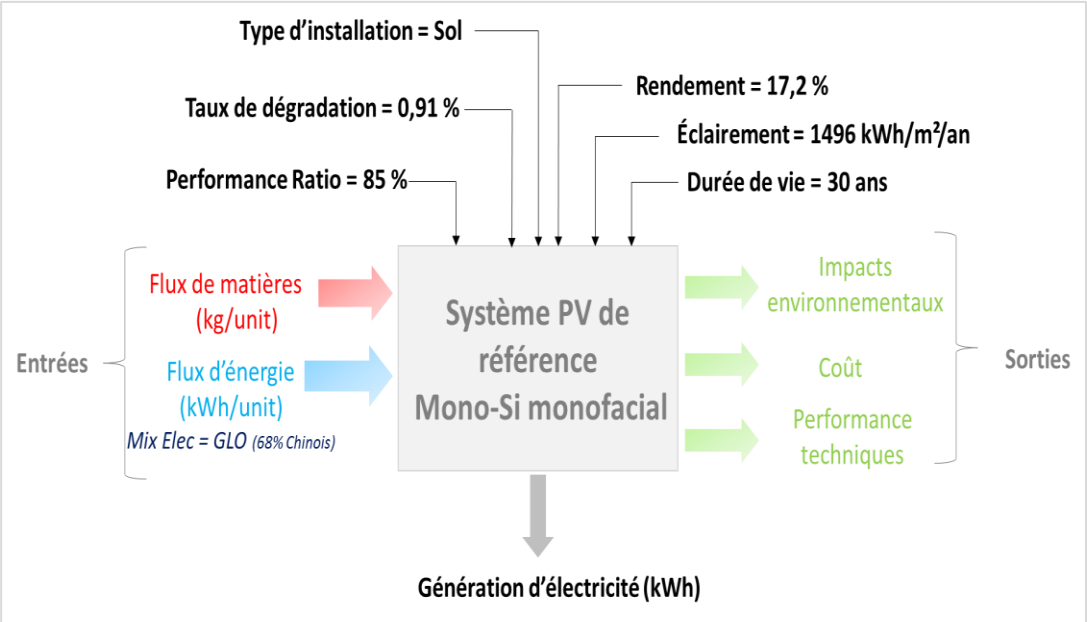


Figure 57. Paramètres clés de la technologie de référence mono-Si monofacial

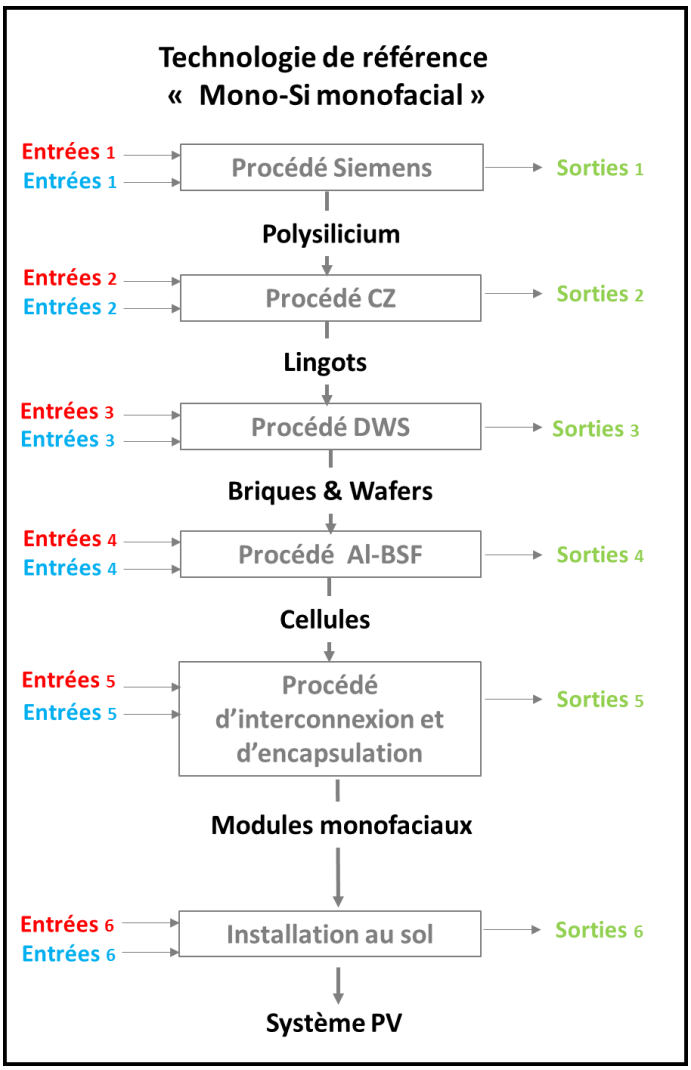


Figure 58. Procédés de fabrication de la technologie de référence Mono-Si monofacial

1.2.1.3 *Frontière du système*

Le système a été décomposé en plusieurs composants (Figure 59) qui ont été traités séparément puis assemblés dans le système final.

« Produire 1kWh d'électricité » est choisi comme l'unité fonctionnelle utilisée pour cette analyse.

Étant donné que cette analyse va servir comme un support de comparaison qui doit être commun à la référence et à la technologie en développement, la frontière du système englobe les phases de fabrication, installation et usage des systèmes PV. La fin de vie est à ce stade exclue de la frontière du système compte tenu du manque de données et de scénarii concernant cette phase aujourd'hui. Par ailleurs, la littérature montre que l'impact de la fin de vie sur les résultats d'ACV est relativement faible comparés aux impacts de la phase de fabrication [30].

Toutes les étapes de fabrication du panneau Mono-Si monofacial comprises dans le périmètre d'étude sont reportées sur la Figure 59.

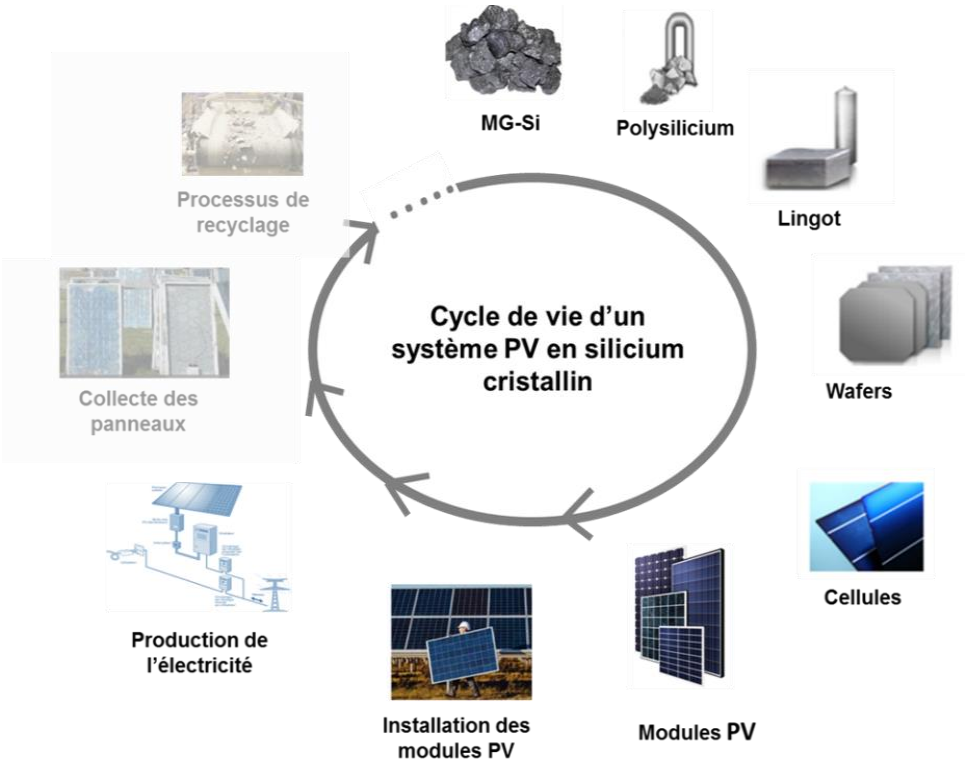


Figure 59. Les étapes du cycle de vie prises en compte pour la technologie de référence

1.2.1.4 *Méthodes et catégories des impacts environnementaux*

Le logiciel ainsi que les méthodes d'évaluation des impacts utilisés sont résumés dans le Tableau 16.

Tableau 16. Outils et méthodes d'évaluation des impacts de la technologie de référence

Outil et source des données :	
Logiciel	Sima Pro 8.1
Sources des données	Ecoinvent V3.1 & CEA-INES
Méthodes d'évaluation des impacts :	
Consommation d'énergie	Cumulative Energy Demand V1.09
Autres impact environnementaux	ILCD 2011 Midpoint+ , V1.06
Consommation d'eau	Water scarity V1.09

1.2.1.5 *Méthode de recueil des données :*

Rappelons ici que l'un des critères de cette ACV de référence est de disposer de données d'inventaire récentes qui représentent au mieux les systèmes PV actuels. Le recueil des données s'appuie donc sur la bibliographie et des entretiens menés avec divers experts. Elles ont également été complétées par une exploitation de la base de données Ecoinvent, accompagnée de calculs et estimations spécifiques à l'étude.

Les données ainsi collectées satisfont les exigences de qualité fixées dans le chapitre 2, telles que :

- **Facteurs temporel :** Collectées de fin 2016 à fin Juin 2017, les données correspondent à la filière silicium monocristallin actuelle.
- **Géographie** : Les données ont été recueillies auprès d'industriels du domaine et de certains partenaires du DTS.
- **Représentativité** : Via leur expérience, leurs équipements et leurs partenariats, les experts de l'INES travaillent constamment en lien avec le secteur industriel, ce qui garantit une bonne représentativité des données.
- **Cohérence :** La méthode de collecte et d'analyse des données s'est voulue la plus uniforme possible pour chaque processus élémentaire évalué.
- **Reproductibilité :** La méthodologie et le traitement des données sont suffisamment explicites pour être repris par d'autres membres de l'organisme de R&D. Les sources, les données brutes et les calculs amont sont disponibles, quant à eux, dans un fichier Excel d'inventaire.
- **Incertitudes :** Compte-tenu de l'analyse de sensibilité réalisée et du niveau d'informations nécessaire identifié par étape de fabrication, la précision peut être considérée comme suffisante.

- *Limitations de l'étude*

Dans notre étude, les étapes suivantes ont été négligées à ce stade :

- La production, la maintenance et le démantèlement des équipements de fabrication.
- L'entretien et le démantèlement de l'installation PV.
- La phase de recyclage et de transport entre les phases du cycle de vie ne sont pas prises en compte à ce stade de l'étude par manque de données récentes et de bonne qualité.

1.2.2 Résultats et interprétations

Les résultats de l'analyse environnementale sont représentés dans le Tableau 17

Tableau 17. Différents résultats environnementaux de la technologie de Référence Mono-Si monofacial

Catégories d'impact	Unité	Valeur
Climate change	g CO2 eq/kWh	5,81E+01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq/kWh	3,29E-09
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh/kWh	9,74E-09
Human toxicity, cancer effects	CTUh/kWh	1,32E-09
Particulate matter	kg PM2.5 eq/kWh	5,02E-05
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq/kWh	2,27E-03
Ionizing radiation E (interim)	CTUe/kWh	1,71E-08
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq/kWh	1,90E-04
Acidification	molc H+ eq/kWh	4,92E-04
Terrestrial eutrophication	molc N eq/kWh	6,80E-04
Freshwater eutrophication	kg P eq/kWh	7,79E-06
Marine eutrophication	kg N eq/kWh	5,81E-05
Freshwater ecotoxicity	CTUe/kWh	4,51E-02
Land use	kg C deficit/kWh	4,46E+00
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq/kWh	1,85E-05
Cumulative energy demand	MJ/kWh	4,43E+00
Water depletion	m3/kWh	6,00E-04

L'étape suivante est d'évaluer la contribution de chaque étape de fabrication pour chaque catégorie d'impact afin de déterminer les procédés significatifs dans le profil environnemental du système PV mono-Si monofacial.

La Figure 60 montre la contribution relative de chaque étape de fabrication.

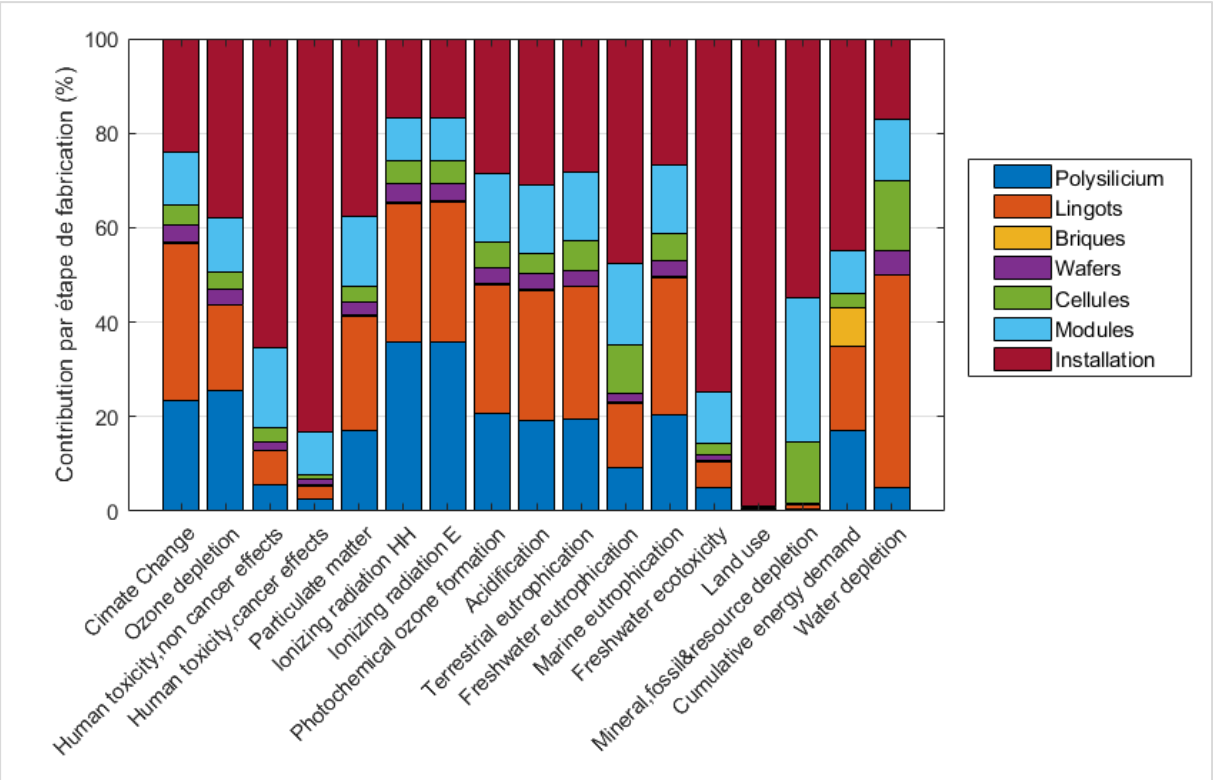


Figure 60. Contribution des différents procédés de fabrication dans les résultats environnementaux du système PV mono-Si monofacial (référence)

La phase de fabrication contribue à 75 % dans l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre **« Climate Change »** par rapport à la phase d'installation dont la contribution ne dépasse pas 25 %. La production du silicium métallurgique (Poly silicium) et le procédé Czochralski (CZ) de cristallisation sont à l'origine de cette grande contribution, à 23 % et 33 % respectivement. Cette dernière est causée essentiellement par la quantité importante d'électricité, produite à partir du charbon issu du mix chinois et consommée pendant ces deux procédés (par exemple 55 kWh/kg est consommé pour le procédé Siemens).

La phase de fabrication a un impact de 62 % sur l' **« Ozone depletion »** dont 44 % est lié aux deux procédés suivants : la purification et la cristallisation du silicium. Ceci est dû essentiellement à la quantité d'électricité consommée, représentant 34 % et 54 % de la somme d'électricité consommée pour le système PV.

Pour les catégories d'impact **« Human toxicity, cancer effects »** et **« Human toxicity, non cancer effects »,** la contribution de la phase d'installation dépasse 70 %, où la structure de montage contribue à plus de 50 % de l'impact. Ceci est dû à la consommation d'aluminium et d'acier pour la mise en place de l'installation.

Les oxydes d'azote et les dioxydes de souffre émis dans l'air sont les substances les plus importantes pour les impacts **« Particulate matter », « Photochemical ozone formation », « Acidification potential »** et **« Marine eutrophication potential ».** Ces substances sont libérées pendant la combustion du charbon pour la production d'électricité. Le procédé CZ présente la plus forte contribution sur les impacts cités auparavant (à hauteur de 25 %), justifiée par la quantité d'électricité consommée dont le mix énergétique chinois est largement dominé par le charbon.

Les catégories **« Ionizing radiation Human Health »** et **« Ionizing radiation Ecosystem »** sont majoritairement impactées par les émissions de carbone - 14. La phase de fabrication y contribue à plus de 75 %. Cette contribution est engendrée essentiellement par la quantité significative d'électricité consommée pendant cette phase, dominée par le mix chinois dont l'énergie nucléaire représente 4 %.

La phase d'installation provoque 75 % de l'impact **« Freshwater ecotoxicity potential »** dont 40 % sont dus à l'onduleur, 16% à l'acier plus le zinc, et 16 % à l'aluminium.

Dans la catégorie d'impact **« Mineral, fossil and renewable resource depletion potential »**, la mise en place des cellules et l'assemblage en modules ont une contribution de 13 % et 30 %, respectivement. L'utilisation d'argent pour la métallisation et d'aluminium pour le cadre du module sont à l'origine de cet impact. La contribution de la phase d'installation est également significative (45 %) ; celle-ci est justifiée par la consommation de zinc pour la galvanisation et d'aluminium dans la mise en place de la structure du montage du système PV.

La phase de fabrication est la plus significative pour la catégorie d'impact **« Cumulative Energy Demand »**. Dans la chaine de fabrication, la consommation d'électricité produite à partir des fossiles (charbon, pétrole, gaz…) dans le procédé de cristallisation et le procédé de purification du silicium engendre la majeure partie de l'impact (à hauteur de 35%).

Enfin, la consommation d'eau **« Water resource depletion »** est dominée par le procédé de cristallisation (45 %). Elle est engendrée essentiellement par la consommation d'électricité dans ce procédé dont 80 % du mix employé est chinois et 14 % est produit à partir d'énergie hydraulique. À noter que la production d'électricité à partir d'énergie hydraulique entraîne l'évaporation de l'eau de leurs réservoirs, et par conséquent une consommation relativement, importante de l'impact **« Water ressource depletion ».**

Le Tableau 18 présente une synthèse de cette analyse permettant en premier lieu une compréhension du système PV d'un point de vue environnemental, aidant ainsi à la construction de la base de données de référence. Cette analyse a démontré que l'impact de la phase d'usage est nul et que la phase de fabrication d'un système PV a un impact significatif sur les résultats environnementaux, d'où la nécessité d'intégrer la démarche d'éco-conception aux nouvelles technologies PV. Cette analyse a montré également que l'impact des composants du système PV sur les résultats des catégories d'impact est très variable d'une catégorie d'impact à une autre. Ainsi, ces premiers résultats valident d'une part la nécessité de l'analyse environnementale multicritères par le biais de l'ACV, évitant ainsi le transfert des impacts, et d'autre part la nécessité de la découpe du système PV en composants dans la construction de la base de données.

Tableau 18. Bilan de la Contribution des différents procédés de fabrication dans les résultats environnementaux du système PV Mono-Si monofacial (référence)

Catégories d'impact	Phase de fabrication					Phase d'installation	Phase d'usage
	Polysilicium	Lingots	Bricks & Wafers	Cellules	Module		
Climate change	X						
Ozone depletion	X	X					
Human toxicity, non-cancer effects					X	X	
Human toxicity, cancer effects						X	
Particulate matter		X					
Ionizing radiation HH	X	X					
Ionizing radiation E (interim)	X	X					
Photochemical ozone formation		X					
Acidification		X					
Terrestrial eutrophication							
Freshwater eutrophication							
Marine eutrophication		X			X		
Freshwater ecotoxicity						X	
Land use						X	
Mineral, fossil & ren resource depletion				X	X	X	
Cumulative energy demand	X	X				X	
Water depletion		X					

Une fois la contribution de chaque étape de fabrication identifiée, l'impact des flux de matières et d'énergie pour chaque procédé de fabrication a été calculé, comme pour le procédé de fabrication des cellules AL-BSF présenté dans le Tableau 19[9].

Ce calcul a un double objectif : il vise d'une part à stocker les résultats dans la base de données pour leur utilisation plus tard pour évaluer les taux d'évolutions, et d'autre part, il vise à pré-identifier le niveau d'information à collecter par étape de fabrication pour l'analyse environnementale.

[9] Consommables confidentiels

Tableau 19. Exemple de résultats environnementaux répertoriés par flux élémentaire d'un procédé de fabrication de la chaine de valeur PV (le procédé AL-BSF de fabrication des cellules)

	Climate change	Ozone depletion	Human toxicity, non-cancer effects	Human toxicity, cancer effects	Particulate matter	Ionizing radiation HH	Ionizing radiation E (interim)	Photochemical ozone formation	Acidification	Terrestrial eutrophication	Freshwater eutrophication	Marine eutrophication	Freshwater ecotoxicity	Land use	Mineral, fossil & ren resource depletion
Flux de matières															
C_1	5,39E-03	3,13E-09	3,39E-10	3,76E-11	4,28E-06	1,85E-04	1,43E-09	1,84E-05	3,67E-05	5,65E-05	2,51E-07	5,14E-06	2,57E-03	5,23E-03	1,41E-07
C_2	1,98E+00	1,68E-07	8,73E-07	1,27E-08	2,30E-03	1,25E-01	9,65E-07	2,04E-02	2,88E-02	9,63E-02	2,78E-03	6,92E-03	2,80E+00	4,36E+00	9,75E-03
C_3	1,20E+00	1,02E-07	5,30E-07	7,70E-09	1,39E-03	7,56E-02	5,84E-07	1,24E-02	1,75E-02	5,83E-02	1,68E-03	4,19E-03	1,70E+00	2,64E+00	5,92E-03
C_4	2,43E-02	1,21E-08	7,53E-09	4,13E-10	1,63E-05	2,39E-03	1,79E-08	7,99E-05	2,00E-04	2,71E-04	3,20E-06	2,50E-05	1,88E-02	3,77E-02	4,16E-06
C_5	3,63E-04	5,81E-11	5,28E-11	5,21E-12	5,81E-07	3,23E-05	2,44E-10	2,07E-06	7,68E-06	6,46E-06	6,18E-08	5,74E-07	2,54E-04	9,32E-04	7,96E-07
C_6	7,54E-01	8,11E-08	2,93E-08	2,61E-09	2,50E-04	1,03E-01	7,72E-07	1,52E-03	3,84E-03	5,20E-03	6,20E-05	4,68E-04	1,30E-01	4,76E-01	6,30E-06
C_7	3,01E-03	3,24E-10	1,17E-10	1,04E-11	9,98E-07	4,11E-04	3,08E-09	6,05E-06	1,53E-05	2,07E-05	2,48E-07	1,86E-06	5,15E-04	1,90E-03	2,51E-08
C_8	3,22E-03	5,98E-10	2,90E-10	2,47E-11	3,21E-06	2,80E-04	1,80E-09	1,07E-05	2,58E-05	3,80E-05	8,22E-06	3,47E-06	1,12E-03	4,18E-03	1,77E-07
C_9	1,97E-02	3,95E-09	1,24E-09	8,76E-11	3,55E-05	1,44E-03	1,03E-08	3,86E-05	1,56E-04	9,06E-05	3,42E-07	8,20E-06	3,23E-02	5,07E-02	3,58E-07
C_{10}	4,28E-02	1,34E-08	7,32E-09	1,42E-09	4,14E-05	2,77E-03	2,18E-08	1,38E-04	3,36E-04	4,68E-04	2,66E-06	4,22E-05	2,65E-02	4,63E-02	2,03E-06
C_{11}	2,17E-03	1,57E-10	1,51E-10	1,64E-11	1,80E-06	1,23E-04	9,49E-10	6,38E-06	1,58E-05	2,16E-05	1,41E-07	1,94E-06	8,35E-04	2,90E-03	9,53E-08
C_{12}	9,11E-04	2,20E-10	1,00E-10	7,94E-12	8,85E-07	5,27E-05	4,02E-10	3,13E-06	7,58E-06	1,31E-05	5,72E-08	1,59E-06	6,08E-04	1,29E-03	4,72E-08
C_{13}	5,75E-04	4,90E-11	4,33E-11	6,79E-11	3,83E-07	2,25E-05	1,73E-10	1,77E-06	3,59E-06	4,89E-06	3,12E-08	4,99E-07	8,88E-04	5,71E-04	2,45E-08
C_{14}	3,54E-01	1,31E-08	9,02E-09	1,03E-09	1,34E-04	4,54E-03	3,28E-08	7,35E-04	1,84E-03	6,43E-03	5,19E-06	2,80E-04	1,24E-01	2,01E-01	6,88E-06
C_{15}	2,13E-04	1,86E-11	9,91E-11	1,37E-11	1,91E-07	2,02E-05	1,52E-10	6,90E-07	2,18E-06	2,29E-06	1,05E-07	1,98E-07	3,24E-04	2,00E-04	3,67E-08
C_{16}	9,38E-01	4,10E-08	1,51E-07	5,47E-08	1,41E-03	1,43E-02	1,05E-07	3,41E-03	9,68E-03	1,16E-02	3,75E-05	1,04E-03	8,29E-01	6,52E-01	1,60E-05
Flux d'énergie															
Elec	9,45E+00	3,20E-07	3,27E-07	1,70E-08	5,36E-03	3,60E-01	2,68E-06	2,48E-02	6,46E-02	9,04E-02	4,94E-04	8,03E-03	1,31E+00	6,81E+00	2,24E-05

1.3 Analyse de sensibilité des systèmes PV : niveau d'information à collecter par étape de fabrication

Comme détaillé dans le chapitre 3, l'objectif de cette étape est d'identifier les paramètres critiques d'un point de vue environnemental pour chaque étape de fabrication du système PV, permettant ainsi de définir le niveau d'information à collecter associé.

