



HAL
open science

Intégration du risque chimique dans la conception de produits industriels. Application au secteur de l'aéronautique

Maud Lemagnen

► **To cite this version:**

Maud Lemagnen. Intégration du risque chimique dans la conception de produits industriels. Application au secteur de l'aéronautique. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2010GRENI006 . tel-00587357

HAL Id: tel-00587357

<https://theses.hal.science/tel-00587357>

Submitted on 20 Apr 2011

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Industriel : Conception, Production**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Maud LEMAGNEN

Thèse dirigée par **Daniel BRISSAUD** et
codirigée par **Fabrice MATHIEUX**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de
Grenoble, UMR 5272
dans **l'École Doctorale IMEP2**
Ingénierie – Mécanique Matériaux Energétique Environnement
Procédés Production

Intégration du risque chimique dans la conception de produits industriels. Application au secteur aéronautique.

Thèse soutenue publiquement le **20 janvier 2011**
devant le jury composé de :

Monsieur Daniel FROELICH

Professeur, Arts et Métiers ParisTech (Président)

Madame Valérie LAFOREST

Chargée de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne,
(Rapporteuse)

Monsieur Alain BERNARD

Professeur, Ecole Centrale de Nantes (Rapporteur)

Monsieur Daniel BRISSAUD

Professeur, Université de Grenoble (Directeur de thèse)

Monsieur Fabrice MATHIEUX

Maître de Conférences, Université de Grenoble (Co-encadrant)

Monsieur Christian VETU

Chef de département, Direction Industrielle, Sagem Défense Sécurité,
(Membre invité)



*A mes collègues de Réau et Colombes,
sans qui ce projet n'aurait pas vu le jour.
(février 2004 - janvier 2009)*

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Pr Daniel BRISSAUD et Dr Fabrice MATHIEUX pour avoir accepté d'encadrer mes travaux de thèse, dans ce contexte particulier lié à mon activité salariée. Je les remercie pour leur patience, leurs conseils et leur suis reconnaissante de m'avoir appris à réfléchir, je le pense, d'une nouvelle manière.

Je remercie Dr Valérie LAFOREST et Pr Alain BERNARD, qui ont accepté de rapporter mes travaux.

Je remercie Pr Daniel FROELICH et Mr Christian VETU d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Je remercie la société Hispano-Suiza, groupe Safran, d'avoir accepté que j'entreprenne des travaux de thèse, intégrés à mon activité d'ingénieur, et de partager ces activités de recherche avec les bureaux d'études.

Dans ce cadre, j'adresse un remerciement appuyé à Mr Bernard JACQUEMIN, qui, depuis mes premiers pas dans ma carrière d'ingénieur, a soutenu mes projets, mes démarches, et m'a apporté beaucoup d'enseignements sur l'environnement de l'aéronautique. Ce projet de thèse a pu démarrer grâce à son soutien et sa confiance. Je l'en remercie très sincèrement.

Je remercie la société Sagem Défense Sécurité, groupe Safran, d'avoir accepté de maintenir ce projet de thèse dans le cadre de mon transfert.

Je remercie mes chers collègues des Etablissements de Colombes et de Réau, qui m'ont beaucoup appris, avec qui j'ai toujours eu beaucoup d'entrain et de motivation à travailler. Vous m'avez transmis ce petit quelque chose, cette fierté particulière que l'on a à évoluer dans le monde de l'aéronautique. Une pensée à MM Ange DEL RIO, Jean GRUARIN, Yvon MONDY, avec qui j'ai effectué mes premiers stages au sein de l'Etablissement de Colombes.

A MM Bruno FERREBOEUF, Jean OLIVIER et Christophe LE MAITRE, avec qui j'ai travaillé au sein de l'Etablissement de Réau pendant près de 5 ans. : je vous remercie pour tout ce que vous m'avez appris, je vous remercie d'avoir été présents dans tous les bons moments, et ceux qui parfois étaient plus difficiles, de m'avoir toujours donné des conseils remplis de bon sens, et de m'avoir aidée à avancer avec joie dans mes activités et missions. Merci.

Cela ne serait pas complet sans un hommage à ceux de mes collègues qui ont beaucoup participé et travaillé aux activités d'éco-conception : MM Patrice BERHAULT, Robert POIRIER, Stéphane COCHARD, Jean-Marc COSQUER et Christophe GALLAIS.

Une pensée également pour Mlles Joséphine SIGNOLES et Elvia MARCELLAN avec qui j'ai eu l'opportunité de travailler en début de carrière, et avec qui nous avons mené de nombreuses réflexions qui ont été le terreau du présent travail.

Merci à tous ces jeunes ingénieurs dont je ne doute pas une seconde des succès futurs, qui ont travaillé en stage avec nous sur les sujets d'éco-conception (et d'environnement) et y ont apporté une belle dynamique : Louis-François LOBREAU, Pierre-Emmanuel PLACHOT, Quentin MOLLET, Fanny FORTUNA, Antoine GASIOREK, Isoline BARES, Vivien TAILLEBOIS, Gwénaëlle MANZANO, Vincent DESNUES, Damien PRUNEL, Boris CLOUET et Edouard BESCOND. Nos chemins se croisent déjà ou se croiseront un autre jour, j'en suis certaine !

Je remercie également tous ceux qui m'ont donné du temps pour la préparation de la soutenance à travers des conseils avisés : Peggy ZWOLINSKY, Guy PRUDHOMME, Carole CHARBUILLET et Erwan HARSCOET.

Je remercie mes proches pour avoir été présent à toutes les étapes de cette aventure, m'avoir accueillie lors de mes nombreux déplacements, encouragée jusqu'à la dernière minute, fait partagé de très bons moments : Manu, Bertrand et Natalia, Anne-Cécile, Benoît, Louis François et Vanessa, Plum, Julie, Guillaume, Jeanmichel.

Je remercie ma famille pour l'attention qu'elle m'a donnée : Sonia, Caliomé, Sébastien et Tata Michèle.

Je remercie Khaled, pour avoir été très présent dans toutes les étapes difficiles de réalisation de ce travail, m'avoir sans cesse encouragée et apporté un très grand soutien. Je lui en suis profondément reconnaissante.

Enfin, un immense merci à mes parents. Pour avoir été TOUJOURS présents, pour m'avoir aidée dans mes réflexions, pris du temps, écoutée (beaucoup), réconfortée dans les moments de doute. Sans vous non plus, cette thèse n'aurait sans doute pas abouti. Merci est un mot à peine assez grand.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	6
LISTE DES ACRONYMES.....	11
LISTE DES FIGURES	14
LISTE DES TABLEUX	19
INTRODUCTION GENERALE	21
PARTIE I : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL, SOCIETAL ET INDUSTRIEL.....	26
INTRODUCTION.....	27
CHAPITRE 1 : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL: SUBSTANCES CHIMIQUES ET RISQUE CHIMIQUE.....	29
1.1. <i>La toxicologie et l'écotoxicologie, domaines d'étude de l'impact d'une substance chimique sur l'homme et l'environnement</i>	<i>29</i>
1.2. <i>La notion de risque chimique.....</i>	<i>30</i>
CHAPITRE 2 : CONTEXTE SOCIETAL : LA REGLEMENTATION ENVIRONNEMENTALE ET LE RISQUE CHIMIQUE.....	35
2.1. <i>Principaux périmètres d'application de la réglementation portant sur le risque chimique.....</i>	<i>35</i>
2.2. <i>Réglementations portant sur le risque chimique, applicables à l'industrie manufacturière et aux produits manufacturés.....</i>	<i>40</i>
2.3. <i>Un nouveau paradigme réglementaire : le règlement européen REACH</i>	<i>44</i>
CHAPITRE 3 : CONTEXTE INDUSTRIEL GENERAL : PRINCIPALES INTERPRETATIONS DU REGLEMENT REACH POUR L'INDUSTRIE MANUFACTURIERE	52
3.1. <i>Les principaux impacts relevés par les industriels.....</i>	<i>52</i>
3.2. <i>Les conséquences du règlement REACH sur la gestion des substances dangereuses présentes dans les produits manufacturés</i>	<i>53</i>
3.3. <i>Anticiper la gestion des substances dès la conception des produits manufacturés....</i>	<i>65</i>
CHAPITRE 4 : CONTEXTE DE L'ETUDE : L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE	66
4.1. <i>Caractéristiques générales de l'industrie et du produit aéronautique.....</i>	<i>66</i>
4.2. <i>Impacts environnementaux, exigences environnementales et réponses du secteur ..</i>	<i>69</i>
4.3. <i>Positionnement de l'industrie aéronautique par rapport au règlement REACH et réponses mises en œuvre.....</i>	<i>76</i>
4.4. <i>Exemple de réponses mises en œuvre par le secteur</i>	<i>77</i>
CONCLUSION ET QUESTION DE RECHERCHE	82

PARTIE II : PROPOSITION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE	85
INTRODUCTION.....	86
CHAPITRE 5 : ROLE DE L'EVALUATION DU RISQUE DANS LES ACTIVITES INDUSTRIELLES	87
5.1. <i>De la connaissance des risques liés à une activité à la mise en place de mesures de sûreté / sécurité</i>	<i>87</i>
5.2. <i>Les étapes de l'évaluation du risque et du management du risque</i>	<i>87</i>
5.3. <i>L'acceptabilité du risque.....</i>	<i>89</i>
5.4. <i>Les moyens de diminution du risque</i>	<i>90</i>
CHAPITRE 6 : ETAT DE L'ART DES PRINCIPALES METHODES D'EVALUATION ET DE GESTION DES AGENTS CHIMIQUES	93
6.1. <i>Différents niveaux d'approches.....</i>	<i>93</i>
6.2. <i>La gestion des agents chimiques par une approche danger</i>	<i>95</i>
6.3. <i>La gestion des agents chimiques par une approche risque.....</i>	<i>100</i>
6.4. <i>La gestion des agents chimiques par une approche cycle de vie</i>	<i>117</i>
CHAPITRE 7 : SPECIFICATION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE PRESENTE PAR UN PRODUIT INDUSTRIEL SUR SON CYCLE DE VIE	124
7.1. <i>Objectif général de la spécification</i>	<i>124</i>
7.2. <i>Contrainte sur l'échelle spatiale</i>	<i>124</i>
7.3. <i>Contrainte sur l'échelle temporelle</i>	<i>124</i>
7.4. <i>Contrainte sur le principe de fonctionnement.....</i>	<i>124</i>
7.5. <i>Contrainte sur la nature des résultats.....</i>	<i>124</i>
7.6. <i>Confrontation des méthodes connues aux contraintes établies</i>	<i>125</i>
CHAPITRE 8 : PROPOSITION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE PRESENTE PAR UN PRODUIT SUR SON CYCLE DE VIE.....	127
8.1. <i>Synoptique général.....</i>	<i>127</i>
8.2. <i>Notations.....</i>	<i>128</i>
8.3. <i>Evaluation qualitative du danger</i>	<i>128</i>
8.4. <i>Evaluation quantitative du risque chimique à chaque étape du cycle de vie du produit</i> <i>128</i>	
8.5. <i>Résultats.....</i>	<i>130</i>
CONCLUSION.....	131

PARTIE III : INTEGRATION DE L'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE DANS SON PROCESSUS DE CONCEPTION	133
INTRODUCTION.....	134
CHAPITRE 9 : AMELIORATION DES CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES D'UN PRODUIT DES SA CONCEPTION 135	
9.1. <i>L'éco-conception : processus global d'intégration des aspects environnementaux dans la conception de produits.....</i>	135
9.2. <i>Evaluation environnementale et amélioration du produit.....</i>	137
9.3. <i>Le point de vue normatif</i>	140
9.4. <i>Maîtriser le risque chimique d'un produit manufacturé sur son cycle de vie par l'éco-conception.....</i>	143
CHAPITRE 10 : PROCESSUS GENERIQUE DE CONCEPTION D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE	148
10.1. <i>Vie d'un programme aéronautique et du processus de conception associé</i>	148
10.2. <i>Caractéristiques fondamentales du processus de conception aéronautique.....</i>	154
CHAPITRE 11 : SPECIFICATIONS POUR L'INTEGRATION DE L'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION AERONAUTIQUE.....	157
11.1. <i>Spécification des fonctions de la méthode.....</i>	157
CHAPITRE 12 : SYNOPTIQUE GENERAL DE LA METHODE	161
CONCLUSION.....	163
PARTIE IV : DESCRIPTION DES MODES OPERATOIRES DE LA METHODE D'INTEGRATION DU RISQUE CHIMIQUE DANS LA CONCEPTION D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE.....	166
INTRODUCTION.....	167
CHAPITRE 13 : EXTRACTION DES DONNEES ET TYPOLOGIE DES SOURCES	168
CHAPITRE 14 : EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE.....	169
14.1. <i>Danger d'une substance.....</i>	169
14.2. <i>Ratio massique d'une substance aux différentes étapes du cycle de vie</i>	169
14.3. <i>Fréquence d'exposition de la substance aux différentes étapes du cycle de vie.....</i>	171
14.4. <i>Accessibilité physique d'une substance aux différentes étapes du cycle de vie.....</i>	173
14.5. <i>Calcul du risque chimique lié à la substance aux différentes étapes du cycle de vie</i>	175
CHAPITRE 15 : INTEGRATION DES RESULTATS D'EVALUATION DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DU PRODUIT	176
CONCLUSION.....	178

PARTIE V : ETUDE DE CAS.....	180
INTRODUCTION.....	181
CHAPITRE 16 : PRODUIT ETUDIE ET PROCESSUS DE CONCEPTION.....	182
16.1. <i>Produit étudié et cycle de vie.....</i>	182
16.2. <i>Description du processus de conception d'un équipement hydromécanique</i>	184
CHAPITRE 17 : OUTILS UTILISES.....	187
17.1. <i>Outils internes pré-existants.....</i>	187
17.2. <i>Base de données matériaux procédés développées.....</i>	187
CHAPITRE 18 : EXTRACTION DES DONNEES.....	192
CHAPITRE 19 : EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE.....	196
19.1. <i>Synoptique de réalisation de l'évaluation de danger.....</i>	196
19.2. <i>Calcul des masses des substances.....</i>	198
19.3. <i>Calcul des fréquences d'exposition des substances.....</i>	201
19.4. <i>Evaluation de l'accessibilité.....</i>	202
19.5. <i>Risque chimique présenté par le produit aux différentes étapes de son cycle de vie</i>	203
CHAPITRE 20 : INTEGRATION DES RESULTATS DE L'EVALUATION DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION.....	205
20.1. <i>Conformité vis-à-vis de l'article 33 du règlement REACh. Cas de l'anodisation.....</i>	205
20.2. <i>Opportunités de réduction du risque chimique présenté par un produit.....</i>	206
20.3. <i>Intégration des résultats dans les revues de conception.....</i>	208
CHAPITRE 21 : DISCUSSION DES RESULTATS.....	209
21.1. <i>Réponse à la question de recherche.....</i>	209
21.2. <i>Identification des limites</i>	209
21.3. <i>Principales pistes d'amélioration de la méthode et de l'outil associé.....</i>	210
CONCLUSION.....	213
CONCLUSION GENERALE.....	214
ANNEXES	220
ANNEXE 1 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIES AU PRODUIT AERONAUTIQUE.....	221
ANNEXE 2 : STRUCTURE ET DOCUMENTATION DU PROCESSUS DE CONCEPTION AERONAUTIQUE	228
BIBLIOGRAPHIE	272
TABLE DES MATIÈRES	283

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Signification
ACARE	Advisory Council of Aeronautical Research in Europe
ACV	Analyse de Cycle de vie
APTE®	Application des Techniques d'Entreprise
ASD	Aerospace and Defence Industries Association in Europe
CAEP	Comittee on Aviation and Environmental Protection
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CDR	Conceptual Design Review
CLP	Classification Labelling and Packaging of substances and mixtures
CMR	Cancérogène Mutagène Reprotoxique
CSA	Chemical Safety Assessment
CSR	Chemical Safety Report
DD	Dossier de Définition
DDR	Detailed Design Review
DFC	Dossier de Fabrication et de Contrôle
DfE	Design for Environment
DJD	Dossier de Justification de la Définition
DNEL	Derived No Effect Level
DSL	Déclaration Substance List
DVI	Dossier de Validation Industrielle
EASA	European Aviation Safety Agency
EINECS	European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances
ELINCS	European List of Notified Chemical Substances
EMIT	Environmental Materials Information Technology
EQRS	Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires
FDS	Fiche de Données de Sécurité
FMU	Fuel Metering Unit
GHS	Global Harmonized System
GIFAS	Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales
HPVC	High Production Volume Chemical
ICAO	International Civil Aviation Organization
IMDS	International Material Data System
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Removal
NEWAC	New Aero Engine Core Concept
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
P/N	Part Number
PBT	Persistent Bioaccumulative Toxic
PDR	Preliminary Design Review
PDSL	Priority Declarable Substance List
PEC	Predicted Environmental Concentration
PNEC	Predicted No Effect Concentration

Acronyme	Signification
PP	Principe de Précaution
REACH	Registration Evaluation Authorisation of Chemicals
SdF	Sûreté de Fonctionnement
SIRIS	System of Integration of Risk with Interaction of Scores
STB	Spécification Technique des Besoins
SVHC	Substance of Very High Concern
TGD	Technical Guidance Document
VLEP	Valeur Limite d'Exposition Professionnelle
vPvB	very Persistent very Bioaccumulative

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : L'ECOTOXICOLOGIE, UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE, TRADUIT DE (TRAAS AND LEEUWEN 2007)	30
FIGURE 2 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES CONCEPTS DE DEVENIR D'UNE SUBSTANCE ET D'EXPOSITION A UN ORGANISME, DANS L'ENVIRONNEMENT TRADUIT DE (RICE, MACDONELL ET AL. 2008))	32
FIGURE 3 : DEFINITION DE CATEGORIES DE SUBSTANCES SELON LA DATE DE MISE SUR LE MARCHÉ ET PERIMETRE D'APPLICATION DES REGLEMENTATIONS.	36
FIGURE 4 : LIENS ENTRE EVALUATION ET MANAGEMENT DU RISQUE CHIMIQUE TRADUIT DE (LEEUWEN 2007)	38
FIGURE 5: ETAPES GENERIQUES DU CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT, IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT ET MAITRISE PAR LA CONCEPTION. TRADUIT DE (WRIGHT, RAHIMIFARD ET AL. 2009)	42
FIGURE 6 : STRUCTURE DU REGLEMENT REACH TRADUITE DE (LEEUWEN, HANSEN ET AL. 2007)	51
FIGURE 7 : EVOLUTION DU NIVEAU DE TECHNOLOGIE EN FONCTION DE LA VIE DU PRODUIT D'APRES (VALERDI AND KOHL 2004)	53
FIGURE 8 : RESPONSABILITE DES ACTEURS DE LA SUPPLY-CHAIN AERONAUTIQUE, IN (GIFAS 2005)	57
FIGURE 9 : APPLICABILITE DES ARTICLES 33 ET 7 A UNE SUBSTANCE PRESENTE DANS UN « ARTICLE », IN (EUROPEAN CHEMICALS AGENCY 2008)	62
FIGURE 11 : CONSEQUENCES DES EXIGENCES DU REGLEMENT REACH SUR L'ORGANISATION D'UNE ENTREPRISE MANUFACTURIERE	65
FIGURE 12 : LES PRINCIPAUX DOMAINES D'ACTIVITES DE L'AERONAUTIQUE ET LES PRINCIPAUX ACTEURS INDUSTRIELS (NOTA : LES FLECHES INDIQUENT UN LIEN FOURNISSEUR / CLIENT)	68
FIGURE 13 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX GENERES AU COURS DU CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE	70
FIGURE 14 : LES PRINCIPALES PARTIES INTERESSEES D'UN AVIONNEUR (ET DE SA SUPPLY-CHAIN) ET LEURS EXIGENCES	73
FIGURE 15: CRITERES DE CLASSIFICATION DES SUBSTANCES RECENSEES DANS LA LISTE BT DU GIFAS	78
FIGURE 16 : DEFINITION DES NIVEAUX BANNED ET TARGETED DE LA LISTE BT PROPOSEE PAR LE GIFAS (SME ENVIRONNEMENT 2007)	78
FIGURE 17 : EXTRAIT DES TABLES DU STANDARD TR 9335	81
FIGURE 18 : DEMARCHE ITERATIVE DE L'EVALUATION ET DE LA DIMINUTION DU RISQUE, D'APRES (DUIJNE, AKEN ET AL. 2008)	88
FIGURE 19 : DIMENSIONS INFLUENÇANT LE NIVEAU D'ACCEPTABILITE DU RISQUE DANS LE CADRE DE LA PRISE DE DECISION DES MESURES DE MANAGEMENT, ADAPTE D'APRES (LEEUWEN 2007)	89

FIGURE 20 : LA PREVENTION ET LA PROTECTION, DEMARCHES DE REDUCTION DU RISQUE, D'APRES (HOLLNAGEL 2008)	90
FIGURE 21 : RELATION ENTRE L'EVALUATION DU DANGER ET L'EVALUATION DU RISQUE, D'APRES (GEBEL, LECHTENBERG-AUFFARTH ET AL. 2009)	93
FIGURE 22 : CLASSES DE DANGER SELON LE REGLEMENT CLP. DOCUMENT INRS, DECEMBRE 2009	97
FIGURE 23 : CATEGORIES DE LA CLASSE DE DANGER « CANCEROGENICITE » SELON LE REGLEMENT CLP, COMPARE AUX CLASSES ACTUELLEMENT EN VIGUEUR (IN (INRS 2009)).	98
FIGURE 24: EXTRAIT DU STANDARD STD 100-0002 EMIS PAR LE GROUPE VOLVO, DANS LE CADRE DE LA GESTION DES SUBSTANCES DANGEREUSES AU SEIN DE SA SUPPLY-CHAIN (IN (VOLVO 2010))	99
FIGURE 25 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA STRUCTURE DE LA METHODE SIRIS	101
FIGURE 26 : EXEMPLE DE CALCULS DE SCORES POUR TROIS CRITERES V1, V2 ET V3, TELS QUE V1>V2>V3, CHACUN ETANT DEFINIS PAR TROIS CLASSES (F=FAVORABLE, M=INTERMEDIAIRE, D=DEFAVORABLE). D'APRES (DEVILLERS, DEVILLERS ET AL. 2009).	103
FIGURE 27: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA STRUCTURE DE LA METHODE INRS	105
FIGURE 28 : PROCEDURE GENERALE D'EVALUATION DU RISQUE PRECONISEE PAR LE TGD, D'APRES (GUERIT, BOCQUENE ET AL. 2008)	111
FIGURE 29 : CAPTURE D'ECRAN DE L'OUTIL CLARICE, UTILISE POUR L'EVALUATION DE RISQUE ET LA DESCRIPTION DES MESURES ASSOCIEES DANS LE CADRE D'UNE ACTIVITE DE PEINTURE.	113
FIGURE 30 : PROCESSUS DE DEFINITION DU CSR, DES MESURES DE MANAGEMENT DU RISQUE (RMMS) ET DE LA FDS A PARTIR DE L'EVALUATION DE RISQUE, DANS LE CADRE DU REGLEMENT REACH, TRADUIT DE (LEEUVEN, HANSEN ET AL. 2007)	116
FIGURE 31 : POSITIONNEMENT DES METHODES DE LCIA PRESENTEES, D'APRES (FINNVEDEN ET AL., 2009)	119
FIGURE 32 : CADRE GENERAL POUR LE CALCUL DES DOMMAGES SUR LA SANTE ET L'ECOSYSTEME DE LA METHODE IMPACT 2002 +, D'APRES (JOLLIET ET AL., 2003)	121
FIGURE 33: SYNOPTIQUE GENERAL DE LA METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE PROPOSEE	127
FIGURE 34 : EXEMPLE D'EXIGENCES A PRENDRE EN COMPTE DANS LE CADRE DU DEVELOPPEMENT D'UN PRODUIT, TRADUIT DE (HAUSCHILD, ALTING ET AL. 2003)	135
FIGURE 35 : "EVOLUTION DU POTENTIEL D'AMELIORATION ENVIRONNEMENTALE D'UN PRODUIT AU COURS DE SON DEVELOPPEMENT, TRADUIT DE (HAUSCHILD, ALTING ET AL. 2003)	138
FIGURE 37 : SYNOPTIQUE DE LA METHODOLOGIE D'ECO-CONCEPTION PROPOSEE PAR LA NORME NF E01-005, IN (AFNOR 2010)	142
FIGURE 38 : "ARBRE DE DECISION POUR L'ASPECT (S), IN (AFNOR 2004)	144