Le système PV est un ensemble de composants (sous-produits) reliés entre eux. Chaque sous composant est caractérisé par unité fonctionnelle spécifique (par exemple « Produire 1 kg de poly silicium »). Ainsi, pour évaluer l'impact de ces paramètres d'un point de vue environnemental, il est nécessaire d'intégrer les composants dans le système. L'intégration est assurée par des facteurs de liaisons notés **(F)** ; l'entrée principale de l'étape (n) étant la sortie principale de l'étape (n-1) (Figure 61). La valeur de ces facteurs dépend essentiellement des paramètres clés du procédé. Ils sont variables et différent d'une étape à une autre et ils fluctuent également avec l'évolution technologique.

La première étape de cette analyse de sensibilité consiste donc à définir ces facteurs en fonction des paramètres du procédé spécifique du composant PV, et étudier par la suite leurs impacts sur les résultats environnementaux.

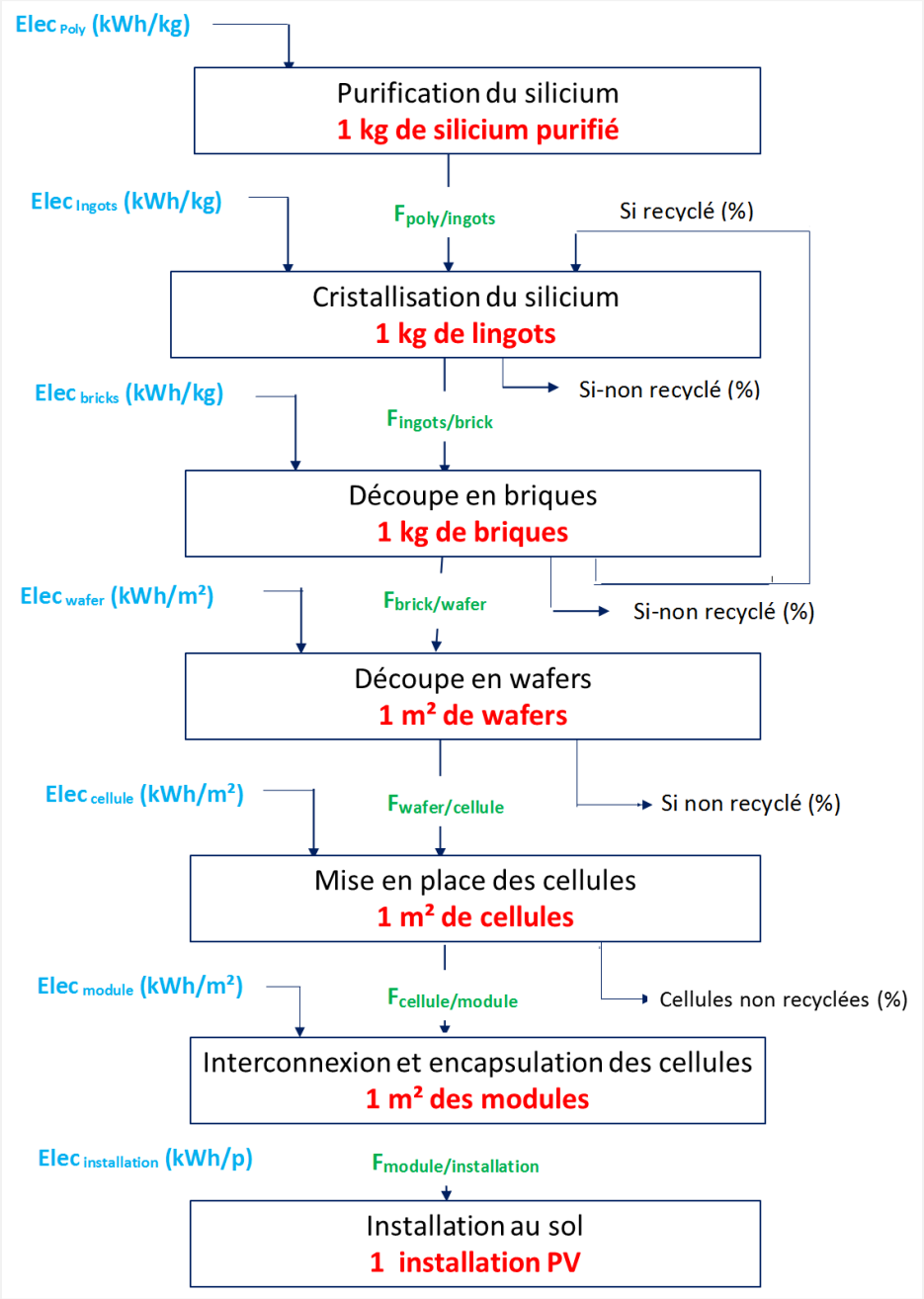


Figure 61. Liaisons entre les différents procédés de fabrication du système PV mono-Si monofacial

1.3.1 Définition des facteurs de liaison des composants des systèmes PV

- *Facteur de liaison MG-Si / poly silicium* ***($F_{MG\text{-}Si\ /\ poly}$)*** *:*

Ce facteur permet d'identifier la quantité en kg de silicium métallurgique (MG-Si) nécessaire pour produire 1 kg de poly silicium par le procédé de purification Siemens. La définition de ce

facteur dépend du **rendement de matière ($\eta_{matières(poly)}$)** (Eq.10). Il s'agit d'évaluer l'efficacité du procédé en estimant la quantité des pertes pour identifier par la suite des conditions opératoires permettant de l'optimiser pour s'approcher le plus près possible de 100 %.

$$F(MG/poly) = 1/\eta\,(\text{matières(poly)}) \quad (10)$$

- *Facteur de liaison poly / lingots* ***($F_{poly\ /\ lingot}$)*** *:*

Ce facteur permet d'identifier la quantité en kg du poly silicium nécessaire pour produire 1 kg de lingots (monocristallin dans le cas de la technologie de référence) par le procédé de cristallisation. Ce facteur dépend de deux paramètres : **le rendement de matière du procédé en (%) ($\eta_{matières(lingot)}$)** et le taux du **silicium recyclé (%) ($T_{Si\ recycled}$)** issu de l'étape suivante de découpe des lingots en briques (Eq.11). En effet, il est estimé qu'il existe un taux de pertes de silicium issu de la découpe qui peut être réinjecté dans le procédé de cristallisation, réduisant ainsi la quantité de poly silicium brut.

$$F(poly/lingot) = 1/\eta\,(\text{matières(lingot)}) - T(Si\ recycled) \quad (11)$$

- *Facteur de liaison poly / lingots* ***($F_{lingot\ /\ brique}$)*** *:*

Ce facteur permet d'identifier la quantité en kg du lingot nécessaire pour produire 1 kg de briques par le procédé de découpe. Ce facteur dépend du **rendement de la découpe en (%) ($\eta_{découpe(brique)}$) (Eq.12).** Pour obtenir le niveau de pureté de silicium voulu, un taux important de silicium est éliminé aujourd'hui (silicium non recyclé). Deux types de pertes peuvent se produire : pertes de silicium recyclé et non recyclé. L'enjeu aujourd'hui est de réduire ces pertes de découpe qui dépendent principalement des diamètres du fil de découpe. Les diamètres des fils varient en fonction de l'étape de découpe (ébavurage[10] ou découpe en briques). Les étapes de découpe et le nombre de briques à obtenir dépendent aussi du type de lingots (mono-Si ou multi Si) et par conséquent de ses dimensions (longueur et diamètre).

$$F(lingot/brique) = 1/\eta\,(découpe(briques)) \quad (12)$$

[10] C'est la première étape de découpe de lingot en briques. La partie supérieure du lingot, et a fortiori des briques, concentre toutes les impuretés contenues dans les morceaux de poly silicium: il est donc nécessaire d'éliminer ces parties à chaque brique.

- *Facteur de liaison briques / wafers* ***($F_{brique\ /\ wafer}$) :***

Ce facteur permet d'identifier la quantité en kg de brique nécessaire pour produire 1 m² de wafers par le procédé de découpe. Ce facteur est lié d'une part au rendement de découpe en % **(η découpe$_{(wafer)}$)** et aux **caractéristiques du wafer** que sont la surface **(S_{wafer})** en m² et le poids **(W_{wafer})** en kg. Le rendement de la découpe **(η découpe$_{(wafer)}$)** quant à lui dépend de plusieurs paramètres qui sont principalement l'épaisseur du wafer **(E_{wafer})** en µm et les pertes liées au trait de scie « Kerf Loss » en µm, dont la quantité est liée au diamètre du fil de découpe.

Ainsi, la formule du **η découpe$_{(wafer)}$** est définie comme suit **:**

$$\eta\left(découpe(wafer)\right) = \left(\frac{E(wafer)}{E(wafer) + kref}\right) * 100 \qquad (13)$$

D'où la formule du facteur de liaison ($F_{brique\ /\ wafer}$) :

$$F(brique/wafer) = \left(\frac{W(wafer)}{\eta\left(découpe(wafer)\right)}\right) * \left(\frac{1}{S(wafer)}\right) \qquad (14)$$

Un autre paramètre qui fait l'objet de recherches aujourd'hui dans le secteur PV est le taux de silicium recyclé pendant le procédé de découpe des wafers. Lors de cette étape, le silicium est aujourd'hui perdu car il n'y a pas aujourd'hui de recyclage du silicium issu de la découpe.

- *Facteur de liaison wafers / cellule* ***($F_{wafer\ /\ cellule}$) :***

Ce facteur permet d'identifier la quantité du wafer en m² nécessaire pour faire un m² de cellules.

Ce facteur ne dépend pas souvent des paramètres pour le définir, sauf s'il y a des cellules rejetées ou cassées ($S_{rejetée}$)

$$F(wafer/cellule) = 1 + Srejetée \qquad (15)$$

- *Facteur de liaison cellule / module* ***($F_{cellule\ /\ module}$) :***

Ce facteur permet d'identifier la quantité de cellules en m² nécessaire pour faire un m² du module. Ce facteur dépend essentiellement du nombre de cellules par module **($N_{cellule}$)** et de la surface du module (Eq 16). La surface du module **(S_{module})** n'est pas directement égale à la surface des cellules **($S_{cellule}$)** assemblées.

$$F(cellule/module) = \frac{(Ncellues * Scellule)}{Smdoule} \quad (16)$$

- *Facteur de liaison module / installation* ***($F_{module\ /\ installation}$) :***

Ce facteur définit la quantité en m² de modules nécessaire pour réaliser une installation PV. Ce facteur dépend de deux paramètres principaux : le **rendement du module** (**η_{module}**) en % et **la taille de l'installation en KWp installés ($S_{installation}$).** Le rendement du module (**η_{module}**) est défini en fonction de la surface du module **(S_{module})** et sa puissance **(P_{module})** qui dépend de plusieurs paramètres, tel que :

$$\eta(\boldsymbol{module}) = \left(\frac{Pmodule}{Smodule * 1000}\right) * 100 \quad (17)$$

Où :

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{module}) = Ncellule * CTM * Pcellule \quad (18)$$

Tel que :
CTM = Gain conservé lors de l'intégration des cellules en module (Cell To Module)
$P_{cellule}$ = puissance cellule

En conclusion, le système PV est un système complexe dont les composants dépendent l'un de l'autre par le biais de plusieurs paramètres qui fluctuent rapidement avec les évolutions technologiques.

Les résultats de la contribution de chaque étape de fabrication dans l'impact environnemental ont montré également qu'il existe certains paramètres critiques dans les procédés employés comme la quantité d'électricité consommée pour la purification et la cristallisation du silicium, la quantité d'argent consommée dans le procédé cellule et la mise en place d'un cadre en aluminium dans la structure du module.
Ces paramètres ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité pour étudier l'incidence de leur variabilité sur les résultats d'impacts environnementaux.

1.3.2 Analyse de sensibilité des paramètres critiques dynamiques des systèmes PV

Le Tableau 20 les différents hypothèses définies pour l'analyse de sensibilité, suite à des entretiens avec les experts PV et en se basant sur les perspectives et les tendances des technologies PV dans la littérature [27].

Les différents résultats environnementaux de l'analyse de sensibilité sont illustrés dans la Figure 62.

Tableau 20. Différents paramètres et hypothèses des composants PV définis pour l'analyse de sensibilité

Composants	Paramètres critiques	Hypothèses pour l'analyse de sensibilité
Polysilicium	Rendement de matière **($\eta_{matières(poly)}$)** Électricité consommée **($Elec_{poly}$)**	Augmentation de **$\eta_{matières(poly)}$** de 10 % Réduction de **$Elec_{poly}$** de 50 %
Lingots	Rendement de matière **($\eta_{matières(lingot)}$)** Silicium recyclé (**$T_{Si\ recycled}$**) Électricité consommée **($Elec_{lingot}$)**	Augmentation de **$\eta_{matières(lingot)}$** de 10 % **$T_{Si\ recycled}$** = 50 % (Silicium issu de la découpe du lingot) Réduction de **$Elec_{poly}$** de 50%
Bricks	Diamètre du fil d'ébavurage **($Ø_{fil\ ébavurage}$)** Diamètre du fil de découpe en briques **($Ø_{fil\ de\ découpe}$)**	Réduction **$Ø_{fil\ ébavurage}$** de 100 µm Réduction **$Ø_{fil\ découpe}$** de 100 µm
Wafer	Épaisseur du wafer **(E_{wafer})** Perte de trait de scie **(Kref)** Perte de **($p_{Si\ recyclé}$)**	**E_{wafer}** = 130 µm Réduction **de** Kref de 20 µm **$p_{Si\ recyclé}$** = **100%**
Cellule	Rendement de la cellule **($\eta_{cellule}$)** Quantité d'argent **(Q_{Ag})**	Augmentation de 2 % du rendement absolu des cellules, soit un gain relatif de 10 % Réduction de la quantité d'argent de 50 %
Module	Perte cellule /module **(CTM)** Nombre des cellules par module (**Ncellule**) Cadre aluminium	CTM = 95 % (au lieu de 99 %) Ncellule = 72 Retrait du cadre d'aluminium

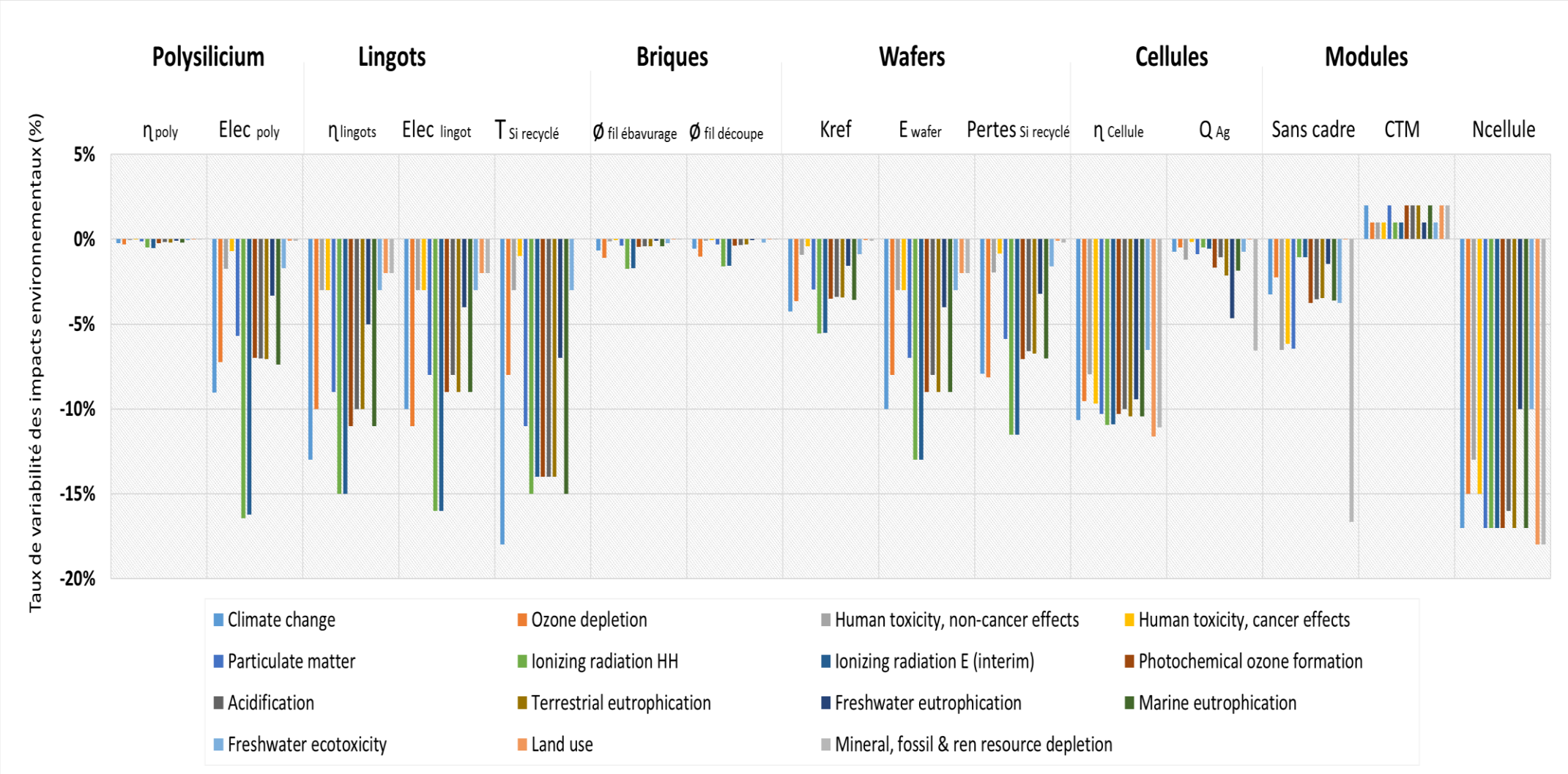


Figure 62. Résultats environnementaux de l'analyse de sensibilité des différents paramètres critiques de la chaine de valeur d'un système PV

La Figure 62 montre que les résultats des impacts environnementaux varient en fonction des catégories d'impact du type de paramètre. Les résultats de ces paramètres dynamiques sont susceptibles de varier avec l'évolution du marché PV. Une telle identification permet de définir le niveau d'information à collecter par étape de fabrication des systèmes PV, surtout pour des technologies non matures à TRL bas.

1.4 Capitalisation et stockage des données

L'étude ACV (inventaires et résultats) ainsi que les paramètres dynamiques identifiés par l'analyse de sensibilité ont été capitalisés pour construire la base de données des systèmes PV d'une façon dynamique, pour son usage dans l'évaluation des technologies non matures par la méthode d'estimation des taux d'évolution (hypothèse 2).

2 Validation initiale de l'approche d'estimation des taux d'évolutions sur une technologie PV mature

La deuxième étape dans cette phase d'expérimentation est une validation initiale de l'approche d'éco-conception développée dans le ce travail de recherche avant d'intégrer l'outil « ECO PV » dans les projets au sein de l'organisme de R&D.

Le principe de cette étape consiste à comparer les résultats environnementaux d'une nouvelle technologie PV mature, d'une part par la méthode ACV standard avec l'outil Sima Pro, et d'autre part par la méthode d'estimation des taux d'évolutions en faisant appel à la technologie de référence mono-Si monofacial. Seule l'étape d'estimation du taux d'évolution environnemental sera alors testée dans cette première validation.

Le déroulement de cette étape de validation est décrit dans la Figure 63. Pour la méthode d'estimation des évolutions, une étape de conversion des taux d'évolutions environnementaux en résultats absolus (exprimés par unité d'impact) est réalisée pour permettre la comparaison entre les deux méthodes.

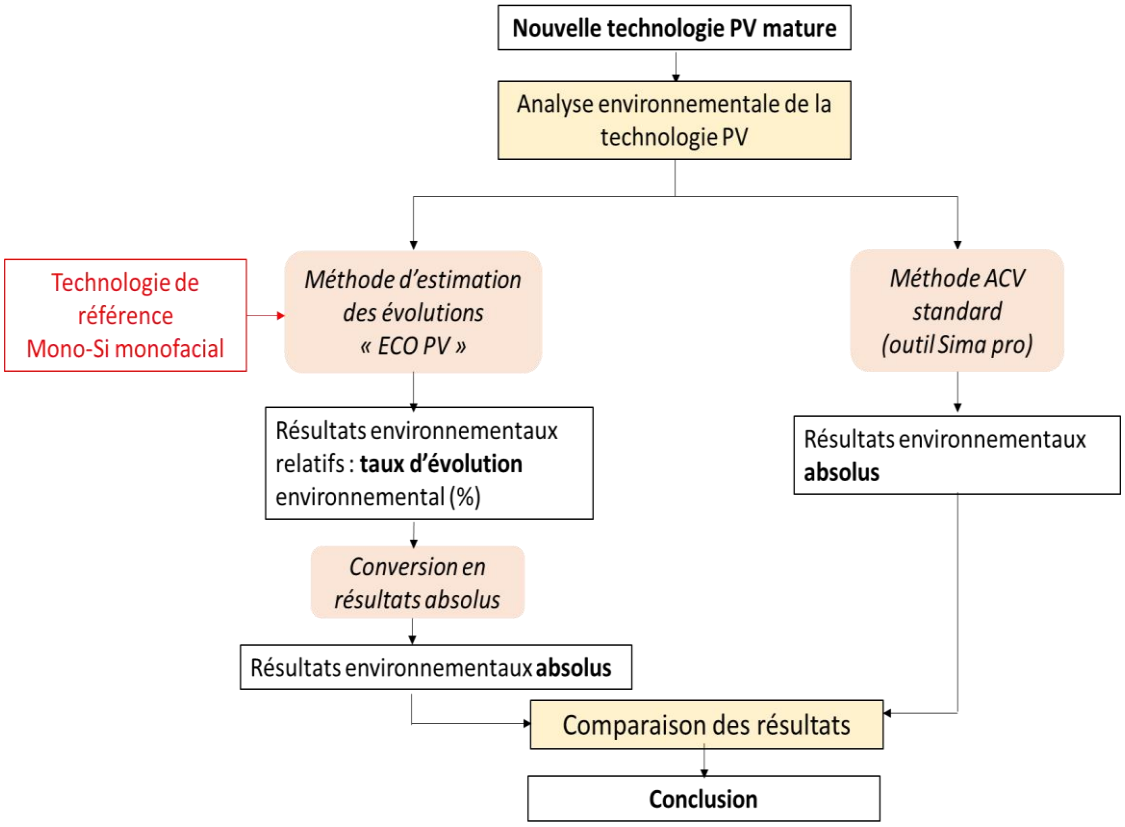


Figure 63. Déroulement de la validation initiale de la méthode d'estimation du taux d'évolution environnemental

2.1 Définition de la technologie PV mature

La technologie PV mature sélectionnée est le « Multi-Si standard » car cette technologie, d'une maturité élevée, représente 62 % du marché PV en 2017 [33]. Il s'agit d'un système PV installé au sol composé de modules monofaces en silicium multi-cristallin. Le module est composé de 60 cellules à 4 bus bars, réalisées par le procédé AL-BSF standard. Ces cellules sont issues des wafers d'épaisseur 180 µm et de surface 156*156 mm², découpés en utilisant le procédé standard de sciage à fil d'acier (SW). La structure du module est la même que pour la technologie de référence (verre / encapsulant / cellules / encapsulant / backsheet).

Les paramètres clés associés ainsi que les procédés de fabrication de la technologie « multi-Si monofacial » sont présentés en Figure 64.

Le rendement du module a été fixé à 16,3 %, en accord avec les valeurs affichées par la plupart des fabricants en 2017 [79]. Le choix des autres paramètres est basé sur les recommandations du Tableau 15.

Certaines données des procédés de fabrication, comme les procédés SW et Siemens, sont issues de la base de données Ecoinvent et sont accompagnées de calculs et d'estimations

propres à l'étude. Afin de répondre au critère de représentativité, ces données ont été par ailleurs validées par les experts PV au sein de l'organisme de R&D.
Le même périmètre d'étude que la technologie de référence, est également employé pour cette validation.

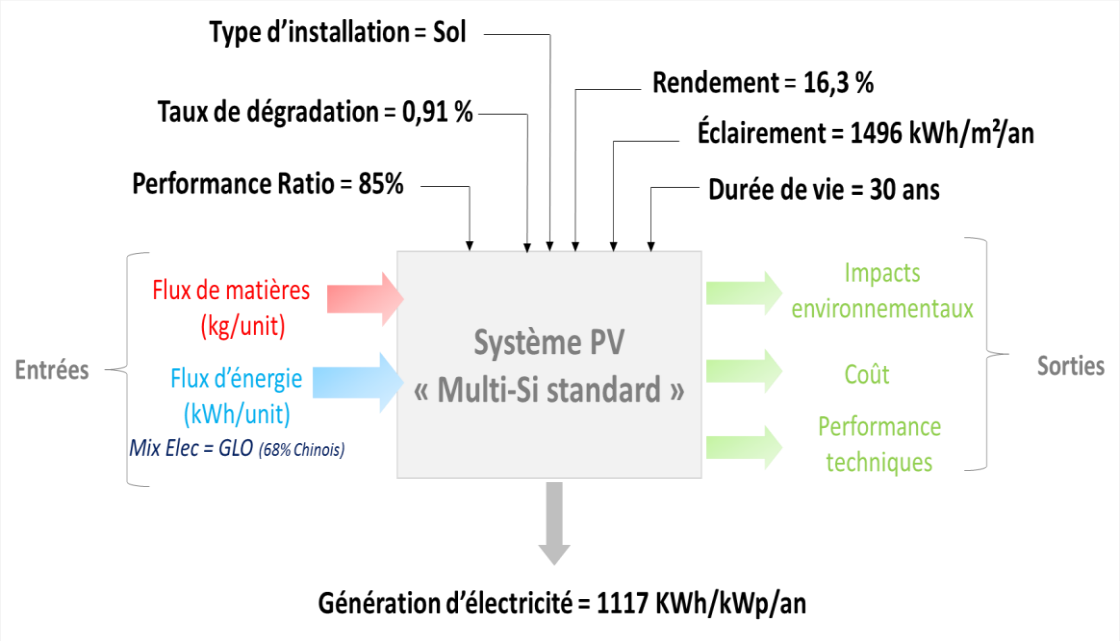


Figure 64. Paramètres clés de la technologie « Multi-Si standard »

2.2 Résultats environnementaux

- *Méthode d'estimation des taux d'évolution « Eco PV »*

Après avoir défini la nouvelle technologie « Multi-Si standard », les procédés de fabrication ont été comparés à ceux de la technologie de référence (Figure 65). La différence entre la chaine de valeur d'un système PV « Mono-Si monofacial » et celle d'un système « Multi-Si standard » réside dans le procédé de cristallisation du silicium et le procédé de découpe du wafer. L'inventaire de ces procédés a donc été réalisé en premier lieu en se basant sur l'inventaire des procédés de référence. Puis l'évaluation de l'évolution des impacts environnementaux a été réalisée par rapport à la référence.

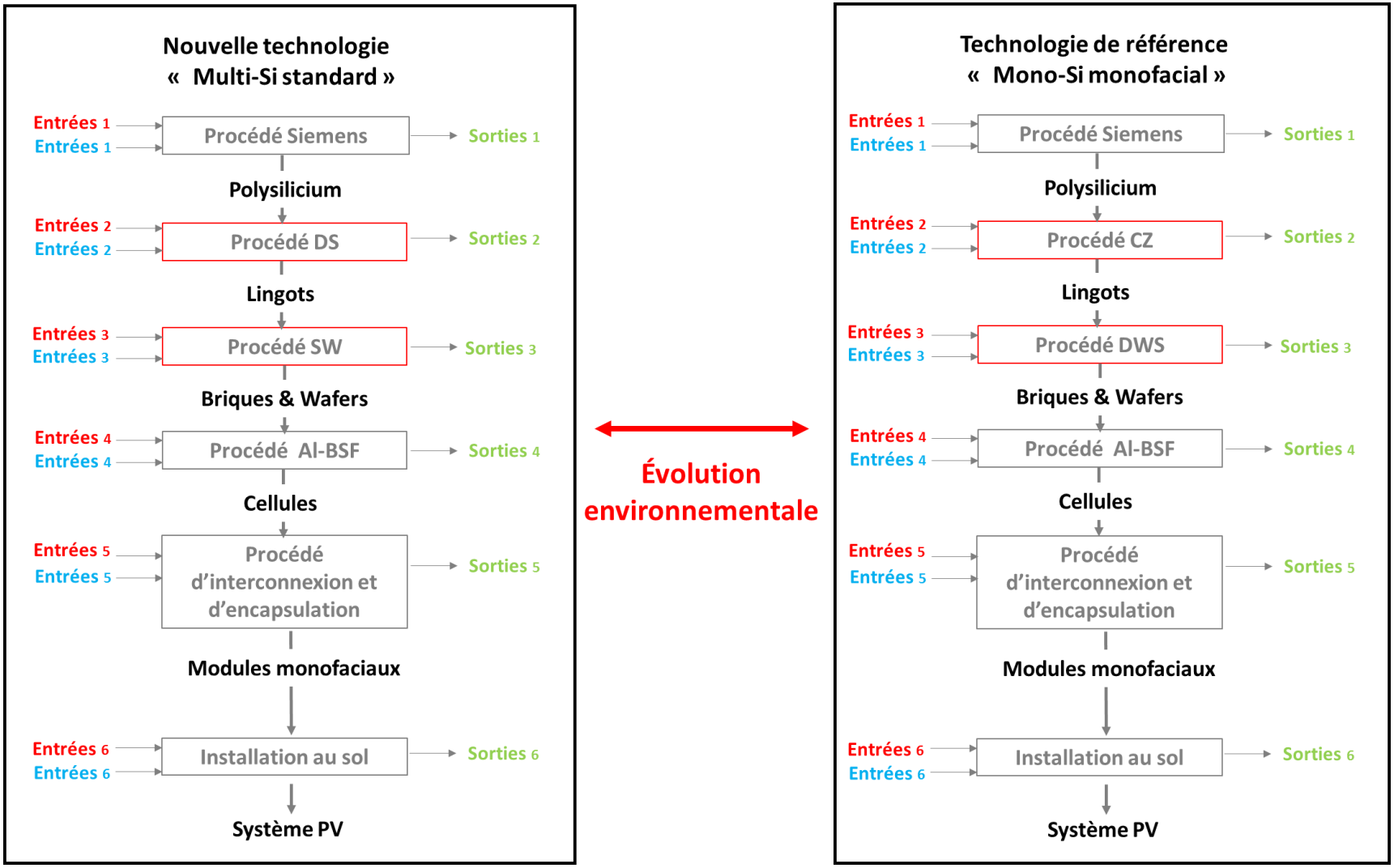


Figure 65. Comparaison de la chaine de valeur de la nouvelle technologie mature « Multi-Si standard » à la technologie de référence « mono-Si monofacial »

Comme le montre le Tableau 21 le flux de matières du procédé CZ a été divisé en 3 catégories et l'inventaire du procédé DS a été complété en se basant sur le procédé CZ, comme détaillé dans le chapitre 3. Le mix d'électricité employé est supposé identique pour les deux procédés de cristallisation (mix électrique basé sur la localisation du marché du lingot en 2017 (Figure 56), ainsi que les consommables communs, supposés être produits dans le même lieu.

Tableau 21. Définition de l'inventaire du procédé DS en se basant sur le procédé de référence CZ

Sous-produit final : 1 kg de lingots	Procédé de référence CZ	Nouveau Procédé DS
Flux de matière (C) (kg/kg)		
Consommables Communs (Cc)		
C_{c1}[11]	1,57E-01	2,15E-01
C_{c2}[11]	3,57E+00	3,29E-01
C_{c3}[10]	3,10E-01	4,90E-03
Consommables retirés (Cr)		
C_{r1}[11]	2,50E-01	0,00E+00
Consommables ajoutés (Ca)		
C_{a5}[11]	0,00E+00	1,40E-03
Flux d'électricité (Elec) (kWh/kg)		
Électricité, « medium voltage » {CN}	$Elec^{11}_{CN(CZ)}$	$Elec^{11}_{CN(DS)}$
Électricité, « medium voltage » {JP}	$Elec^{11}_{JP(CZ)}$	$Elec^{11}_{JP(DS)}$
Électricité, « medium voltage » {KR}	$Elec^{11}_{KR(CZ)}$	$Elec^{11}_{KR(DS)}$
Électricité, « medium voltage » {NO}	$Elec^{11}_{NO(CZ)}$	$Elec^{11}_{NO(DS)}$
Électricité, « medium voltage » {RoW}	$Elec^{11}_{ROW(CZ)}$	$Elec^{11}_{ROW(DS)}$
Flux des déchets (unité/kg)		
Déchets Communs (Cc)		
D_{c1}[11]	3,57E+00	3,29E-01
Déchets retirés (Cc)		
D_{r1}[11]	4,00E-02	0,00E+00

La même démarche a été employée pour le procédé de découpe de wafers (SW) et le même inventaire que celui de la technologie de référence a été défini pour le reste de la chaine de la valeur (polysilicium, cellule, module et installation).

À partir de ces tableaux d'inventaire et des résultats des impacts de référence, déjà capitalisés, l'impact environnemental pour chaque étape a été estimé.

En se basant sur les équations 7, 8 et 9 (Chapitre 3), les résultats des impacts environnementaux des procédés de la technologie « multi-Si standard » ont été exprimés par kWh (unité fonctionnelle du système PV final) puis le taux d'évolution environnemental est

[11] Données confidentiels

estimé par rapport au procédé équivalent de la technologie de référence (mono-Si monofacial) (Figure 66).

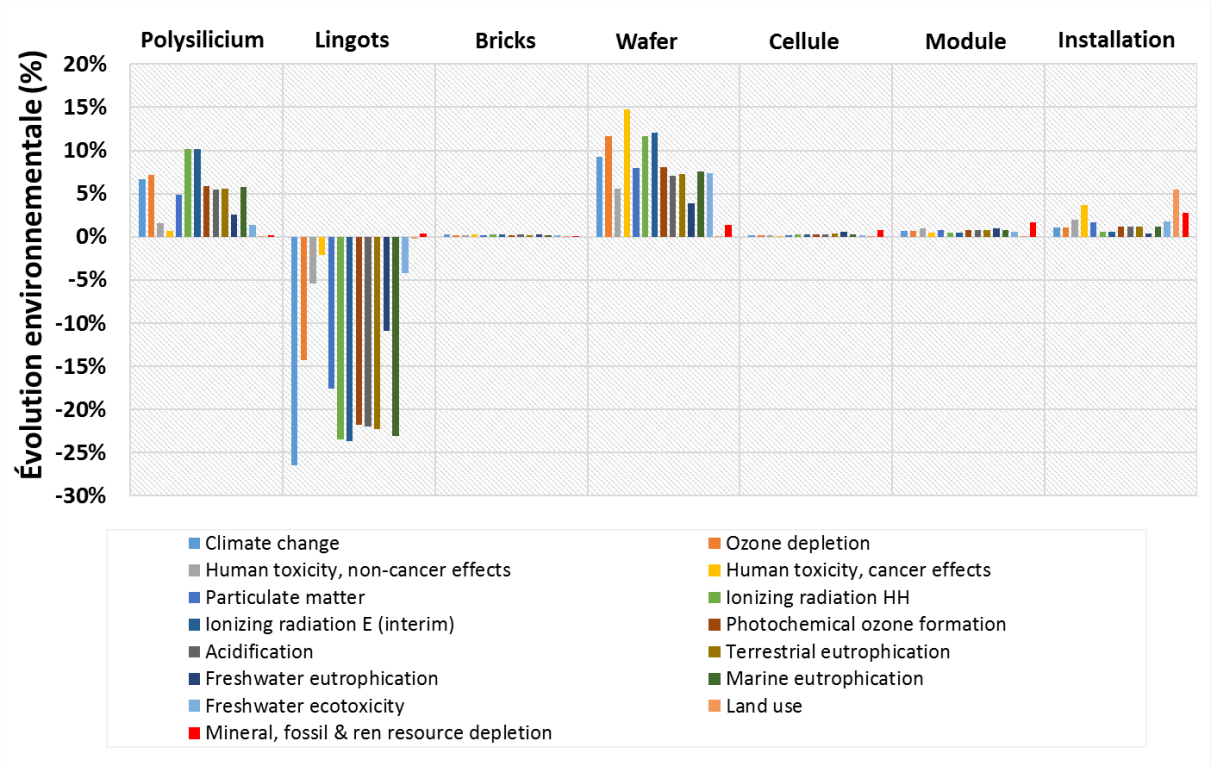


Figure 66. Évolution environnementale par catégorie d'impact de chaque étape de fabrication de la technologie « Multi-Si standard » par rapport à la technologie de référence « Mono-Si monofacial »

La somme des évolutions par étape de fabrication traduit l'évolution environnementale globale de la technologie « multi-Si standard » par rapport à la technologie « mono-Si monofacial », illustrée dans la Figure 67 où les gains environnementaux (G_{en}) sont présentés en vert si positifs alors que le rouge traduit, quant à lui, une augmentation de l'impact par rapport à la référence. À partir de ces résultats, les différentes catégories d'impact ont été exprimées en unité d'impact/kWh pour la comparaison avec les résultats issus du logiciel Sima Pro.

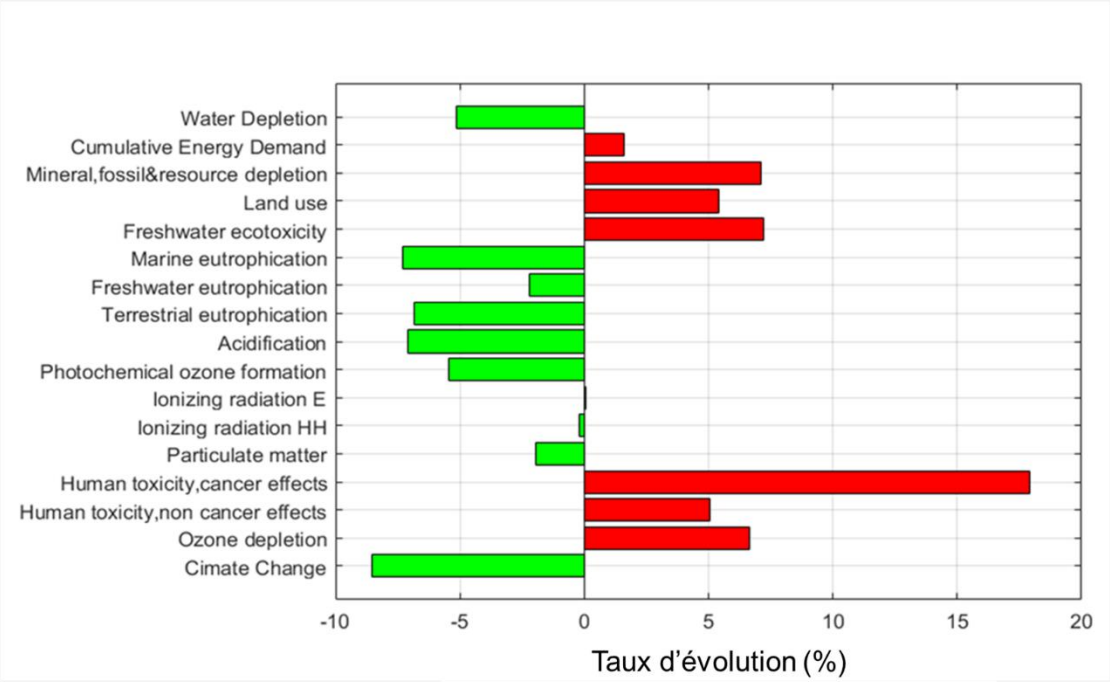


Figure 67. Taux d'évolution des résultats des impacts environnementaux par catégorie d'impact de la technologie « Multi-Si standard » par rapport à la technologie de référence « Mono-Si monofacial »

- *Méthode d'ACV standard*

L'évaluation environnementale de la technologie Multi-Si a été réalisée en parallèle avec le logiciel Sima pro 8.1 et la base des données Ecoinvent 3.1. La méthode **« ILCD 2011 midpoint »** a été employée pour évaluer 15 impacts environnementaux principaux, alors que la consommation d'énergie et la consommation d'eau ont été évaluées par les méthodes **« Cumulative Energy Demand 1.09 »** et **« Pfister et al 2009 (water scarcity) »** respectivement.

Les résultats des différents impacts environnementaux sont présentés dans le Tableau 22.

Tableau 22. Résultats des impacts environnementaux absolus de la technologie « Multi-Si standard » par la méthode ACV standard

Catégories d'impact	Unité	Multi-Si Standard
Climate change	kg CO2 eq/kWh	5,31E+01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq/kWh	3,51E-09
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh/kWh	1,02E-08
Human toxicity, cancer effects	CTUh/kWh	1,56E-09
Particulate matter	kg PM2.5 eq/kWh	4,92E-05
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq/kWh	2,27E-03
Ionizing radiation E (interim)	CTUe/kWh	1,72E-08
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq/kWh	1,79E-04
Acidification	molc H+ eq/kWh	4,57E-04
Terrestrial eutrophication	molc N eq/kWh	6,33E-04
Freshwater eutrophication	kg P eq/kWh	7,62E-06
Marine eutrophication	kg N eq/kWh	5,38E-05
Freshwater ecotoxicity	CTUe/kWh	4,83E-02
Land use	kg C deficit/kWh	4,70E+00
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq/kWh	1,98E-05
Cumulative Energy Demand	MJ/kWh	4,50E+00
Water Depletion	m3/kWh	5,69E-04

- *Comparaison des deux méthodes :*

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus, d'une part avec la méthode ACV, et d'autre part avec la méthode d'estimation des taux d'évolution « ECO PV », le pourcentage d'erreur a été défini comme l'écart entre la valeur théorique et la valeur expérimentale : dans le cas de cette validation, les valeurs expérimentales traduisent les taux d'évolution environnementale calculés par la méthode des évolutions « ECO PV » et convertis en résultats absolus (unité /kWh) et les valeurs théoriques sont celles résultantes de la méthode d'ACV standard (unité/kWh).

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre ainsi les différents pourcentages d'erreur p ar catégorie d'impact

Tableau 23. Pourcentage d'erreurs entres les résultats de deux méthodes

Catégories d'impact	Pourcentage d'erreur
Climate change	0,057%
Ozone depletion	0,060%
Human toxicity, non-cancer effects	0,206%
Human toxicity, cancer effects	0,099%
Particulate matter	0,072%
Ionizing radiation HH	0,013%
Ionizing radiation E (interim)	0,096%
Photochemical ozone formation	0,000%
Acidification	0,008%
Terrestrial eutrophication	0,000%
Freshwater eutrophication	0,055%
Marine eutrophication	0,112%
Freshwater ecotoxicity	0,000%
Land use	0,000%
Mineral, fossil & ren resource depletion	0,000%
Cumulative Energy Demand	0,198%
Water Depletion	0,129%

Les résultats montrent que les pourcentages d'erreurs sont faibles, variant entre 0 et 0,2 %, ce qui valide la méthode du calcul du taux d'évolution environnemental développée dans ce travail de recherche.

L'étape suivante consiste à appliquer l'approche « ECO PV » dans un projet de R&D à TRL bas et valider les différentes fonctionnalités de l'approche.

3 Utilisation de l'approche « ECO PV » dans un projet de R&D à TRL bas : étude de cas

L'approche « ECO PV » a été testée sur un projet PV de R&D à TRL bas : le projet de R&D BIPPP **« Bifacial Integrated Premium PV Product »** [147] dont l'échelle TRL est située entre 4 et 5. L'objectif de ce projet est de développer une nouvelle technologie de modules bifaces de forte puissance, sans cadre et sur silicium «Monolike » type p (Figure 68).

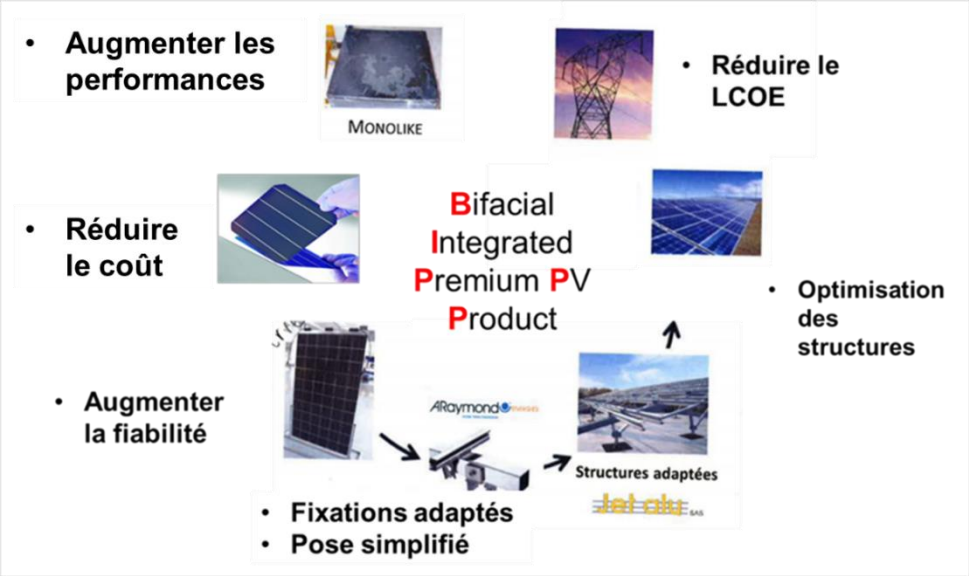


Figure 68. Les différents objectifs du projet BIPPP

En se basant sur la démarche détaillée en chapitre 3 (section 2), **(1)** les besoins du « partenaire industriel » ont été définis, **(2)** la nouvelle technologie a été définie et les taux d'évolution ont été estimés. En se basant sur les résultats des évolutions, **(3)** la décision a été prise concernant la nouvelle technologie dans sa phase de développement.

1) Étape 1 : Les besoins du « partenaire industriel »

En se basant sur les objectifs fixés dans le projet BIPPP, les besoins du client ont été traduits par la réduction du coût (grâce au développement des lingots « monolike » par un procédé de cristallisation innovant) et l'augmentation des performances (grâce à la bifacialité des modules qui produisent l'électricité grâce aux photons récupérés en faces avant et arrière).
Par ordre de priorités, le classement des trois aspects technique, économique et environnemental a été défini comme suit :

Performances économiques > Performances techniques > Performances environnementales

Afin de quantifier ce classement de performances, un poids est donné pour chaque alternative et, en utilisant la méthode AHP, un taux de priorité est attribué à chaque critère (Tableau 24)
Par conséquent, les taux de priorités associés pour les critères économique, technique et environnemental sont 54 %, 30 % et 16 % respectivement.

Tableau 24. Quantification des priorités technique, économique et environnementale du client en utilisant la méthode AHP

Critères	Pec	Pt	Pen	Pec	Pt	Pen	Taux de priorités
Pec	1	2	3	0,55	0,57	0,50	**54%**
Pt	0,50	1	2	0,27	0,29	0,33	**30%**
Pen	0,33	0,50	1	0,18	0,14	0,17	**16%**
∑ =	**1.83**	**3.5**	**6**	**1**	**1**	**1**	

2) Étape 2 : Estimation des taux d'évolution

La technologie étudiée est un système PV composé d'un module à 60 cellules bifaciales en silicium « monolike ». Dans la chaine de valeur, les changements par rapport à la technologie de référence résident dans le procédé de cristallisation, la réalisation des cellules et des modules : afin d'assurer la collection de la lumière des deux côtés, la face arrière du module (backsheet) est remplacée par un verre transparent, rendant possible la suppression du cadre. Les paramètres clés associés ainsi que les procédés de fabrication utilisés pour le développement de la technologie « Monolike bifacial » sont présentés en Figure 69 et Figure 70, respectivement. D'après le retour d'expérience et la bibliographie, le gain bifacial peut atteindre 15% sur le productible annuel du système PV. Étant donné que la technologie n'est pas encore totalement mature, les valeurs du rendement, du PR, du DR et de la durée de vie sont basées sur des estimations réalistes proposées par les experts PV du DTS.
Les mêmes conditions d'ensoleillement et d'installation que la technologie de référence ont été prises en compte pour les calculs.

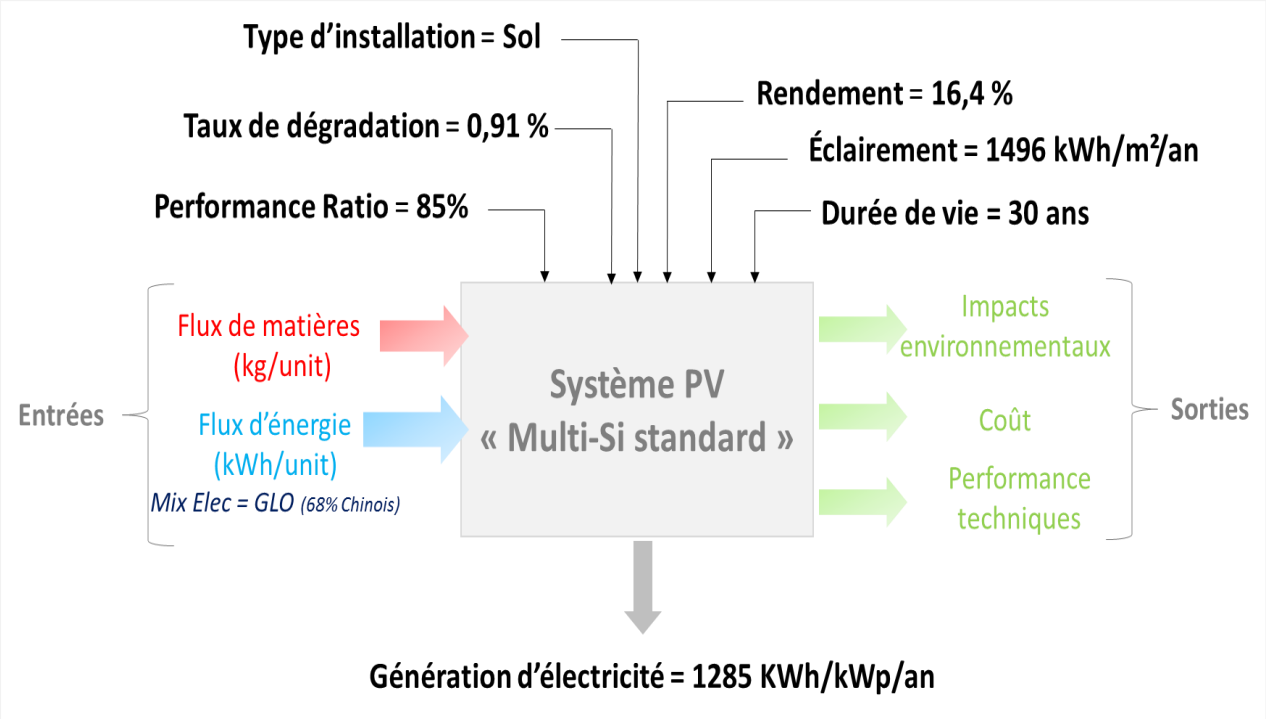


Figure 69. Paramètres clés de la technologie « Monolike bifacial »