FIGURE 39 : CYCLE DE VIE GENERIQUE D'UN PROGRAMME AERONAUTIQUE CIVIL, D'APRES (SCHMITT 2009)	149
FIGURE 40 : SCHEMA D'UN PROCESSUS DE CONCEPTION SIMPLIFIE, D'APRES (PRICE, RAGHUNATHAN ET AL. 2006)	150
FIGURE 41 : EVOLUTION DU NIVEAU DE DETAIL DES EXIGENCES ET PARAMETRES DE DESCRIPTION POUR UNE CELLULE D'AVION.	152
FIGURE 42 : MODELE SIMPLIFIE DU PROCESSUS D'INGENIERIE SYSTEME, DANS LE CAS DE LA CONCEPTION, TRADUIT DE (PRICE, RAGHUNATHAN ET AL. 2006)	153
FIGURE 43 : VUE D'ENSEMBLE DE L'ARCHITECTURE DOCUMENTAIRE, D'APRES (RG AERO 000 08 ET RGAERO 000 12)	155
FIGURE 44 : DIAGRAMME PIEUVRE REPRESENTANT LES FONCTIONS PRINCIPALES (FP) ET LES FONCTIONS CONTRAINTEES (FC) DE LA METHODE AU REGARD DES ELEMENTS DE SON ENVIRONNEMENT	157
FIGURE 45 : SYNOPTIQUE GENERAL DE LA METHODE SIMPLIFIEE PROPOSEE DE PRISE EN COMPTE DU CRITERE « RISQUE CHIMIQUE » DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DETAILLEE	162
FIGURE 46 : ORIENTATION DES CHOIX DE MODELES DE CALCUL DE LA MASSE DE SUBSTANCE EVALUEE.	169
FIGURE 47 : SYNOPTIQUE DE LA DEMARCHE D'ANALYSE DES RESULTATS FOURNIS PAR LA METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE	176
FIGURE 48 : FUEL METERING UNIT	182
FIGURE 49 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU CYCLE DE VIE D'UN EQUIPEMENT AERONAUTIQUE, D'APRES DOCUMENT INTERNE HISPANO-SUIZA.	183
FIGURE 50 : PROCESSUS DE CONCEPTION D'UN EQUIPEMENT HYDROMECHANIQUE, D'APRES DOCUMENT INTERNE CONFIDENTIEL	184
FIGURE 51 : LISTE DES CHAMPS UTILISABLES POUR LA RECHERCHE AU SEIN DE LA BASE DE DONNEES, IN [LOBREAU 2007]	190
FIGURE 52: INTERFACE D'ACCUEIL DE LA BASE DE DONNEES	191
FIGURE 53 : PROCEDURE D'EXTRACTION DES DONNEES NECESSAIRES A LA REALISATION D'UNE EVALUATION DE RISQUE CHIMIQUE, D'APRES [MOLLET,Q., 2008]	194
FIGURE 54 : ENSEMBLE DES DONNEES D'ENTREES NECESSAIRES A LA REALISATION DE L'EVALUATION	195
FIGURE 55 : EXTRAIT DE LA PROCEDURE D'EXTRACTION DES DONNEES, PORTANT SUR L'APPOSITION DES LABELS DE DANGER (2), D'APRES [MOLLET 2008]	196
FIGURE 56 : LABELLISATION DANGER DES PIECES CONSTITUTIVES DU FMU	197

FIGURE 57 : SYNOPTIQUE DE CALCUL DE LA MASSE D'UNE SUBSTANCE PRESENTE DANS UN MATERIAU (1) OU UN REVETEMENT (2) ET EXEMPLES	199
FIGURE 58 : CALCUL DES MASSES ET POURCENTAGES MASSIQUES DE SUBSTANCES DANGEREUSES CONTENUES DANS LES PIECES DU FMU	200
FIGURE 59 : ATTRIBUTION DES VALEURS D'ACCESSIBILITES AUX PIECES DE LA NOMENCLATURE POUR LES DIFFERENTES PHASES DU CYCLE DE VIE.	202
FIGURE 60 : EXTRAIT DE LA MATRICE DE CONFORMITE	203
FIGURE 61 : PIECES SOUMISES A NOTIFICATION D'APRES L'ARTICLE 33 DU REGLEMENT REACH	205
FIGURE 62 : EXTRAIT DE LA MATRICE DE CONFORMITE RISQUE CHIMIQUE	206
FIGURE 63 : EXTRAIT DE LA MATRICE DE CONFORMITE CAS N°2	207
FIGURE 64 : REVUES INTEGRANT L'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION D'UN EQUIPEMENT HYDROMECHANIQUE(EN ORANGE), DOCUMENT INTERNE CONFIDENTIEL	208
FIGURE 65 : PRINCIPALES FONCTIONNALITE D'UN SYSTEME D'INFORMATION DU PLM ET INTERFAÇAGE AVEC L'OUTIL D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE, ADAPTE DE (MORENTON 2009)	212

LISTE DES TABLEAUX

TABLE 1 : PRINCIPAUX TERMES UTILISES DANS LE REGLEMENT REACH	47
TABLE 2 : LISTE DES CRITERES CARACTERISANT L'EXPOSITION ET VALEURS DES CLASSES, D'APRES (GUERBET AND JOUANY 2002).....	102
TABLE 3 : TYPOLOGIE ET SOURCES DES DONNEES NECESSAIRES A L'APPLICATION	105
DE LA METHODE D'EVALUATIONS DE L'INRS	105
TABLE 4 : CLASSES DE DANGER EN FONCTION DE L'ETIQUETAGE, DES VALEURS LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLES ET DE LA NATURE DES AGENTS CHIMIQUES EMIS LORS DE DIVERS TRAVAUX.....	106
TABLE 5 : CALCUL DES CLASSES DE QUANTITE.....	107
TABLE 6 : DETERMINATION DES CLASSES DE FREQUENCE D'UTILISATION.....	107
TABLE 7 : DETERMINATION DES CLASSES D'EXPOSITION POTENTIELLE	108
TABLE 8 : DETERMINATION DU RISQUE POTENTIEL.....	109
TABLE 9 : CARACTERISATION DES PRIORITES EN FONCTION DU SCORE DE RISQUE POTENTIEL PAR AGENT CHIMIQUE	109
TABLE 10: EXEMPLES DE DOMAINES D'APPLICATION DES RESULTATS D'ACV, D'APRES (OLSEN, CHRISTENSEN ET AL. 2001).....	122
TABLE 11 : COMPARAISON MULTICRITERE DES METHODES PRESENTEES	126
TABLE 12 : COMPARAISON D'OUTILS D'ECODESIGN, IN (LE POCHAT, BERTOLUCI ET AL. 2007).....	139
TABLE 13 : STRATEGIE, LIGNES DIRECTRICES ET INDICATEURS POUR L'ASPECT (S), IN (AFNOR 2004) .	144
TABLE 14 : FONCTIONS IDENTIFIEES DE LA METHODE, DONNEES D'ENTREE ET DE SORTIE	158
TABLE 15 : GUIDE DE SPECIFICATION DE LA METHODE	160
TABLE 16 : IDENTIFICATION DES DONNEES D'ENTREES NECESSAIRES A L'APPLICATION DE LA PHASE D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE.....	168
TABLE 17 : CLASSES DE RATIO MASSIQUE M_i	170
TABLE 18 : CLASSES DE FREQUENCE.....	173
TABLE 19 VALEUR DE $A_{i,j}$ EN FONCTION DES CONTRAINTES DE MONTAGE.....	174
TABLE 20 : DONNEES NECESSAIRES, SOURCE ET TRAITEMENT	192
TABLE 21 : VALEUR DES CLASSES DE FREQUENCE POUR LES DIFFERENTES PHASES DE L'EQUIPEMENT.	201

INTRODUCTION GENERALE

Les problèmes environnementaux, caractérisés par des modifications plus ou moins graves des équilibres écologiques ont, pour beaucoup, un lien important avec le développement des activités humaines. La prise en charge de ces modifications est pourtant relativement récente, notamment en France, depuis les premières lois sur la salubrité publique édictées au XIXe siècle jusqu'à une réglementation spécifique des activités, de l'agriculture à l'industrie, en passant par les transports et la vie quotidienne des habitants. L'encadrement des interactions entre homme et environnement évolue dans le sens d'une progression, notamment depuis que celui-ci peut représenter un mode de démarcation, de responsabilité et d'anticipation pour les organismes ou groupes le mettant en œuvre.

C'est typiquement à travers le développement des systèmes de management environnemental, qu'ils reposent sur la norme internationale ISO 14001 ou le référentiel EMAS, que la gestion des impacts environnementaux liés aux activités industrielles prend une dimension qualitative, et ouvre la voie au développement de démarches volontaristes vis-à-vis de la préservation de l'environnement. Le management de l'environnement est fondé sur un principe d'amélioration continue, l'objectif basique étant un respect de la réglementation, les objectifs à long terme touchant à une réelle intégration de la dimension environnementale dans les activités, puis les produits et services.

L'industrie aéronautique française, au cœur de notre domaine d'expérience, se familiarise progressivement avec la notion de protection de l'environnement. Depuis une petite quinzaine d'année, les sites industriels obtiennent et maintiennent des systèmes de management certifiés. Les effluents et déchets générés par les activités de production, essais ou maintenance sont gérés, les solutions d'optimisation de dépense énergétique ou de recyclage de matériaux se construisent. Depuis 2005 environ, un nouveau tournant, celui de l'environnement produit, apparaît et progresse. Les directives européennes touchent de plus en plus aux qualités environnementales des produits : substances toxiques, consommation d'énergie, gestion de la fin de vie. Ces textes législatifs reflètent une réelle pression sociétale, qui touche tous les biens de consommation. Et le domaine du transport aérien n'en demeure pas moins inclus ! Avec un trafic croissant, les clients, utilisateurs mais également les riverains des sites aéroportuaires exigent une maîtrise croissante des impacts environnementaux générés par le produit lui-même : l'aéronef.

Aussi, la question des modes de gestion des impacts environnementaux générés par ce produit très particulier, caractérisé par sa haute technologie et sa complexité, son évolution dans un cadre réglementaire extrêmement strict se pose-t-elle. Travailler sur ce point s'entend bien sûr comme la mise en

œuvre d'activités environnementales au cœur des activités de création, développement et support du produit industriel.

Nous constatons cependant qu'une des clés de succès d'une telle entreprise réside dans l'acceptation de la prise en compte des dispositions environnementales par les acteurs eux-mêmes. Une compréhension mutuelle doit être réalisée, entre ceux qui prescrivent, encadrent et conseillent vis-à-vis des directions environnementales et ceux qui œuvrent à la réalisation du produit. Les bénéfices pour l'entreprise, l'activité voire le salarié doivent être compris et admis de la part de ces derniers. La relation est complète lorsque les niveaux d'intégration des prescriptions environnementales sont identifiés, l'objectif étant de tendre vers une intégration à iso-périmètre.

Dans le cadre du développement de l'intégration de l'environnement dans les activités de conception, nos travaux se sont axés sur la prise en compte du risque chimique, au regard des problématiques développées par la profession aéronautique. La modification importante du paysage européen en matière de gestion des agents chimiques (RoHS, REACH) n'exclut désormais aucune activité industrielle, et le secteur aéronautique doit faire face à une exigence de maîtrise vis-à-vis des agents chimiques mis en œuvre dans la réalisation d'un aéronef. Ces travaux visent à proposer une approche ancrée dans le domaine industriel et spécifique au secteur aéronautique quant à la prise en charge au sein des activités de conception de la problématique de gestion du risque chimique sur le cycle de vie du produit.

Cette thèse a été réalisée en étant salariée à temps plein d'un équipementier aéronautique. Ma mission industrielle porte sur l'intégration de l'environnement au sein des activités de réalisation du produit, et plus principalement, au sein des activités de conception et développement. Le travail de thèse est ainsi issu d'un besoin identifié dans le cadre de mes missions, visant à approfondir la démarche d'intégration de l'environnement en conception, d'une part, et à fournir un socle scientifique à ces activités industrielles. Ainsi, le travail de thèse a pu s'appuyer sur mes missions industrielles, qu'il s'agisse de la formulation de la problématique, de la connaissance des processus industriels effectifs et de l'implémentation de la méthode proposée sur des cas réels. Les travaux menés pour la réalisation de la thèse, tant en terme de construction de la bibliographie que d'approche méthodologique des problèmes posés, ont permis d'enrichir les actions industrielles que j'ai pu conduire. Ces deux approches, menées en continu durant les trois années de thèse, se sont mutuellement enrichies et ont également ouvert la voie à une meilleure connaissance, pour mes collègues, des enjeux des activités d'intégration de l'environnement en conception.

La partie I porte sur une étude générale des contextes environnemental, sociétal et industriel centrée sur la problématique du risque chimique. La connaissance scientifique des effets et dommages des agents chimiques sur l'environnement préside à la création d'un cadre réglementaire, en Europe, de plus en plus complexe et strict vis-à-vis des modes d'évaluation et de gestion des dangers et risques.

Les conséquences des réglementations sur les activités industrielles en général sont multiples mais principalement caractérisées par le risque d'obsolescence des produits mis sur le marché d'une part, et le besoin de traçabilité d'autre part. Le secteur aéronautique, jusqu'alors concentré sur la gestion des impacts environnementaux majeurs tels que le bruit ou les émissions de gaz à effet de serre, se structure très progressivement. Nous constaterons cependant que les réponses mises en œuvre présentent des lacunes au regard du besoin de prise en charge du risque chimique présenté par le produit au cours de son cycle de vie.

Cette première étude nous amènera à la question de recherche suivante : la réduction du risque chimique d'un produit aéronautique sur son cycle de vie peut-elle être mise en œuvre dès la conception ?

La partie II s'articule autour des modes de gestion du risque présenté par les agents chimiques. Après un rappel sur la notion de risque dans le domaine industriel, les étapes génériques de son évaluation ainsi que les orientations possibles à sa gestion, nous dresserons un panorama des méthodes utilisées, spécifiques aux agents chimiques. Cet état de l'art nous permettra de formuler la spécification d'une méthode d'évaluation du risque chimique sur le cycle de vie du produit. Une description générale des étapes de cette méthode d'évaluation sera proposée.

La partie III présente les principes généraux d'intégration du paramètre environnemental (au sens écologique du terme) dans les activités de conception. Un focus sera réalisé sur les méthodes d'intégration de la grandeur « risque chimique ». Puis, à partir de l'étude des spécificités du processus de conception aéronautique, nous envisagerons les modes d'intégration de la méthode d'évaluation du risque chimique que nous proposons, dans l'optique de la mise en œuvre d'un processus complet d'éco-conception.

La partie IV propose les modes de mise en œuvre, étape par étape, de la méthode proposée dans le cadre particulier du domaine de l'aéronautique. Les grandeurs utiles ainsi que les hypothèses spécifiques et principes généraux de calculs y sont établis.

La partie V consiste en une étude de cas, soit l'application de l'ensemble des étapes de la méthode exposée dans la partie précédente à un cas réel (équipement moteur). Les résultats de cette étude de cas

nous conduirons à valider la question de recherche, mais également à examiner les limites de la méthode et à en proposer des pistes d'amélioration.

Une conclusion générale termine la dissertation.

PARTIE I :

CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL, SOCIÉTAL ET INDUSTRIEL

Introduction	26
Chapitre 1 : Contexte environnemental: substances chimiques et risque chimiques	28
Chapitre 2 : Contexte sociétal la réglementation environnementale et le risque chimique.....	34
Chapitre 3 : Contexte industriel général : Principales interprétations du règlement REACH pour l'industrie manufacturière.....	51
Chapitre 4 : Contexte de l'étude : l'industrie aéronautique	65
Conclusion et question de recherche	81

Introduction

Depuis le XIXe siècle, la production et l'utilisation d'agents chimiques augmente continuellement. Véritables sources de révolutions techniques (plastiques, médicaments, etc. ...), les agents chimiques peuvent aussi être à l'origine de graves catastrophes environnementales. Afin d'améliorer les impacts des activités humaines sur l'environnement, le premier angle d'attaque est constitué par la science. De nombreuses disciplines scientifiques concourent à la compréhension et à la modélisation des phénomènes de pollution environnementale. La toxicologie et l'écotoxicologie sont les domaines scientifiques au travers desquels sont étudiées les conséquences néfastes des substances chimiques sur les écosystèmes ainsi que l'évaluation du risque qu'elles présentent.

La problématique des impacts des agents chimiques est aussi reprise par la société, à travers l'encadrement par la loi des activités de production et d'utilisation des produits. Faisant suite à une approche axée sur l'identification des dangers et à la multiplication de textes aux champs d'application variés, la Communauté Européenne instaure un nouveau règlement, REACH (2007), ayant pour ambition d'homogénéiser les pratiques de gestion des agents chimiques dans tous les Etats membres, et orientant désormais les objectifs d'action sur l'évaluation du risque chimique. Cette nouvelle donne réglementaire a de nombreuses conséquences sur l'ensemble du tissu industriel, dont nous pouvons extraire deux thématiques majeures pour les industries manufacturières : la gestion de l'obsolescence et la traçabilité. Au sein de l'industrie aéronautique, la gestion des impacts environnementaux a largement été centrée sur la réduction des émissions atmosphériques et du bruit. Cependant les problèmes liés aux agents chimiques n'ont jamais été particulièrement pris en compte, bien que REACH introduise de nouvelles exigences. La profession se structure progressivement, mais les actions mises en place font apparaître une lacune évidente : le risque chimique présenté par le produit aéronautique, sur son cycle de vie, n'est pas connu.

Le chapitre 1 s'intéressera à la définition du risque chimique à travers le prisme des sciences environnementales, écotoxicologie, toxicologie et chimie.

Le chapitre 2 décrira le cadre réglementaire européen applicable aux modes de gestion des agents chimiques et aux mesures de management de leurs effets sur l'homme et l'environnement, en mettant en lumière le nouveau paradigme réglementaire porté par le règlement REACH.

Le chapitre 3 se concentrera sur la description des conséquences de la réglementation REACH sur les activités industrielles manufacturières et les modes de réponse proposés.

Le chapitre 4 se focalisera sur la description de l'industrie au sein de laquelle ont été menées les présentes recherches, i.e. l'industrie aéronautique, et examinera les niveaux de réponse mis en œuvre dans le cadre du contexte de la gestion du risque chimique présenté par les produits aéronautiques.

Cette partie s'achèvera par une conclusion de synthèse et l'énonciation de la question de recherche.

Chapitre 1 : Contexte environnemental: substances chimiques et risque chimique

1.1. La toxicologie et l'écotoxicologie, domaines d'étude de l'impact d'une substance chimique sur l'homme et l'environnement

De nombreuses définitions de la toxicologie et de l'écotoxicologie existent. Nous nous appuyerons sur celles respectivement proposées par M.BOUNIAS et F. RAMADE :

Toxicologie : « *Etude scientifique des poisons et des toxiques* » (Bounias 1999) . Les toxiques peuvent être classés en différentes catégories, selon leurs sources, leurs effets (sources physiques, chimiques, effets herbicides, fongicides, venins...),

Ecotoxicologie (Ramade 1992) : « *Science dont l'objet est l'étude des polluants toxiques dans les écosystèmes et la biosphère toute entière* ». Il est intéressant de noter que cette définition introduit la notion de polluant / pollution, qui selon le même auteur, désigne « *l'ensemble des rejets de composés toxiques que l'Homme libère dans l'écosphère, mais aussi les substances qui, sans être vraiment dangereuses pour les organismes, exercent une influence perturbatrice sur l'environnement* ».

T.P. TRAAS et C.J. VAN LEEUWEN précisent la définition de l'écotoxicologie en soulignant la nécessaire implication de trois disciplines scientifiques complémentaires : la toxicologie, la chimie et l'écologie (Traas and Leeuwen 2007). Chacune de ces disciplines apporte l'éclairage nécessaire à la compréhension et à l'étude des effets toxiques des substances sur les différentes espèces vivant au sein d'écosystèmes :

- **la chimie** permet de décrire l'évolution, la dégradation et la vie des molécules et substances. Elle s'attache à l'axe d'interaction *substances / systèmes*,
- **La toxicologie** s'intéresse à la biocinétique et aux modes d'action des toxiques, ainsi qu'aux effets des toxiques sur différentes espèces végétales et animales. Elle s'attache à l'axe d'interaction *espèces / substances*,
- **L'écologie** est l'étude des structures et fonctions des écosystèmes, et touche particulièrement aux aspects génétique des populations, biogéographie et évolution. Elle s'attache à l'axe d'interaction *espèces / systèmes*.

La figure 1, reprise de (Traas and Leeuwen 2007), propose une vue synthétique du champ d'étude recouvert par l'écotoxicologie.

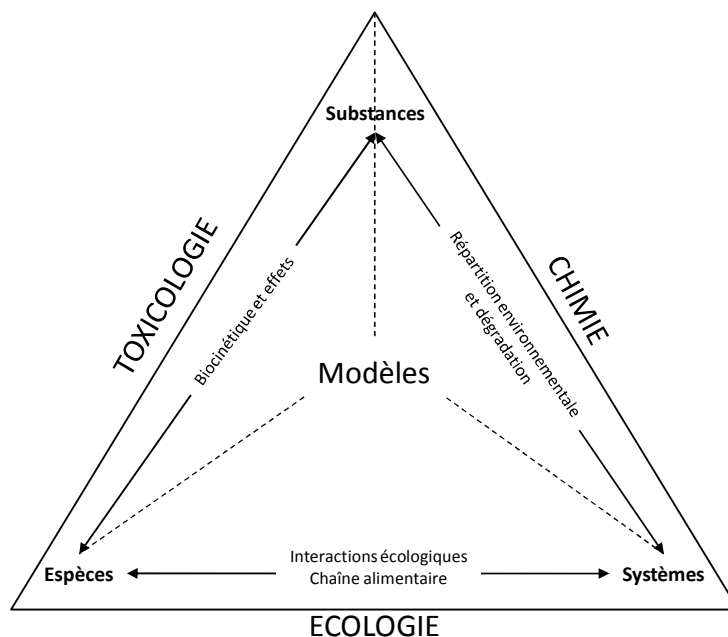


Figure 1 : L'écotoxicologie, une approche pluridisciplinaire, traduit de (Traas and Leeuwen 2007)

1.2. La notion de risque chimique

1.2.1. Le risque chimique et ses liens avec les domaines de la toxicologie et de l'écotoxicologie

C.J. VAN LEEUWEN (Leeuwen 2007) définit le risque chimique comme la « *probabilité d'occurrence d'un effet défavorable sur l'homme ou l'environnement résultant d'une exposition donnée à une substance chimique ou à un mélange de substances chimiques* ».

La grandeur « risque » permet de qualifier et/ou de quantifier les dommages pouvant être générés par une ou plusieurs substances chimiques aux composantes d'un écosystème. De fait, son évaluation fait appel à la connaissance des disciplines précitées (la chimie, la toxicologie et l'écologie) et aboutit à la caractérisation de sa forme et sa magnitude.

Le risque est une composante du danger de la (des) substance(s) présente(s) et des modes d'exposition de l'homme et/ou de l'environnement à ces dernières.

1.2.2. Les composantes majeures du risque chimique

1.2.2.1. *Le danger*

Le danger est « *la capacité inhérente d'une substance chimique ou d'un mélange de substances chimiques à causer des effets défavorables à l'homme ou à l'environnement selon les conditions d'exposition* » (Leeuwen 2007).

Les effets ou dommages produits par une substance chimique ou par un mélange sont de plusieurs natures. Ils peuvent consister, pour l'homme, en des dommages sur les fonctions reproductives, neurologiques, ou induire un cancer, par exemple. Dans le cas de l'environnement, ces effets vont notamment se traduire par la mortalité ou le trouble de croissance de populations animale(s) et/ou végétale(s).

La caractérisation du danger s'effectue à travers l'étude du comportement et des interactions de la substance chimique ou du mélange au niveau de l'organisme, des tissus, des cellules, du matériel génétique.

1.2.2.2. *L'exposition*

1.2.2.2.1 Définition

La notion d'exposition peut être simplement définie, comme le suggère un des rapports de l'Institute for Environment and Health (Royaume Uni) : « *contact entre une substance chimique et une population ou un individu dans le temps* » (IGHR 2004). Cette définition en appelle une autre, celle du principe d' « évaluation de l'exposition », qui permet de comprendre la complexité du concept d'exposition et les conséquences induites sur les modes de mesure.

Le Risk Assessment Toxicology Steering Committee propose la définition suivante: « *quantification du niveau de produit chimique auquel sont exposée les populations humaines, les sous populations et individus en terme d'intensité, durée et fréquence* » (Risk Assessment and Toxicology Steering Committee 1999). La définition proposée par C.J VAN LEEUWEN (Leeuwen 2007) étend la définition de l'évaluation de l'exposition aux compartiments environnementaux¹ « *détermination des émissions, des chemins empruntés, des quantités de substances et de leurs transformation ou dégradation afin d'estimer les*

¹ Compartiments environnementaux : système aérien, systèmes aquatiques (marin, lacustres), systèmes terrestres (terres agricoles...)

concentrations / doses auxquelles les populations humaines ou les compartiments environnementaux sont ou ont pu être exposés. »

Ainsi, la notion d'exposition est plus simplement appréhendable à travers ses modes d'évaluation, qui n'en demeurent pas moins complexes et divers.

1.2.2.2.2 La diversité des modèles d'exposition

L'évaluation de l'exposition d'un organisme à une substance est complexe. RICE et al. (Rice, MacDonell et al. 2008) proposent une représentation des chemins et devenir d'une substance émise dans l'environnement (figure 2).

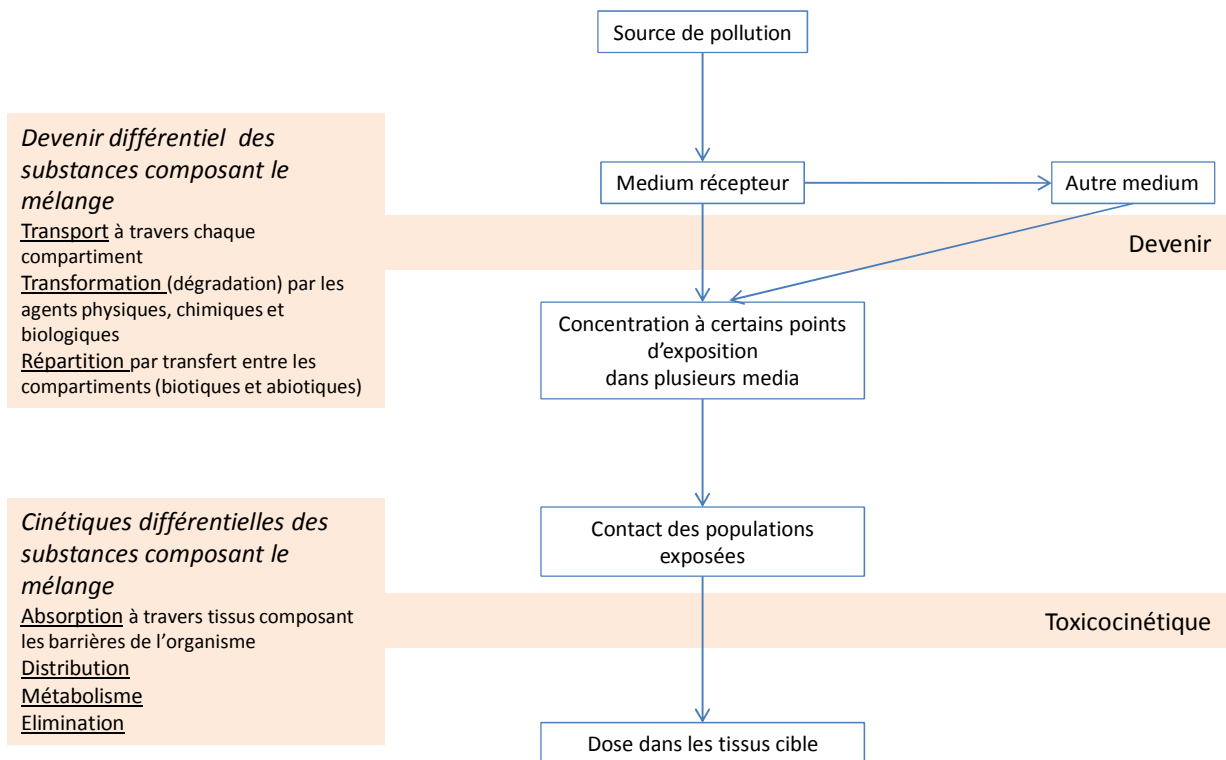


Figure 2 : Représentation schématique des concepts de devenir d'une substance et d'exposition à un organisme, dans l'environnement traduit de (Rice, MacDonell et al. 2008)

Différents éléments entrent dans l'évaluation de l'exposition, tels que la nature du milieu récepteur, les caractéristiques des populations cibles, les modes de dégradation de la substance etc...

FRYER et al. (Fryer, Collins et al. 2006) effectuent une revue des principaux modèles d'évaluation de l'exposition de l'homme à un produit chimique. Dans leur ensemble, ces modèles conduisent à la simulation des concentrations de substances auxquelles l'humain peut être exposé, dans un medium

environnemental donné. Les principales lois statistiques et modèles mathématiques utilisés pour évaluer la distribution de la substance dans le médium en fonction du temps sont :

- **La loi de Gauss**,
- **Le modèle d'équilibre des masses** (Meent and Bruijn 2007): des équations décrivent la variation de la masse d'une substance ΔM et de sa concentration ΔC , sur un intervalle de temps donné Δt , dans un compartiment environnemental de volume V supposé constant :

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = V \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

Ce modèle se complexifie en fonction du nombre de compartiments et de substances évalués.

Les modèles d'expositions peuvent être regroupés dans différentes catégories :

- **Evaluation de l'exposition liée aux modes de contact** : ces modèles s'intéressent aux modes de contact de l'individu vis-à-vis de la substance (« route d'exposition »), notamment l'ingestion, l'inhalation et contact dermal. La mise en œuvre de ces modèles nécessite la connaissance des activités (modes de contacts) et les paramètres physiologiques de la population étudiée.
- **Evaluation de l'exposition liée à l'alimentation** : ces modèles s'intéressent à l'exposition d'une population à un agent chimique liée à la consommation d'eau ou de nourriture contaminée. La limite de ces modèles réside notamment dans le fait qu'ils ne considèrent que des routes d'exposition directes. En outre, des difficultés d'évaluation sont liées au manque de connaissance portant sur les caractéristiques des substances lorsque les aliments subissent des transformations, ou les habitudes alimentaires des différentes populations.
- **Evaluation de l'exposition liée à un produit** : les produits (objets) mis sur le marché sont regroupés en familles selon leurs caractéristiques (présence de peintures, emballage, produit alimentaire, etc) et des scénarii d'exposition type sont définis, tenant compte des routes d'exposition les plus probables.
- **Evaluation de l'exposition liée aux conditions de travail** : L'évaluation est notamment fondée sur les propriétés physico-chimiques de la substance, son mode d'utilisation par l'opérateur, la nature du contact ainsi que sa fréquence et la quantification de substance mise en contact. Cette évaluation s'effectue à l'aide d'arbre de décisions, et est de nature semi quantitative.

La difficulté d'évaluation de l'exposition tient dans la définition des valeurs des paramètres pris en compte et des modes de simulation mis en œuvre. Ainsi, utiliser des valeurs moyennes ne permettra pas d'évaluer l'ensemble du spectre présenté par une population hétérogène. De même, le choix de valeurs

majorantes produira des résultats non pertinents par rapport à la réalité. La validité des modèles est souvent restreinte à un espace / temps spécifique, et se révèle moins pertinente dans le cas d'une évaluation portant sur tout un cycle de vie. Enfin chaque modèle ne décrit pas, dans son ensemble, la complexité des réactions chimiques, biochimiques et métaboliques auxquelles est soumise une substance au sein d'un compartiment environnemental et dans un organisme.

Aussi, FRYER et al. notent qu'il est intéressant de procéder à la combinaison de différents modèles d'exposition afin de pouvoir élargir les champs d'application : les modèles ne sont adaptés qu'aux domaines pour lesquels ils ont été conçus et leurs résultats ne sont pas comparables. In fine, ces modèles vont généralement conduire à estimer une concentration de substance dans le compartiment étudié (PEC : Predicted Environmental Concentration) puis au calcul d'une dose de substance reçue par les organismes, souvent exprimé en masse par unité de masse d'organisme par unité de temps ($\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$ par exemple). La valeur de la dose, confrontée aux connaissances sur la nature des effets (dommages) d'une substance pour une quantité et un organisme donné, permettront d'évaluer les dommages potentiels de la substance.

1.2.3. Bilan

Le **risque chimique** est donc la combinaison du **danger** potentiel d'une substance, caractéristique intrinsèque, à son **exposition** au milieu ou à un organisme vivant. L'évaluation du risque correspond ainsi à l'évaluation de la magnitude des dommages subis par un milieu ou un organisme, et constitue alors une identification de **l'impact² de la substance sur l'environnement ou l'organisme** (AFNOR 2004).

D'un point de vue sociétal, la chimie accompagne l'évolution des Hommes depuis l'antiquité et connaît un essor exponentiel depuis le XIXe siècle. Aussi, les nécessités de comprendre le risque chimique par la science, et de l'encadrer par la loi, sont elles devenues essentielles. Nous nous intéresserons particulièrement au cadre européen de la réglementation portant sur les substances chimiques et le risque chimique, afin de comprendre le lien entre les principes écotoxicologiques d'étude des impacts des substances chimiques et les modes de gestion du risque chimique, dans la société.

² Le terme impact est ici entendu selon la définition donnée par la norme ISO 14001 : 2004 : « toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique [...] »

Chapitre 2 : Contexte sociétal : la réglementation environnementale et le risque chimique.

2.1. Principaux périmètres d'application de la réglementation portant sur le risque chimique

2.1.1. La réglementation du risque chimique : histoire, évolution et conséquences

2.1.1.1. La prise en charge des impacts liés aux substances chimiques par la réglementation : de l'évaluation du danger à l'évaluation du risque chimique

LEEUWEN décrit l'histoire de la prise en charge des impacts liés à la production et l'usage des substances chimiques, notamment dans le cadre de la réglementation européenne (Leeuwen, Hansen et al. 2007). La forte recrudescence de production de produits chimiques amène la communauté scientifique à s'interroger sur les dommages collatéraux générés sur l'environnement et l'homme. En 1967, la directive européenne n°67/548/CEE institue notamment la **classification des substances selon le danger qu'elles présentent**, caractéristique intrinsèque (Conseil Européen 1967). Cette directive conduit, par évolutions successives, à l'élaboration du système des phrases de risque R et des pictogrammes d'identification des dangers, présents sur les emballages de produits chimiques mis sur le marché européen.

La démarche d'encadrement des dangers présentés par les substances chimiques s'étend progressivement à d'autres domaines, notamment la **réduction des émissions dans l'environnement** et la **protection des travailleurs dans leur lieu de travail**, via la maîtrise de l'exposition des ces derniers aux agents dangereux. A partir des années 90, la prise de conscience s'exerce sur une approche englobant maîtrise du danger et de l'exposition, soit la **gestion du risque chimique**. La législation prend alors un nouveau tournant, s'intéressant désormais à **l'évaluation du risque chimique** et à la **mise en place de mesures** permettant de prévenir ce risque, vis-à-vis de l'homme et de l'environnement.

GEBEL et al. (Gebel, Lechtenberg-Auffarth et al. 2009) indiquent que le fondement d'une grande partie des directives européennes sur l'identification des dangers des substances relève d'une approche pragmatique de simplification, et demeure limitée par un manque de recul sur les méthodes d'évaluation du risque chimique. En effet, l'évaluation du risque chimique est, du point de vue toxicologique, un processus long et nécessitant de nombreuses données d'entrée. Cette démarche n'étant pas directement

applicable, une première approche via la classification des dangers des substances a permis de donner un cadre à la régulation de la production et de l'usage des substances sur le marché européen.

Une catégorisation des substances disponibles sur le marché a parallèlement été introduite en fonction de critères temporels et de volumétrie de production. Des priorités d'évaluation des risques chimiques ont progressivement été définies. La figure 3 propose une représentation de ces différentes catégories de substances définies par les réglementations successives et les modalités d'évaluations des risques afférents.

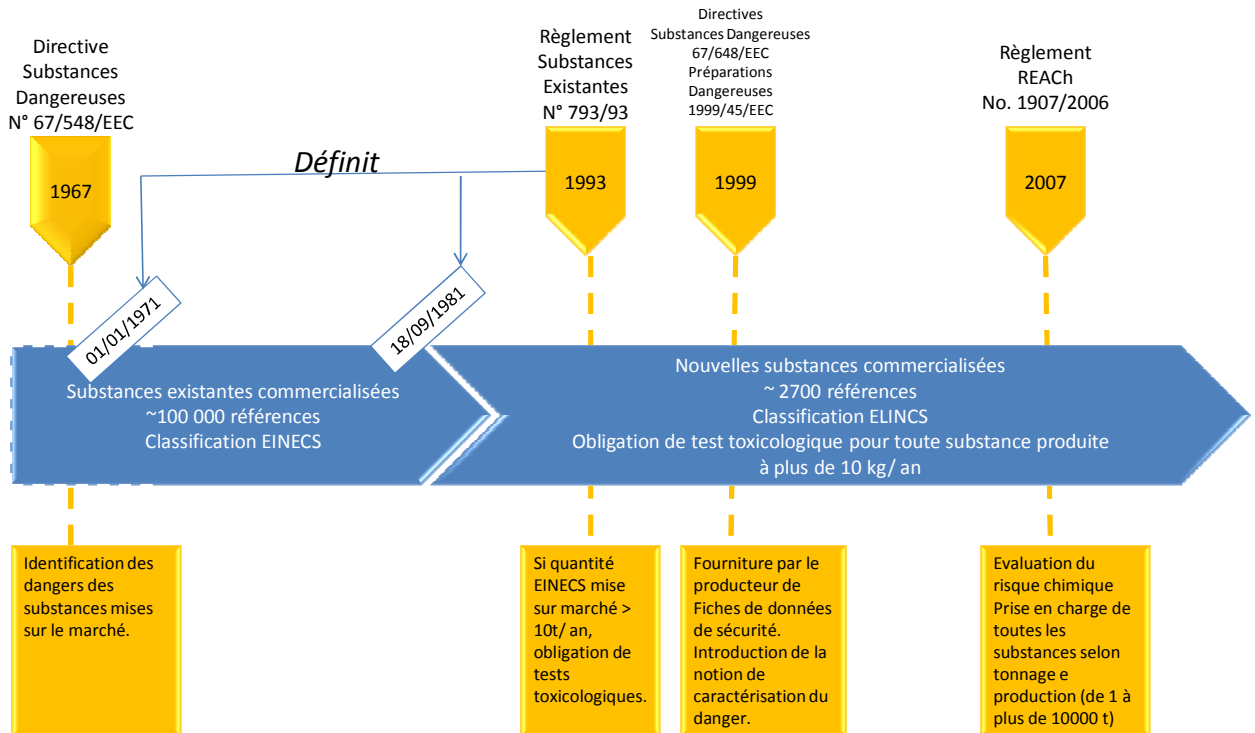


Figure 3 : Définition de catégories de substances selon la date de mise sur le marché et périmètre d'application des réglementations.

En 1993, Le règlement n°793/93 définit deux groupes parmi les substances existantes :

- **EINECS** : substances existantes, commercialisées entre 1971 et 1981. Elles représentent 99% du marché.
- **ELINCS** : nouvelles substances commercialisées à partir du 18 septembre 1981.

Les EINECS sont soumises à des tests toxicologiques lorsque leur volumétrie de production excède 10 tonnes par an, les ELINCS le sont pour une production supérieure à 10kg par an. Les directives sur les substances dangereuses 67/648/EEC et sur les préparations dangereuses 1999/45/EEC introduisent en 1999 une amélioration sur l'identification du danger des substances et mélanges, prenant en compte la

notion d'**usage normalement prévu** : la notion d'exposition est ainsi progressivement introduite. Chaque substance ou mélange mis sur le marché par un producteur doit, sans seuil de tonnage, être accompagné d'une fiche de données de sécurité (FDS), indiquant notamment ses propriétés physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques.

Parmi les 30 000 substances EINECS produites à plus d'une tonne par an, 2750 le sont à plus de 10 000 tonnes par an : ce sont les substances dites **HPVC** (High Production Volume Chemicals). Les pays de la communauté européenne se focalisent sur les HPVC et établissent des rapports précis sur le risque chimique qu'elles présentent. En 2007, le résultat des investigations couvre moins de 86% des HPVC existants. Des substances nécessitant une attention particulière sont alors décrites et des mesures de prévention et de gestion du risque chimique édictées.

2.1.1.2. La gestion (management) du risque chimique

2.1.1.2.1 Etapes générales

LEEUVEN (Leeuwen 2007) décrit le lien entre les étapes de l'évaluation du risque chimique et le management du risque (figure 4). Le management du risque chimique consiste à prendre des mesures fondées sur les résultats de l'évaluation du risque, en tenant également compte de données d'ordre légal, politique, social, économique et techniques. Pour LEEUVEN, les mesures de management du risque chimique procèdent principalement d'une volonté politique.

Ces mesures sont définies d'après trois étapes principales :

- **La classification du risque** : le risque une fois évalué est confronté à une échelle de valeurs, bornée par des limites hautes et basses. De cette façon, l'acceptabilité du risque est mesurée, et les dispositions à prendre en vue de sa réduction sont alors statuées.
- **L'analyse de faisabilité des options de réduction du risque** : cette étape est la plus critique de la démarche de management du risque. La réduction du risque chimique peut être réalisée par une modification voire une interdiction des modes de production et/ou d'utilisation de la substance. L'analyse de faisabilité, outre les aspects liés à la diminution du niveau de risque, doit prendre en compte pour chaque mesure des aspects touchant à la faisabilité technique, aux facteurs sociaux, économiques, éthiques, réglementaires et scientifiques.

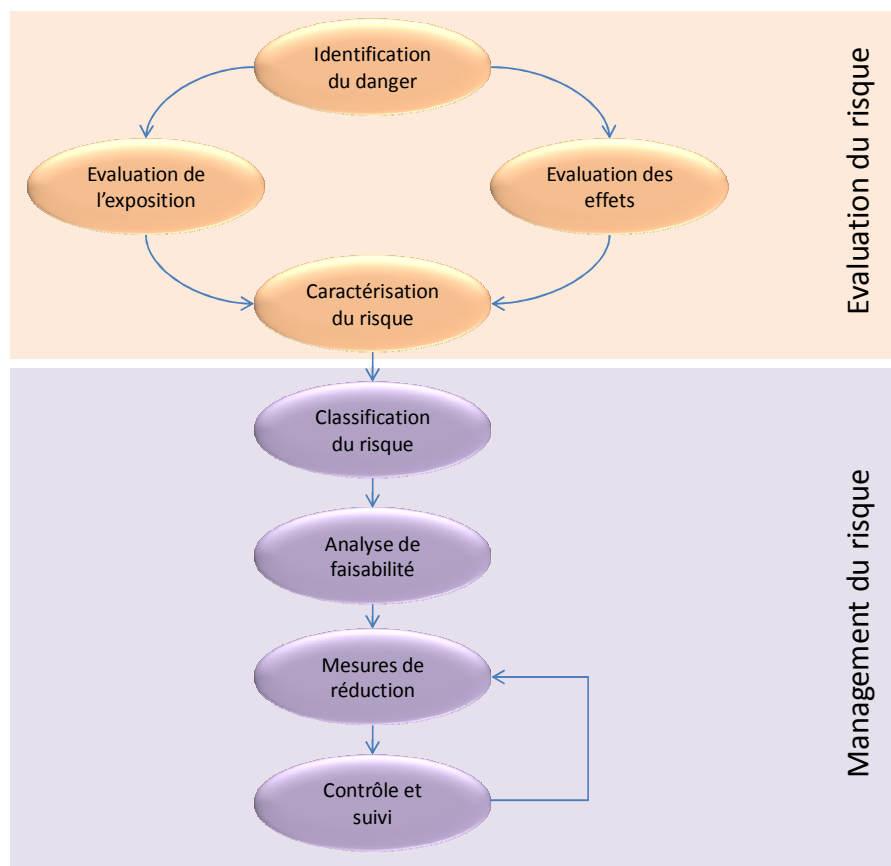


Figure 4 : Liens entre évaluation et management du risque chimique traduit de (Leeuwen 2007)

- **Les actions de réduction du risque** : les mesures de réduction de risque en tant que telles peuvent être liées :
 - à la mise en place d'un système de communication sur les dangers / risques potentiels présentés par une substance (cf pictogrammes de dangers),
 - à l'établissement de limites d'exposition aux substances, définies réglementairement, et s'appliquant tant aux compartiments environnementaux qu'au milieu industriel,
 - à la mise en œuvre de barrières techniques, de modes d'organisation et d'instruction d'utilisation des substances, etc.
- **Le contrôle et le suivi** : Les actions mises en place doivent être contrôlées, afin de s'assurer de leur efficacité, de détecter des modifications particulières ou autres effets non désirés et d'améliorer autant que besoin les dispositions applicables en s'appuyant sur le retour d'expérience. Selon l'élément à étudier, le contrôle peut s'effectuer soit à l'aide de mesures

directes des effets (biomonitoring³) soit par des systèmes d'audits de l'organisation de gestion du risque.

2.1.1.2.2 *La gestion des risques et le principe de précaution*

L'évaluation des risques chimiques, dont va découler la mise en œuvre des mesures de gestion, n'est cependant pas une science exacte. ROGERS (Rogers 2003) introduit la prise en compte de l'incertitude, intervenant à différents niveaux de l'évaluation du risque, fondée sur la relation entre **danger (Hz)** et **dommage (Ha)**. Il définit l'évaluation du risque chimique comme :

- l'identification d'un **couple [danger-dommage]**, noté [H-H], pertinent pour une situation donnée,
- la détermination de la relation entre **l'intensité I (Hz)**, degré d'exposition à un danger donné
- la **probabilité P(Ha)**, de réalisation d'un dommage pour chaque couple [H-H].