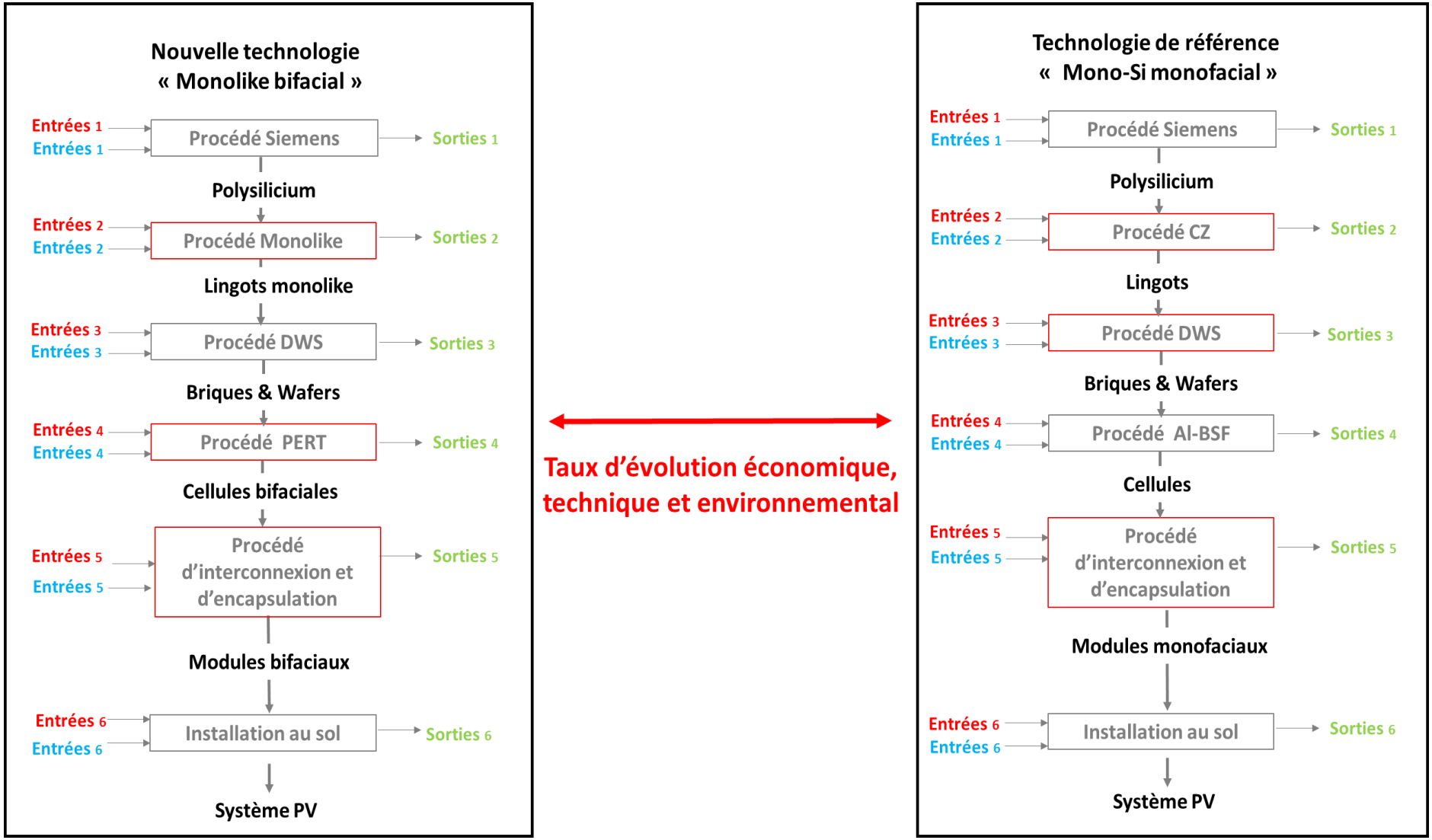


Figure 70. Comparaison de la chaine de valeur de la technologie de référence « Mono-Si monofacial » et de la technologie « Monolike bifacial »

En se basant sur l'inventaire de la référence et l'inventaire des procédés de la technologie « monolike bifacial », l'évolution environnementale (%) de chaque procédé de fabrication a été exprimée en kWh (Figure 71)

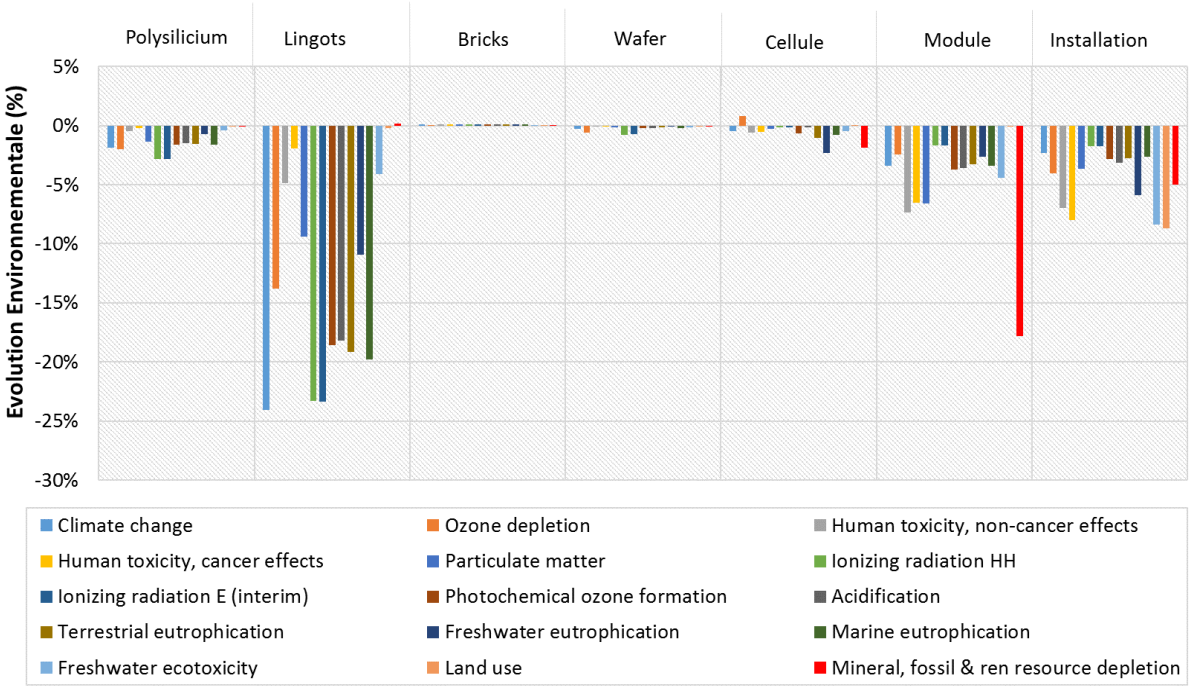


Figure 71. Taux d'évolution des résultats des impacts environnementaux par catégorie d'impact des différents procédés de fabrication de la technologie "Monolike bifacial" par rapport à la technologie de référence.

La Figure 71 montre que les procédés de fabrication de la technologie « monolike bifacial » offrent un gain environnemental sur tout l'ensemble des impacts environnementaux. Ce gain est de 20 % en moyenne sur l'étape de cristallisation (lingots) grâce au procédé « monolike » où la consommation d'énergie est plus faible que celle consommée pour le procédé CZ. Au niveau module, le retrait du cadre en aluminium permet un gain environnemental de 18 % sur la déplétion des ressources minérales et fossiles. Le procédé PERT réduit également le taux d'impacts environnementaux par rapport au procédé Al-BSF standard de 3 % en moyenne sauf pour la déplétion d'ozone où une augmentation de 1% a été estimée, du fait de la consommation de silane (SiH_4). Comme les catégories d'impact des systèmes PV sont exprimées par unité d'électricité produite (kWh), les gains observés pour le polysilicium, les wafers et l'installation sont dus au gain sur le productible des cellules bifaciales.

Les gains environnementaux pour le système final « monolike bifacial » pour l'ensemble des impacts environnementaux étudiés sont présentés en Figure 72

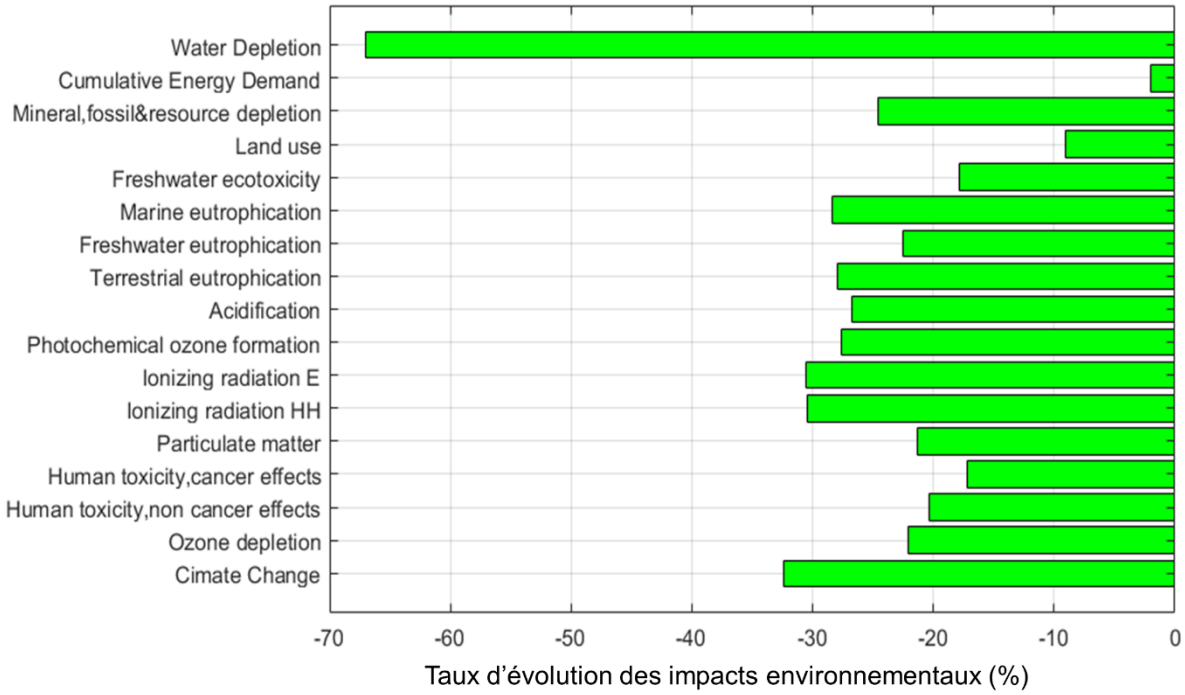


Figure 72. Taux d'évolution par catégories d'impact environnemental de la technologie "monolike bifacial" par rapport à la technologie « mono-Si monofacial »

Étant donné que dans le cadre du projet, il n'existe pas de priorité pour les impacts environnementaux, une moyenne linéaire des gains obtenus a été calculée pour définir le gain environnemental global du système final : 11 %.

Du point du vue économique, l'intégration du procédé de cristallisation « monolike » ainsi que le gain bifacial sur le productible final ont permis de réduire le coût de la technologie « monolike bifacial » par kWh de 15 %. Le gain bifacial de 15 % définit, quant à lui le gain technique de la technologie.

La Figure 73 présente les différents taux d'évolutions de la technologie « monolike bifacial » du point de vue économique, technique et environnemental.

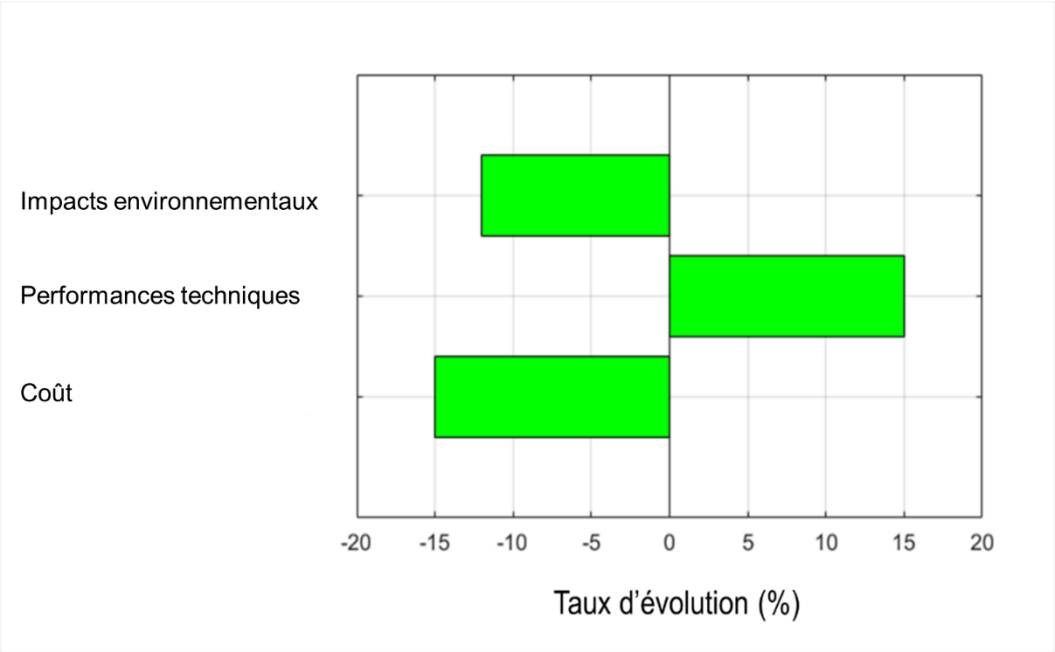


Figure 73. Taux d'évolution économique, technique et environnemental de la technologie " Monolike bifacial" par rapport à la technologie de référence

3) La prise de décision

Par rapport aux systèmes monofaces mono-Si Al-BSF, la nouvelle technologie « monolike bifacial » offre un gain sur les trois dimensions économique, technique et environnementale. Pondéré par le vecteur de priorités du client, détaillé auparavant, un gain composite global de 14 % a été estimé.

En conclusion, la technologie « Monolike bifacial » offre des avantages qui pourraient contribuer de manière significative à l'évolution du marché photovoltaïque.

Il faut noter que ces résultats peuvent varier en fonction de l'unité fonctionnelle choisie pour analyser le système et par conséquent peuvent influencer la prise de décision. Ce paramètre doit alors être défini en fonction du besoin du client dans le projet de R&D.

Afin de souligner l'impact de l'unité choisie, une estimation des taux d'évolutions environnementaux de la technologie « Monolike bifacial », exprimés en kWp, a été réalisée et comparée par rapport aux gains obtenus par KWh (Figure 74).

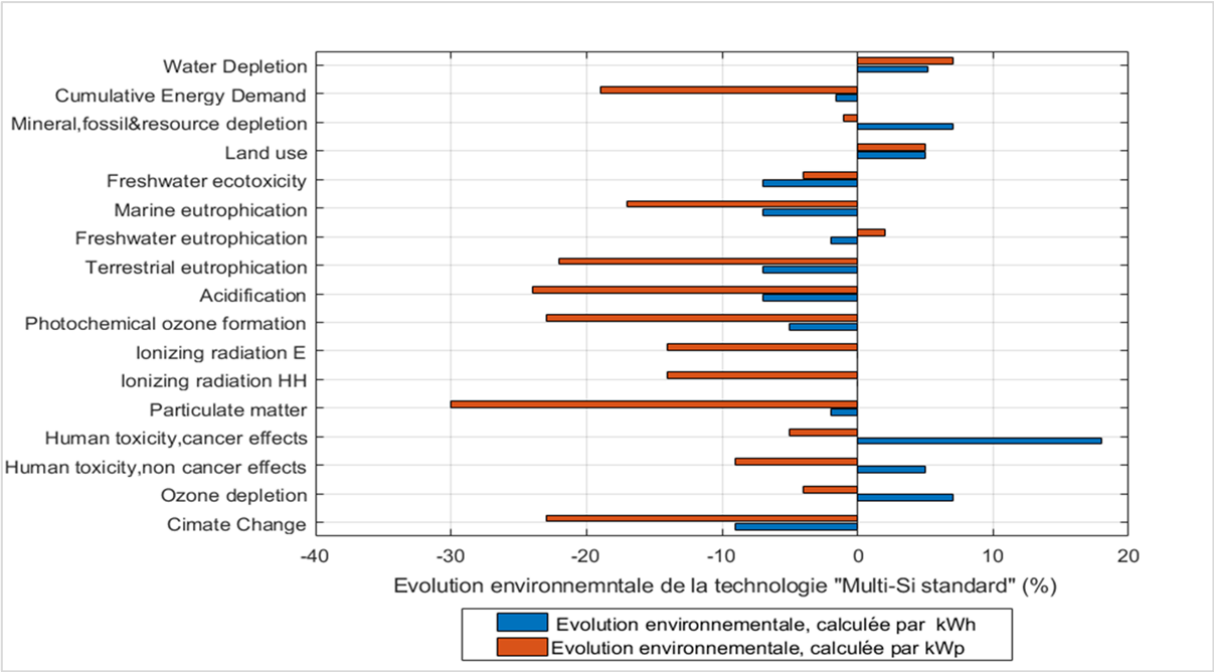


Figure 74. Variabilité en fonction de l'unité fonctionnelle de l'évolution environnementale de la technologie « Monolike bifacial » par rapport à la technologie de référence

La Figure 74 illustre ainsi la variabilité de l'évolution environnementale en fonction de l'unité fonctionnelle choisie. En considérant cette unité fonctionnelle (kWp), l'analyse ne prend pas en compte l'électricité produite (kWh), ainsi le gain de bifacialité ajouté à l'électricité produite n'est pas pris en compte. Pour certains impacts comme le bilan carbone **« climate change »** et l'énergie consommée **« Cumulative energy demand »,** une réduction significative est obtenue en appliquant le kWp comme unité fonctionnelle. Cette réduction est justifiée par la réduction significative de l'électricité consommée pendant la phase de cristallisation avec le procédé monolike. Pour d'autres impacts, une réduction de l'impact environnemental est obtenue en kWh mais une augmentation de ce même impact est constatée en kWp, comme l'exemple de l'impact **« ozone depletion »** (-4 % en kWh et +7 % en kWp exprimant une augmentation du taux de l'impact par rapport à la référence).

Des tels résultats peuvent impacter significativement la prise de décision.

4 Conclusion sur la phase d'expérimentation

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de valider les fonctionnalités de la méthode « ECO PV » proposée pour répondre aux besoins identifiés au chapitre 2 (Tableau 25). Les analyses ont également mis en évidence la complexité du système PV et de ses paramètres,

amenés à fluctuer rapidement (échelle de temps inférieure à 1 an) et qui nécessitent par conséquent la mise en place d'un outil informatique adapté et « friendly user », afin d'assurer la pérennité de l'intégration de cette approche au sein de l'organisme de R&D dans un premier temps, puis au sein de la communauté internationale du domaine photovoltaïque.

Tableau 25. Les différentes caractéristiques de l'approche d'estimation des évolutions « ECO PV » pour répondre aux besoin pour une intégration pérenne de l'éco-conception au sein de l'organisme de R&D

Outils d'éco-conception basés sur :	Méthode d'analyse		Niveau d'expertise	Temps requis	Applicable à TRL bas	Besoin du client	Interprétation des résultats	Analyse multicritères	Type d'analyse	
	Objective	Subjective							Évaluation	Amélioration
Les Checklists		✓	****	*			****		✓	
ACV simplifiée	✓		****	****	□		****		✓	
QFD		✓	***	***	✓	✓	***		✓	
MCDM		✓	**	*	✓	✓	*	✓	✓	
« ECO PV »	✓	✓	*	*	✓	✓	*	✓	✓	✓

Les besoins à satisfaire

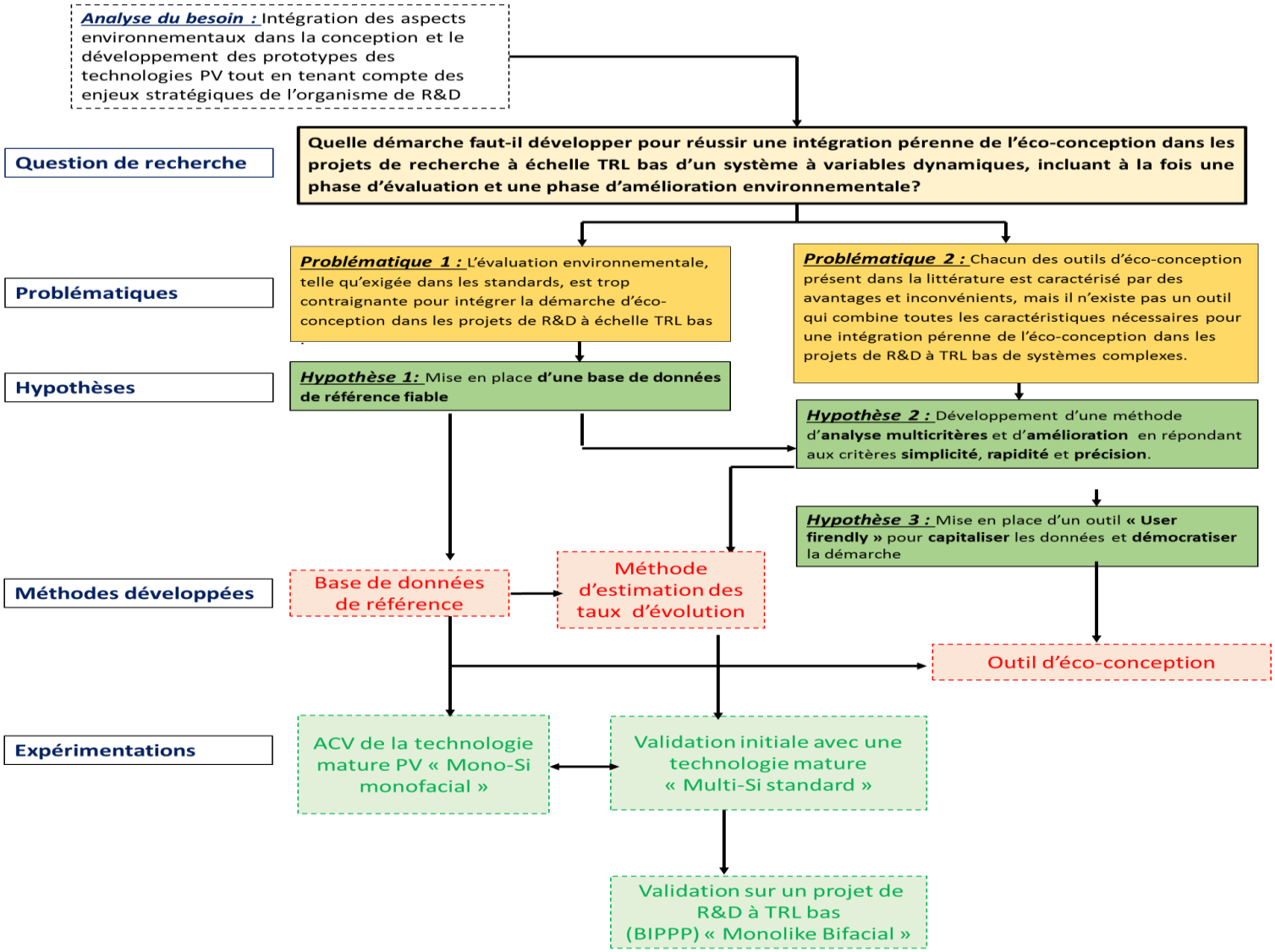


Figure 75. Synoptique général de la question de recherche

Chapitre 5 Mise en place d'un outil d'éco-conception des systèmes PV « ECO PV »

Ce chapitre présente la mise en place d'un outil pour répondre à la problématique de la pérennité de l'intégration de l'approche d'éco-conception au sein d'un organisme de R&D : la démarche d'éco-conception, développée dans ce travail, a été implémentée dans un outil informatique appelé « ECO PV » dédié dans un premier temps aux systèmes PV en silicium cristallin.

Tout d'abord, les différentes fonctionnalités de l'outil seront présentées dans ce chapitre. Pour tester la robustesse du modèle, ces fonctions seront testées (Alpha test) sur le projet PV de R&D défini comme cas d'étude pendant la phase d'expérimentation (Chapitre 4).
À l'aide de cet outil, les différentes étapes de la démarche d'intégration, détaillées dans le chapitre 3 (déploiement, intégration dans les projets de R&D et pérennisation), seront également éprouvées.
Enfin, les limites de l'outil « ECO PV » seront identifiées et des perspectives d'amélioration seront proposées.

1 Conception de l'outil « ECO PV »

1.1 Introduction sur l'outil « ECO PV »

La construction de l'outil a été réalisée selon les spécifications du cahier des charges, défini et détaillé dans le chapitre 3 (section 3.1).

En se basant sur l'approche d'éco-conception développée dans le cadre de ce travail, l'enjeu est de pouvoir intégrer de façon systématique la prise en compte des impacts environnementaux dans les projets PV de R&D du DTS en accompagnement de ses partenaires industriels dans leur effort d'innovation et de compétitivité.

Il est nécessaire de rappeler que l'outil « ECO PV » doit répondre aux objectifs suivants qui répondent également aux besoins identifiés auparavant dans le cahier des charges (Figure ***76***) :

(1) Automatiser l'analyse environnementale dans les projets du DTS et de ses partenaires.

(2) Aider à la décision multicritères en répondant aux besoins économique, technique et environnemental des clients.

(3) Favoriser le développement de technologies à la fois innovantes et éco-conçues, dès leur phase de conception (TRL 2).

(4) Capitaliser les données, la méthodologie et les résultats, sous la forme d'une base de données à maintenir et élargir.