A partir de cette définition, il définit trois domaines d'incertitudes issus :

1) des effets : incertitude sur la réalisation d'un dommage (Ha) pouvant résulter de l'exposition à un danger (Hz), en raison de la variabilité des réponses d'un système à l'exposition donnée,

2) de la cause : incertitude sur la nature précise du ou des danger(s) ayant induit un dommage,

3) de la relation [H-H] elle-même : incertitude portant sur le degré de corrélation entre l'exposition à un danger particulier et la réalisation d'un risque particulier.

Ce troisième domaine d'incertitude résulte d'un manque de connaissance scientifique permettant de décrire la relation [H-H], bien que l'intuition indique l'existence potentielle de cette relation. De fait, la conduite d'une évaluation du risque chimique, dans ce type de scénario, est difficile voir peu pertinente. A ce niveau est alors fait appel au **Principe de Précaution (PP)**.

³ Le biomonitoring regroupe ici les tests pouvant être réalisés sur des organismes pour mesurer la concentration des substances étudiées dans les fluides, les organes, etc. ... afin de déterminer des effets liés aux modes d'exposition.

Le PP peut avoir différentes définitions, celle qui est retenue dans le Traité sur l'Union Européenne de 1999 (article 174, ex R 130) indique que face à une incertitude scientifique vis-à-vis de risques, le législateur doit mettre en œuvre des mesures de prévention.

La Communauté Européenne décrit cinq principes devant prévaloir à toute action de gestion du risque :

- Les actions doivent être proportionnelles au niveau de protection choisi,
- Les actions sont non discriminatoires dans leur application,
- Les actions sont cohérentes avec des mesures prises antérieurement,
- Les actions sont basées sur l'examen des bénéfices et des coûts relatifs à la mise en œuvre ou l'absence de celles-ci (incluant, lorsque cela est approprié ou réalisable, une analyse des coûts et bénéfices),
- Les actions sont soumises à revue, au regard des nouvelles données scientifiques.

L'application du PP à la démarche de gestion du risque chimique, dans le cadre réglementaire européen, est un élément décisif de l'orientation de la logique du législateur. Cet élément a d'importantes répercussions sur la réglementation européenne à partir des années 2000.

2.2. Réglementations portant sur le risque chimique, applicables à l'industrie manufacturière et aux produits manufacturés

2.2.1. Le risque chimique et les activités manufacturières industrielles

2.2.1.1. Le risque chimique et l'environnement

Les industries produisant ou mettant en œuvre des produits chimiques dangereux en grandes quantités présentent potentiellement des risques pour l'environnement, à travers l'occurrence d'une situation accidentelle. Différentes catastrophes industrielles retentissantes ont amené à la création d'un cadre réglementaire européen strict, via la directive n° 82/501/CEE dite SEVESO adoptée en 1982. Cette directive tire son nom d'un accident industriel survenu en Italie en 1976, dans la ville du même nom, ayant exposé la population et les écosystèmes à une émission massive de dioxine. En 1984 et 1986 surviennent respectivement les catastrophes de Bhopal (Inde) et de Basel (Suisse) : dans le premier cas, l'explosion au sein d'une installation de production de pesticides émet de grandes quantités d'isocyanate de méthyle, causant le décès de plusieurs milliers de personnes ; dans le second cas, des effluents fortement concentrés en mercure se déversent dans le Rhin, suite à l'incendie d'un entrepôt, conduisant à une mortalité massive

de la faune aquatique. Ces évènements ne font que renforcer la nécessité de mettre en œuvre des mesures de sûreté dans la gestion des sites industriels produisant ou manipulant des agents chimiques en forte quantité. La directive Seveso sera amendée suite aux évènements de Bhopal et Basel, puis revue et mise à jour dans les années 90, sous la référence 96/82/EC, mieux connue sous le nom de **directive Seveso II**. Cette directive est toujours en application aujourd'hui.

PORTER et al. (Porter and Wettig 1999) décrivent les principaux axes de la directive. La gestion du risque chimique au sein d'un site industriel va être liée à la connaissance des agents chimiques présents et de leur potentiel dangereux, à la définition de scénarii d'accidents et à la mise en place de mesures de gestion (techniques et humaines) permettant d'offrir une réponse adaptée selon le mode de fonctionnement du site, normal ou dégradé. L'**analyse de risques** joue ici un rôle central dans l'organisation générale du site et dans l'orientation de la prise de décision des équipes de management quant au choix de tel ou tel procédé ou mode de travail.

La directive Seveso II s'applique à toutes les activités faisant appel à un ou plusieurs agents chimiques identifiés comme particulièrement dangereux (annexe I de la directive). La directive fixe des seuils de quantité à partir desquels le site propriétaire des agents chimiques doit mettre en œuvre toute une batterie de mesures de sûreté garantissant la sécurité des activités. La directive Seveso II prend en compte les dommages causés à la santé humaine par les agents chimiques, mais inclus également les substances dites « dangereuses pour l'environnement ».

2.2.1.2. Le risque chimique et la protection des travailleurs

La directive 98/24/CE concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail (Journal officiel des Communautés Européennes 1998) traite des mesures à mettre en place au niveau du poste de travail dans le cadre de la protection mais aussi de la prévention des pathologies pouvant être liées à une exposition aux agents chimiques. Cette réglementation se fonde sur les apports de la mise en œuvre d'une structure d'identification des dangers et de leurs signalisations. Des seuils d'exposition aux substances sont également établis (OEL, Occupational Exposure Limit), définissant des valeurs limites de concentration de substance dans l'atmosphère, pour des durées données (en général 8 heures par jour) sur le lieu de travail (Fairhurst 2003).

Dans une logique similaire à celle proposée par SEVESO II, l'évaluation du risque au poste de travail, présenté par la substance manipulée, doit déboucher sur la mise en œuvre de mesures préventives, sous forme de barrières techniques (équipements de protection collective, individuelle) voire sous forme de modifications des modes opératoires.

2.2.2. Le risque chimique et les produits manufacturés

WRIGHT et al. (Wright, Rahimifard et al. 2009) proposent une revue des réglementations européennes portant sur le risque chimique présenté par un produit manufacturé. Les produits manufacturés mis sur le marché présentent également, tout au long de leur cycle de vie, différents impacts sur l'environnement (figure 5). Les auteurs proposent une représentation d'un cycle de vie générique de produit, illustrant le lien effectif entre les différentes étapes du cycle de vie du produit, les éléments générés pouvant avoir un impact sur l'environnement, mais également le fait que cette production d'impacts peut notamment être maîtrisée par la conception même du produit.

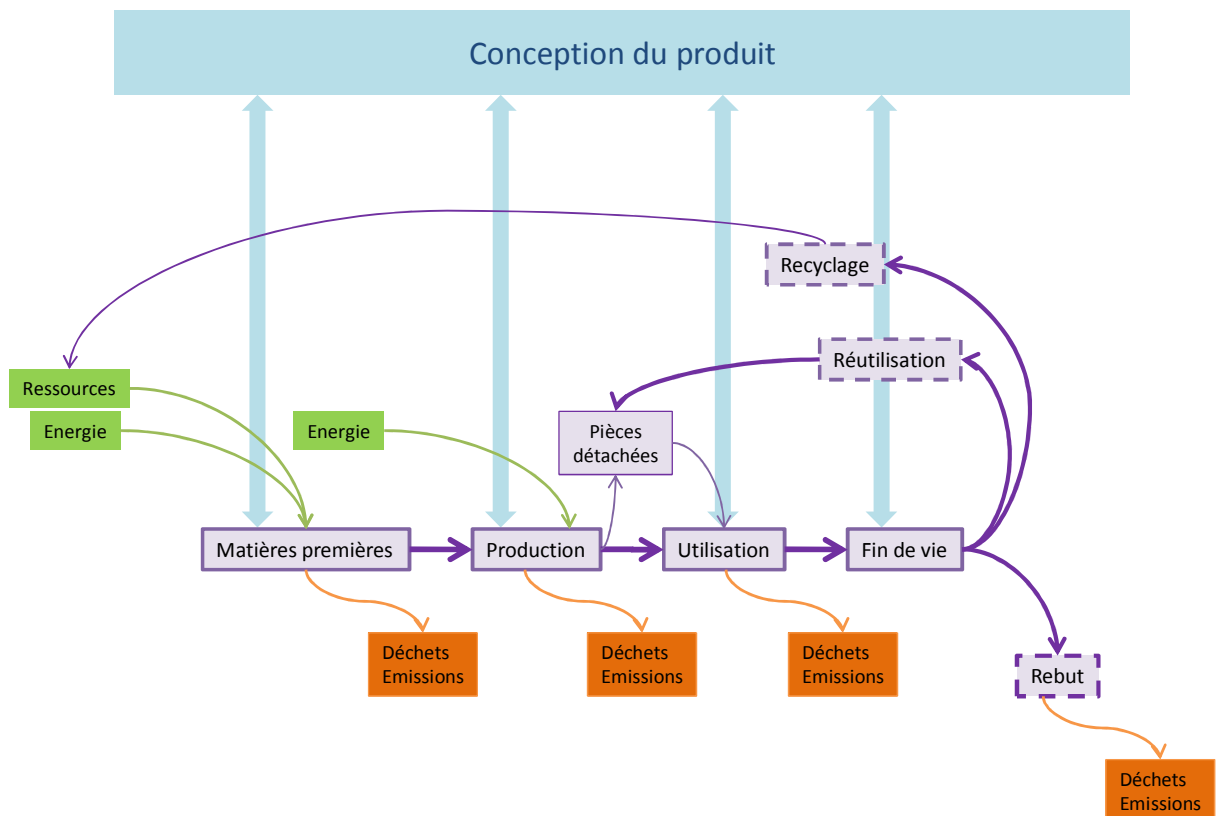


Figure 5: Etapes génériques du cycle de vie d'un produit, impacts sur l'environnement et maîtrise par la conception. Traduit de (Wright, Rahimifard et al. 2009)

En raison des volumes croissants de produits manufacturés mis sur le marché, le législateur doit faire face à la génération d'impacts environnementaux plus diffus que ceux générés au sein de sites industriels en décrivant un nouveau cadre réglementaire. Les réglementations européennes qui s'intéressent principalement à la réduction des impacts des produits manufacturés consistent notamment en une série d'exigences applicables dès la conception des produits. Nous proposons ci après une synthèse des principales réglementations par étapes du cycle de vie des produits manufacturés.

2.2.2.1. Maîtrise du risque chimique lié au choix des matières premières

La directive RoHS n° 2002/95/EC (Restriction of Hazardous Substances) identifie une liste de six substances présentant un niveau de danger et introduit la notion de **teneur maximale du produit en substance** (de 0,01% à 0,1%). Cette directive s'applique aux équipements électriques et électroniques. Elle implique le choix de matériaux conformes, voire l'abandon de certaines solutions techniques (la brasure au plomb, par exemple), nécessitant des solutions de substitution apportant des fonctionnalités équivalentes.

Le règlement RECh n° 1907/2006 (Registration Evaluation Authorisation of Chemicals) introduit également cette notion de teneur en substances dites très dangereuses, mais pour un champ d'application beaucoup plus large (tous les produits manufacturés mis sur le marché européen) et pour une liste de substances plus grande, soit près de 1500 substances (Service National d'Assistance Réglementaire sur RECh / BERPC 2009).

2.2.2.2. Maîtrise du risque chimique lors de la fin de vie des produits manufacturés

La Directive n° 1999/31/CE du 24/04/99 concernant la mise en décharge des déchets vise à faire appliquer une diminution du volume de déchets mis en décharge. Elle introduit un volet sur le risque chimique pouvant être lié aux déchets mis en décharge, du fait de la nature des matériaux les constituant. Les déchets peuvent en effet induire des dommages aux compartiments environnementaux avec lesquels ils sont en contact.

La Directive n° 91/689/CEE du 12/12/91 relative aux déchets dangereux définit l'identification de déchets dangereux pour l'homme et l'environnement. La dangerosité des déchets est établie à travers une classification spécifique, disponible en annexe de la directive. Des exigences supplémentaires en termes de gestion, stockage et transport des dits déchets sont également décrites.

2.2.2.3. Maîtrise du risque chimique pour les autres phases du cycle de vie

A l'heure actuelle, aucune directive ne vise explicitement le risque chimique pouvant être généré par un produit lors de sa production ou de son utilisation.

Concernant la production, nous pouvons cependant estimer que ce domaine est couvert par les réglementations de type SEVESO II, qui introduisent le contrôle de l'usage des agents chimiques mis en œuvre dans les process de fabrication.

Concernant l'utilisation du produit manufacturé, le risque chimique présenté par ce dernier n'est pas clairement encadré par un texte réglementaire, comme peuvent l'être par exemple, les émissions atmosphériques générées par des véhicules (Règlement (CE) n° 715/2007 du Parlement européen et du

Conseil, du 20 juin 2007, relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 et Euro 6) et aux informations sur la réparation et l'entretien des véhicules).

2.3. Un nouveau paradigme réglementaire : le règlement européen REACH

2.3.1. Un nouveau règlement pour combler les lacunes de l'encadrement du risque chimique

2.3.1.1. Généralités

Le règlement REACH (Registration Evaluation and Autorisation of Chemicals) est entré en vigueur au sein des pays de la Communauté européenne le 1^{er} juin 2007 (Parlement Européen et Conseil Européen 2006). Ce texte recouvre environ 40 réglementations européennes touchant à la gestion des produits chimiques et vise :

- à encadrer un unique système de référencement des substances mises sur le marché (Enregistrement/Registration),
- à faire converger les évaluateurs vers une même méthodologie d'évaluation des risques chimiques (Evaluation),
- à réguler au mieux l'usage des substances les plus dangereuses, voire à les faire retirer du marché (Autorisation / Authorisation).

LEEUWEN et al. (Leeuwen, Hansen et al. 2007) indiquent que les lignes directrices du règlement REACH procèdent d'un ensemble de constats consignés en 2001 dans le Livre Blanc sur la Stratégie pour la future politique dans le domaine des substances chimiques (Commission des Communautés Européennes 2001). Le Livre Blanc propose sept objectifs qui prévalent à la définition du règlement REACH :

- **« Protéger la santé humaine et l'environnement.**
- **Préserver et renforcer la compétitivité de l'industrie chimique communautaire.**
- **Empêcher la fragmentation du marché intérieur.**
- **Accroître la transparence.** *Les consommateurs ont besoin d'avoir accès à des informations sur les substances chimiques, qui leur permettent de prendre des décisions en connaissance de cause sur les produits qu'ils utilisent, et les entreprises ont besoin de comprendre le système de réglementation.*

- **Intégrer les efforts déployés sur le plan international.** La mondialisation de l'industrie chimique et l'impact transfrontière de certains produits chimiques ont fait de la sécurité chimique une préoccupation internationale.
- **Promouvoir l'expérimentation non animale.** L'objectif de protection de la santé humaine et de l'environnement, y compris de la faune sauvage, doit être nuancé par des considérations relatives au bien-être des animaux de laboratoire. La Commission encouragera par conséquent le développement et la validation de méthodes d'essai n'utilisant pas d'animaux.
- **Se conformer aux obligations internationales de l'UE dans le cadre de l'OMC.** Il importe de ne pas créer d'obstacles inutiles au commerce, et il ne doit pas y avoir de discrimination à l'encontre des substances et des produits importés. »

La nouvelle réglementation proposée, au-delà de l'apport de réponses à chacun de ces sept objectifs, comporte également des éléments d'approche tout à fait novateurs concernant l'encadrement de la gestion des substances dangereuses.

2.3.1.2. Les principaux changements apportés par REACH à la réglementation européenne

2.3.1.2.1 Le passage d'une approche « danger » à une approche « risque »

Jusqu'à l'entrée en vigueur de REACH, les réglementations encadrant la gestion des produits chimiques sont orientées vers une **approche danger** : les mesures de prévention sont liées à la nature du danger d'une substance ou d'un mélange. ASSMUTH et al. (Assmuth, Hildén et al. 2010) soulignent, à travers REACH, le passage à une démarche centrée sur **l'évaluation du risque chimique**, d'où découlent l'ensemble des mesures des gestions des substances encadrées par les différentes prérogatives du règlement.

REACH met en avant la prise en compte de l'exposition des hommes et de l'environnement aux agents chimiques, en associant à la description du danger, celle de **l'usage**. En effet, si nous prenons l'exemple d'une peinture présentant un certain danger D, le risque auquel sera soumis l'opérateur sera différent si cette peinture est appliquée au pinceau ou à l'aérographe (aérosols), du fait de la différence de nature des voies d'exposition et conséquences sur l'organisme. De fait, REACH obligera le fabricant de peinture à spécifier les modes d'usages possibles et à proposer pour chaque cas les types de protections pertinentes, à défaut de quoi la peinture ne pourra être mise sur le marché.

Une évaluation du risque présenté par le mélange chimique devra donc être réalisée en amont de sa mise sur le marché, en tenant compte, de manière exhaustive, des modes d'exposition potentiels. Désormais, la réglementation pourra imposer le retrait du marché d'un agent chimique dont les caractéristiques « **danger, usage** » s'avèrent non conformes aux exigences prescrites.

2.3.1.2.2 Le principe de précaution (PP)

Le **principe de précaution** (cf § 3.1.1.2.2) s'applique lorsqu'il existe une incertitude scientifique sur le niveau ou la nature exacte de dommage provoqué par une substance sur l'homme ou l'environnement, bien qu'un lien de cause à effet de l'impact néfaste de cette substance soit établi.

LØKKE (Løkke 2006) étudie l'intégration du PP dans la réglementation européenne et notamment les apports substantiels du règlement REACH dans ce domaine. REACH tente d'établir un compromis entre les modes d'évaluation du risque chimique définis pour les « anciennes » et « nouvelles » substances, pour lesquelles les méthodologies mises en œuvre varient de simples caractérisations de danger à des études toxicologiques complexes.

Selon LØKKE, l'amélioration de la protection de la santé et de l'environnement pourrait être atteinte grâce à une véritable progression des connaissances sur les propriétés et usages des agents chimiques existants, via une accélération des procédures d'évaluation du risque chimique et une meilleure identification de la responsabilité de chaque acteur. Le PP permet de définir des groupes de substances particulièrement dangereuses, court-circuitant ainsi les procédures d'évaluation de leur risque chimique sur la base de la connaissance de leurs propriétés intrinsèques (dommages potentiellement irréversibles) : un encadrement de la gestion de ces substances peut alors être directement défini.

Ainsi, la mise en application du PP permet au législateur de fixer des priorités pour les substances reconnues les plus dangereuses, par la mise en œuvre de mesures de gestion drastique, et ouvre le champ à une augmentation des actions d'évaluation du risque chimique présenté par les autres substances mises sur le marché européen.

2.3.1.2.3 Le renversement de la charge de la preuve

REACH introduit une nouvelle approche quant à la **responsabilité du contenu des données relatives à la caractérisation du danger et l'évaluation des risques**. FÜHR et al. (Führ and Bizer 2007) pointent le changement apporté par cette réglementation au regard du cadre général fourni par l'ensemble des textes jusqu'alors applicables. Les évaluations de risque placées sous l'égide de la directive 793/93/EC étaient conduites par des organismes nationaux et notamment fondées sur des données fournies par les industriels. Le règlement REACH alloue désormais directement cette responsabilité aux industriels, fabricants et importateurs : c'est le **renversement de la charge de la preuve**. Les **industriels** doivent mettre en œuvre le **processus d'évaluation du risque chimique** pour la substance mise sur le marché, et préconiser, au regard des résultats, les **mesures de précaution nécessaires**. Ces responsabilités majeures, initialement conférées à des entités administratives, sont désormais transférées aux industriels. Ce n'est

plus l'Etat mais les industriels qui doivent rassembler les données pertinentes, mener les évaluations de risque, définir les mesures appropriées et communiquer l'ensemble des informations aux usagers.

2.3.2. Principaux mécanismes de mise en œuvre du règlement REACH

Le règlement REACH met en œuvre un ensemble de mécanismes visant à homogénéiser les pratiques de gestion des agents chimiques au sein du territoire européen. Le règlement, directement applicable à l'ensemble des pays membres (sans transposition dans leur droit national), fait également appel un vocabulaire relativement complexe, dont nous proposons un glossaire repris de (AIRBUS SAS, SAFRAN et al. 2008) en **table 1**, et que nous utiliserons dans la suite.

Table 1 : Principaux termes utilisés dans le règlement REACH

Article	Objet auquel sont donnés, au cours du processus de fabrication, une forme, une surface, ou un dessin particulier qui sont plus déterminants pour sa fonction que sa composition chimique.
Substance	Élément chimique ou ses composés à l'état naturel ou obtenu par un processus de fabrication, y compris tout additif nécessaire pour préserver la stabilité et toute impureté résultant du processus de mise en œuvre, mais à l'exclusion de tout solvant qui peut être séparé sans affecter la stabilité de la substance ou modifier sa composition.
Préparation	Mélange ou solution composée de deux substances ou plus sans qu'il n'y ait fabrication d'une nouvelle substance.
Fabricant	Toute personne physique ou morale établie dans la Communauté qui fabrique une substance dans la Communauté ; c'est-à-dire qui produit ou extrait des substances à l'état naturel.
Importateur	Toute personne physique ou morale établie dans la Communauté, qui est responsable de l'importation.
Distributeur	Toute personne physique ou morale établie dans la Communauté, y compris un détaillant, qui n'exécute que des opérations de stockage et de mise sur le marché d'une substance, telle quelle ou contenue dans une préparation, pour des tiers.
Utilisateur en aval	Toute personne physique ou morale établie dans la Communauté, autre que le fabricant ou l'importateur, qui utilise une substance, telle quelle ou contenue dans une préparation, dans l'exercice de ses activités industrielles ou professionnelles. Un distributeur ou un consommateur n'est pas un utilisateur en aval.

Le règlement s'applique à **l'ensemble des substances produites ou importées à plus de 1 tonne par an** (environ 30 000 substances). Quatre processus majeurs constituent les piliers du règlement : **l'enregistrement**, **l'évaluation**, la **restriction** et **l'autorisation** (Petry, Knowles et al. 2006; Leeuwen, Hansen et al. 2007).

2.3.2.1. L'enregistrement (Registration)

Les producteurs et importateurs doivent fournir les informations nécessaires concernant les propriétés de leurs substances et soumettre ces données sous forme d'un **dossier d'enregistrement** auprès de **l'Agence Européenne des Produits Chimiques**. Lorsque ces substances sont produites ou importées à plus d'une tonne par an, les industries doivent alors enregistrer l'ensemble des **usages**, qu'il s'agisse de la substance seule ou contenue dans une préparation. Dans le cas de volumes supérieurs à 10 tonnes par an, les industriels doivent renseigner un **rapport sur la sécurité chimique** (Chemical Safety Report) comprenant des informations sur les propriétés et dangers intrinsèques de la substance, ainsi que ses usages. Certaines substances ne sont pas soumises à la procédure d'enregistrement et sont mentionnées dans les annexes IV et V du règlement, parce qu'il existe suffisamment de données permettant de considérer qu'elles présentent un risque. **Une substance non enregistrée ne peut être mise sur le marché** (« pas de donnée, pas de marché »). La redevance versée à l'Agence pour l'enregistrement d'une substance varie entre 120€ et 50 000€.

2.3.2.2. L'évaluation (Evaluation)

Deux types d'évaluation coexistent :

- **L'évaluation du dossier d'enregistrement**: permet de déterminer la conformité de l'enregistrement avec la procédure relative et si les tests et données existants sont suffisants pour permettre l'évaluation de la substance, l'objectif étant notamment de limiter le nombre de tests sur les animaux.
- **L'évaluation des substances** : cette démarche est menée lorsqu'un Etat membre ou l'Agence émet des doutes quant à l'usage d'une substance, pouvant présenter des risques pour la santé ou l'environnement. L'Agence établit alors un plan de priorité et s'appuie sur les Etats membres pour procéder à une évaluation des substances, au sein d'organismes d'expertise nationaux. Ce type d'évaluation peut amener les autorités à proposer une **autorisation** ou une **restriction** quant aux usages de la substance.

2.3.2.3. L'autorisation (Authorisation)

L'Agence peut décider d'attribuer ou de refuser pour certaines substances, au regard des risques présentés, une **autorisation à la production, l'import ou l'utilisation**. Certaines catégories de substances seront directement soumises au processus d'autorisation :

- Les substances CMR 1 et 2 (cancérogènes⁴, mutagènes⁵, reprotoxiques⁶), dont le pouvoir est avéré sur l'homme et l'animal,
- Les PBTs (persistantes⁷, bio-accumulables⁸ et toxiques),
- Les vPvB (très persistantes et très bio-accumulables)
- Les substances ayant des propriétés équivalentes aux PBT ou vPvB, ou présentant des propriétés de perturbateur endocrinien⁹, mais non assimilables aux PBT et vPvB, et pour lesquelles il existe une évidence scientifique quant aux risques présentés pour l'homme ou l'environnement.

La charge de la preuve sera portée par le déclarant (celui soumettant une demande d'enregistrement ou d'autorisation), qui devra démontrer, à travers une étude, que le **risque** présenté par la substance est sous contrôle, ou que les **bénéfices socio-économiques** apportés par l'emploi de cette substance pour des usages particuliers prévalent et qu'il n'existe, dans l'état des connaissances actuelles, aucune substance ou technologie **alternative**.

Un des principaux buts du processus d'autorisation est ici d'encourager la **substitution** : les substances les plus critiques peuvent être remplacées par des substances ou technologies alternatives, si ces dernières sont économiquement et techniquement viables.

Les substances soumises à autorisation sont listées au sein de l'annexe XIV du règlement, cette liste étant périodiquement mise à jour. Ces substances sont identifiées parmi un ensemble de substances dites « candidates à l'autorisation », également désignées par l'acronyme **SVHC** (Substances of Very High Concern). La redevance versée à l'Agence pour la demande d'autorisation d'une substance varie entre 1500€ et 50 000€.

⁴Substance cancérogène : substance induisant des mécanismes provoquant le cancer.

⁵Substance mutagène : substance induisant des modifications du matériel génétique et défauts génétiques héréditaires.

⁶Substance reprotoxique : substance altérant les fonctions de reproduction ou provoquant des malformations du fœtus lors de la gestation.

⁷Substance persistante : substance résistant aux dégradations biologiques et physico-chimiques naturelles.

⁸Substance bio-accumulable : substance s'accumulant dans les organismes et par conséquent dans la chaîne trophique.

⁹ Perturbateur endocrinien : substance altérant les fonctions endocriniennes (production d'hormones...).

2.3.2.4. La restriction (Restriction)

L'Agence Européenne des Produits Chimiques ou un Etat membre peut proposer une restriction de fabrication, de mise sur le marché ou d'utilisation d'une substance. Cette restriction peut s'appliquer à la substance en tant que telle ou contenue dans un article.

Ce processus est considéré comme un « filet de sécurité », permettant de contrôler les risques qui n'auraient par ailleurs pas été pris en compte dans REACH.

2.3.2.5. La transmission de l'information au sein de la supply-chain¹⁰

Le règlement REACH décrit également une amélioration de la distribution de l'**information** relative au risque chimique présenté par une substance tout au long de la **supply-chain**. Le principal medium de diffusion de l'information est la **Fiche de Données de Sécurité (FDS)**, découpée en seize chapitres et contenant des données relatives aux propriétés physico-chimiques de la substance, mais également aux dangers, aux scénarii d'exposition et aux mesures pertinentes de management du risque chimique. Ainsi, tous les acteurs identifiés par REACH doivent être en mesure de communiquer les données nécessaires à la connaissance des risques d'une substance, dans le sens amont et aval de la chaîne de responsabilité.

¹⁰ Supply-chain : ensemble des fournisseurs et/ ou sous-traitants d'une entreprise

2.3.2.6. Vue générale de la structure du règlement

La figure 6 ci après, reprise de (Leeuwen, Hansen et al. 2007) propose une synthèse de la structure du règlement REACH et des différents domaines recouverts par le texte.

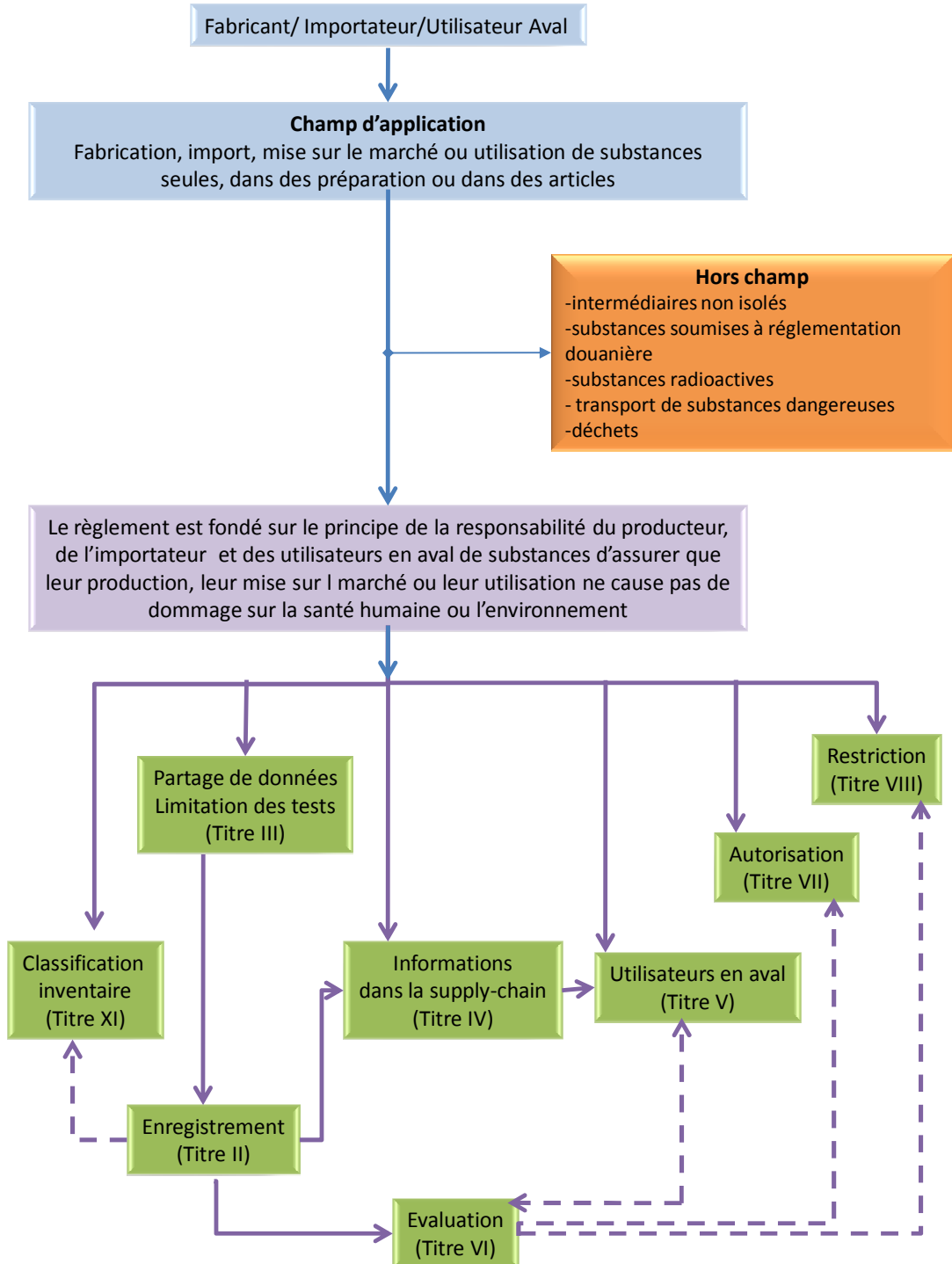


Figure 6 : Structure du règlement REACH traduite de (Leeuwen, Hansen et al. 2007)

Chapitre 3 : Contexte industriel général : principales interprétations du règlement REACH pour l'industrie manufacturière

3.1. Les principaux impacts relevés par les industriels

Le règlement REACH est applicable à toutes les activités industrielles (Marsh 2007). Au regard du règlement REACH, l'industriel mettant sur le marché des produits manufacturés relève principalement des statuts suivants :

- **Importateur** : d'alliages (sous forme de lingots, barres), de poudres, de produits chimiques entrants dans la réalisation de procédés (bains de traitement de surface...), d'articles...
- **Utilisateur en aval** : utilisation de préparations et substances dans les phases de fabrication, maintenance réparation, réalisation de certaines préparations (peintures thermiques, par exemple), actions de recherche et développement portant sur le produit en lui-même et les procédés.

➔ **De ces statuts découlent les obligations suivantes :**

- Vérification de la nécessité d'enregistrer les matériaux, substances et articles importés et mise en œuvre de la démarche d'enregistrement,
- Vérification des informations générées par les fournisseurs sur les contenus en substance, les scénarii d'exposition, la gestion des risques chimiques,
- Vérification de la présence de SVHC à plus de 0,1% en masse dans le produit final, mis sur le marché,
- Notification des substances utilisées dans les activités de recherche et de développement.

➔ **Les conséquences sont nombreuses :**

- Risque d'arrêt d'approvisionnement de certaines préparations contenant des SVHC,
- Risque de mauvaise gestion de l'information tout au long de la supply-chain,
- Augmentation des coûts d'approvisionnement,
- Mise en place de ressources dédiées à la gestion des exigences de REACH en interne,
- Mise en place de nouvelles pratiques d'approvisionnement, impliquant la conformité à REACH parmi les critères de choix habituellement pris en compte.

Des actions sont menées par les entreprises ou groupement d'entreprises afin de mettre en place les organisations efficaces permettant de répondre à REACH. Les plans de management des industriels sont

principalement constitués d'actions de lobbying vis-à-vis de l'Union Européenne et d'information de la supply-chain. Le règlement REACH fait apparaître aux industries manufacturières deux conséquences majeures portant sur les produits qu'elles conçoivent, fabriquent et mettent sur le marché (Lemagnen, Mathieux et al. 2009) : **l'obsolescence et la traçabilité des substances**.

Nous illustrerons la notion de **gestion de l'obsolescence** liée à une substance chimique à travers l'exemple de l'interdiction du plomb dans les équipements électriques et électroniques, via la directive RoHS. Bien que cette approche ne traite pas directement de REACH, la transposition est tout à fait évidente, quant à la problématique étendue posée par le règlement. La **gestion de la traçabilité** consistera en l'étude d'un document d'aide à l'implémentation de REACH, se concentrant sur la gestion des substances dans les articles. Les modes de gestion de la traçabilité sont pour le moment confidentiels au sein des entreprises manufacturières, et peu d'exemples sont aujourd'hui accessibles.

3.2. Les conséquences du règlement REACH sur la gestion des substances dangereuses présentes dans les produits manufacturés

3.2.1. Obsolescence

3.2.1.1. Définition

Dans un domaine d'activité donnée, les technologies mises en œuvre vont suivre une progression de leur niveau de maturité, depuis le stade de recherche et développement jusqu'à la mise au point d'une technologie éprouvée et qualifiée. VALERDI et al. (Valerdi and Kohl 2004) proposent une représentation du cycle de vie d'un produit et en définissent les différentes étapes en fonction des niveaux de maturité de technologie appliquée. La figure 7 indique que tout produit bénéficiant d'une technologie donnée, présentera une phase de développement, puis de maturité, et enfin, deviendra obsolète, la courbe en pointillés figurant le vieillissement du produit.

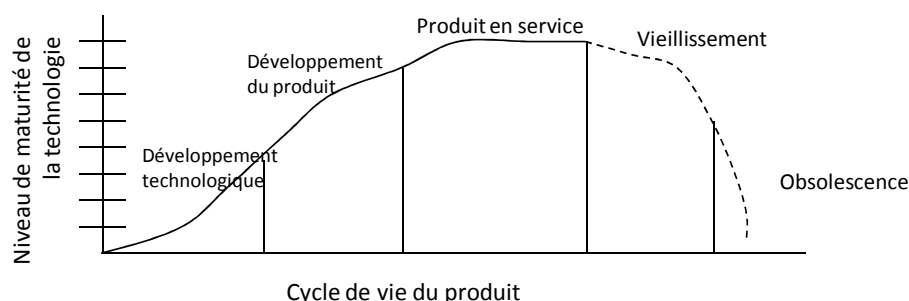


Figure 7 : Evolution du niveau de technologie en fonction de la vie du produit d'après (Valerdi and Kohl 2004)

Le vieillissement et l'obsolescence du produit sont provoqués par différents facteurs extérieurs. Un rapport de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (afssaps 2009), portant sur l'obsolescence des dispositifs médicaux (DM) introduit les causes de l'obsolescence, pouvant être transposée à d'autres types de dispositifs.

"L'obsolescence d'un DM a plusieurs origines :

a) la perte des performances initiales, imputable au vieillissement du DM, le rendant inapte à sa destination prévue ;

b) l'évolution des techniques médicales exigeant des performances pour une application donnée auxquelles ne souscrit plus un DM acquis pourtant pour cette application ;

c) l'évolution technologique, qui permet de s'affranchir aujourd'hui de risques techniques acceptés hier faute de mieux ;

d) l'évolution réglementaire, qui impose de respecter des règles ou de satisfaire à des performances nouvelles, auxquelles le DM n'est pas conforme."

Ainsi, dans le cas nous intéressant, REACh, en visant le retrait de certaines substances qualifiées de hautement dangereuses et pouvant être utilisée dans la mise en œuvre de certains procédés ou dans la composition de certains produits manufacturés, peut induire une obsolescence technologique, tel qu'indiqué dans la condition d) citée ci-dessus.

Le cas de l'interdiction du plomb dans les équipements électriques et électroniques exigée par la directive RoHS a conduit de nombreuses industries à traiter des cas d'obsolescence, ces dernières devant opérer un changement de process de fabrication (brasage des composés sans plomb), tout en conservant les fonctionnalités des produits finis. Cette démarche de gestion de l'obsolescence est particulièrement documentée au sein des industries aéronautiques et de défense.

3.2.1.2. Illustration : la gestion de l'obsolescence des composés au plomb dans les domaines de l'aéronautique et de la défense

3.2.1.2.1 Un parallèle entre la directive RoHS et le règlement REACh

La **directive RoHS**, transcrite en droit français sous forme du décret n° 2005-829 du 20 juillet 2005 (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable 2005) interdit aux fabricants d'équipements électroniques l'usage de certaines substances dangereuses. Ce texte réglementaire a pour conséquence l'élimination du plomb, cadmium, mercure, chrome hexavalent (Cr VI) et de retardateurs de flammes polybromés dans les matériaux utilisés dans les équipements, touchant ainsi non seulement aux sous ensembles tels que les composants électroniques et câbles, par exemple, mais également aux process de fabrication, tel que le brasage. Ainsi, les fabricants d'équipements électriques et électroniques ont dû

développer de nouvelles technologies afin d'atteindre le niveau de conformité requis par cette réglementation.

Un parallèle entre REACH et RoHS, sur la problématique d'une obsolescence induite par une interdiction réglementaire, peut donc être réalisé. Dans les deux cas, les textes réglementaires imposent une liste de substances à usage limité voire interdit, conduisant de fait les industriels à proposer des solutions techniques de substitution. Le règlement REACH, entré en vigueur depuis 2007, n'offre pas aujourd'hui le recul nécessaire en termes d'illustration de la gestion des obsolescences liées aux substances dangereuses qu'il vise. Cependant, nous pouvons largement nous appuyer sur le retour d'expérience relié à l'application de RoHS pour envisager les conséquences industrielles provoquées par l'interdiction de l'usage de certaines substances.

3.2.1.2.2 L'obsolescence des composés électroniques : conséquences pour les industries aéronautiques et de défense

Pour les industries aéronautiques et de défense qui fabriquent des équipements électriques et électroniques, bien qu'écartées du champ d'application de la directive RoHS, la problématique d'obsolescence des technologies a vu le jour. En effet, Les sous-ensembles utilisés dans la fabrication des équipements, principalement achetés auprès de fournisseurs impactés par la réglementation RoHS, ont subi la mise en conformité requise et ne correspondent plus, en termes de réponses techniques, aux exigences technologiques émises par les cahiers des charges des industries aéronautiques et de défense. Ces industries, dites de niche et mettant sur le marché des produits de haute technologie et à durée de vie élevée, ont subi de plein fouet la modification technologique imposée par l'interdiction des substances listées par RoHS. De plus, le problème a été amplifié par l'incompatibilité des cycles de développement et de qualification des produits (en moyenne de trois à cinq ans) : pour les programmes arrivant au stade de la mise en production au moment de l'application de RoHS, certaines technologies choisies en début de développement étaient déjà obsolètes (Gravier and Swartz 2009).

Dans le cas précis de l'interdiction du plomb, RENTSCH (Rentsch 2008) identifie notamment les impacts suivants, liés à l'obsolescence des composants au plomb :

- **Impact sur la fiabilité des systèmes :**
 - L'utilisation conjointe de procédés de brasage sans plomb et étain/plomb réduit la durée de vie et la fiabilité de la brasure,
 - Les températures plus élevées mises en œuvre dans le cadre des procédés sans plomb altèrent la durée de vie des composants,
 - Les phénomènes de whiskers¹¹ d'étain est accru avec la technologie sans plomb, induisant une augmentation du risque de défaillances,
 - Les données et modèles permettant la validation et la qualification des technologies sans plomb n'existent pas.
- **Impact sur le coût de production :** un surcoût est induit par la mise en œuvre de nouveaux process de fabrication sans plomb,
- **Impact sur la maintenance et la réparation :** un surcoût est également constaté, en raison de la nécessité du maintien de deux lignes de fabrication (avec et sans plomb).

Cet état de fait mobilise l'ensemble de la profession à travers la création de programmes de recherche visant à introduire de nouvelles technologies pouvant répondre aux besoins propres des équipements aéronautiques et de défense d'une part, et dans la mise en place de systèmes de gestion des nouveaux composants sans plomb dans la logistique de production et de maintenance, d'autre part.

3.2.1.2.3 Mise en œuvre de plans de management de l'obsolescence des composés au plomb

SIMMONDS (Simmonds 2006) présente un ensemble de programmes de recherche centrés sur la substitution des matériaux visés par RoHS, notamment le plomb, le cadmium, le chrome hexavalent. Ces programmes sont portés par différents grands industriels du domaine. Un groupe de travail international, le LAEWG (Lead-free Aerospace Electronics Working Group) a pour objectif de développer une norme dédiée aux industries aéronautiques afin de mettre en place des modes de management et des standards applicables aux équipements avioniques.

¹¹ Whiskers : fins filaments métalliques croissants depuis une surface métallique. Dans un système électronique, les whiskers peuvent provoquer des courts circuits et induire des défaillances.

Le GIFAS (Groupement des Industries Aéronautiques et Spatiales Françaises), acteur majeur du paysage aéronautique français, a publié un guide de management des obsolescences de composants (GIFAS 2005). Les rôles et responsabilités des différents acteurs de la supply-chain sont identifiés et explicités (voir figure 8), des mesures de management préventif (au moment de la conception de l'équipement) et de management curatif (obsolescence identifiée pour un équipement en service) sont exposées.

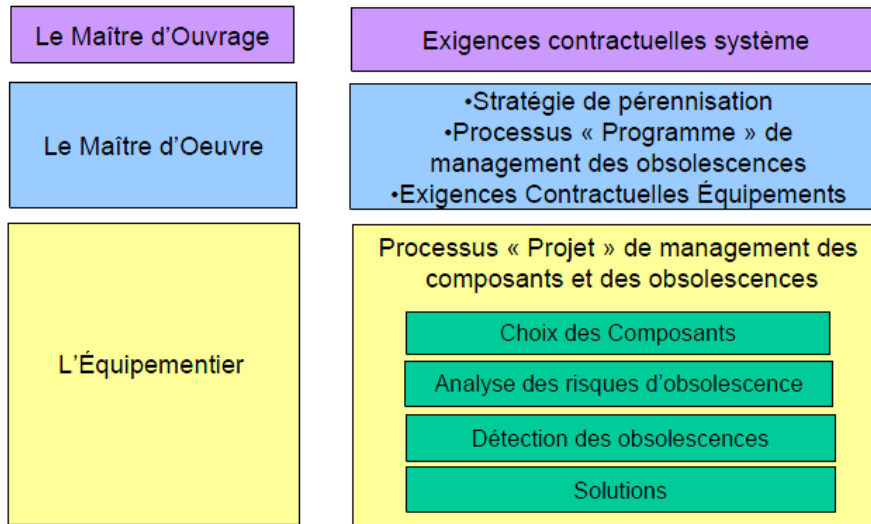


Figure 8 : Responsabilité des acteurs de la supply-chain aéronautique, in (GIFAS 2005)

3.2.1.3. Bilan

L'obsolescence des technologies utilisées pour la réalisation d'un produit manufacturé, induite par l'interdiction d'une substance, a des répercussions importantes au sein des industries, en terme d'efforts de recherche, mais également de modification et d'adaptation des activités et organisations. Bien que non développée dans la suite de l'étude, cette réalité industrielle liée à une modification du cadre réglementaire de la gestion des produits chimique doit être soulignée. Au regard du champ d'application du règlement REACH, la gestion des obsolescences laisse entrevoir de nombreuses mutations technologiques dans les décennies à venir.

3.2.2. Traçabilité des substances

3.2.2.1. Exigences relatives au contenu en substances d'un article

3.2.2.1.1 Exigences incluses dans le règlement

Le règlement REACH introduit une nouveauté dans la gestion du risque chimique en s'intéressant aux substances présentes dans les articles. Les exigences sont décrites dans les articles 7 et 33 du règlement.

L'article 7 vise à faire adopter la démarche d'enregistrement et de notification auprès de l'Agence, également dans le cas d'une substance présente dans un article, selon les conditions suivantes :

Article 7

Enregistrement et notification des substances contenues dans des articles

« **1.** *Tout producteur ou importateur d'articles soumet une demande d'enregistrement à l'Agence pour toute substance contenue dans ces articles, si toutes les conditions suivantes sont remplies:*

- a) la substance est présente dans ces articles dans des quantités supérieures au total à 1 tonne par producteur ou importateur par an;*
- b) la substance est destinée à être rejetée dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation.*

Toute demande d'enregistrement est accompagnée de la redevance exigée conformément au titre IX.