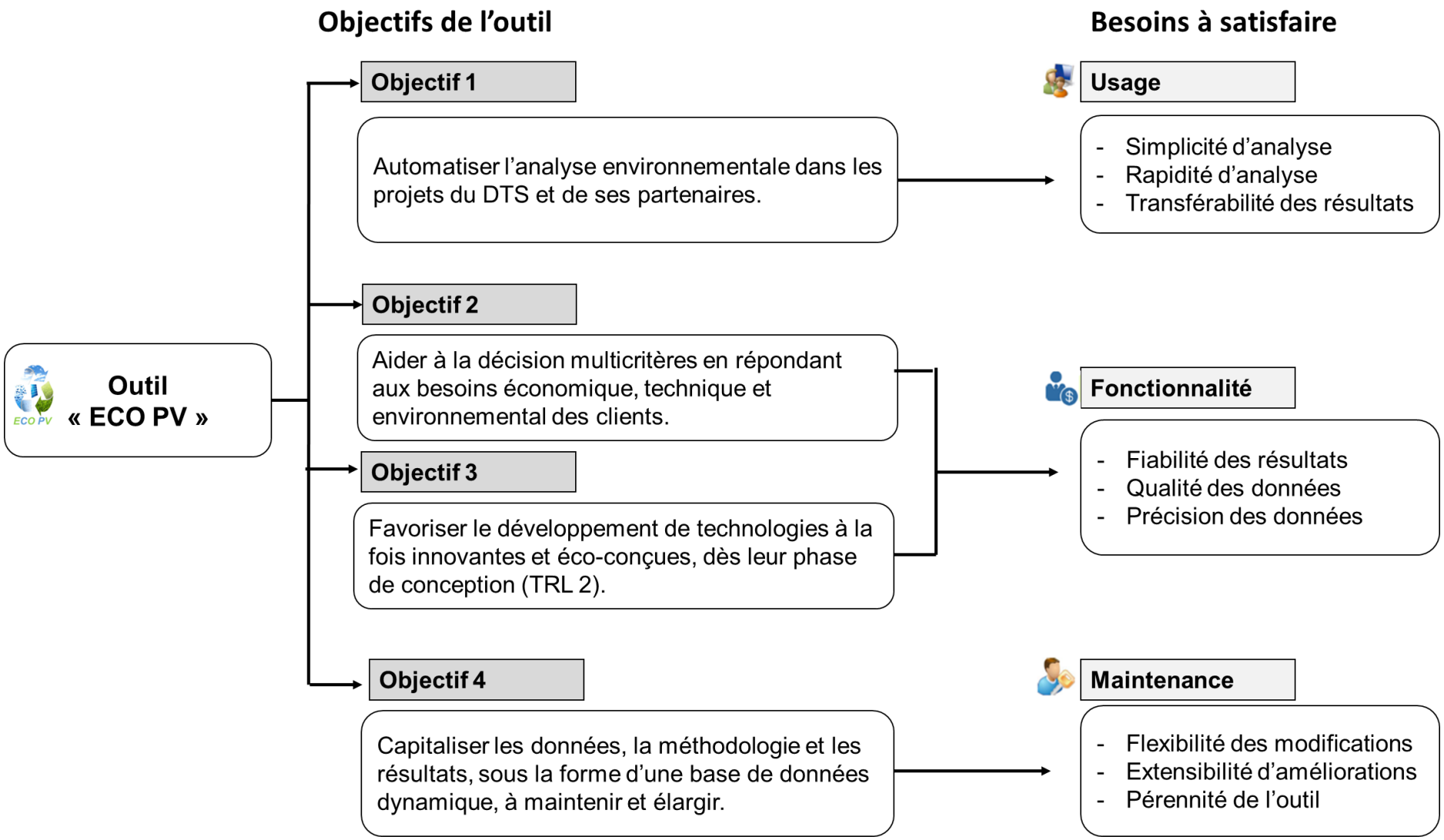


Figure 76. Objectifs de l'outil d'éco-conception "ECO PV " pour répondre aux besoins définis dans le cahier des charges de l'outil

L'outil « ECO PV » a été développé sous **MATLAB**[12] (Figure 77). Les GUI (Graphical User Interface) ont été utilisés comme interfaces graphiques afin de permettre l'interaction entre l'utilisateur et le programme informatique. Avec une interface de ce type, l'utilisateur n'a pas besoin de connaître le langage ni de saisir des commandes pour se servir de l'application.

Cette interface a été convertie en une application exécutable dont les accès d'installation sont à ce stade limités aux ingénieurs / chercheurs du DTS à l'INES.

Figure 77. Première version de l'outil d'éco-conception "ECO PV "

1.2 Fonctionnalités de l'outil « ECO PV »

L'approche d'estimation des évolutions par rapport à une référence a été intégrée dans le code de l'outil en répondant aux critères de simplicité d'usage, fiabilité des résultats et extensibilité des modifications et des améliorations. Comme illustré dans la Figure 78, l'interface utilisateur est composée de plusieurs interfaces :

(a) L'interface « **Project Information »** définit le projet de R&D testé (type, TRL…) et les besoins du client.
(b) L'interface **« Technology of reference »** définit la base de données de référence mise en place.
(c) L'interface **« PV system »** définit la nouvelle technologie par étape de fabrication.
(d) L'interface **« Results »** illustre les résultats des taux d'évolutions technique, économique et environnementale ainsi que les éléments le plus impactant d'un point de vue environnemental.

[12] Un langage de programmation de quatrième génération

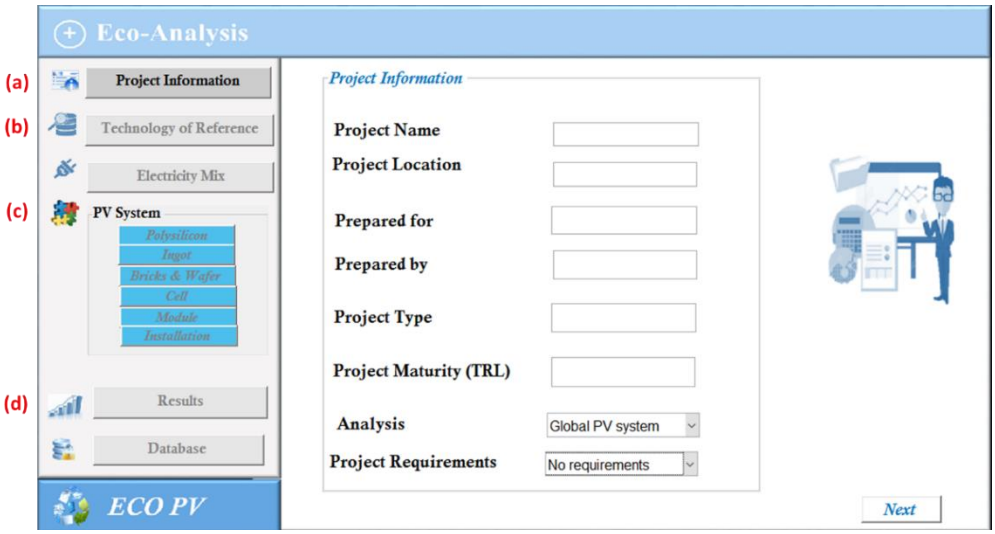


Figure 78. Structure de l'interface utilisateur dans l'outil « ECO PV »

En se basant sur les objectifs de l'outil, les différentes fonctionnalités ont été développées :

- **Objectif 1 : Automatisation de l'analyse environnementale**

Afin d'automatiser l'analyse environnementale, quatre bases de données ont été implémentées comprenant :

- L'**inventaire de la technologie de référence** depuis l'extraction de silicium jusqu'à l'installation du système PV.
- Les **impacts environnementaux** de chaque étape de fabrication de la technologie de référence.
- Les **impacts environnementaux des nouveaux matériaux et des substances chimiques** qui peuvent être ajoutés dans les inventaires de la nouvelle technologie à évaluer (importés de la base de données de référence).
- Les **impacts environnementaux des différentes sources d'énergie** en fonction du mix énergétique du pays.

L'ensemble de ces données est stocké sous forme de tableaux dans des **fichiers Excel**, puis importé par la suite sous forme des **fichiers.Mat** pour être enfin traités dans Matlab et affichés dans les GUI (Figure 79).

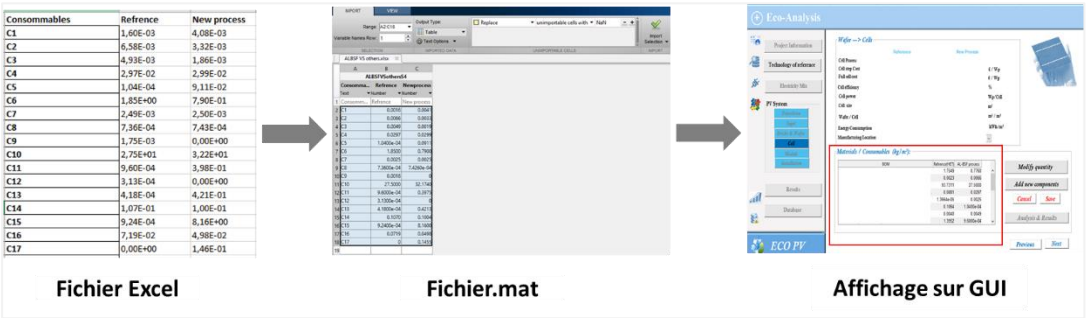


Figure 79. Un exemple de stockage et gestion des données de l'inventaire dans l'outil ECO PV

Chaque étape dans la chaîne de valeur du PV a été modélisée dans une interface indépendante (Figure 80).

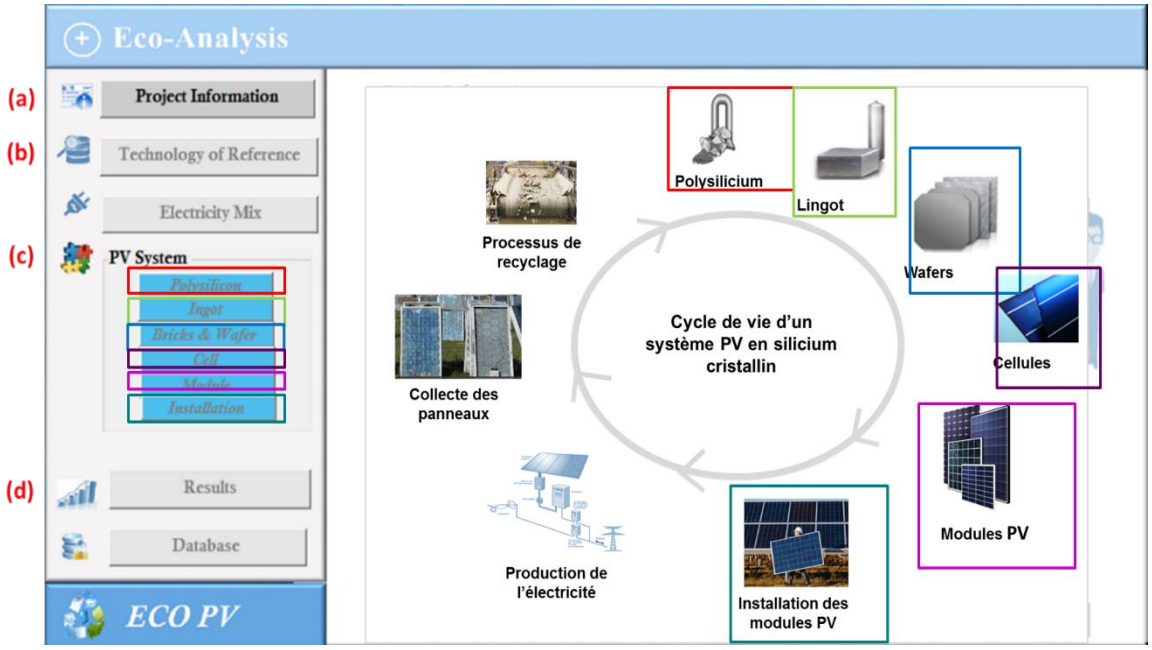


Figure 80. Définition de la nouvelle technologie à évaluer par étape de fabrication

La liaison entre les différentes interfaces (étapes de fabrication du système PV) a été réalisée par les facteurs de liaison, détaillés dans le chapitre 4, pour pouvoir évaluer le système complet. Les différents paramètres qui définissent le niveau d'information à définir par étape de fabrication, identifiés dans le chapitre 4, ont été implémentés d'une façon dynamique, pour donner la possibilité de les modifier facilement. L'inventaire est enfin représenté sous forme de tableaux dans l'interface de l'outil, et la gestion du tableau réalisée selon la méthode d'éco-conception proposée dans ce travail (Figure 81).

La Figure 81 illustre un exemple de définition d'une étape de fabrication (procédé de fabrication des cellules hétérojonction) par rapport au procédé standard de la référence (procédé AL-BSF).

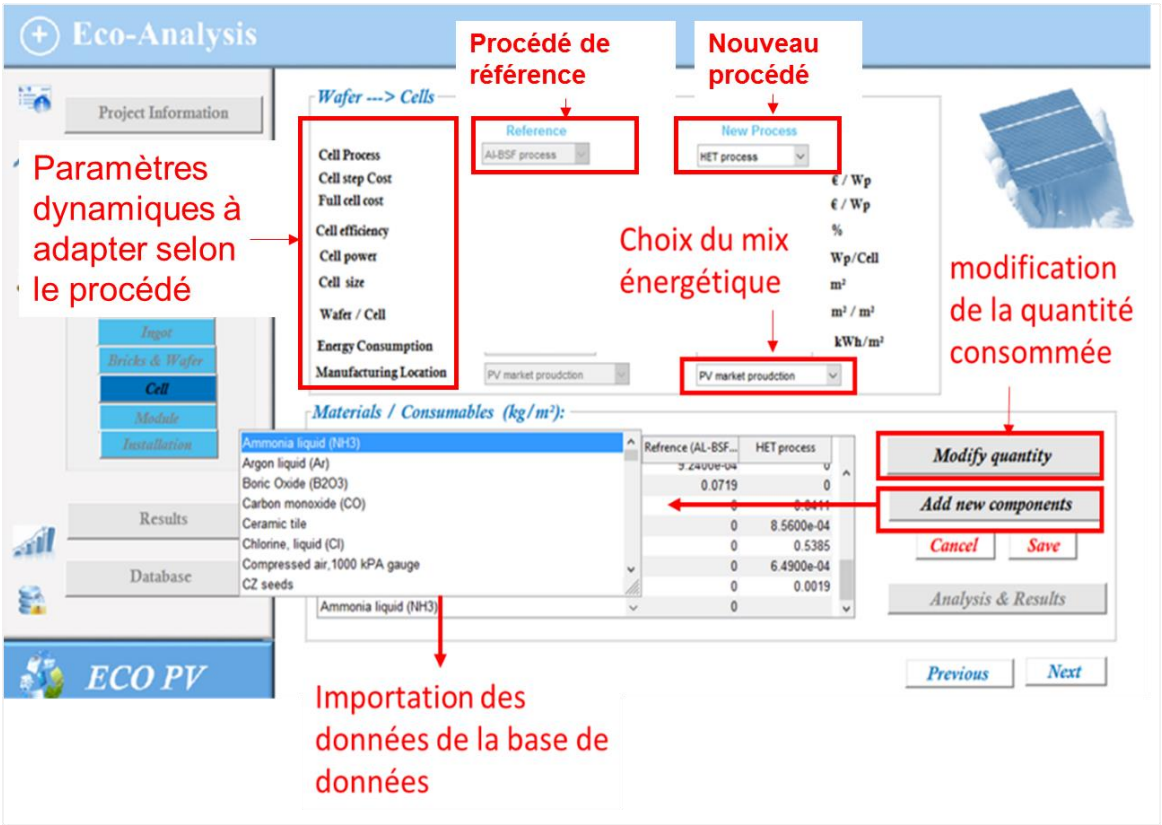


Figure 81. Exemple de gestion de l'inventaire d'un nouveau procédé par rapport à la technologie de référence dans l'outil ECO PV.

Toutes les équations permettant le calcul des taux d'évolution environnemental, technique et économique, détaillées dans le chapitre 3, ont été implémentées dans l'outil.

Une telle gestion des données permet ainsi une réduction du temps d'accès à l'information et d'analyse, répondant aux critères simplicité et rapidité exigés dans le cahier de charges.

- **Objectif 2 : Aide à la décision multicritère pour répondre aux besoins économique, technique et environnemental du client**

Les résultats finaux sont représentés sous forme de graphiques de gains et pertes relativement faciles à interpréter (Figure 83). Ils présentent :

- Le taux d'évolution composite, calculé en fonction des besoins du client fixés dès le début du projet, comme le montre la Figure 82.

- Les différents taux d'évolutions économique, technique et environnementale de la nouvelle technologie par rapport à la référence.
- L'évolution environnementale détaillée des différents impacts environnementaux par rapport à la référence.

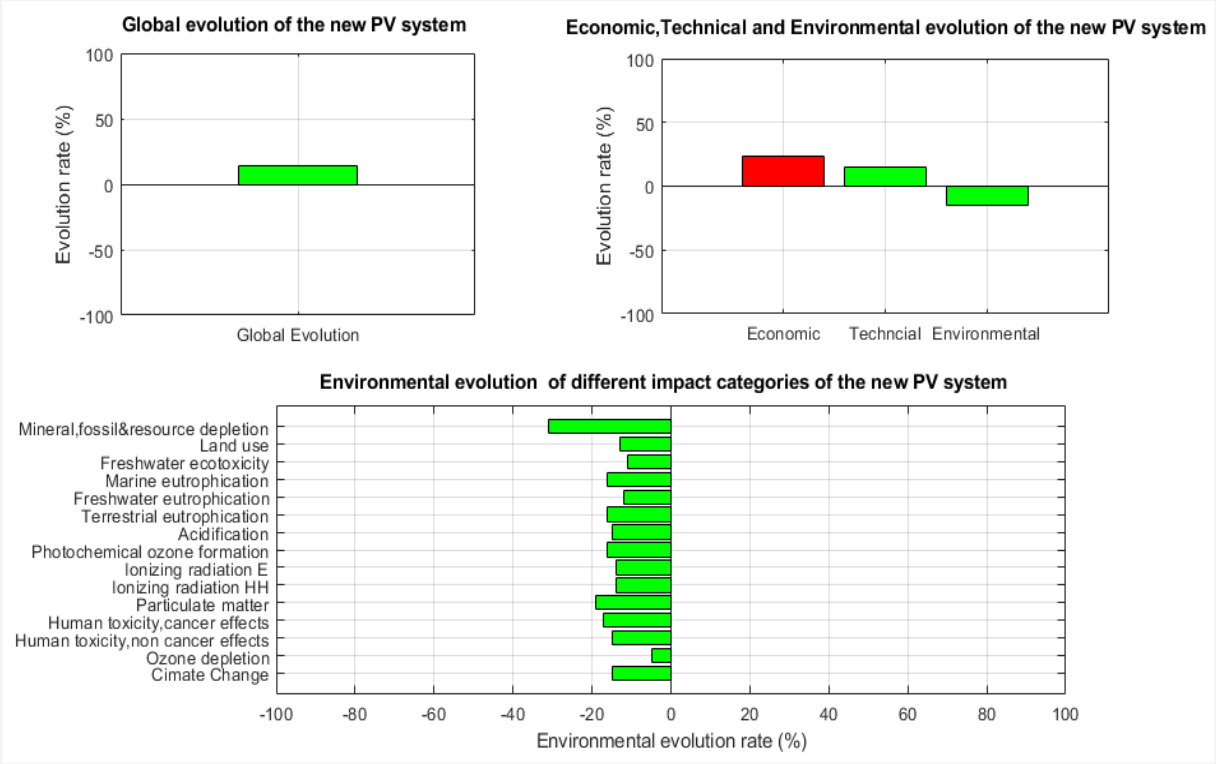


Figure 82. Exemple de résultats de l'analyse multicritères dans l'outil ECO PV

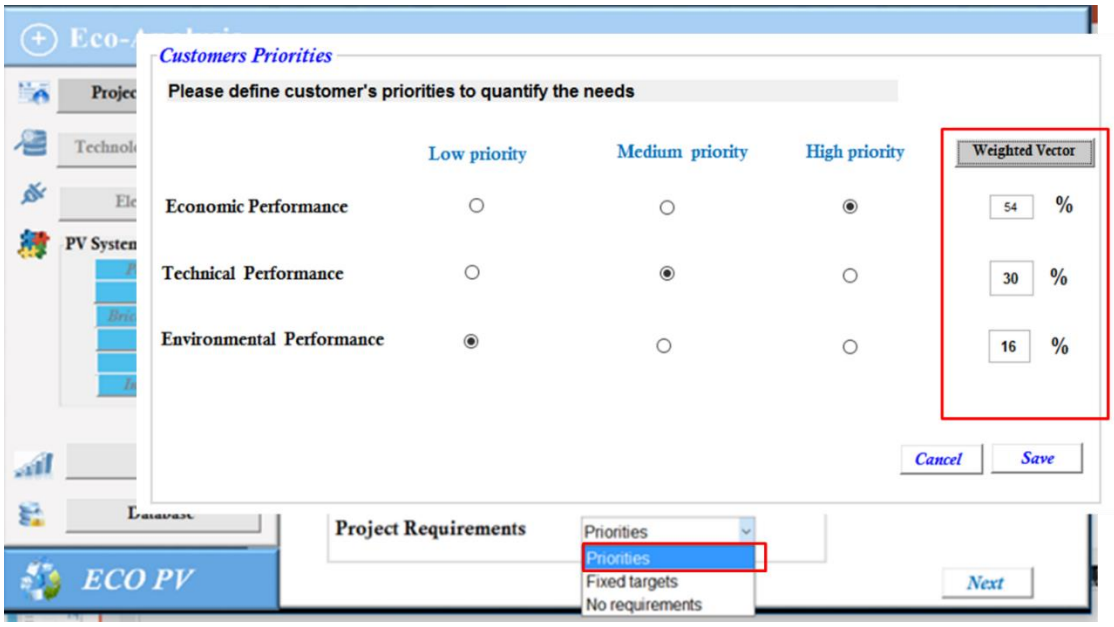


Figure 83. Exemple de définition et de quantification des besoins du client par l'outil « ECO PV »

Ces résultats donnent une vision globale et synthétique des performances technique, économique et en particulier environnementales compréhensible par tous les utilisateurs même s'ils ne sont pas experts de l'ACV, ce qui constitue une aide à la décision multicritères avec le partenaire industriel.

À noter que l'évolution environnementale est estimée par défaut en kWh. Étant donné que l'unité fonctionnelle a un impact sur les résultats finaux, l'outil « ECO PV » permet de varier ce paramètre en fonction du type d'analyse souhaitée (Chapitre 4) pour le système PV complet ou plus spécifiquement un procédé de fabrication. (par exemple pour l'évaluation d'un procédé de cristallisation l'unité fonctionnelle par défaut est « produire 1kg de lingot ») (Figure 84).

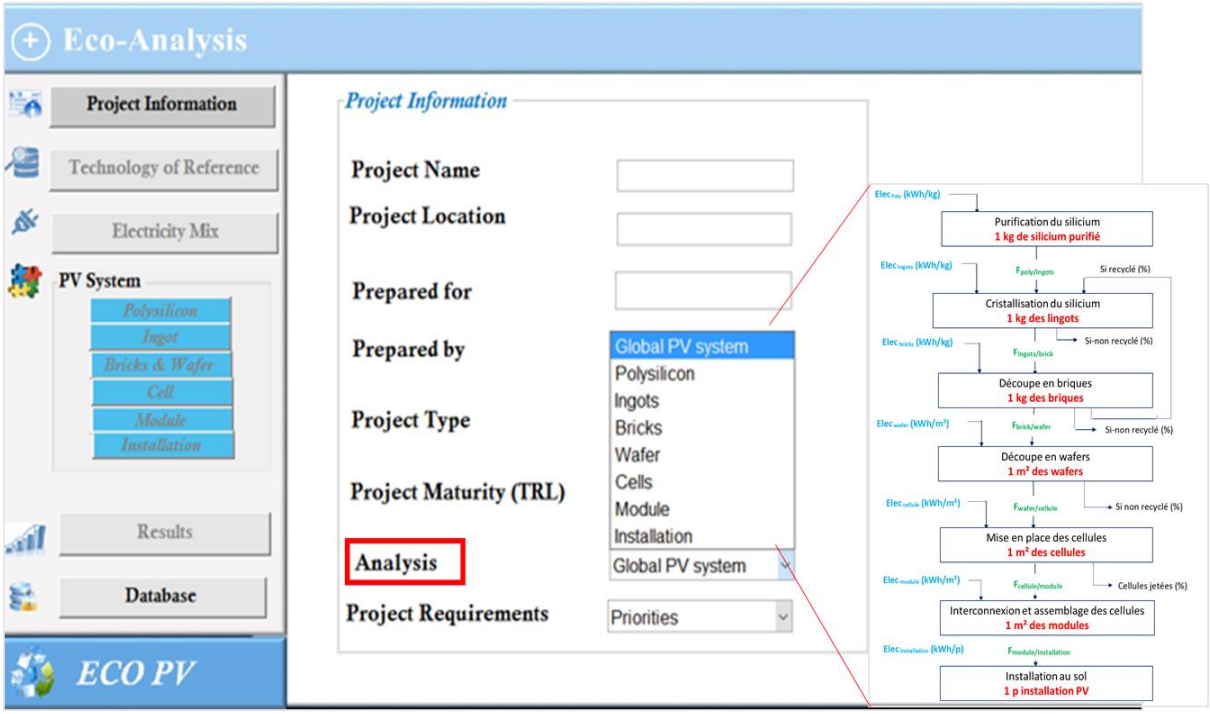


Figure 84. Illustration de la définition de l'unité fonctionnelle en fonction de la frontière du système PV à analyser dans l'outil « ECO PV »

- **Objectif 3 : Favoriser le développement de technologies à la fois innovantes et éco-conçues, dès les TRL bas**

Le modèle présente plusieurs interfaces, pré-remplies par les données de la référence. L'utilisateur peut ainsi compléter ou modifier les données pour la technologie non mature à partir de cette base de données qui facilite la modélisation de l'inventaire.

D'autre part, il est possible de comparer les performances environnementales des différents procédés, pour favoriser le développement de technologies à la fois innovantes et éco-conçues.

Pour aller plus loin dans la possibilité d'améliorer la technologie étudiée d'un point de vue environnemental, une deuxième représentation des impacts environnementaux fournie par l'outil détaille la contribution de chaque étape. L'outil « ECO PV » offre également l'option d'analyse détaillée de contribution de chaque flux élémentaire dans les différents procédés de la chaine de la valeur (Figure 85). Un tel résultat permet de révéler d'éventuelles anomalies dans les procédés testés (utilisation de composants toxiques…) et orienter alors le technologue pour adopter les procédés avant le lancement commercial du produit.