2. *Tout producteur ou importateur de produits notifie à l'Agence conformément au paragraphe 4 du présent article, si une substance répond aux critères énoncés à l'article 57 et est identifiée conformément à l'article 59, paragraphe 1, si les deux conditions suivantes sont remplies:*

- a) la substance est présente dans ces articles dans des quantités supérieures au total à 1 tonne par producteur ou importateur par an;*
- b) la substance est présente dans ces articles dans une concentration supérieure à 0,1 %masse/masse (w/w).*

3. *Le paragraphe 2 n'est pas applicable lorsque le producteur ou l'importateur peut exclure l'exposition des êtres humains et de l'environnement dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation, y compris l'élimination. Dans de tels cas, le producteur ou l'importateur fournit des instructions appropriées au destinataire de l'article.*

4. Les informations à notifier comprennent les éléments suivants:

- a) l'identité et les coordonnées du producteur ou de l'importateur conformément à l'annexe VI, section 1, à l'exception de leurs propres sites d'utilisation;
- b) le ou les numéros d'enregistrement visés à l'article 20, paragraphe 1, le cas échéant;
- c) l'identité de la ou des substances conformément à l'annexe VI, sections 2.1 à 2.3.4;
- d) la classification de la ou des substance(s) conformément à l'annexe VI, sections 4.1 et 4.2;
- e) une brève description de la ou des utilisations de la ou des substances contenues dans l'article conformément à l'annexe VI, section 3.5, et des utilisations du ou des articles;
- f) la fourchette de quantité de la ou des substances, par exemple 1-10 tonnes, 10-100 tonnes, etc..

5. L'Agence peut prendre des décisions imposant aux producteurs ou aux importateurs d'articles de soumettre une demande d'enregistrement, conformément au présent titre, pour toute substance contenue dans ces articles, si toutes les conditions suivantes sont remplies:

- a) la substance est présente dans ces articles dans des quantités supérieures au total à 1 tonne par producteur ou importateur par an;
- b) l'Agence a des raisons de suspecter que:
 - i) la substance est rejetée par les articles, et
 - ii) le rejet de la substance par les articles présente un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement;
- c) la substance n'est pas soumise au paragraphe 1.

Toute demande d'enregistrement est accompagnée de la redevance visée au titre IX.

6. Les paragraphes 1 à 5 ne sont pas applicables aux substances qui ont déjà été enregistrées pour cette utilisation.

7. À partir du 1er juin 2011 les paragraphes 2, 3 et 4 sont applicables six mois après qu'une substance a été identifiée conformément à l'article 59, paragraphe 1.

8. Toute mesure de mise en œuvre des paragraphes 1 à 7 est adoptée conformément à la procédure visée à l'article 133, paragraphe 3. »

Le guide édité par AIRBUS et SAFRAN (AIRBUS SAS, SAFRAN et al. 2008) concernant la lecture du règlement REACH interprète l'article 7 de la manière suivante :

« Obligation d'enregistrement si la substance :

- *Est présente dans les articles dans des quantités supérieures au total à 1 tonne par an par producteur et importateur **ET***
- *Est destinée à être rejetée dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation **ET***
- *N'a pas déjà été enregistrée pour cette utilisation.*

Obligation de notification si la substance :

- *Appartient à la liste des substances candidates à l'autorisation (SVHC) **ET***
- *Est présente dans les articles dans des quantités supérieures au total à 1 tonne par an **ET***
- *Est présente à une concentration supérieure à 0,1% masse/masse **ET***
- *N'a pas été enregistrée pour cette utilisation **ET***
- *Ne peut être exclue, par le producteur ou l'importateur, d'un schéma d'exposition vis-à-vis des êtres humains ou de l'environnement, dans les conditions normales et raisonnablement prévisibles d'utilisation, tout au long du cycle de vie, y compris l'élimination »*

L'article 33 exige du fournisseur la transmission d'informations relatives à la composition de l'article :

Article 33

Obligation de communiquer des informations sur les substances contenues dans des articles

« 1. Tout fournisseur d'un article contenant une substance répondant aux critères énoncés à l'article 57 et identifiée conformément à l'article 59, paragraphe 1, avec une concentration supérieure à 0,1 % masse/masse (w/w), fournit au destinataire de l'article des informations suffisantes dont il dispose pour permettre l'utilisation dudit article en toute sécurité et comprenant, au moins, le nom de la substance.

2. Sur demande d'un consommateur, tout fournisseur d'un article contenant une substance répondant aux critères énoncés à l'article 57 et identifiée conformément à l'article 59, paragraphe 1, avec une concentration supérieure à 0,1 % masse/masse (w/w), fournit au consommateur des informations suffisantes dont il dispose pour permettre l'utilisation dudit article en toute sécurité et comprenant, au moins, le nom de la substance.

Les informations pertinentes sont fournies, gratuitement, dans les 45 jours qui suivent la réception de la demande. »

Ici, l'obligation de communication de la composition de l'article s'applique sans seuil de tonnage. Cependant aucun formalisme particulier n'est exigé pour communiquer cette information. Le niveau de détail sera établi au cas par cas, en fonction des utilisations, exposition et risques spécifiques vers les destinataire ou consommateur (AIRBUS SAS, SAFRAN et al. 2008).

3.2.2.1.2 Guide d'interprétation des exigences relatives aux substances présentes dans les articles édités par l'Agence Européenne

L'Agence Européenne a rédigé en 2008 un document technique offrant une interprétation des articles sus-cités (European Chemicals Agency 2008). Ce document propose tout d'abord de lever, autant que possible, l'ambiguïté portant sur les définitions de certains termes employés dans le texte du règlement (« article », « condition normale d'utilisation »,...)

Le document est complété par un ensemble de logigrammes et d'exemples de calculs d'application illustrant concrètement les conditions d'éligibilité des substances présentes dans les produits manufacturés aux articles 7 et 33, et le type d'information devant être transmis dans la chaîne d'acteurs.

L'article 33 nous intéresse particulièrement, ses conditions d'applications sont moins restrictives que celles de l'article 7, et son potentiel d'application est plus important. Le producteur ou l'importateur d'un produit manufacturé devra désormais être capable de déterminer si celui-ci contient une substance SVHC¹², et si cette dernière est présente à une concentration supérieure à 0,1% en masse. Cette approche sous entend donc une réelle capacité à mobiliser les données nécessaires permettant de délivrer au consommateur ou utilisateur du produit les informations exigées. Nous reprenons dans la figure 9 le logigramme proposé par (European Chemicals Agency 2008), permettant de déterminer le cas où un produit manufacturé est soumis à l'article 33.

¹² Substance SVHC : Substance of Very High Concern, candidate ou soumise à autorisation, cf § 3.3.2.3

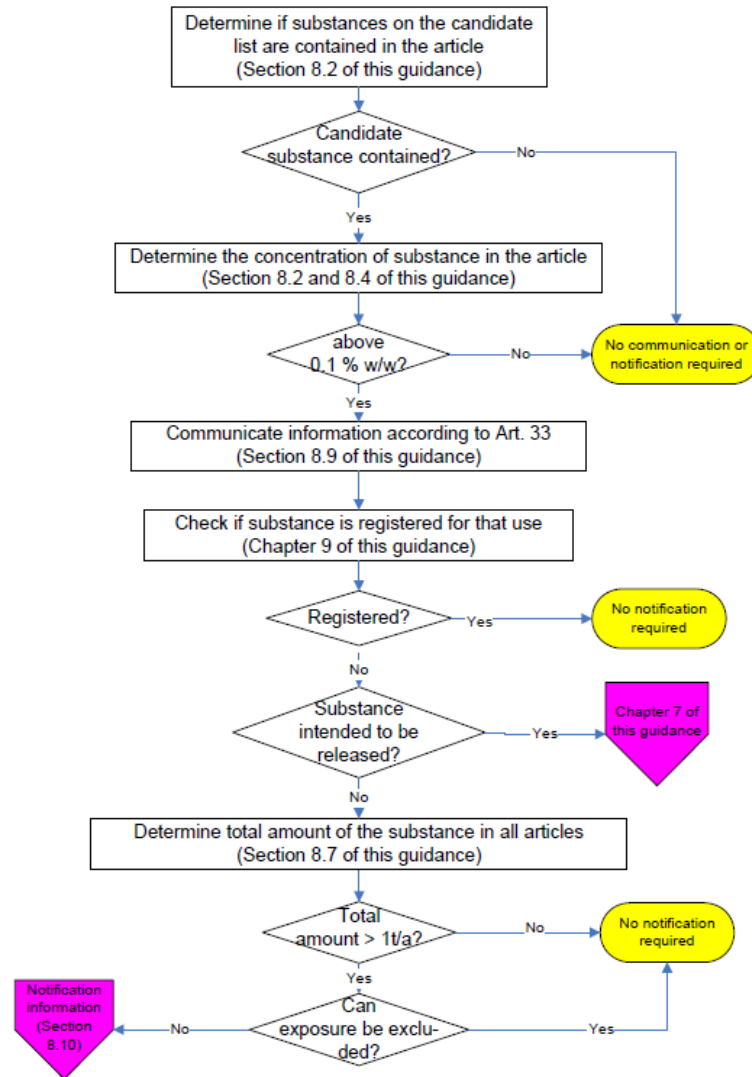


Figure 9 : Applicabilité des articles 33 et 7 à une substance présente dans un « article », in (European Chemicals Agency 2008)

C'est donc en s'appuyant sur la définition même de l'article, sa structure en termes de matériaux, revêtements et traitement divers que l'industriel peut remonter à la composition chimique.

3.2.2.2. Extension du processus industriel de traçabilité à l'identification de substance chimiques

La norme ISO 9000:2000 définit la traçabilité comme l'« aptitude à retrouver l'historique, la mise en œuvre ou l'emplacement de ce qui est examiné ». Dans le domaine industriel aéronautique, l'acceptation du terme traçabilité correspond au processus permettant, à partir d'un système de référencement, de relier l'ensemble des composants d'un produit manufacturé à leurs dossiers de définition et de fabrication, ainsi qu'aux évolutions successives de ces derniers, dans le but de connaître avec exactitude les justifications des

solutions techniques choisies, la nature des matériaux et procédés mis en œuvre pour la réalisation. Ces dispositions participent en outre à la gestion de configuration.

Les exigences émises dans l'article 33 du règlement REACH peuvent être traduites comme l'ajout d'une information supplémentaire dans l'ensemble des données gérées via un processus classique de traçabilité industriel, i.e, la composition chimique du produit manufacturé, à 0,1% près. **Cette donnée est-elle aisément accessible ?**

→ Prenons l'exemple simple d'une vis, utilisée dans un équipement aéronautique. Cette vis a pour référence **HM10-60 suivant la norme EN 4322 :2004**. Pratiquement, ce code signifie qu'il s'agit d'une vis « *de section 10mm, de longueur 60mm, à tête bihexagonale avec trous de fil frein, fût dégagé, filetage long, en alliage de titane TI-P64001, anodisée, revêtue de MoS2- Classe de résistance:1.100 MPa (à température ambiante)* ». Si ces données sont suffisantes pour la mise en production de l'équipement, elles ne donnent cependant aucun renseignement direct quant aux concentrations de titane, chrome et disulfure de molybdène présents. Dans ce cas, il est nécessaire de procéder à des investigations supplémentaires (masse totale de la vis, masse du traitement déposé...) pour déterminer les concentrations respectives des espèces chimiques.

En nous référant au logigramme proposé en figure 9, nous constatons qu'il existe un premier point bloquant dès la deuxième étape, qui sera en partie résolu par une adaptation des processus de traçabilité mis en œuvre dans les activités manufacturières. Les modes actuels de traçabilité permettent de connaître de façon macroscopique la nature des matériaux et traitements utilisés dans la composition d'un produit. REACH demande un niveau de précision supplémentaire : connaissance et quantification des substances en présence.

3.2.2.3. Pistes de réponses à la problématique de traçabilité des substances dans l'industrie

La mise en œuvre du processus de traçabilité, dans son acception étendue aux exigences du règlement REACH, n'est pas aujourd'hui mature. Des pistes sont proposées dans des guides mis à disposition par l'Agence Européenne ou des fédérations industrielles. Ainsi, le guide portant sur les substances dans les articles, précédemment cité, invite les industriels à développer des systèmes d'interrogation des fournisseurs quant à la composition des préparations ou sous-ensembles achetés entrant dans la fabrication de l'article, de se référer aux données existantes dans les fiches de données de sécurité, voire de procéder à des analyses chimiques des articles. La Fédération des Equipementiers Automobiles, à travers un guide dédié à la mise en œuvre des réponses au règlement REACH dans leurs industries (Task Force on REACH 2008), décrit une stratégie de réponse en s'appuyant notamment sur des systèmes de collecte de données sur les matériaux et substances pré-existants (IMDS, MACSI).

3.2.2.4. Bilan

Dans le cadre de la fabrication d'un produit, le manufacturier emploie des matières premières, des préparations (colles, peintures, résines, etc...), voire des sous-ensembles achetés à un fournisseur. Le règlement REACH impose :

- La justification de la réalisation de la démarche d'enregistrement, sous entendant la transmission à l'Agence d'un dossier adéquat,
- La communication du contenu en substance des préparations et articles, dans le cas où ces derniers contiennent des substances très dangereuses.

Ces actions représentant un coût non négligeable pour le producteur de substance / préparation ou l'importateur, la décision peut être prise de retirer la substance incriminée du marché. Dans ce cas, la disparition de la substance induit une **obsolescence** de toutes les préparations et / ou articles qui la contiennent. Dans une autre mesure, l'obligation de fournir des informations quant au contenu en substance d'un article mis sur le marché est également à l'origine d'une nouvelle activité pour le manufacturier. Ce dernier doit en effet être capable de connaître la composition exacte du produit mis sur le marché, et pouvoir préciser à 0,1% près (ratio masse de substance / masse totale de l'article) la concentration en substance très dangereuse. Afin de répondre aux exigences de gestion de l'information chimique demandée par REACH, l'entreprise manufacturière doit mettre en place un système de **traçabilité des substances**. Ce contexte et ses conséquences sont résumés figure 11.

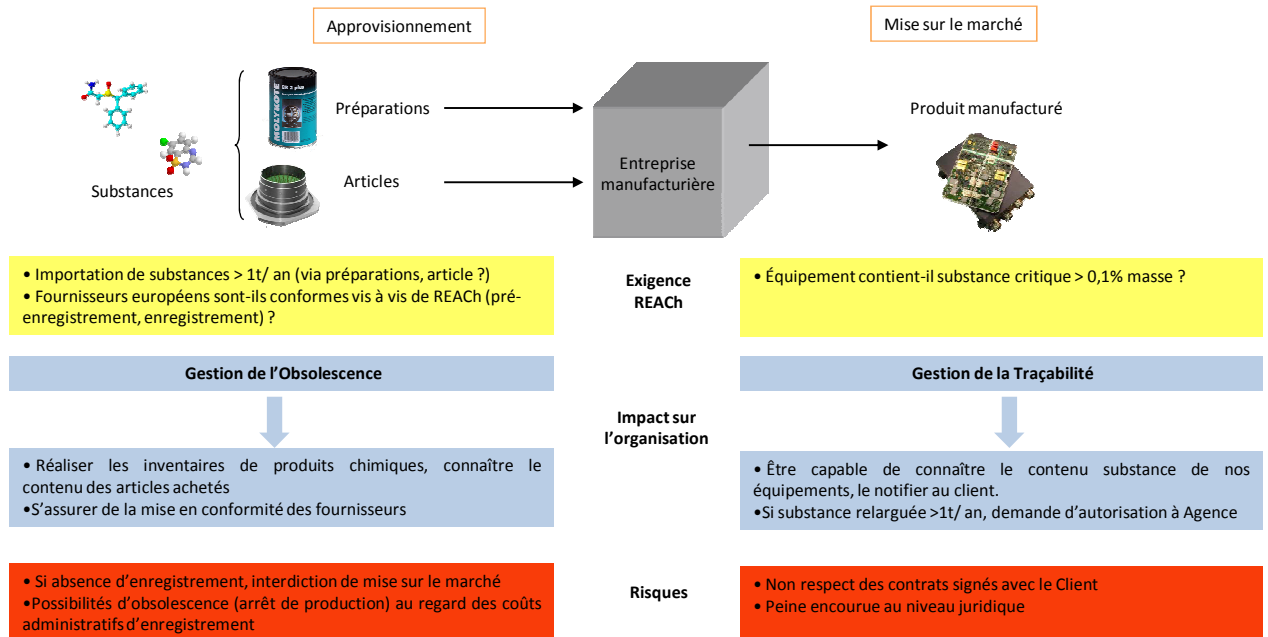


Figure 11 : Conséquences des exigences du règlement REACH sur l'organisation d'une entreprise manufacturière

Les quelques lignes de l'article 33 du règlement REACH sont ainsi à l'origine de nombreuses interrogations au sein du monde industriel. Jusqu'alors, la problématique du contenu en substance des produits manufacturés mis sur le marché n'était pas abordée (la directive RoHS a conduit à l'élimination progressive des six substances listées dans les applications électriques et électroniques). Désormais, au-delà de la gestion des données techniques caractérisant le produit, l'industriel doit déployer un système lui permettant de connaître, pour tout produit mis sur le marché, la présence de substance(s) SVHC, de manière précise, voire d'identifier les risques liés à ce(s) substance(s) au cours du cycle de vie du produit.

3.3. Anticiper la gestion des substances dès la conception des produits manufacturés

Brièvement évoquée à travers le paragraphe 2.2.2, l'activité de conception est une source potentielle d'amélioration des caractéristiques environnementales d'un produit manufacturé. Les substances dangereuses présentes dans les différents éléments de composition du produit (matériaux, revêtements...) peuvent être retirées ou réduites lors des choix de conception. Ainsi, la directive RoHS a ouvert à la voie à ce type de démarche, en interdisant, dès la conception d'un équipement électrique ou électronique, le recours à un certain nombre de substances dangereuses au sein des matériaux et revêtements constitutifs de l'équipement final.

Chapitre 4 : Contexte de l'étude : l'industrie aéronautique

Les présents travaux de recherche ont été menés au sein de sociétés d'équipementiers aéronautiques. Le présent paragraphe propose, à travers une description générale de l'industrie et du produit aéronautique et des principaux enjeux environnementaux, de positionner le cadre de la recherche.

4.1. Caractéristiques générales de l'industrie et du produit aéronautique

4.1.1. L'industrie aéronautique

L'industrie aéronautique qui est caractérisée par un marché mondial segmenté, propose des produits de très haut niveau technologique. Dans un rapport adressé au Premier Ministre Français, concernant l'état des lieux de cette industrie, MICHOT (Michot 2004) dresse le panorama des différents acteurs industriels. Les applications aéronautiques se répartissent, en chiffre d'affaire, pour environ 70% dans le domaine civil et 30% dans le domaine militaire. Le nombre d'acteurs majeurs de cette industrie, avionneurs, motoristes et équipementiers, est finalement peu élevé, du fait de l'effort conséquent nécessaire en termes de développement, validation et mise en œuvre des produits. La figure 12 propose une représentation de la segmentation de ce marché, indiquant les liens fournisseurs clients entre les différentes familles d'industriels d'une part, et fait référence aux grandes entreprises présentes actuellement dans le domaine, d'autre part.

Le domaine de l'aviation civile est caractérisé par une très haute compétitivité. Les acteurs, peu nombreux, doivent se démarquer grâce à une politique optimale de gestion des coûts et des performances. En outre, l'industrie aéronautique est soumise à des cycles, i.e, des niveaux de productions très élevés ou très faibles, que l'auteur impute à des caractéristiques structurelles intrinsèques.

Après avoir connu une croissance de l'ordre de 11% par an entre les années 1970 et 1980, puis de 5% par an jusqu'en 2001, le trafic aérien a connu une crise majeure reliée aux attentats du 11 septembre aux Etats-Unis. Reparti à la hausse depuis quelques années, le parc actuel d'avions commerciaux (plus de 100 places) s'élève à environ 12 000 aéronefs. Avec une croissance prévue de l'ordre de 5% par an, ce parc devrait compter jusqu'à 25 000 unités en 2020.

Le domaine de l'aviation militaire est un secteur fermé à l'exploitation commerciale, notamment en raison des contraintes de « secret défense ». Dans ce cadre, la notion de marché avec retour sur investissement, à l'inverse du marché civil, est exclue. Bien que la flotte mondiale d'avions de combat suive une tendance à la réduction, ces appareils demeurent néanmoins des équipements stratégiques pour les nations devant assurer la maîtrise de leur espace aérien et ainsi protéger leur souveraineté. Concernant les

avions « lourds » (avion de transport, de mission...), le parc mondial vieillissant conduit à la mise en œuvre de programmes de renouvellement, le besoin étant évalué à environ 1500 appareils d'ici à 2020 pour la branche transport.

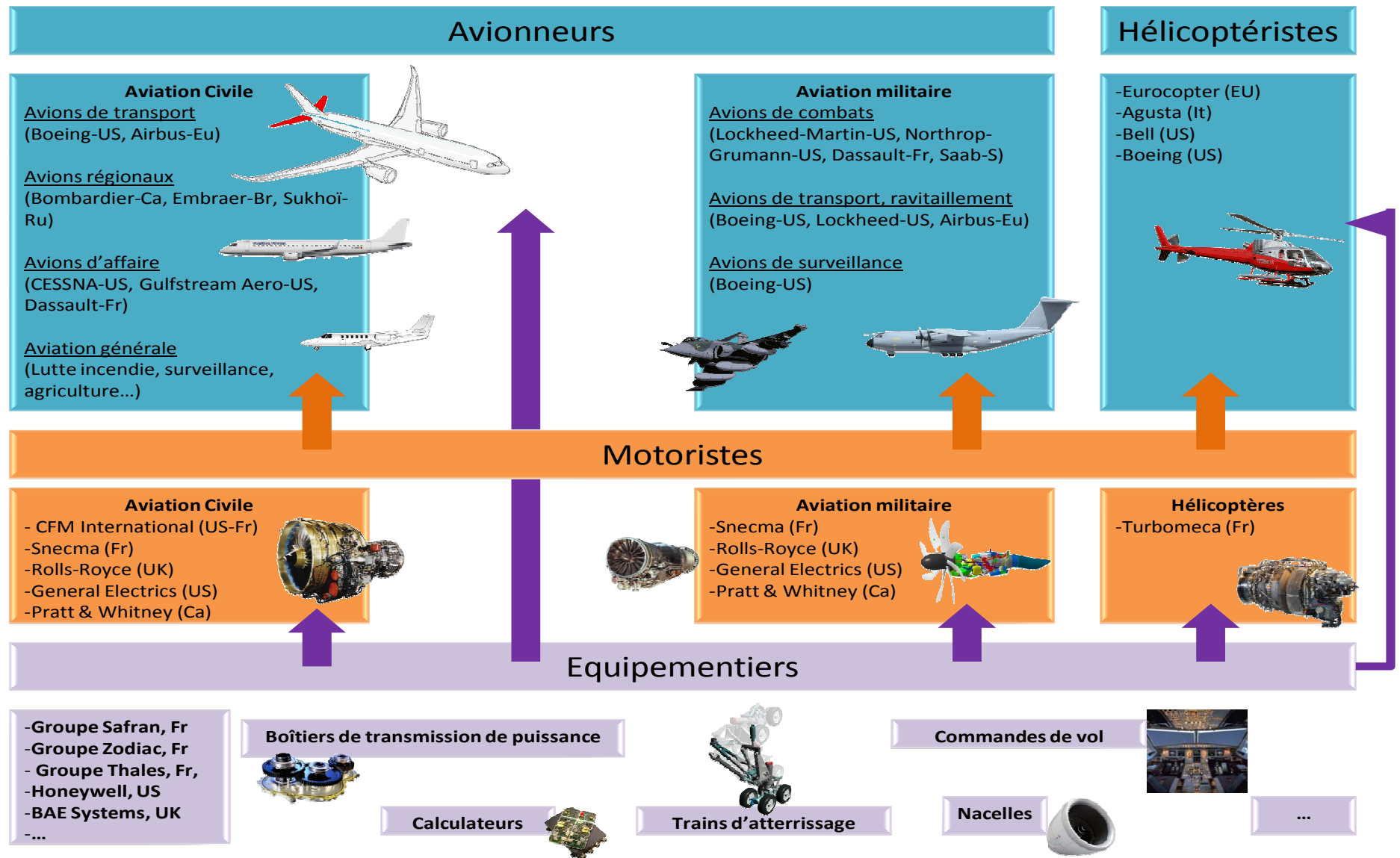


Figure 12 : les principaux domaines d'activités de l'aéronautique et les principaux acteurs industriels (nota : les flèches indiquent un lien fournisseur / client)

4.1.2. Le produit aéronautique

« Produit aéronautique » est l'expression générique que nous avons choisie pour désigner l'ensemble des éléments issus de l'industrie aéronautique : depuis l'aéronef en passant par les moteurs et tous les autres équipements constitutifs de l'aéronef, quelle que soit leur destination finale au sein de celui-ci (trains d'atterrissage, nacelles, toboggans ...). Le produit aéronautique présente des caractéristiques très particulières, résumées par HARSCOET (Harscoet 2007) :

- Très haute technologie,
- Longue durée de vie des programmes (jusqu'à 40 ans),
- Longue durée d'utilisation (20-30 ans) intégrant des phases de maintenance nombreuses et complexes.

A ces caractéristiques peuvent être ajoutées les contraintes élevées en termes de sûreté de fonctionnement, un processus de développement long (5 ans en moyenne aujourd'hui) engendrant des coûts conséquents, enfin, le faible nombre d'unités mises sur le marché par an (entre 600 et 800 aéronefs dans le domaine civil).

4.2. Impacts environnementaux, exigences environnementales et réponses du secteur

4.2.1. Principaux aspects environnementaux du produit aéronautique

L'augmentation du trafic aérien générera, selon les prévisions moyennes, un doublement du nombre d'aéronefs en service d'ici à 2020. Cette activité, comme toute activité industrielle, présente un corollaire important que sont les nuisances environnementales. Depuis une quarantaine d'années, la problématique environnementale occupe une place croissante au sein des préoccupations de l'industrie aéronautique. Les principales nuisances liées au trafic aérien (détaillées en annexe 1) se concentrent dans quelques domaines :

- **Bruit** : les aéroports, souvent situés près de zones habitées, sont source de nuisances sonores importantes. Au décollage, le bruit mesuré à proximité d'un réacteur s'élève à environ 130 dB, niveau correspondant au seuil de douleur pour l'oreille humaine.
- **Pollution atmosphérique** : la combustion du carburant génère différents gaz et particules dont la réactivité avec l'atmosphère engendre des phénomènes de pollution. En fonction des couches atmosphériques atteintes, ces gaz et particules peuvent contribuer aux phénomènes d'effet de serre ou d'appauvrissement de la couche d'ozone.

- **Consommation des ressources fossiles** : le carburant utilisé pour le fonctionnement des moteurs, mais également toutes les phases d'essais est le kérosène, issu du raffinage du pétrole. Cette ressource est limitée.

Le champ des sources d'impacts liés à l'activité aéronautique doit également prendre en compte les structures de production et les structures aéroportuaires, à l'origine d'impacts environnementaux inhérents aux activités qu'elles hébergent (pollution de l'air, de l'eau, des sols, utilisation des sols, etc...). La figure 13 propose de synthétiser, au regard du cycle de vie d'un produit aéronautique, les étapes sources d'impacts environnementaux. Un complément sur la nature des aspects et impacts environnementaux du produit aéronautique est proposé en annexe 1.

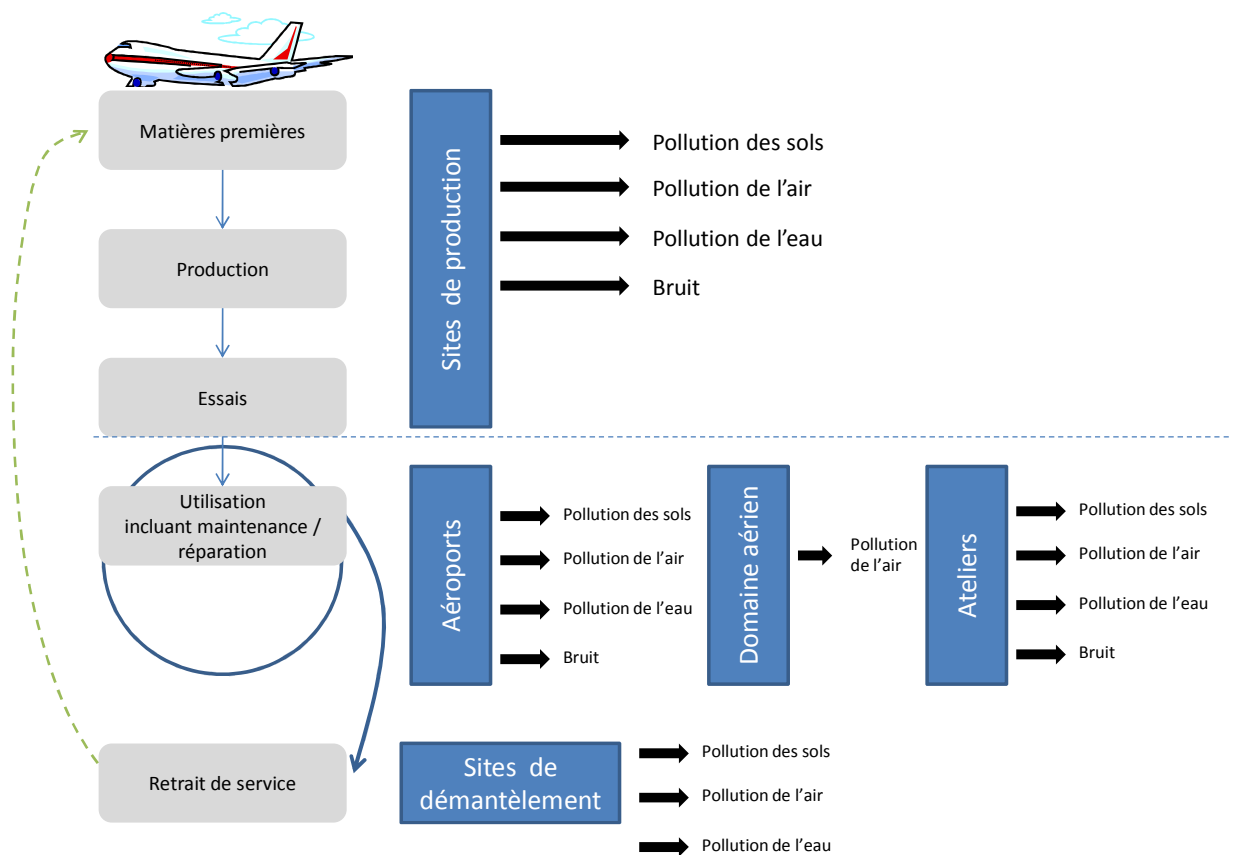


Figure 13 : Impacts environnementaux générés au cours du cycle de vie d'un produit aéronautique

4.2.2. Typologie des exigences environnementales

4.2.2.1. *Certifications et réglementations*

4.2.2.1.1 Certifications

Le processus de certification s'appuie sur des normes et recommandations décrites par différentes instances internationales, dont l'objectif est la délivrance du **certificat de navigabilité**, indispensable pour exploiter l'aéronef (autorisation de vol). Dans le cadre environnemental, les niveaux de bruit et d'émission des moteurs sont évalués selon les standards puis validés.

L'**ICAO** (International Civil Aviation Organization) est une agence spécialisée des Nations Unies, et a pour mission de normaliser les principes et techniques de navigation aérienne, mais aussi de promouvoir le développement du trafic aérien. Ses activités environnementales sont portées par le **CAEP** (Committee on Aviation and Environmental Protection), dont les travaux sont principalement focalisés sur les émissions aériennes, la réduction du bruit et les coûts économiques reliés à ces impacts. Les recommandations environnementales sont établies à l'annexe 16 de la Convention sur l'Aviation Civile Internationale (Convention de Chicago), fixant les statuts et missions de l'ICAO, signée en 1944, et amendée plusieurs fois depuis (dernière version 2006) (ICAO 2010).

L'**EASA** (European Aviation Safety Agency), est une agence de l'Union Européenne créée en 2003 ayant notamment pour mission de procéder à la certification des aéronefs et équipements, et délivrer des agréments aux organisations assurant la conception, la fabrication et l'entretien des produits aéronautiques. L'agence a pour mission de vérifier l'application des recommandations établies à l'annexe 16 de la Convention de Chicago, en application du règlement européen n°1701/2003 du 24 septembre 2003 :

«Article I.

Les produits, les pièces et les équipements satisfont aux exigences de protection de l'environnement de la convention de Chicago telle que publiée en mars 2002 pour le volume I et en novembre 1999 pour le volume II, à l'exclusion des appendices de l'annexe 16.»

L'EASA définit des spécifications de certification pour les émissions atmosphériques et le bruit, compilées dans les annexes du standard **PART 21** (ICAO 2010).

4.2.2.1.2 Réglementations

L'aéronautique est principalement soumise à la législation européenne qui porte sur les impacts du bruit, les quotas de gaz à effet de serre et REACh :

- **La directive n°2002/49** du 25 juin 2002 porte sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement, imposant notamment la mise en œuvre d'une cartographie du bruit, de jour et de nuit, pour les aéroports et aérodromes.
- **La directive n°2008/87/CE** du 13 octobre 2003 met en place un système d'échange de quotas de gaz à effet de serre (GES). Des quotas d'émission sont attribués aux entreprises les plus fortement émettrices, pouvant ensuite les revendre si elles ne les ont pas utilisés ou au contraire acheter des quotas supplémentaires si cela est nécessaire. Les activités aériennes seront couvertes par la directive à compter du 2 février 2012.
- **le règlement REACh** s'applique à l'industrie aéronautique, à la différence des autres réglementations européennes portant sur les matériaux et substances entrant dans la composition du produit. Le secteur du transport aérien est en général exclu, notamment au motif des contraintes liées à la sûreté de fonctionnement des aéronefs.

Ces règles législatives s'appliquent en sus de la réglementation EASA qui délivre les certificats et agréments indispensables à l'autorisation de navigabilité des aéronefs.

4.2.2.2. **Les parties intéressées**

La norme ISO 14001:2004 définit une **partie intéressée** comme « un individu ou un groupe concerné ou affecté par la performance environnementale d'un organisme » (AFNOR 2004).

HARSCOET (Harscoet 2007) identifie la typologie générale des parties intéressées par la performance environnementale, notamment dans le domaine de l'aéronautique, dont nous reprenons les principales :

- **Les clients** : peuvent avoir différents niveaux d'attente écologique, cependant, la performance environnementale du produit rapportée au coût doit être acceptable
- **Le public** : comprend les riverains, les associations... le public pouvant être affecté par les nuisances générées par le produit peuvent saisir les autorités ou les médias.
- **Les assurances, actionnaires, investisseurs** : ces parties intéressées relèvent de l'aspect financier. Elles attendent principalement, dans le domaine environnemental, que l'organisme soit capable de gérer le risque environnemental inhérent à son activité.

La figure 14 propose une synthèse de ces informations.

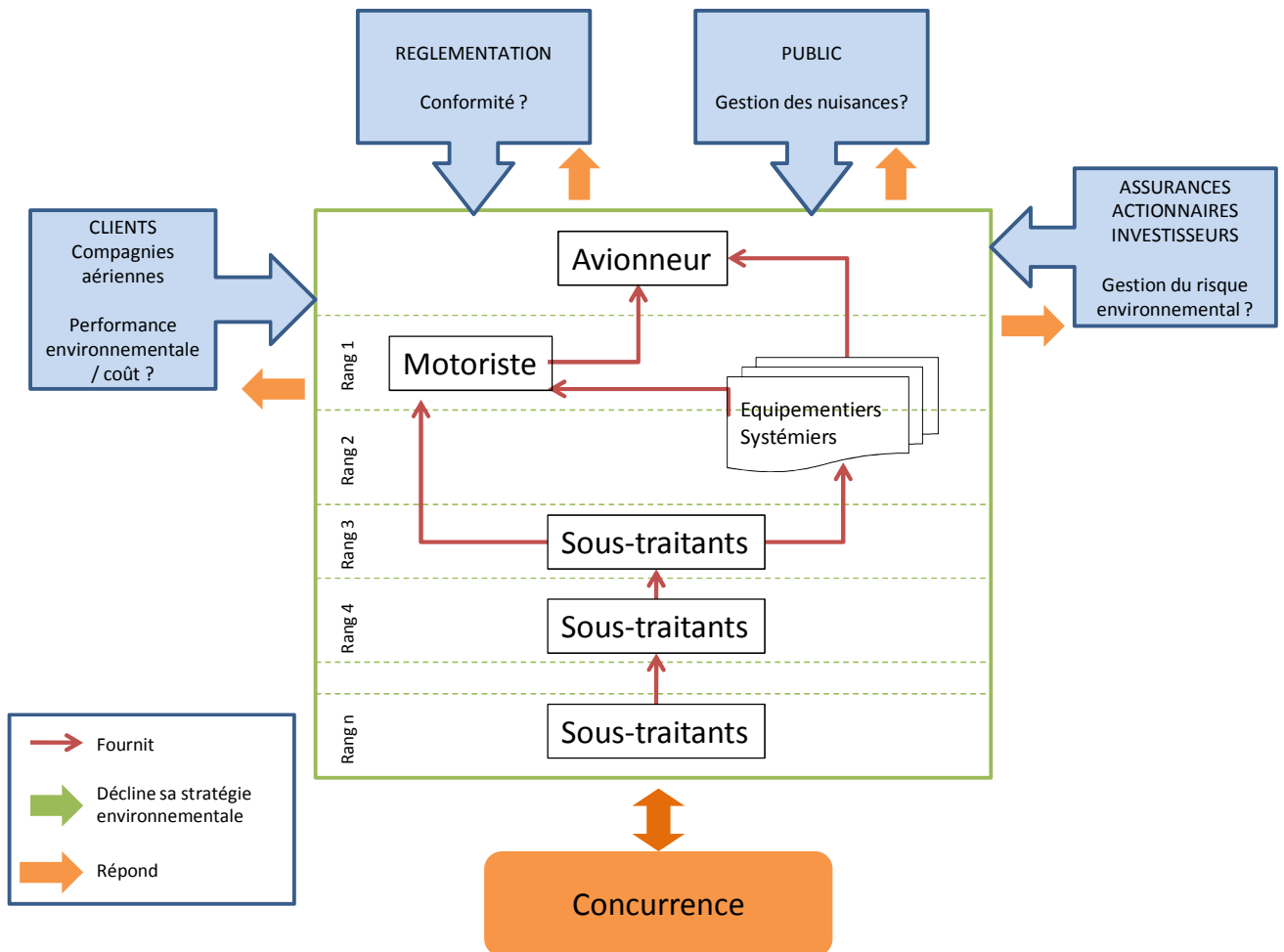


Figure 14 : Les principales parties intéressées d'un avionneur (et de sa supply-chain) et leurs exigences

Le rôle des parties intéressées dans la définition d'une stratégie environnementale s'avère de plus en plus prépondérant. Les pressions sociétales, conséquentes aux nuisances générées par les aéronefs, vont conduire progressivement une modification de la réglementation et des standards applicables, amenant l'industriel à fournir de nouvelles solutions, afin d'améliorer le produit dans le sens environnemental - cependant, l'environnement n'est pas encore le moteur principal de l'innovation, des aspects tels que la réduction de consommation de carburant liée à son coût prédominent encore (Lee 2010).

Ces solutions prennent plusieurs formes, depuis l'amélioration technologique du produit à l'amélioration même des structures industrielles, par une approche managériale.

4.2.3. Des réponses technologiques

Le présent paragraphe présente quelques illustrations d'avancées et solutions techniques et technologiques du secteur de l'industrie aéronautique, dont le développement a particulièrement été stimulé par de nouveaux objectifs environnementaux.

4.2.3.1. Conception de nouvelles architectures de produit

ACARE (Advisory Council of Aeronautical Research in Europe) identifie les priorités de progrès pour l'industrie aéronautique, fixe différents objectifs de performances environnementales à horizon 2020 et finance des projets de recherche en accord avec ces objectifs. Avec l'ambition réduire de 20% des émissions de CO₂ générées par les moteurs, le projet européen NEWAC (New Aero Engine Core Concept), engageant des motoristes et laboratoires universitaires, est axé sur la proposition de nouvelles structures de compresseur.

A titre d'exemple, afin d'améliorer le rendement du cycle thermodynamique du moteur, l'air admis dans les compresseurs situés en amont de la chambre de combustion est refroidit. Différentes architectures de systèmes de refroidissement couplées au compresseurs sont étudiées. Ces avancées techniques engendrent un gain de la consommation spécifique du moteur, entraînant de fait une réduction des émissions des gaz de combustion (Wilfert, Joerg et al. 2007) (Rolt and Baker 2009). Des configurations radicalement nouvelles des aéronefs, touchant à l'architecture globale (aile delta, empennage en V...), permettant notamment de diminuer le bruit aérodynamique, sont aujourd'hui à l'étude (Mistry, Smith et al. 2009).

4.2.3.2. Amélioration des procédés de fabrication et choix des matériaux

Les exigences d'amélioration de performance environnementale induisent également des recherches visant à **retirer des agents dangereux** des procédés. Ainsi, **l'utilisation des chromates** (Cr VI) est très répandue dans le domaine aéronautique. En effet, les propriétés de cette substance sont essentielles dans le procédé d'anodisation, traitement anticorrosion appliqué aux alliages d'aluminium, matériaux choisis pour leurs caractéristiques de résistance et leur faible masse. Cependant, les chromates sont des agents chimiques CMR, et l'utilisation des bains de traitement de surface les contenant peut être à l'origine de nombreux impacts, tant sur les opérateurs que sur l'environnement. De plus, la composition de ces bains est potentiellement visée par la réglementation REACH. La substitution de tels bains est un sujet crucial pour le domaine aéronautique : jusqu'alors, aucune solution alternative n'a démontré de capacités similaires de protection des alliages d'aluminium, dans des conditions de corrosion sévères. Des

pistes probantes sont actuellement étudiées, substituant aux chromates des solutions à base de magnésium (Bierwagen, Brown et al. 2010).

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans la construction des aéronefs, et leurs applications sont diverses, depuis l'aube de fan du turboréacteur à de grands sous ensembles de la cellule. Ces matériaux présentent une densité plus faible que les matériaux jusqu'alors utilisés, permettant un gain de masse important des structures, et, en conséquent un gain de consommation de carburant. En outre, leur grande résistance permet de réduire les cycles de maintenance, et donc une diminution d'opérations potentiellement impactantes sur l'environnement, menées dans les ateliers (Soutis 2005).

4.2.4. Des réponses structurelles

Les entreprises majeures du monde aéronautique ont développé, depuis une dizaine d'années, le management de leurs activités à potentiel impactant pour l'environnement. Pour la plupart, elles utilisent le système de référence ISO 14001 (AFNOR 2004), définissant les lignes directrices des systèmes de management environnemental. Ces systèmes sont principalement appliqués aux activités de production et maintenance. L'organisation de tels systèmes repose sur l'identification des exigences environnementales applicables aux activités ciblées, d'une part, et aux impacts générés sur l'environnement par celles-ci (pollutions, consommations), d'autre part. Fonction de ce cadrage général, une organisation est définie, reposant sur des ressources, humaines, techniques et financières. Un plan d'actions est détaillé, à partir d'objectifs et de cibles de réduction des impacts, validés au plus haut niveau de l'entreprise. La conduite des actions est mesurée, actée, puis en fonction des succès, de nouvelles voies d'amélioration sont engagées. Au regard de l'évolution du paysage réglementaire, les systèmes se sont tout d'abord concentrés sur les activités. La version 2004 de la norme introduit la notion de « produit », et nous constatons dans le secteur aéronautique, depuis environ 5 ans, la mise en œuvre de projets d'intégration des activités de conception au champ d'application des systèmes de management environnemental (AIRBUS SAS 2007). La logique peut se résumer ainsi : cartographier les activités de développement et y injecter, aux bons niveaux, les exigences environnementales nécessaires à la réduction des impacts du produit sur l'environnement. Du fait d'une approche système, les activités supports, tels que les achats, sont également impliquées (Ritzén and Beskow 2001). Cette démarche se combine de manière tout à fait efficace aux avancées réalisées dans les domaines de recherche et développement que nous avons précédemment cités.

4.3. Positionnement de l'industrie aéronautique par rapport au règlement REACH et réponses mises en œuvre

4.3.1. Des actions axées sur le lobbying et l'information de la supply-chain

Les principales actions menées sont pour le moment réalisées au sein de groupes de travail rassemblés sous l'égide d'organisations et associations professionnelles, telles que le GIFAS ou l'ASD (Aerospace and Defence Industries Association of Europe). Les objectifs sont de fédérer l'ensemble des acteurs sur des modes de travail communs et des outils d'échange appropriés aux besoins du secteur.

Une liste de substances prioritaires, dite PDSL (Priority Declarable Substances List) incluant les SVHC et d'autres substances supposées entrer prochainement dans le champ d'attention du législateur a été adoptée sous forme de consensus. La « material declaration dataform » est un format unique proposé à tous les industriels aéronautiques, afin d'identifier les substances de la PDSL dans les articles qu'ils mettent sur le marché. Ce format unique a notamment pour objectif de faciliter l'échange de données entre les différents niveaux de la supply chain (voir § 4.4.1.4).

De nombreuses actions de lobbying sont également menées auprès de la Communauté Européenne et de l'Agence, afin de défendre les positions de l'aéronautique et de limiter les impacts qui seraient liés à l'interdiction précoce d'une substance essentielle aux activités, dont les substituts n'ont pas encore été validés (ex : trichloroéthylène, chrome VI, cadmium, béryllium, PTFE, kevlar).

Enfin, différents guides sont rédigés à l'attention des acteurs de la supply-chain, afin d'apporter une interprétation commune et adaptée des dispositions du règlement : structure générale et règles d'éligibilités aux exigences (AIRBUS SAS, SAFRAN et al. 2008), point de vue sur la définition d'une substance, préparation, article (ASD 2008).

4.4. Exemple de réponses mises en œuvre par le secteur

4.4.1. Listes NRJ/BTR/DSL/PDSL

4.4.1.1. Principe des listes de substances utilisées dans le secteur aéronautique¹³

Le GIFAS, sous l'impulsion de la société SNECMA (France), a fait établir une liste de substances classées en fonction de leur danger et statut réglementaire. Cette liste a pour objectif premier de guider les industriels du secteur parmi l'ensemble des exigences législatives (telles que RoHS, introduisant la notion de liste de substances interdites), et face à la recrudescence d'interdiction de substances (amiante, trichloroéthylène ...) fréquemment utilisées les procédés de fabrication (joints amiantés de fours de cémentation, dégraissage de pièces ...). Une première mouture de cette liste fut éditée au début des années 2000, sous le nom NRJ, pour :

- **Noir** : substances interdites (ex : amiante),
- **Rouge** : substances dangereuses, pouvant être utilisées pour des applications particulières (ex : béryllium),
- **Jaune** : substances dont la substitution ou la réduction d'emploi est recommandée de manière volontaire (ex : nickel).

Cette liste fut reprise et de nouveau éditée en 2006, puis présentée lors du salon aéronautique international du Bourget de 2007. Désormais, elle est appelée liste BT pour **Banned** et **Targeted**. La figure 42, extraite de la note méthodologique de construction de la liste présente les critères d'attribution des labels B et T.

¹³ Nous ne traitons que du secteur aéronautique français et européen.

Environ 3600 substances sont identifiées dans la liste BT. Pratiquement, cette liste est consultable sous forme d'un tableau, les substances étant caractérisées selon 10 critères, tel que présenté dans la figure 15.