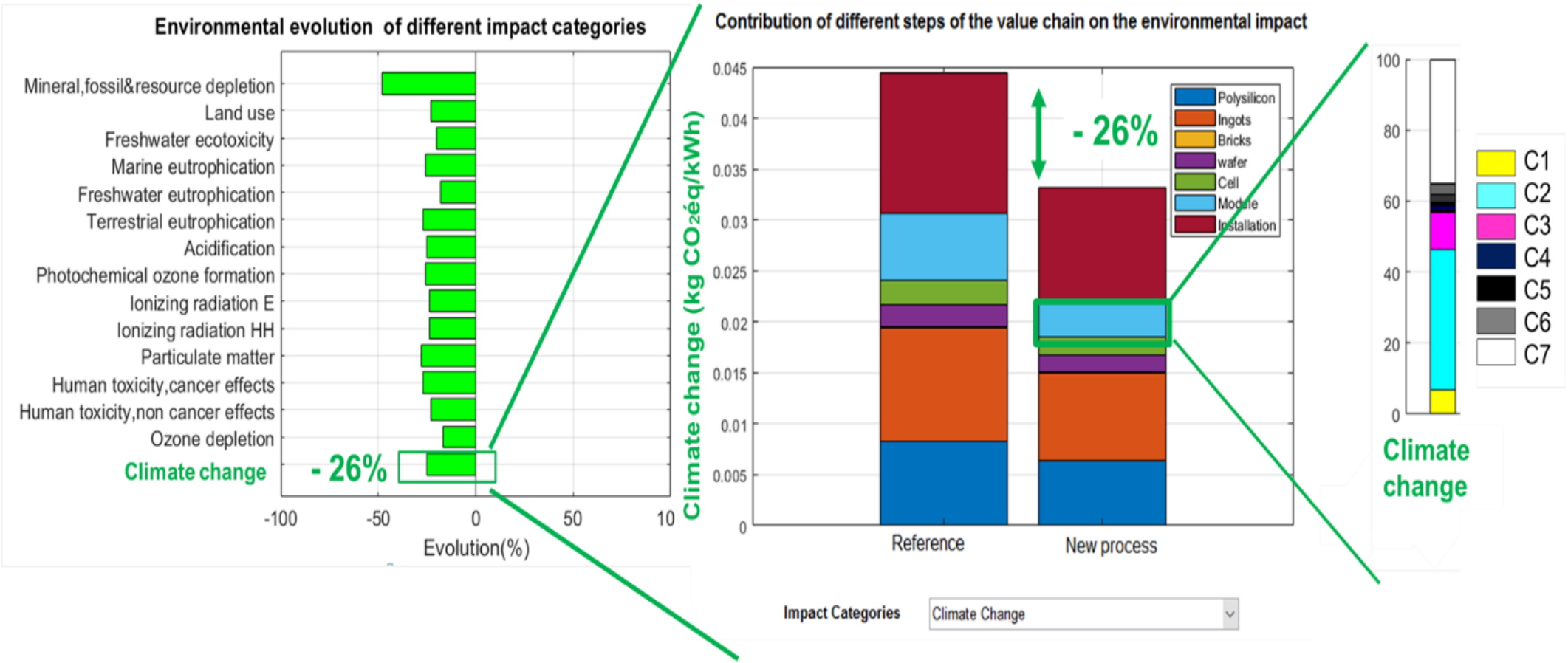


Figure 85. Exemple de résultats environnementaux affichés dans l'outil « ECO PV » par étape de fabrication et par sous-composants pour chaque procédé pour accompagner le processus d'amélioration

- **Objectif 4 : Capitalisation des données dans une base de données à maintenir et élargir**

Dans le cadre de la pérennisation de ce travail de recherche, l'une des problématiques majeures est l'évolution rapide (à l'échelle du semestre) des paramètres des systèmes PV dans l'état de l'art.

Pour répondre à cette problématique, les paramètres critiques, identifiés dans le chapitre 4 (rendement, mix énergétique, pertes de sciage, taux de silicium recyclé…) ont été indiqués et justifiés dans l'outil « ECO PV » de façon transparente, et l'utilisateur peut les modifier à sa guise selon l'évolution du marché (Figure 86). La flexibilité de la mise à jour du mix énergétique des pays est également assurée par l'outil (Figure 87). Ces différentes modifications peuvent être réalisées par l'utilisateur (ingénieur PV) sans intervention du référent de l'outil (section 2.2.3).

Cette démarche de gestion des paramètres évolutifs permet de garantir la transparence, la traçabilité et la fiabilité des résultats. Elle assure par conséquent la pérennisation de la méthode « ECO PV » développée, permettant ainsi une utilisation continue dans l'organisme de R&D.

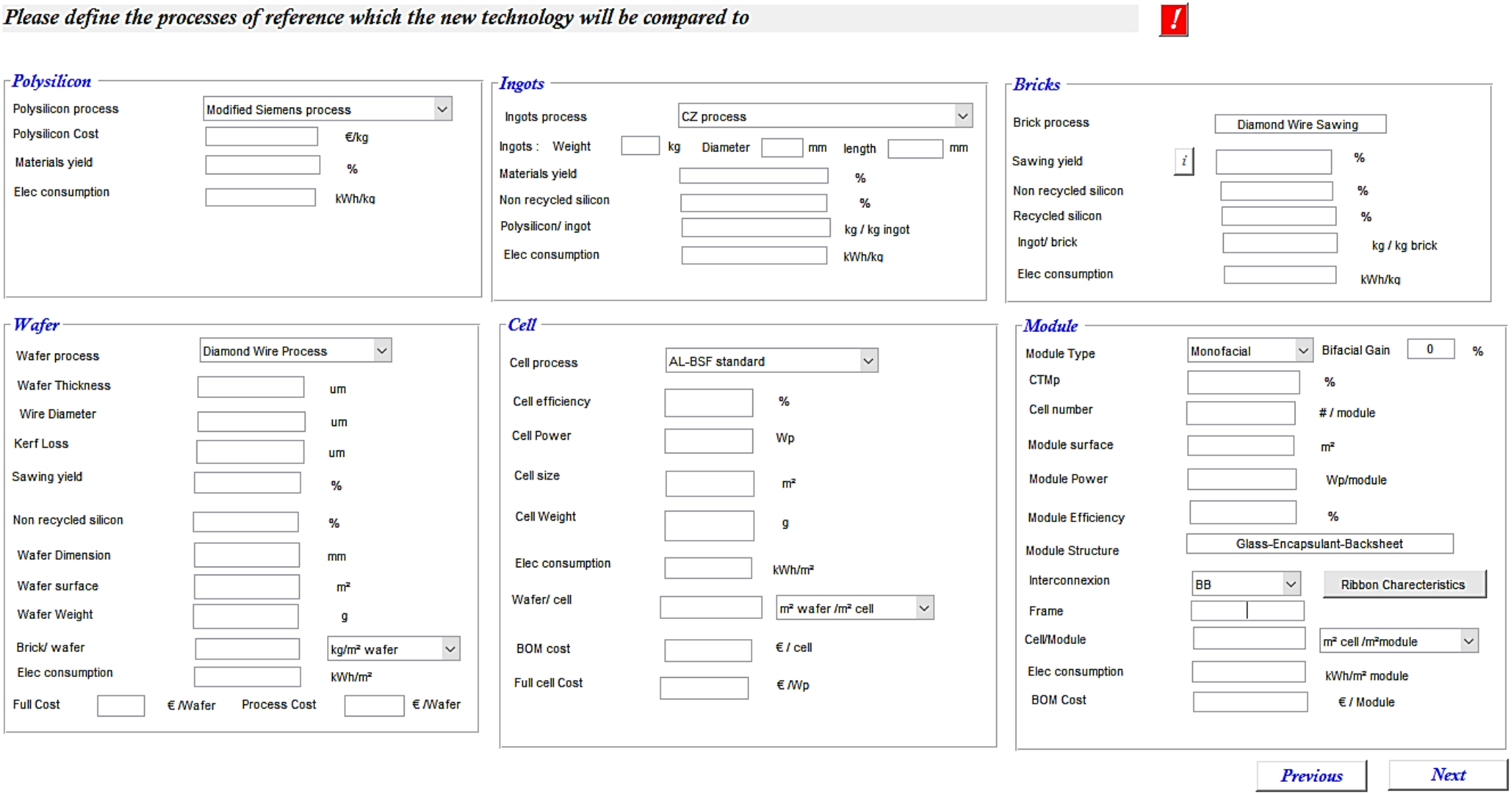


Figure 86. Exemple d'interface des paramètres dynamiques de l'outil « ECO PV »

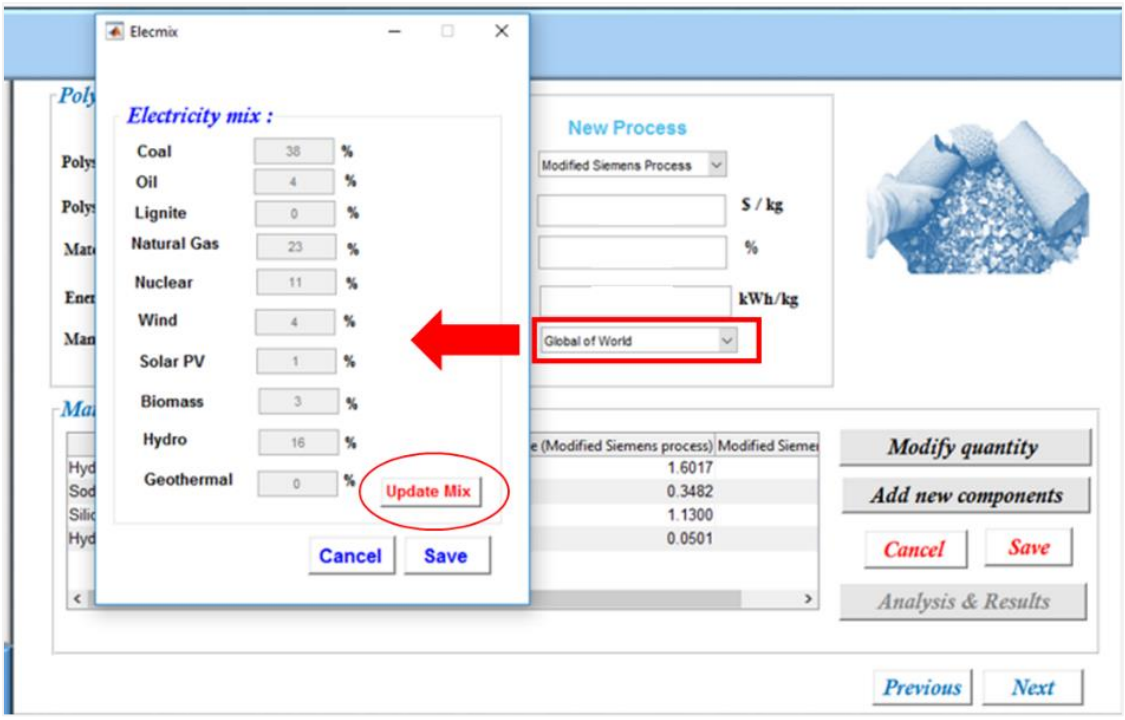


Figure 87. Exemple de mise à jour du mix énergétique dans l'outil « ECO PV »

En se basant sur ces fonctionnalités, l'outil « ECO PV » a réussi à répondre au cahier de charges fixé en termes d'automatisation de l'analyse environnementale, d'aide à la décision multicritères, de développement de technologies éco-conçus à TRL bas et de capitalisation des données et de la méthodologie au sein de l'organisme de R&D.

La maintenance des inventaires et le stockage des impacts environnementaux ont été également considérés dans la construction de l'outil, et seront abordés dans la partie pérennisation de l'outil (section.2.2.3)

2 Intégration de la démarche d'éco-conception au sein de l'organisme de R&D par le biais de l'outil « ECO PV »

L'objectif de la démarche est de faire adhérer les acteurs de l'organisme de R&D à l'intégration de l'éco-conception au sein de leurs développements, grâce à un outil informatique adapté.

Cette étape consiste alors à éprouver la démarche mise en place, détaillée dans le chapitre 3, suivant les étapes décrites dans la Figure 88.

Figure 88. Étapes d'intégration de l'approche d'éco-conception grâce à l'outil "ECOPV"

2.1 Validation initiale de fonctionnement de l'outil : Alpha test

Afin de valider le bon fonctionnemnt de l'outil, la technologie « monolike bifacial », définie comme cas d'étude dans ce travail de recherche, a été testée par l'outil « ECO PV ».
Comme le montre la Figure 89, les résultats obtenus avec l'outil « ECO PV » sont cohérentes avec les résultats déjà obtenus (Chapitre 4, section.3), ce qui valide le bon fonctionnement du code implémenté dans l'outil.

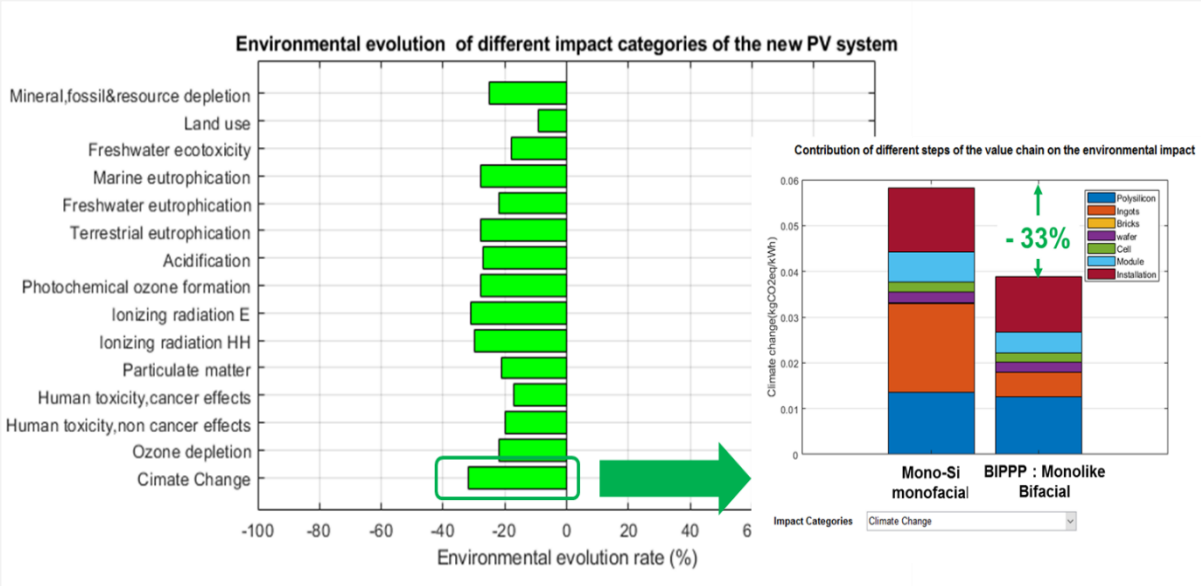


Figure 89. Résultats environnementaux obtenus avec l'outil « ECO PV » sur la technologie "Monolike bifacial" dans le cadre du projet BIPPP (notre cas d'étude)

Cette première validation a donné lieu à une communication au sein du DTS, présentée comme « Fait marquant » du laboratoire (LMPV) au mois de juin 2018, qui a été relayée au sein du CEA - LITEN dans le « Journal du suivi des laboratoires ». Cette communication a été accompagnée de plusieurs séances de présentation de l'outil à différentes équipes du CEA.

2.2 Déploiement de l'approche au sein de l'organisme : les Bêta-tests de l'outil « ECO PV »

Dans le développement logiciel, le bêta-test désigne la deuxième période d'essai du fonctionnement d'un produit informatique. Cet essai est réalisé par plusieurs utilisateurs, appelés « Bêta-testeurs », chargés de détecter les anomalies éventuelles et proposer des améliorations.

Dans le cadre de ce travail, l'objectif des bêta-tests est non seulement d'améliorer l'outil « ECO PV » d'un point de vue technique, mais aussi de démarrer un processus d'apprentissage par la formation, le partage et la capitalisation des connaissances.

Dans ce paragraphe, nous allons présenter le retour d'expérience du test de la première version de l'outil « ECO PV » au sein de l'organisme de R&D, auprès des bêta-tests issus de différents domaines (PV, éco-conception, ACV), spécialisés selon différentes briques technologiques pour les utilisateurs du PV (matériaux, cellules, modules, systèmes).

2.2.1 Déroulement des bêta-tests

Le PV décrit le principe des formations / bêta-tests de l'outil « ECO PV » réalisées au sein des différents laboratoires de l'organisme de R&D**.**

Tableau 26. Principe des formations bêta-tests de l'outil ECO PV

Bêta-tests de l'outil « ECO PV »	
Objectif	Identifier les pistes d'amélioration puis les implémenter pour aboutir à des versions V1. N de l'outil. Former les utilisateurs
Principe	Chaque bêta-test est réalisé auprès d'un nouvel utilisateur ayant préalablement défini une technologie innovante à étudier.
Laboratoires impliqués au sein de l'organisme du DTS	• Laboratoire matériaux • Laboratoire cellules homojonction • Laboratoire cellules hétérojonction • Laboratoire modules PV
Durée de l'expérimentation	5 mois
Nombre de bêta-testeurs	18
Durée de chaque bêta-test	45 min en moyenne

2.2.2 Retour d'expérience des Bêta-tests

Plusieurs technologies PV avec des procédés innovants et des paramètres spécifiques, ont été testées tout au long des formations / bêta-tests comme les technologies hétérojonction bifacial (HJT), IBC HJT monofacial, mono-Si (PERC) monofacial…(Figure 90).

De façon unanime, plusieurs points positifs ont été relevés, tels que la simplicité de l'outil, la facilité d'interpréter les résultats, la rapidité d'analyse, la flexibilité des modifications et l'extensibilité des améliorations lors de phases de maintenance.

Différentes pistes d'améliorations ont été proposées puis implémentées comme l'ajout de l'option de sauvegarde pendant la simulation, l'explication de certains impacts environnementaux, et le choix de sélectionner des étapes de fabrication à analyser. Certaines anomalies ont été également détectées puis corrigées.

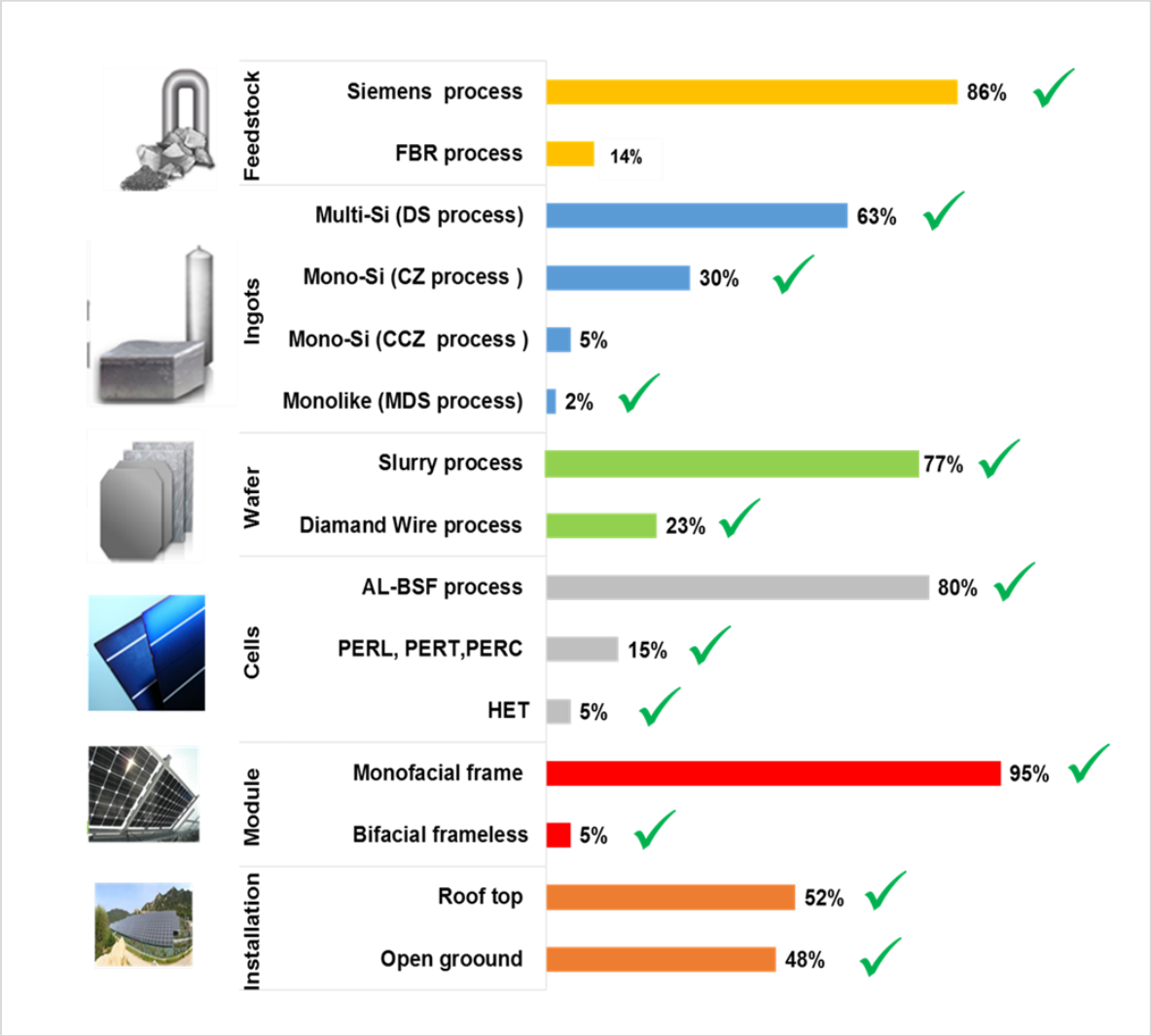


Figure 90. Les différents procédés du marché PV testés par l'outil "ECO PV" lors des bêta-tests (indiqués par le signe ✓)

Les échanges avec plusieurs acteurs de domaines d'expertise variés, a permis d'identifier et de partager les connaissances individuelles sous la forme d'une expérience collective.
Par conséquent, ce retour d'expérience a permis d'une part de confirmer le bon fonctionnement de l'outil pour sa première version (V1.0), de l'améliorer et l'adapter au besoin (V1.1), et d'autre part de faire adhérer les premiers utilisateurs à cette démarche.

2.2.3 Pérennisation de l'outil « ECO PV » au sein de l'organisme de R&D

Les Bêta-tests ont permis de tester, de valider l'outil au sein du DTS, et d'élargir les connaissances environnementales des utilisateurs pour intégrer l'approche au sein de l'organisme de R&D.
L'ensemble des flux implémentés dans la base de données de l'outil « ECO PV » (impacts des matériaux, impact de l'énergie, paramètres de la technologie de référence…) étant évolutifs, une mise à jour continue est alors nécessaire pour assurer la pérennité et la maintenance de l'outil.
Pour cela, des réflexions ont été menés avec le laboratoire L2EV « Eco-process & Environnent » au sein du LITEN à Grenoble. Un référent technique au sein du DTS (expert PV) a également été désigné pour la mise à jour des données de la technologie de référence afin d'assurer des résultats fiables et représentatifs de l'état de l'art du marché PV.
Une session administrateur a enfin été ajoutée dans l'outil pour permettre l'accès à la base de données et sa mise à jour telle qu'également demandée dans le cahier des charges
(Figure 91). L'implémentation d'une telle session protège l'outil d'une modification éventuelle des données qui pourrait générer des erreurs ou incohérences.

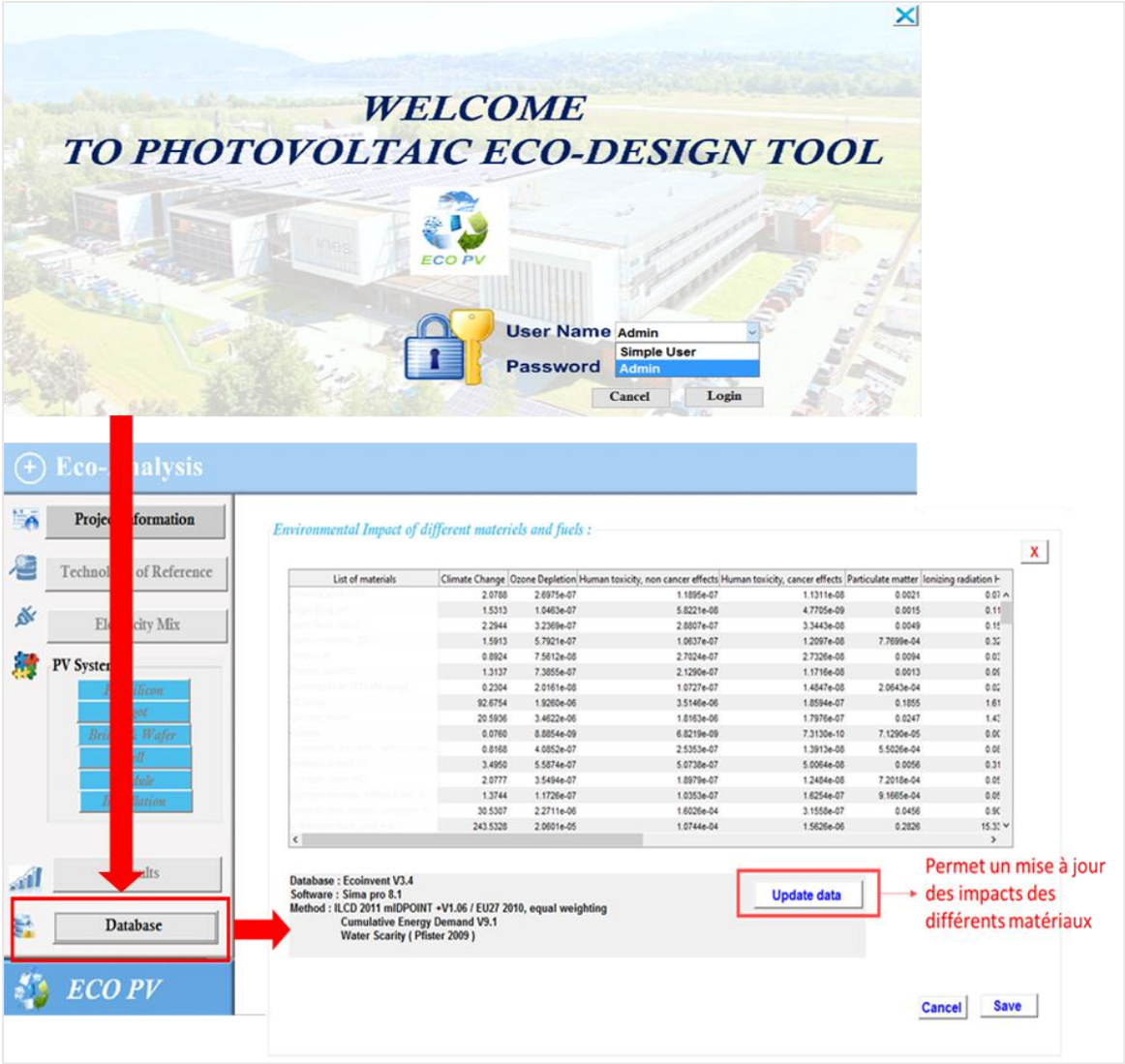


Figure 91. Flexibilité des mises à jour dans l'outil « ECO PV »

2.2.4 Exploitation de l'outil « ECO PV » : intégration de l'approche dans les projets de R&D

Suite aux Bêta-tests, l'outil « ECO PV » a été utilisé pour évaluer des nouvelles technologies PV innovantes à TRL bas dans le cadre de plusieurs projets de R&D. Ces projets de R&D et les caractéristiques des technologies PV associées sont décrits dans le Tableau 27.

Tableau 27. Les différentes technologies PV évaluées par l'outil "ECO PV " dans le cadre de projets de R&D

Projets de R&D :	Technologie PV où procédé	Spécificité de la technologie par rapport à la référence
Projet 1	HJT bifacial	Nouveau procédé de fabrication cellule nouvelle méthode d'interconnexion des cellules (SWCT)
Projet 2	IBC HJT monofacial	Nouveau procédé de fabrication cellule (couplage du procédé IBC et HJT) Une nouvelle structure du module (bifacial et nouvel encapsulant)
Projet 3	Procédé PERC, PERC+	Nouveau procédé de fabrication des cellules
Projet 4	Module standard avec demi-cellules	Module PV avec demi-cellules installé sur façade Nouvelle structure de montage d'installation

Pour chacun des projets étudiés, la technologie PV et les procédés de fabrication associés ont évolué pendant le déroulement du projet de R&D, permettant par conséquent un enrichissement continu de l'outil par la mise à jour des données suivant les évolutions de l'état de l'art dans le domaine PV.

Dans certains projets à TRL bas, l'outil « ECO PV » a été utilisé pour plusieurs simulations suivant ainsi l'évolution du développement de la technologie tout au long du projet.

La Figure 92 montre un exemple de simulation de l'estimation du gain environnemental de la technologie « IBC HJT » par rapport à la technologie de référence au début (02/2018), au milieu (07/2018) et à la fin du projet (10/2018).

Ce résultat est une première validation de l'intégration systématique de l'approche dans les projets PV au sein de l'organisme de R&D. Ce résultat illustre également l'intérêt de l'outil « ECO PV » pour réaliser le suivi environnemental d'une technologie non mature tout au long de son développement, et pour l'adapter d'une façon éco-responsable.

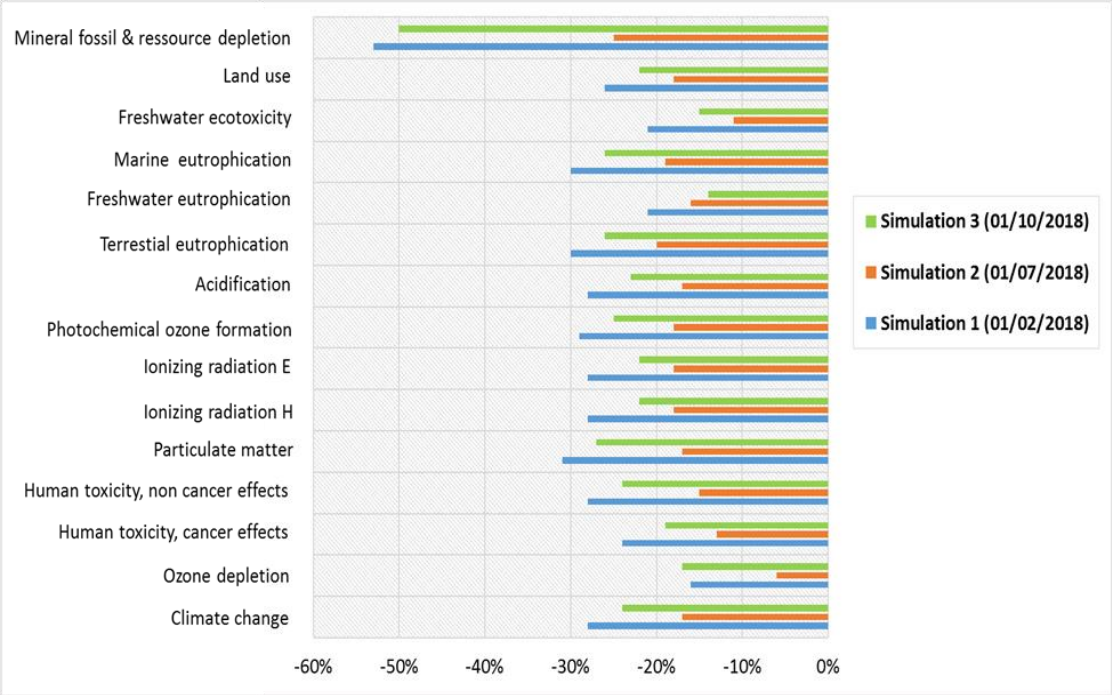


Figure 92. Exemple de résultats des simulations obtenues pendant plusieurs phases du projet pour estimer le gain environnemental de la technologie "IBC HJT" par rapport à la référence.

3 Limites de l'outil « ECO PV » et perspectives d'amélioration

3.1 Limites des fonctionnalités de l'outil

Ce travail de recherche a permis de regrouper au sein d'un même outil « ECO PV » les caractéristiques nécessaires pour une intégration pérenne de l'éco-conception dans les projets de R&D à TRL bas des systèmes complexes : la simplicité d'utilisation, la rapidité du calcul, la précision des résultats, la simplicité d'analyse des résultats, l'analyse multicritères et la possibilité d'implémenter des améliorations.

Néanmoins, plusieurs perspectives d'améliorations du fonctionnement de l'outil « ECO PV » sont envisageables, comme :

- Ajouter un indicateur qui évalue le niveau de qualité des données et estime par conséquent le taux de robustesse des résultats
- Élargir la frontière du système pour inclure la phase de fin de vie, permettant ainsi l'orientation vers le développement des technologies PV avec non seulement des matériaux à impact environnemental faible, mais aussi facile à recycler.

- Élargir la brique d'installation pour introduire des nouvelles applications du PV (PV intégré aux véhicules, PV intégré au bâtiment, PV pour applications spatiales etc).
- Élargir le modèle d'analyse économique avec un modèle complet du calcul du LCOE
- Élargir le modèle d'analyse technique avec un modèle d'estimation des taux d'évolution en performances.
- Inclure d'autres technologies PV dans l'analyse comme les couches minces et les Pérovskites.

3.2 Limites de la pérennité de l'intégration de l'outil « ECO PV »

Le retour d'expérience a montré que la démarche d'intégration de l'éco-conception au sein du DTS à l'INES par le biais de l'outil « ECO PV » a été mise en place avec succés (Figure 93). Pour que cette démarche soit complétement validé et pérenne, il est nécessaire de poursuivre le travail afin de lever les derniers verrous. Les actions suivantes sont ainsi proposées :

- Pour que l'outil soit adopté comme pratique de recherche par les ingénieurs PV, il serait intéressant de mettre en place à travers un indicateur associé à l'utilisation de l'outil « ECO PV » dans les projets de l'organisme de R&D.
- L'Implication du partenaire indutriel dans la prise de décision en communiquant les résultats issus de l'outil « ECO PV »
- Le retour d'expérience des admnistrateurs concernant le processus de maintenance (mise à jour des données, problèmes éventuels rencontrés dans le code de l'outil…)

Ainsi la démarche de pérennisation doit poursuivre son déroulement au sein du de l'organisme de R&D pour une validation finale de ce travail de recherche.

Figure 93. Synthèse des limites de la démarche d'intégration de l'outil "ECO PV" au sein de l'organisme de R&D (DTS à l'INES)

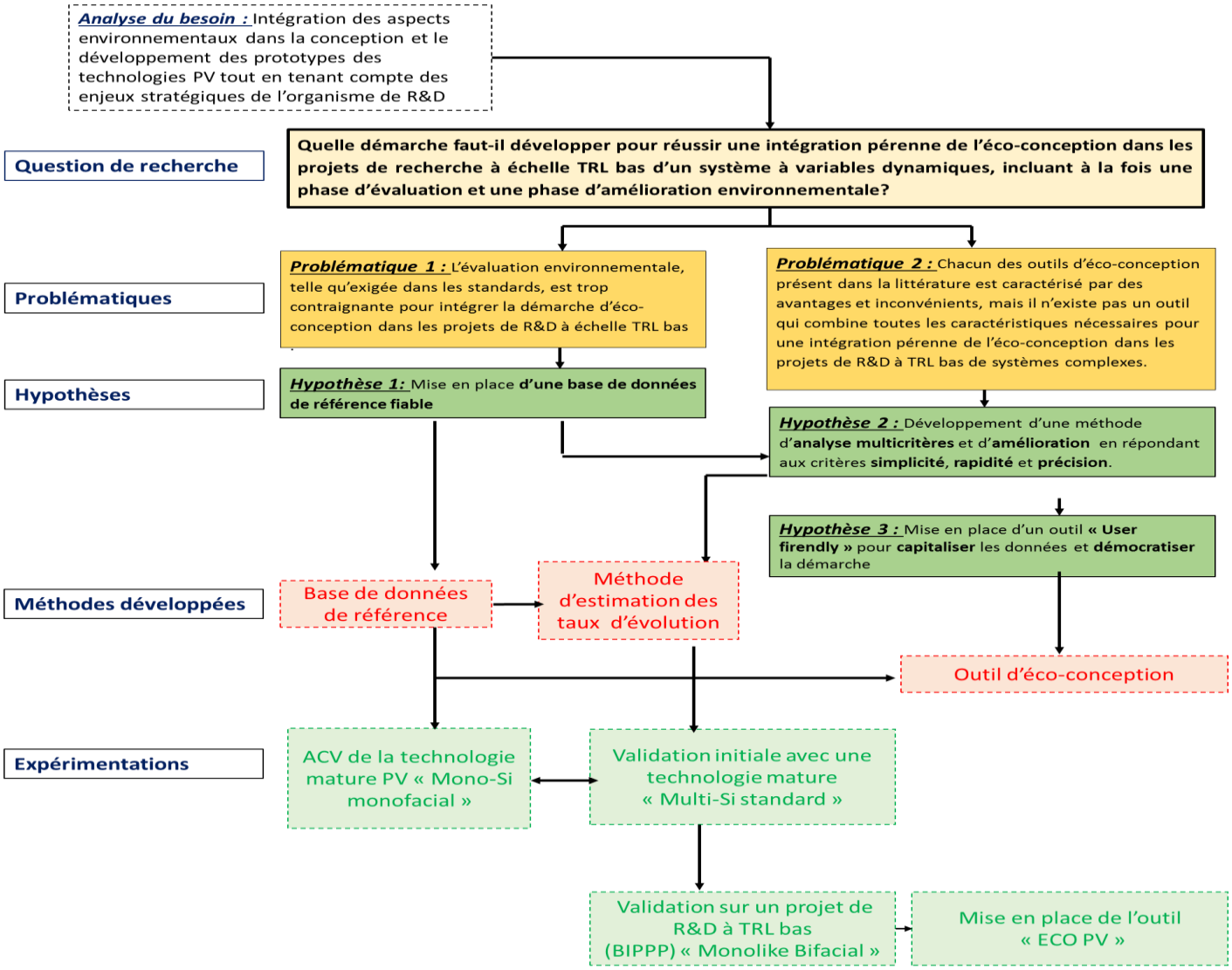


Figure 94. Synoptique de la démarche de recherche

CONCLUSION

Face aux enjeux environnementaux actuels, s'investir dans les énergies renouvelables au nom de la « transition énergétique » est l'alternative la plus adoptée par de nombreux pays. Les énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque, sont ainsi devenues des secteurs concurrentiels en pleine expansion. L'innovation y apparaît comme une condition indispensable de survie et de développement pour de nombreuses entreprises et les activités de R&D jouent un rôle déterminant dans la stratégie industrielle. Il est donc nécessaire que ces innovations soient menées en cohérence avec les exigences de développement durable. Cependant, les limites des outils d'éco-conception actuels, identifiées dans la littérature, constituent un frein pour leur appropriation dans les organismes de R&D.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse était d'intégrer la composante environnementale dans les projets de R&D dynamiques à TRL bas de nouvelles technologies PV. Cette intégration doit permettre aux organismes de recherche, comme le Département des Technologies Solaires au sein du CEA–Liten à INES, de s'approprier une démarche d'éco-conception pour développer des solutions technologiques plus respectueuses de l'environnement. Dans ce but, trois axes de recherche ont été adressés.

Le premier axe a concerné le développement d'une approche tenant compte de la complexité de l'analyse environnementale d'une technologie non mature (TRL bas) tout en assurant la fiabilité des résultats. L'approche proposée a consisté en la mise en place d'une base de données de référence où les paramètres dynamiques critiques ont été identifiés, les données couvrant toute la chaine de la valeur ont été capitalisées et, par le biais d'une ACV de référence, les résultats environnementaux de référence ont été stockés. Pour cela, et en particulier pour le domaine PV, le niveau d'information à collecter pour chaque procédé de la chaine de valeur a été identifié et capitalisé, résolvant ainsi le problème d'incompatibilité entre la disponibilité des données à TRL bas dynamique et les exigences de l'ACV.

Le deuxième axe a concerné le développement d'une approche plus adaptée au domaine, c'est-à-dire non seulement focalisée sur l'estimation des évolutions environnementales, mais aussi sur l'estimation des évolutions techniques et économiques de la technologie en développement. La démarche proposée repose principalement sur la base de données de référence conçue dans le premier axe. Elle vise à évaluer le taux d'évolution d'une nouvelle

technologie d'un point de vue technique, économique et environnemental à partir d'une technologie de référence assurant ainsi un alignement entre le besoin industriel et la démarche d'éco-conception. L'originalité de l'approche repose sur l'utilisation de l'ACV de référence comme un outil de pilotage pour l'estimation de l'évolution environnementale, satisfaisant ainsi les critères de fiabilité et transparence des résultats, dès la phase de R&D et sans nécessité d'une expertise environnementale. La validation de l'approche sur des études de cas (projets PV de R&D au sein du CEA-LITEN à INES), a montré une bonne adéquation entre les résultats obtenus par ce travail de recherche, et l'attente des équipes concernées des projets (ingénieurs de R&D et partenaires industriels), qui ont pu être guidés efficacement dans les choix environnementaux.

Ces approches ont enfin été implémentées dans un outil informatique « ECO PV » muni d'une interface « utilisateur » ergonomique, satisfaisant ainsi la double ambition de cette thèse :

- d'une part, la démocratisation et la capitalisation des connaissances environnementales au sein de l'organisme de R&D, accessible non seulement aux experts du domaine, mais aussi aux ingénieurs de R&D,
- d'autre part, une pérennité de l'intégration de la démarche développée au sein de ce même organisme.

En effet, le retour d'expérience des « bêta-tests » a confirmé la facilité d'utilisation de l'outil par l'ensemble des ingénieurs R&D, travaillant sur l'intégralité de la chaine de la valeur d'un système PV. L'intégration de l'outil dans plusieurs projets de R&D a confirmé également la fonctionnalité de l'outil. De plus, l'automatisation de l'analyse environnementale, en mettant en valeur les paramètres dynamiques du système, a confirmé le critère de pérennité d'usage, objectif souhaité dans la démarche. La structuration de l'outil par briques technologiques, a permis la participation d'ingénieurs de R&D d'expertises diverses. Cela a ainsi rendu possible le transfert de connaissances entre les différents experts de la chaine de valeur, initiant un processus d'intégration systématique au sein de l'activité dans l'organisme.

En conclusion, ce travail de recherche a conduit au développement d'une méthodologie d'éco-conception pour orienter, dès la phase de R&D, les choix technologiques visant des systèmes PV plus respectueux de l'environnement.

Certaines fonctionnalités complémentaires ont d'ores et déjà été identifiées et vont être implémentées dans l'outil à court terme, afin d'améliorer les analyses et solidifier la pérennité de son usage au sein de l'organisme de R&D. Nous pouvons citer : l'élargissement du périmètre d'étude pour prendre en compte la fin de vie des systèmes ; l'élargissement de la phase d'installation et de fabrication pour l'implémenter de nouvelles applications ; l'intégration

d’un indicateur de qualité et d’incertitude des données permettant de définir un niveau de fiabilité des résultats ; et l’intégration d’un modèle de coûts complets associé (LCOE ou Levelized Cost Of Energy).

En perspectives de ces travaux de recherche la démarche d’intégration devra être poursuivie pour devenir une étape systématique dans la réalisation des projets de R&D de l’organisme de R&D, et devenir un pilier de ses axes stratégiques. Cette démarche devra par ailleurs être accompagnée de la continuité de la mise à jour des données semestrielles, compte-tenu de l’évolution constante des technologies PV dans le marché actuel.

Enfin, le déploiement de la méthodologie développée pourrait être étendu à d’autres organismes de R&D et dans d’autres domaines d’énergies renouvelables (solaire thermique et thermodynamique, éolien, biomasse …), afin d’offrir de nouvelles pistes d’améliorations pour sa généralisation.

BIBLIOGRAPHIE

[1] PV TECH, 2017. https://www.pv-tech.org/editors-blog/10-years-of-rd-spending-analysis-of-12-key-pv-module-manufacturers. [Consulté le: 03-déc-2018].

[2] Le rapport Brundtland pour le développement durable (2017). https://www.geo.fr [Consulté le: 30-oct-2018].

[3] La transition écologique, 2017. http://www.manche.gouv.fr/ [Consulté le: 30-oct-2018].

[4] M. Fischer-Kowalski et H. Haberl, Socioecological Transitions and Global Change: Trajectories of Social Metabolism and Land Use. Edward Elgar Publishing, 2007.

[5] World Population Prospects: The 2017 Revision, 2017 https://www.un.org/ [Consulté le: 30-juin-2018].

[6] BP Statistical Review of World Energy (2018), 67th edition.

[7] Planetoscope - Statistiques. https://www.planetoscope.com [Consulté le: 30-oct-2018].

[8] Planetoscope - Statistiques. https://www.planetoscope.com/ [Consulté le: 30-oct-2018].

[9] J. Markard, R. Raven, et B. Truffer, « Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects », Res. Policy, vol. 41, nº 6, p. 955-967, juill. 2012.

[10] IPCC Second Assessment Report. Climate Change 1995. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

[11] A. Smith, A. Stirling, et F. Berkhout, « The governance of sustainable socio-technical transitions », Res. Policy, vol. 34, nº 10, p. 1491-1510, déc. 2005.

[12] A. Rip, R. P. M. Kemp, et R. Kemp, « Technological change », Hum. Choice Clim. Change Vol II Resour. Technol., p. 327-399, 1998.

[13] J. Rotmans, M. Van Asselt, K. Molendijk, R. Kemp, F. Geels, et G. Verbong, « Transitions and transition management. The case of an emission-low energy supply », déc. 2000.

[14] P.Martens, J.Rotmans . «Transitions in a Globalizing World», 1st edition.CRC Press, ISBN 9789026519215 .January 2002.

[15] F. Berkhout, « Technological regimes, path dependency and the environment », Glob. Environ. Change-Hum. Policy Dimens. - Glob. Env. CHANGE, vol. 12, p. 1-4, avr. 2002.

[16] IEA 2018. «Global Energy & CO2 Status Report 2017». OECD/IEA. March 2018.

[17] EIA 2018. US Energy Information Administration. « International Energy Outlook 2018». Center for Strategic and International Studie. July 24 2018. Washington DC.

[18] W. Bach, « Fossil fuel resources and their impacts on environment and climate », Int. J. Hydrog. Energy, vol. 6, nº 2, p. 185-201, janv. 1981.

[19] S. Shafiee et E. Topal, « When will fossil fuel reserves be diminished? », Energy Policy, vol. 37, nº 1, p. 181-189, janv. 2009.

[20] STATISTA 2018. https://www.statista.com [Consulté le: 01-juill-2018].

[21] « Carbon Dioxide from Fossil Fuel Combustion is Huge Problem for Society ». http://www.frackcheckwv.net/2015/11/20/carbon-dioxide-from-fossil-fuel-combustion-is-huge-problem-for-society/. [Consulté le: 30-oct-2018].

[22] EIA 2018. US Energy Information Administration. « Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050 ». U.S. Washington DC 20585. Feb. 2018

[23] Connaissance des énergies 2018. https://www.connaissancedesenergies.org/quel-est-precisement-le-role-du-giec-141105. [Consulté le: 30-oct-2018].

[24] United Nations Climate Change 2015. https://unfccc.int [Consulté le: 01-juill-2018].

[25] Bloomberg NEF 2018. Disponible sur: https://about.bnef.com. [Consulté le: 02-oct-2018].

[26] EPIA, 2017. Solar Power Europe « Global Market Outlook 2017: Solar Power Europe ».

[27] ITRPV, 2018. « International Technology Roadmap for Photovoltaic for Photovoltaic»,Results 2017 Inc, ninth edition, September 2018).

[28] REN21, 2018. « RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT ». (Paris: REN21 Secretariat). ISBN978-3-9818107-6-9.

[29] AGORA 2018. « L'Énergie wende et la transition énergétique à l'horizon 2030 ». Agora Energiewende, Iddri (2017). 131/05-S-2018/FR. Mar.2018.

[30] Wyss, F., Frischknecht, R., Wild Scolten, M., Stolz, Ph, 2015. « PEF Screening Report ofElectricity from Photovoltaic Panels in the Context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots». 6 May 2015.

[31] EC-JRC, 2010. «International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance», first ed. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. Mar 2010. EUR 24708 EN. First. Luxembourg: Publications Office of the European Union.].

[32] WIKEPEDIA 2018 « Effet photovoltaïque », https://fr.wikipedia.org/wiki/ [Consulté le: 02-oct-2018].

[33] ISE, 2018. « Photovoltaics Report ». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Photovoltaic report, Freiburg. 10 Aug. 2018.

[34] « Handbook of Photovoltaic Science - PDF Free Download », epdf.tips. [En ligne]. Disponible sur: https://epdf.tips/handbook-of-photovoltaic-science.html. [Consulté le: 31-oct-2018].

[35] The Quartz Corp 2014. http://www.thequartzcorp.com/en/blog/2014/04/28/polysilicon-production/61. [Consulté le: 01-nov-2018].

[36] A. Nadri, « Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque », phdthesis, Université de Grenoble, 2012.

[37] R. M. Swanson, « A vision for crystalline silicon photovoltaics », Prog. Photovolt. Res. Appl., vol. 14, nº 5, p. 443-453.

[38] X. Yu, P. Wang, X. Li, et D. Yang, « Thin Czochralski silicon solar cells based on diamond wire sawing technology », Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 98, p. 337-342, mars 2012.

[39] « L'énergie solaire: LA SYNTHÈSE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE », L'énergie solaire. http://lenergie-solaire.blogspot.com/p/lenergie-solaire-et-ses-mecanismes.html

[40] S. D. Vecchi, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière », phd thesis, INSA de Lyon, 2013

[41] France Diplomate 2015. « Nouveau type de cellule photovoltaïque en tandem silicium/pérovskite ». https://www.diplomatie.gouv.fr [Consulté le: 01-nov-2018].

[42] « LONGi ». http://en.longi-solar.com/. [Consulté le: 02-nov-2018].

[43] PV TECH 2018. https://www.pv-tech.org/news/longi-sets-solar-industry-record-for-rd-spending. [Consulté le: 02-nov-2018].

[44] PV Tech 2018. https://www.preprints.org/manuscript/201805.0218/v1. [Consulté le: 02-nov-2018].

[45] LAZARD 2018. « Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - VERSION 12.0. Nov 2018

[46] J. Park, W. Kim, N. Cho, H. Lee, et N. Park, « An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: from separation to cell fabrication », Green Chem., vol. 18, nº 6, p. 1706-1714, mars 2016.

[47] Décret n° 2014-928 du 19 août 2014 relatif aux déchets d'équipements électriques et électroniques et aux équipements électriques et électroniques usagés. 2014.

[48] « REGLEMENTATION - Directive DEEE », Eco-3e, 25-oct-2011. .

[49] IRENA 2016 and IEA 2016. « End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels », IEA-PVPS Report Number: T12-06:2016.

[50] RECORD 2012. « Recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie. État des lieux internationaux » ENEA Consulting. ETUDE N° 11-0912/1A. Oct 2012.

[51] WIKEPEDIA, 2018, «Trois R ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Trois_R

[52] W. Brenner et N. Adamovic, « A circular economy for Photovoltaic waste - the vision of the European project CABRISS », in 2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, 2017, p. 146-151.

[53] C. Spies, « Savoir faire la différence entre la R&D et l'innovation », Subinfo, 21-sept-2016. .

[54] P. Warde et al., « Prognostic factors for relapse in stage I seminoma managed by surveillance: a pooled analysis », J. Clin. Oncol. Off. J. Am. Soc. Clin. Oncol., vol. 20, nº 22, p. 4448-4452, nov. 2002.

[55] Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 2018. « Les dépenses de R&D des entreprises en 2016 (données provisoires) ». Https ://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid129336/les-depenses-de-r-d-des-entreprises-en-2016-donnees-provisoires.html. [Consulté le: 03-nov-2018].

[56] R. Coombs, A. McMeekin, et R. Pybus, « Toward the development of benchmarking tools for R&D project management », RD Manag., vol. 28, nº 3, p. 175-186, juill. 1998].

[57] BLOOMOONgroup, « L'échelle des Techonology Readiness Levels », 10:49:30 UTC.

[58] ISO 16920, 2013. «Space systems -- Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment ».

[59] A. Lewandowska et A. Matuszak-Flejszman, « Eco-design as a normative element of Environmental Management Systems—the context of the revised ISO 14001:2015 », Int. J. Life Cycle Assess., vol. 19, nº 11, p. 1794-1798, nov. 2014.

[60] C.Vezzoli, E.Manzini. « Design for Environmental Sustainability ». Springer. DOI 10.1007/978-1-84800-163-3.2008

[61] C. Luttropp et J. Lagerstedt, « EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development », J. Clean. Prod., vol. 14, nº 15, p. 1396-1408, janv. 2006.

[62] Q. Energie. https://www.quelleenergie.fr/magazine/economies-energie/eco-conception-pour-efficacite-energetique/. [Consulté le: 04-nov-2018].

[63] M. D. Bovea et V. Pérez-Belis, « A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process », J. Clean. Prod., vol. 20, nº 1, p. 61-71, janv. 2012.

[64] J. Vicente, R.Frazao, F.Moreira da Silva, « Ecodesign Tools: One basis to operacionalize sustainable design ». In 2016 VI Congresso Internacional de Pesquisa em Design (ciped), 2016, p1-5

[65] M. A. Curran, « Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability », Curr. Opin. Chem. Eng., vol. 2, nº 3, p. 273-277, août 2013].

[66] OXFORD REARCH, 2011. « Evaluation of the Ecodesign Directive (2009/125/EC) Draft Final Report ».Center of strategy and evaluation service. Déc 2011.

[67] « Regulation (EC) No 1907/2006 - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) - Santé et sécurité au travail — EU-OSHA » https://osha.europa.eu [Consulté le: 03-juill-2018].

[68] Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment Text with EEA relevance, vol. OJ L. 2011.

[69] Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, vol. OJ L. 2012.

[70] Directive 2010/30/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010 concernant l'indication, par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, de la consommation en énergie et en autres ressources des produits liés à l'énergie | Legifrance ».2010.

[71] NOVOCERAM. https://www.novoceram.fr/societe/environnement-et-qualite/pef. [Consulté le: 04-nov-2018].

[72] Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/solaire. [Consulté le: 04-nov-2018].

[73] IEA TASK 12. « Iea-pvps.org - Task 12: PV environmental, health and safety (e, h & s) activities ». Disponible sur: http://www.iea-pvps.org/. [Consulté le: 04-nov-2018].

[74] Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/leconomie-circulaire. [Consulté le: 04-nov-2018].

[75] Horizon 2020. http://www.horizon2020.gouv.fr/cid119239/cabriss-l-economie-circulaire-a-partir-de-materiaux-a-forte-valeur-ajoutee-issus-du-photovoltaique.html. [Consulté le: 04-nov-2018].

[76] S. Gerbinet, S. Belboom, et A. Léonard, « Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review », Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 38, p. 747-753, oct. 2014.

[77] « MÉTHODOLOGIE DE l'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) - Caractéristiques et choix des données ». [Consulté le: 12-juill-2018].

[78] N. Gazbour et al., « A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems », J. Clean. Prod., vol. 197, p. 1607-1618, oct. 2018..

[79] EUROOBSERVER, 2011. Barom_etre photovoltaïque 2010. Syst. Sol. J. Photovolt.

[80] U. Desideri et J. Yan, « Clean energy technologies and systems for a sustainable world », Appl. Energy, vol. 97, p. 1-4, sept. 2012.

[81] R. Battisti et A. Corrado, « Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology », Energy, vol. 30, nº 7, p. 952-967, juin 2005.

[82] M. Raugei, S. Bargigli, et S. Ulgiati, « Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si », Energy, vol. 32, nº 8, p. 1310-1318, août 2007.

[83] IEA, 2016. «Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity,third ed» . IEA PVPS Task 12, Subtask 2.0, LCA IEA-PVPS T12-08:2016 ISBN978-3-906042-39-8.].

[84] TAIYANGNEWS, 2018. « Bifacial Solar Technology Report 2018 ». ShK.Chunduri, M.Schmela. 2018 Edition.

[85] R. Fu, D. Feldman, R. Margolis, K. Ardani, et M. Woodhouse, « NREL U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark Q1 2017 Report », National Renewable Energy Laboratory - Data (NREL-DATA), Golden, CO (United States); National Renewable Energy Laboratory, 73, août 2017.

[86] M. Lenzen, « Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review », Energy Convers. Manag., vol. 49, nº 8, p. 2178-2199, août 2008.

[87] M. Ito, K. Kato, K. Komoto, T. Kichimi, et K. Kurokawa, « A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules », Prog. Photovolt. Res. Appl., vol. 16, nº 1, p. 17-30, janv. 2008.

[88] V. M. Fthenakis et H. C. Kim, « Photovoltaics: Life-cycle analyses », Sol. Energy, vol. 85, nº 8, p. 1609-1628, août 2011.

[89] B. Kim, J. Lee, K. Kim, et T. Hur, « Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si PV systems in Korea », Sol. Energy, vol. 99, nº Supplement C, p. 100-114, janv. 2014.

[90] A. Stoppato, « Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation », Energy, vol. 33, nº 2, p. 224-232, févr. 2008.

[91] S. Pacca, D. Sivaraman, et G. A. Keoleian, « Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems », Energy Policy, vol. 35, nº 6, p. 3316-3326, juin 2007.

[92] M. Pehnt, « Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies », Renew. Energy, vol. 31, nº 1, p. 55-71, janv. 2006.

[93] IEA, 2014. « Technology Roadmap Solar photovoltaic energy ». International Energy Agency. Paris. OECD/IEA, 2014

[94] M. Ito, K. Komoto, ET K. Kurokawa, « Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules », Curr. Appl. Phys., vol. 10, nº 2, Supplement, p. S271-S273, mars 2010.

[95] M. J. (Mariska) de Wild-Scholten, « Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems », Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 119, p. 296-305, déc. 2013.

[96] N. Palanov, « Life-cycle assessment of Photovaltaic systems : analysis of environmental impact from the production of PV system including solar panels produced by Gaia Solar », TVBH-5074, 2014.

[97] IEA, 2017. « Trends 2017 in Photovoltaic Applications. Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2016». Report IEA PVPS T1-32:2017.

[98] N. Gazbour, G. Razongles, C. Schaeffer, et C. Charbuillet, « Photovoltaic power goes green », in 2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG), 2016, p. 1-8.

[99] INES. http://www.ines-solaire.org/fr/presentation/histoire/. [Consulté le: 09-juill-2018].

[100] J. Reap, F. Roman, S. Duncan, et B. Bras, « A survey of unresolved problems in life cycle assessment », Int. J. Life Cycle Assess., vol. 13, nº 5, p. 374, août 2008.

[101] R. Heijungs et M. A. J. Huijbregts, A Review of Approaches to Treat Uncertainty in LCA. 2004.

[102] ISO 14040, 2006a. « Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Framework».

[103] B. P. Weidema et M. S. Wesnæs, « Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators », J. Clean. Prod., vol. 4, nº 3, p. 167-174, janv. 1996.

[104] I. BLANC et E. LABOUZE, « Analyse du cycle de vie - Évaluation de la qualité des données », Ref : TIP800WEB - « Environnement », 01-janv-1999.

[105] D. J. Kennedy, D. C. Montgomery, et B. H. Quay, « Data quality », Int. J. Life Cycle Assess., vol. 1, nº 4, p. 199-207, déc. 1996.

[106] Y. Leroy et S. Lasvaux, « DE LA GESTION DES INCERTITUDES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE », Marché Organ., 2013.

[107] B. Steen, « On uncertainty and sensitivity of LCA-based priority setting », J. Clean. Prod., vol. 5, nº 4, p. 255-262, janv. 1997.

[108] ISO 14044, 2006 « Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices ».

[109] R. Coulon, V. Camobreco, H. Teulon, et J. Besnainou, « Data quality and uncertainty in LCI », Int. J. Life Cycle Assess., vol. 2, nº 3, p. 178, sept. 1997.

[110] J. Guinée, « Handbook on life cycle assessment — operational guide to the ISO standards », Int. J. Life Cycle Assess., vol. 6, nº 5, p. 255-255, sept. 2001.

[111] G. Finnveden, « On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general », Int. J. Life Cycle Assess., vol. 5, nº 4, p. 229, juill. 2000.

[112] S. Le Pochat, Intégration de l'éco-conception dans les PME : proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-fraire pour la conception environnementale des produits. Paris, ENSAM, 2005.

[113] M. Grundstein, « De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue », juill. 2018.

[114] P.-A. Millet, « An analysis of organizational and informational integration. Application to ERP Based Information Systems », Theses, INSA de Lyon, 2008.

[115] H. Baumann, F. Boons, et A. Bragd, « Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives », J. Clean. Prod., vol. 10, nº 5, p. 409-425, oct. 2002.

[116] P. Knight ET J. O. Jenkins, « Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective », J. Clean. Prod., vol. 17, nº 5, p. 549-558, mars 2009.

[117] C. Vezzoli et D. Sciama, « Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines », J. Clean. Prod., vol. 14, nº 15, p. 1319-1325, janv. 2006.

[118] R. Lozano, « Towards better embedding sustainability into companies' systems: an analysis of voluntary corporate initiatives », J. Clean. Prod., vol. 25, p. 14-26, avr. 2012.

[119] J. Tingström et R. Karlsson, « The relationship between environmental analyses and the dialogue process in product development », J. Clean. Prod., vol. 14, nº 15, p. 1409-1419, janv. 2006.

[120] P. Deutz, M. McGuire, et G. Neighbour, « Eco-design practice in the context of a structured design process: an interdisciplinary empirical study of UK manufacturers », J. Clean. Prod., vol. 39, p. 117-128, janv. 2013.

[121] N. Cross. « Engineering design methods: strategies for product design » 4th Edition. Wiley May 2008.

[122] C. Hales, « RESPECT DESIGN OR EXPECT DISASTER! », DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm, 2003.

[123] A. Tukker, P. Eder IPTS, M. Charter, E. Haag, A. Vercalsteren, et T. Wiedmann, « Eco-design: The State of Implementation in Europe – Conclusions of a State of the Art Study for IPTS », J. Sustain. Prod. Des. vol. 1, nº 3, p. 147-161, sept. 2001.

[124] C. van Hemel et J. Cramer, « Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs », J. Clean. Prod., vol. 10, nº 5, p. 439-453, oct. 2002.

[125] C. Sales, C. Sales, et A. Júnior, Acquisition of Product Development Tools in Industry: A Theorectical Contribution. 2001.

[126] S. Ritzén, « Integration environmental aspects into product development : proactive measures », 2000.

[127] K. Ramani et al., « Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review », J. Mech. Des., vol. 132, sept. 2010.

[128] T. Hur, J. Lee, J. Ryu, et E. Kwon, « Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system », J. Environ. Manage. vol. 75, nº 3, p. 229-237, mai 2005.

[129] M. Fargnoli et F. Kimura, « Screening life cycle modelling for sustainable product design », 2006, p. 281-292.

[130] N. Jungbluth, O. Tietje, et R. W. Scholz, « Food purchases: Impacts from the consumers' point of view investigated with a modular LCA », Int. J. Life Cycle Assess., vol. 5, nº 3, p. 134, mai 2000.

[131] GaBi Software. Disponible sur: http://www.gabi-software.com/france/logiciel/. [Consulté le: 20-nov-2018].

[132] SIMAPRO Software. http://www.evea-conseil.com/fr/logiciel/simapro-le-logiciel-dacv. [Consulté le: 29-mars-2017].

[133] R. Speck, S. Selke, R. Auras, et J. Fitzsimmons, « Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results », J. Ind. Ecol., vol. 20, nº 1, p. 18-28, févr. 2016.

[134] W. Wimmer, « The ECODESIGN checklist method: A redesign tool for environmental product improvements », 1999, p. 685-688.

[135] F. Giudice, G. La Rosa, et A. Risitano, « Materials selection in the Life-Cycle Design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice », Mater. Des., vol. 26, nº 1, p. 9-20, févr. 2005.

[136] L. Y. Ljungberg, « Materials selection and design for development of sustainable products », Mater. Des., vol. 28, nº 2, p. 466-479, janv. 2007.

[137] A. Inaba, M. Kobayashi, T. Sakao, et K. Masui, « Applying Quality Function Deployment to environmentally conscious design », Int. J. Qual. Reliab. Manag., vol. 20, nº 1, p. 90-106, févr. 2003.

[138] Y. Zhang, H.-P. Wang, et C. Zhang, « Green QFD-II: A life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices », Int. J. Prod. Res., vol. 37, mars 1999.

[139] Y. Zhang, « Green QFD-II: A life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices », Int. J. Prod. Res., vol. 37, nº 5, p. 1075-1091, mars 1999.

[140] Lehoux, N., & Vallée, P. (2004). Analyse multicritère. Ecole Polytechnique de Montréa].

[141] A. Kumar et al., « A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development », Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 69, p. 596-609, mars 2017.

[142] M. Rossi, M. Germani, et A. Zamagni, « Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies », J. Clean. Prod., vol. 129, p. 361-373, août 2016.

[143] L. Audibert, « Bases de Données et langage SQL », Developpez.com. [En ligne]. Disponible sur: http://laurent-audibert.developpez.com/Cours-BD/. [Consulté le: 06-août-2018].

[144] ECOINVENT. http://www.ecoinvent.org/. [Consulté le: 15-févr-2017].

[145] T. Huld, R. Müller, et A. Gambardella, « A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa », Sol. Energy, vol. 86, nº 6, p. 1803-1815, juin 2012.

[146] D. C. Jordan, T. J. Silverman, J. H. Wohlgemuth, S. R. Kurtz, et K. T. VanSant, « Photovoltaic failure and degradation modes », Prog. Photovolt. Res. Appl., p. n/a-n/a, janv. 2017.

[147] BIPPP. http://bippp.fr/. [Consulté le: 11-avr-2018].

[148] H. Hondo, « Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case », Energy, vol. 30, p. 2042-2056, août 2005.

[149] E. A. Alsema, M. J. De Wild-Scholten, et V. M. Fthenakis, « Environmental impacts of PV electricity generation. A critical comparison of energy supply options », Energy research Centre of the Netherlands ECN, ECN-RX--06-016, 2006.

[150] N. Jungbluth, « Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database », Prog. Photovolt. Res. Appl., vol. 13, nº 5, p. 429-446, août 2005.

[151] T. Muneer, S. Younes, N. Lambert, et J. Kubie, « Life cycle assessment of a medium-sized photovoltaic facility at a high latitude location », Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Power Energy, vol. 220, nº 6, p. 517-524, janv. 2006.

[152] R. Kannan, K. C. Leong, R. Osman, H. K. Ho, et C. P. Tso, « Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7kWp distributed solar PV system in Singapore », Sol. Energy, vol. 80, nº 5, p. 555-563, mai 2006.

[153] E. A. Alsema, M. de Wild-Scholten, et V. M. Fthenakis, « Environmental impacts of PV electricity generation—A critical comparison of energy supply options », 3rd PV Ind. Forum, janv. 2006.

[154] V. M. Fthenakis, H. C. Kim, et E. Alsema, « Emissions from Photovoltaic Life Cycles », Environ. Sci. Technol., vol. 42, nº 6, p. 2168-2174, mars 2008.

[155] M. de Wild-Scholten, R. Gløckner, J. Odden, G. Halvorsen, et R. Tronstad, « LCA COMPARISON OF THE ELKEM SOLAR METALLURGICAL ROUTE AND CONVENTIONAL GAS ROUTES TO SOLAR SILICON », janv. 2008.

[156] Jungbluth, N., Stucki, M., Frischknecht, R., Buesser, S., 2009. Photovoltaics. In Dones, R., et al. (Eds.), Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den €okologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in €Okobilanzen für dieSchweiz. ecoinvent report No. 6-XII. ESUservices Ltd, Uster, CH.].

[157] P. Zhai et E. D. Williams, « Dynamic hybrid life cycle assessment of energy and carbon of multicrystalline silicon photovoltaic systems », Environ. Sci. Technol., vol. 44, nº 20, p. 7950-7955, oct. 2010.

[158] A. Sumper, M. Robledo-García, R. Villafáfila-Robles, J. Bergas-Jané, et J. Andrés-Peiró, « Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain) », Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 15, nº 8, p. 3888-3896, oct. 2011.

[159] D. Yue, F. You, et S. B. Darling, « Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis », Sol. Energy, vol. 105, p. 669-678, juill. 2014.

[160] B. Kim, J. Lee, K. Kim, et T. Hur, « Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si PV systems in Korea », Sol. Energy, vol. 99, p. 100-114, janv. 2014.

[161] Y. Fu, X. Liu, et Z. Yuan, « Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China », J. Clean. Prod., vol. 86, nº Supplement C, p. 180-190, janv. 2015.

[162] J. Hong, W. Chen, C. Qi, L. Ye, et C. Xu, « Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China », Sol. Energy, vol. 133, p. 283-293, août 2016.

ANNEXES

Annexe 1 :

Tableau 28. La variabilité des résultats et des paramètres définis dans les études d'ACV des systèmes PV cristallins (30 études publiés entre 2005 et 2016)

Études	Localisation	Bilan Carbone (gCO_2eq/kWh)	Technologie	Rendement (%)	Éclairement ($kWh/m^2/yr$)	PR	Durée de vie (ans)	DR (%)
Hondo (2005) [148]	Asie	53	multi-Si	14	1314	0,75	30	-
Battisti and Corrado (2005) [81]	Europe	26	multi-Si	10,8	1530	-	30	-
Wild-sholten et Alsema (2005) [149]	Europe	41	multi-Si	13,2	1700	0,75	30	-
Jungbluth (2005) [150]	Europe	-	multi-Si	13,2	-	-	30	-
		-	mono-Si	14,8				
Fthenakis et al.(2006) [149]	Europe	37	mono-Si	20,1	1800	0,8	30	-
Pehnt (2006) [92]	Europe	72	multi-Si	13,4	1100	0,85	25	-
Munner et al.(2006) [151]	Amérique	44	mono-Si	11,4	800	-	30	-
Kannan et al.(2006) [152]	Asia	217	mono-Si	11,8	1635	-	25	-
Alsema et al.(2006) [153]	Europe	32	multi-Si	13,2	1700	0,75	30	-
		35	mono-Si	14,0				
Ragei et al.(2007) [82]	Europe	72	multi-Si	14,0	1700	0,75	20	-
Pacca et al.(2007) [91]	Amérique	72	multi-Si	12,9	1359	0,95	30	-

Études	Location	Bilan Carbone (gCO_2eq/kWh)	Technologie	Rendement (%)	Éclairement ($kWh/m^2/yr$)	PR	Durée de vie (ans)	DR (%)
Lenzen (2008) [86]	Australie	106	multi-Si	13,0	1750	0,85	25	-
Stoppato (2008) [90]	Europe	61	multi-Si	16,0	1697	0,83	28	-
Fthenakis et al.(2008) [154]	Europe	43	mono-Si	14,0	1700	0,8	30	-
		41	multi-Si	13,2				
Ito et al.(2008) [87]	Europe	12	multi-Si	12,8	1702	0,78	30	-
Wild Scholten (2008) [155]	Europe	23	mono-Si	13,2	1700	0,75	30	-
Jungbluth (2009) [156]	Europe	64	mono-Si	14,0	1100	0,75	30	-
		57	multi-Si	13,2				
Zhai et William (2010) [157]	Europe	24	multi-Si	13,2	1700	0,75	30	-
Ito et al.(2010) [94]	Asie	50	mono-Si	-	1702	0,78	-	-
Sumper et al.(2011) [158]	Europe	-	multi-Si	16,8	1614	-	-	-
Desideri and Yan (2012) [80]	Asie	89	multi-Si	14,4	1552	0,8	25	0,5
Fthenakis et al.(2012) [88]	Europe	64	multi-Si	13,2	1800	0,8	30	-
Wild Scholten (2013) [95]	Europe	38	mono-Si	14,8	1700	0,75	30	0.67
		27	multi-Si	14,1				
Yue et al.(2014) [159]	Europe	38	mono-Si	14,2	1700	0,75	30	-
		32	multi-Si	13,2				

Études	Localisation	Bilan Carbone (gCO_2eq/kWh)	Technologie	Rendement (%)	Éclairement ($kWh/m^2/yr$)	PR	Durée de vie (ans)	DR (%)
Kim et al.(2014) [160]	Asie	42	mono-Si	15,9	1310	0,8	30	-
		32	multi-Si	14,9				
Palanov (2014) [96]	Europe	53	mono-Si	14,2	1150	0,8	30	0,5
Frischknecht et al.(2015) [83]	Europe	35	multi-Si	13,0	1700	0,75	30	-
Fu et al.(2015) [161]	Asie	50	multi-Si	13,6	772 - 2100	0,75	25	-
Wyss et al.(2015) [30]	Europe	88	mono-Si	15,1	1331	0,75	30	0,8
		59	multi-Si	14,7				
Hong et al.(2016) [162]	Asie	56	multi-Si	12,7	1300	-	25	-

Annexe 2 :

Tableau 29 . Niveau de qualité des données en fonction des indicateurs spécifiques [103]

Quality level	Quality rating	C	TiR	P	TeR	GR	EoL
Very good[64]	1	All 15 PEF Impact Categories	Data[65] are not older than 4 years with respect to the release date or latest review date	≤ 10%	The technologies covered in the dataset are exactly the one(s)modelled	The processes included in the dataset are fully representative for the geography stated in the title and metadata	The EoL formula [2] is implemented in the entire dataset (foreground and all background processes)
Good	2	14 PEF Impact Categories (and all 10 categories classified I or II in ILCD are included[66])	Data are not older than 6 years with respect to the release date or latest review date	10% to 20%	The technologies modelled are included in the mix of technologies covered by the dataset	The processes included in the dataset are well representative for the geography stated in the title and metadata	The EoL formula [2] is implemented in foreground level-1 + level-2 disaggregated processes (see Figures E.2 and E.3)
Fair	3	12-13 PEF Impact Categories (and all 10 categories classified I or II in ILCD are included)	Data are not older than 8 years with respect to the release date or latest review date	20% to 30%	The technologies modelled are representative of the average technology used for similar processes	The processes included in the dataset are sufficiently representative for the geography stated in the title and metadata	The EoL formula [2] is implemented in foreground at level-1disaggregated processes (see Figure E.2)
Poor	4	10-11 PEF Impact Categories (and all those covered are classified I or II in ILCD)	Data are not older than 10 years with respect to the release date or latest review date	30% to 50%	Technology aspects are different from what described in the title and metadata	The processes included in the dataset are only partly representative for the geography stated in the title and metadata	The EoL formula [2] is not implemented, but all information and data needed to calculate all parameters in the EoL formula are available and transparently documented
Very poor	5	Less than 10 PEF Impact Categories (and all those covered are classified I or II in ILCD)	Data are older than 10 years with respect to the release date or latest review date	> 50%	Technology aspects are completely different from what described in the title and metadata	The processes included in the dataset are not representative for the geography stated in the title and metadata	The EoL formula [2] is not implemented

Une formule semi-quantitative a été proposé [103] afin d'évaluer le niveau de la qualité des données dans une étude ACV.

La formule est décrite en fonction des indicateurs cités dans le Tableau 29.

$$DQR = \frac{TiR + TeR + GR + C + P + EoL}{6}$$

Où :

- DQR = Degré de la qualité des données
- Tir = Corrélation temporelle
- TeR = Corrélation technologique
- GR = Corrélation géographique
- C = complétude
- P = Précision/ incertitude

Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques

Résumé : Face aux enjeux environnementaux actuels, s'investir dans les énergies renouvelables au nom de la « transition énergétique » est l'alternative la plus adoptée par de nombreux pays. Les énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque, sont ainsi devenues des secteurs concurrentiels innovants en pleine expansion. Dans ce contexte, il est donc nécessaire de s'assurer que les nouvelles technologies PV, qui sont complexes et issues de plusieurs étapes de fabrication, répondent aux critères d'un produit peu impactant pour l'environnement, dénommé ici éco-conçu. L'état de l'art sur l'éco-conception montre que la prise en compte des contraintes environnementales dans les projets de R&D à échelle TRL « Technology Readiness Level » bas est encore un phénomène émergent, pour les raisons suivantes : d'une part l'évaluation de l'impact environnemental est relativement complexe pour une technologie non mature en cours de développement (TRL bas) ; ses caractéristiques et procédés de fabrication n'étant pas encore tous connus ; d'autre part les outils identifiés présentent plusieurs écueils qui limitent leur intégration dans les organismes PV de R&D.
Ce travail de recherche vise donc à développer une méthodologie pour permettre l'intégration pérenne de l'éco-conception dans les organismes de R&D, pour accompagner leurs partenaires industriels dans leur effort d'innovation et de compétitivité.
La méthode développée est ainsi basée sur le principe d'estimation des taux d'évolutions techniques, économiques et environnementales d'une nouvelle technologie (TRL bas) par l'intermédiaire d'une base de données de référence. La construction de cette dernière s'appuie sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) comme outil de pilotage pour fournir des résultats fiables, malgré le faible niveau TRL.
Pour intégrer de façon pérenne cette approche au sein des organismes de R&D, la méthode développée a été implémentée dans un outil informatique « ECO PV » dédié aux systèmes PV en silicium cristallin, qui constituent plus de 90% du marché PV actuel. Basé sur le principe de démocratisation des connaissances environnementales et de la capitalisation des informations, cet outil est accessible non seulement aux experts en ACV mais aussi à l'ensemble des ingénieurs du domaine PV.
Ce travail de recherche a enfin permis d'une part de générer des premiers résultats à la fois fiables, simples et quantifiés, et de développer une méthodologie d'éco-conception pour orienter les choix technologiques des projets dans les phases amont de R&D, afin de développer des systèmes PV plus respectueux de l'environnement.

Mots clés : base de données de référence, TRL bas, taux d'évolution, éco-conception, ACV, photovoltaïque, intégration, pérenne, organisme de R&D, outil « ECO PV »

Systemic integration of Eco-design in photovoltaic technologies R&D

Abstract: Faced with current environmental challenges, investing in renewable energies in the name of the "energy transition" is the alternative most adopted by many countries. Renewable energies, in particular photovoltaic solar (PV) energy, have thus become innovative and competitive sectors in full expansion. In this context, it is therefore necessary to ensure that new PV technologies, which are complex and the result of several manufacturing stages, meet the criteria of a product with low environmental impact, referred here as eco-designed.

The state of the art on eco-design shows that the consideration of environmental constraints in R&D projects with low TRL "Technology Readiness Level" is still an emerging phenomenon, for two main reasons. On the one hand, environmental impact assessment is relatively complex for a non-mature technology under development (TRL low) because its characteristics and manufacturing processes are not yet fully defined. On the other hand, the identified tools in the literature have several limitations that impede their appropriation in R&D organizations.

This research work therefore aims to develop a methodology to enable the sustainable integration of eco-design into R&D organizations, supporting their industrial partners in innovation and competitiveness. Thus, the developed method is based on the estimation of the evolution rate of technical, economic and environmental criteria of a new technology (low TRL) through a specific database of reference. The construction of the database relies on Life Cycle Assessment (LCA), used as a management tool to provide reliable results, despite the low TRL level.

To integrate this approach into R&D organizations in a sustainable way, the method developed was implemented in a software "ECO PV" dedicated to crystalline silicon PV systems, which represent more than 94% of the current PV market today. Based on the principle of democratization of environmental knowledge and capitalization of information, this tool is accessible not only to LCA experts but also to all engineers in the PV field.

Finally, this research work enabled to generate reliable, simple and quantified results and to develop an eco-design methodology to guide the technological choices of projects in the upstream phases of R&D, in order to develop PV systems more environmentally friendly.

Key Word: data base of reference, Low TRL, evolution rates, eco-design, LCA, integration, sustainable, R&D organizations, « ECO PV » software