Dénomination chimique	Numéro CE (EINECS ou ELINCS)	Numéro CAS	Phrases de risque	Catégories	Classement GIFAS vis-à-vis de l'UE	Classement GIFAS vis-à-vis de l'US fédéral	Référence UE	Référence US	Commentaires
-----------------------	------------------------------	------------	-------------------	------------	------------------------------------	--	--------------	--------------	--------------

Figure 15: Critères de classification des substances recensées dans la liste BT du GIFAS

En raison de législations différentes, les classements peuvent varier entre les territoires européens et ceux des Etats-Unis d'Amérique : une substance interdite aux USA peut être autorisée en Europe et inversement.

GIFAS list of Banned and Targeted substances - October 12th 2006 -

Legend B Banned (Noir - Black) T Targeted (Rouge - Red)

B **Substances banned for manufacturing, use or marketing according to applicable regulation (European Union, US Federal)**

T **Substances and products submitted to regulation (European Union)**
T1 : Substances targeted by a regulatory requirement with a legal target date for phasing out and/or reduction
T2: Substances only banned for particular applications
T3: Substances of Very High Concern (VHC) according to REACH regulation (CMR, PBT, vBvP, endocrine disruptors)*
- Risk phrases: R 45, R 46 , R 49, R 60, R 61
- IARC: groups 1 and 2A
- German KMR (TRGS 905): Cat. 1 and 2
- Radioactive elements: activity > 100 Bq/g
- CMR cat 1 and 2 (TRGS 905)

* waiting for implementation of annex XIV of REACH

Figure 16 : Définition des niveaux Banned et Targeted de la liste BT proposée par le GIFAS (SME Environnement 2007)

En 2008, le GIFAS présente deux nouvelles listes : DSL (Declaration Substances List, 3000 substances) et PDSL (Priority Declaration Substance List, 100 substances). Ces listes font écho à l'entrée en vigueur du règlement REACH et aux obligations liées à la traçabilité des substances dans les articles. Ces listes sont partagées au niveau européen et publiées par l'ASD (Aerospace and Defence Industries Association of Europe) (GIFAS 2008).

4.4.1.2. Des substances aux matériaux et procédés

Le groupe Safran s'est intéressé au cours des années 2005 à 2007 à la possibilité de translater le mode de classification des substances proposé par les listes NRJ puis BT, aux matériaux et procédés, partant du principe que ces ensembles pouvaient être assimilés à des mélanges de substances.

A partir des règles de définition de classification et labellisation des dangers inscrites aux annexes de la directive n° 45/1999/CEE, fondées sur des valeurs de concentrations de substances, un groupe de travail issu de différentes entreprises du groupe a proposé d'attribuer un label N,R, ou J puis B ou T aux matériaux, ingrédients (consommables) mis en œuvre dans les procédés.

Des réflexions ont été initiées afin d'appliquer la classification des substances, matériaux et procédés au articles produits par les sociétés du groupe (Signoles 2005), (Marcellan 2006). Le principe consiste à identifier, à partir des plans de conception et dossiers de fabrication, les matériaux et procédés mis en œuvre pour la réalisation de l'article. Un label de danger est assigné à chaque sous ensemble, en fonction des dangers identifiés selon la nature des matériaux ou ingrédients qui le compose. Un article complet est ainsi cartographié, l'image obtenue permet de déterminer les sous-ensembles présentant un danger pour l'homme ou l'environnement.

Des pistes visant à déployer cette méthode sur le cycle de vie de l'article ont également été envisagées.

4.4.1.3. Création d'une base de données

Le groupe Safran s'est intéressé à pouvoir fournir aux fonctions hygiène sécurité environnement, mais également aux acheteurs et concepteurs une base de données regroupant les FDS des agents chimiques achetés par le groupe. L'intérêt de cette base réside notamment dans le fait que l'utilisateur peut directement obtenir la labellisation BT de l'agent chimique, mais également interroger la base sur la famille de procédés pour laquelle est utilisé cet agent, voire la spécification technique par laquelle il est appelé. Cette base permet également de relier la composition des agents chimiques aux listes de substances candidates à l'autorisation préconisée par le règlement REACH, et ainsi d'obtenir une relative visibilité quant à l'obsolescence potentielle de ces agents. Ce projet,

débuté en 2006, en parallèle des réflexions portant sur la caractérisation des matériaux et procédés selon la liste BT, devient opérationnel depuis 2010 (A.L.B. 2010).

4.4.1.4. *Material Declaration Form*

A partir des listes DSL et PDSL, l'ASD a proposé en 2008 un standard permettant aux industries aéronautiques d'identifier les substances présentes dans les articles mis sur le marché dans ces derniers, associées à une information sur leur masse (BNAE 2010). Ce standard TR 9535 est potentiellement utilisable par l'ensemble de la supply-chain aéronautique (figure 17).

4.4.1. Utilisation de bases de données matériaux

L'évaluation de la présence de substances dangereuses, identifiées notamment par différentes législations (tant en Europe qu'aux Etats-Unis) dans des articles, fait l'objet du développement de bases de données dédiées. Ainsi, et à titre d'exemple, le consortium EMIT (Environmental Materials Information Technology), constitué d'industriels tel que Rolls Royce, EADS ASTRIUM, Honeywell, d'institutions telles que la NASA, l'US Army Research Lab et d'un éditeur de solutions logicielles GRANTA DESIGN, s'attache à développer des outils associant aux données techniques sur les matériaux toute une bibliothèque d'information sur les substances dangereuses (Granta Design 2010). Le principe est d'éliminer le danger à la source, en sélectionnant des matériaux et procédés ne contenant pas de substances ciblées par les différentes réglementations environnementales en vigueur. L'objectif est bien sûr de limiter les risques d'obsolescence, mais le cas échéant, d'être capable de se conformer aux objectifs de traçabilité des substances. Ces outils conservent le formalisme de bases de données connues des concepteurs et ingénieurs matériaux, auxquelles sont ajoutés des modules spécifiques, relatifs aux substances dangereuses.

Conclusion et question de recherche

L'abondance des substances chimiques utilisées au sein des activités humaines soulève de nombreuses questions quant à leur gestion.

Nous nous sommes tout d'abord intéressés, ici, au point de vue des sciences de l'environnement, quant à l'évaluation des effets délétères des substances sur les éco-systèmes. La connaissance de ces effets s'effectue par le biais d'évaluation des caractères toxicologiques et éco-toxicologiques d'une substance et fait appel à une batterie de tests et méthodes expertes. Le risque chimique est une grandeur de référence nous intéressant, permettant de qualifier ou quantifier le pouvoir d'une substance sur l'environnement. L'étude du contexte sociétal, ensuite, nous indique que le risque chimique est un problème intégré dans l'évolution de la réglementation environnementale. La communauté Européenne met en œuvre le règlement REACH, et encadre de manière complexe la production et l'usage, direct ou indirect, des substances mises sur le marché.

Cette évolution sociétale a des conséquences sur le monde industriel. La prise en compte du risque chimique par la législation intéresse désormais tous les industriels, sous peine ultime d'arrêt de production. Les pratiques de conception et production doivent également intégrer deux types de conséquences techniques liées aux exigences réglementaires: la gestion des obsolescences et la traçabilité des substances.

Dans le secteur aéronautique, la prise en compte de la réduction des impacts environnementaux liés au produit est principalement axée sur une réduction du bruit et des émissions atmosphériques. Cependant, le règlement REACH introduit une nouvelle donne, du fait de son applicabilité à toute activité industrielle faisant appel à l'introduction ou l'usage de substances chimiques.

L'industrie aéronautique a identifié des risques pour son activité, notamment liés à l'approvisionnement de substances, préparations ou articles critiques, mais aussi liés à la connaissance de la composition des produits mis sur le marché. Pour le moment, l'identification des substances se limite à une cartographie instantanée : danger de la substance, localisation, masse. Cependant, la dimension « risque », qui est pourtant le centre particulier de l'approche de REACH, n'est pas traitée, et ne semble pas être envisagée de l'être. L'état des lieux de la prise en charge du risque chimique présenté par un produit aéronautique sur son cycle de vie indique des lacunes, notamment liées à la confusion des approches risque et danger.

Nous proposons ici de contribuer à limiter cet écart constaté, en tentant de répondre à la question de recherche suivante :

La réduction du risque chimique d'un produit aéronautique sur son cycle de vie peut-elle être mise en œuvre dès la phase de conception ?

Afin de répondre à cette question, nous proposerons un outil d'évaluation du risque chimique présenté par un produit manufacturé. Nous considérerons ensuite la nature du processus de conception aéronautique et les modes d'intégration de l'outil dans cette activité amont.

PARTIE II :

PROPOSITION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE

Introduction :.....	85
Chapitre 5 : Rôle de l'évaluation du risque dans les activités industrielles	86
Chapitre 6 : Etat de l'art des principales méthodes d'évaluation et de gestion des agents chimiques	92
Chapitre 7 : Spécification d'une méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel sur son cycle de vie.....	123
Chapitre 8 : Proposition d'une méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel sur son cycle de vie.....	128
Conclusion	130

Introduction

Le règlement REACh est articulé sur une approche particulière de la gestion des agents chimiques : la gestion par le risque chimique. La gestion des risques chimiques, telle que nous l'avons étudiée dans la partie précédente, présente une étape d'évaluation, dont les résultats amènent à des mesures préventives ou correctives.

L'objectif de cette partie est de proposer une méthode d'évaluation du risque chimique applicable à un produit manufacturé, sur son cycle de vie, afin de répondre à l'aspect « évaluation » soulevé par la question de recherche.

Dans le chapitre 5, afin d'établir un panorama des méthodes utilisées dans l'industrie manufacturière pour la gestion des agents chimiques, nous nous interrogerons tout d'abord sur la notion générale de risque, dans le domaine industriel, sur les étapes génériques de son évaluation puis rappellerons les grandes lignes des modes de gestion découlant d'une telle analyse.

Dans le chapitre 6, nous étudierons les différentes méthodes d'évaluation des effets dangereux des agents chimiques, présents sous forme de préparations ou dans les articles manufacturés. Cette étude nous permettra d'appréhender les différents niveaux d'approche et leurs conséquences sur les modes de management des agents chimiques.

Le chapitre 7 sera consacré à la spécification d'un outil d'évaluation du risque chimique présenté par un produit aéronautique, sur son cycle de vie.

Le chapitre 8 consistera en la proposition d'une structure de cet outil, au regard des enseignements tirés des précédentes études.

Chapitre 5 : Rôle de l'évaluation du risque dans les activités industrielles

5.1. De la connaissance des risques liés à une activité à la mise en place de mesures de sûreté / sécurité

La notion de **risque** peut être définie comme la probabilité qu'un évènement non désiré se produise. La **sûreté** et **sécurité** sont quant à elles définies par l'absence de tels évènements. L'évaluation des risques présentés par une activité industrielle se traduit par **l'identification des dangers existants**, inhérents à l'activité, puis des **circonstances probables de réalisation d'un dommage** (matériel, humain, financier, etc...). Au regard des résultats de cette évaluation, l'analyste décide, par le biais d'une **hiérarchisation** des résultats et de **l'acceptabilité** du risque ainsi déterminé, de l'opportunité de le réduire ou non, et si nécessaire, des moyens à mettre en œuvre pour le diminuer. De nombreuses méthodes d'évaluation du risque existent, chacune adaptée aux particularités des secteurs à laquelle elle s'applique. Mais de manière systématique, les mêmes étapes clés sont présentes, communes aux différentes méthodes

5.2. Les étapes de l'évaluation du risque et du management du risque

DUIJNE et al. (Duijne, Aken et al. 2008) proposent une synthèse sur les étapes génériques d'une évaluation du risque et son lien avec la mise en place de mesures visant à la réduction du risque considéré. Le point d'orgue d'une telle démarche est de définir un niveau de classification de ce risque, ce qui revient à lui attribuer une dimension quantifiable. De fait, celui-ci pourra être placé sur une échelle de valeur, et son niveau d'acceptabilité identifié.

La proposition de mesures de gestion du risque relève d'un processus itératif. Les scénarii de réalisation du dommage seront de nouveau évalués, en ajoutant à ces derniers les éléments porteurs de la diminution, jusqu'à ce que le risque résultant devienne définitivement acceptable (figure 18).

Trois étapes majeures se succèdent :

- L'identification du risque** : un ou plusieurs scénarii sont décrits, impliquant l'interaction entre une personne/ un système/ un produit, le(s) danger(s), les facteurs extérieurs et le(s) dommage(s) potentiel(s). La description des scénarii initiaux doit faire abstraction de la connaissance des dangers ou risques par l'utilisateur. Les modes d'utilisation des produits / systèmes doivent être envisagés selon des modèles pertinents, mais les scénarii impliquant des cas limites ne doivent cependant pas être éliminés. Ces scénarii sont établis grâce au **retour d'expérience** d'accidentologie, à la connaissance de **circonstances** d'accidents, et dans le cas d'un nouveau système/ produit, par **analogie** avec des cas existants.

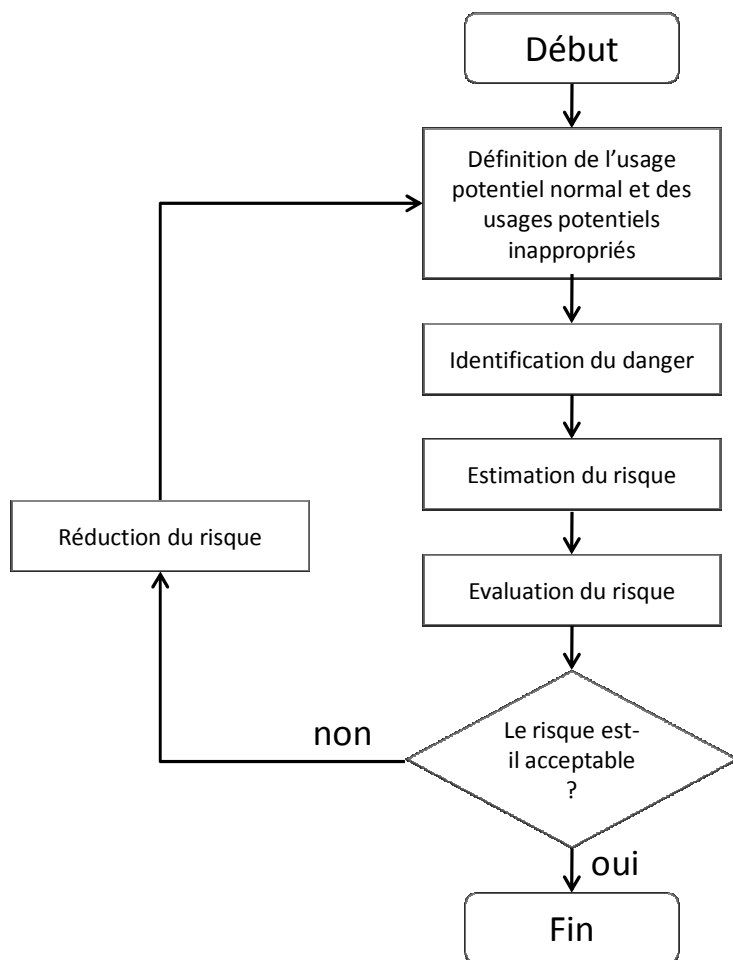


Figure 18 : Démarche itérative de l'évaluation et de la diminution du risque, d'après (Duijne, Aken et al. 2008)

- **L'estimation du risque** : l'estimation du risque aboutit à une **quantification** de ce dernier. Elle se fonde en général sur des échelles numériques hiérarchisant d'une part la sévérité des dommages (niveau de destruction matérielle, niveau de blessure d'une victime...) et d'autre part la probabilité d'occurrence du scénario. La combinaison de ces deux paramètres aboutit à l'attribution d'une valeur quantifiable du risque évalué.
- **L'évaluation du risque** : en fonction de la valeur résultant de l'estimation, le risque peut ensuite être comparé à un référentiel afin de déterminer son amplitude.

Les mesures de management du risque, qui conduisent à une situation déterminée de sûreté / sécurité, découlent d'une évaluation préalable du niveau de risque. Cette évaluation doit reposer sur des mécanismes fiables, reproductibles, et s'appuyer sur des échelles de valeurs le plus objectives possibles, lors de l'étape de caractérisation des scénarii d'occurrence des dommages. Les mesures sont également calibrées en fonction de l'acceptabilité du risque évalué.

5.3. L'acceptabilité du risque

La notion d'**acceptabilité** est un élément de plus en plus important dans la réalisation de programmes de management du risque (Leeuwen 2007). L'acceptabilité du risque dépend non seulement des connaissances scientifiques mais aussi des contextes sociétaux encadrant la perception du risque. L'acceptabilité d'un risque peut varier dans le temps, d'un territoire à un autre. D'autres dimensions, telles que la culture, l'éducation, vont également influencer la prise de décision quant au niveau d'acceptabilité du risque (figure 19).

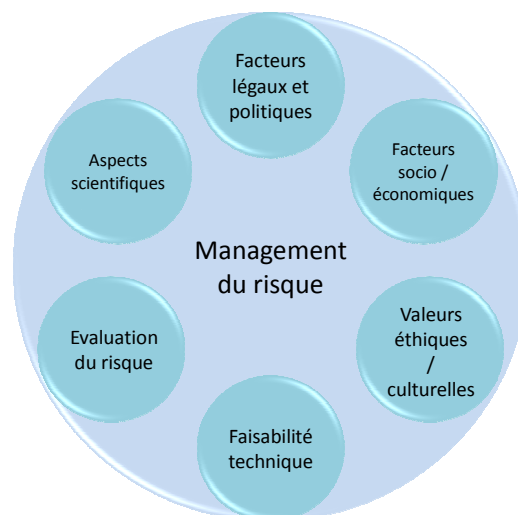


Figure 19 : Dimensions influençant le niveau d'acceptabilité du risque dans le cadre de la prise de décision des mesures de management, adapté d'après (Leeuwen 2007)

Ce niveau d'acceptabilité varie entre des limites hautes et basses : un niveau maximum de risque acceptable vs un niveau de risque négligeable, entre lesquels peuvent être décrits des niveaux intermédiaires, utiles à l'appréciation de l'efficacité des mesures de réduction proposées. Cependant, un équilibre entre les moyens mis en œuvre pour la réduction du risque et le bénéfice retiré doit être également pris en compte.

5.4. Les moyens de diminution du risque

HOLLNAGEL (Hollnagel 2008) s'intéresse à la notion de **barrières**, i.e., à la typologie des solutions pouvant être mises en œuvre dans le cadre de la définition de mesures de réduction du risque. Comme présenté en figure 20, une fois le scénario de risque identifié, le risque peut être jugulé en agissant soit sur la source (prévention), soit sur le dommage (protection).

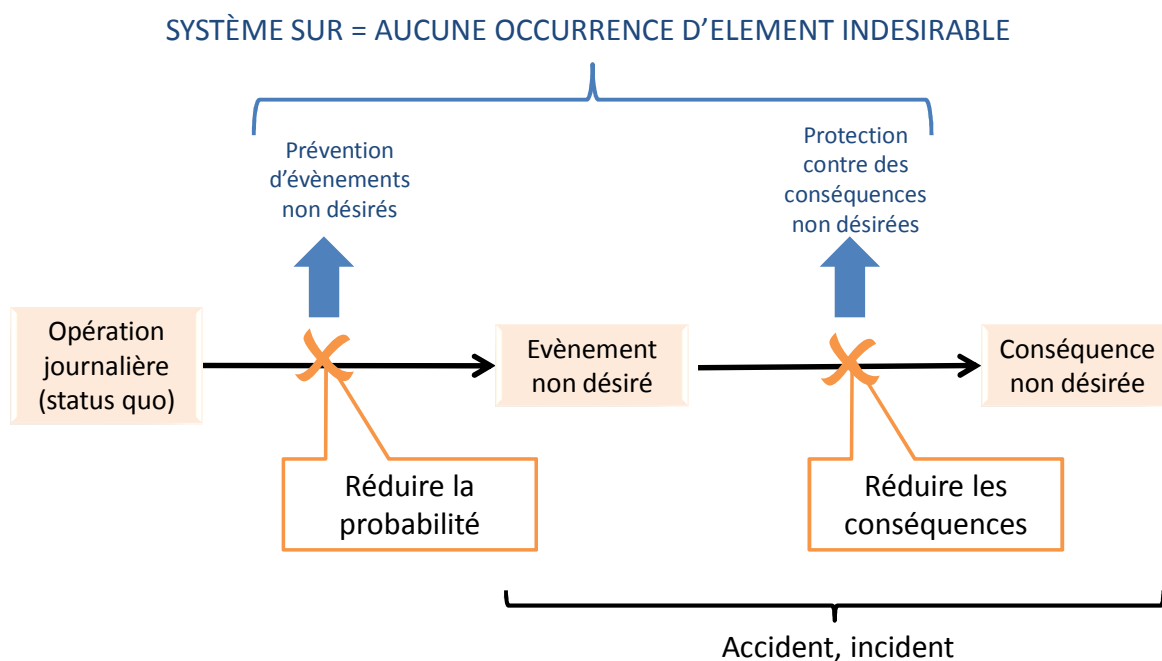


Figure 20 : La prévention et la protection, démarches de réduction du risque, d'après (Hollnagel 2008)

Les barrières définies par HOLLNAGEL peuvent être réparties en quatre catégories :

- **Les barrières physiques** : elles permettent d'éviter l'occurrence d'un événement ou d'en limiter les effets via le blocage de flux d'énergie, de masse ou d'information, d'un point à un autre. Ce type de barrière a pour caractéristique d'avoir un fonctionnement autonome, ne nécessitant pas une interprétation particulière par un individu tiers. Ex : ceinture de sécurité, porte coupe-feu.
- **Les barrières fonctionnelles** : elles créent des conditions préalables à la réalisation d'une action, permettant ainsi de configurer le système dans un état moins propice à l'occurrence d'un risque, ou pour lequel le dommage serait moindre. Ce type de barrière peut être autonome ou non, perceptible ou non. Ex : codes d'entrée, airbag.
- **Les barrières symboliques** : elles fonctionnent indirectement via leur signification, mais dès lors, un processus d'interprétation est requis. Ex : alarme sonore, panneau.
- **Les barrières organisationnelles** : elles ne sont pas physiquement présentes dans la situation d'occurrence du risque, mais mises en œuvre à travers le comportement humain, l'organisation de l'activité. Ex : règlements, procédures.

D'autres démarches de réduction du risque peuvent être adoptées. Ainsi :

- **L'élimination ou la substitution** : l'élément identifié comme cause majeure du risque est éliminé et remplacé par un autre système. Par exemple, il peut s'agir d'automatiser une opération auparavant effectuée par un homme.
- **Le remplacement, complet ou partiel** : à la différence de l'élimination ou de la substitution, un composant, identifié défaillant, est remplacé par un composant identique ou ayant subi des améliorations techniques, sans pour autant que la fonction soit modifiée.
- **Le contrôle et suivi (monitoring)** : des paramètres caractérisant les causes d'occurrence du risque sont identifiés, mesurés et suivis, permettant de détecter au plus tôt une quelconque déviation qui pourrait être à l'origine d'une défaillance.
- **La facilitation** : le système ou les modes d'organisation sont modifiés afin que la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable soit réduite. Cette approche se traduit par des modifications de l'ergonomie d'un système, ou l'établissement de règles opérationnelles.

La démarche de diminution du risque chimique nécessite une évaluation pertinente et interprétable du risque, mais également une bonne connaissance de l'activité industrielle et des leviers potentiels de progrès, permettant la mise en œuvre d'une stratégie de management du risque, axée notamment sur la prévention, la protection, la substitution ou la combinaison de plusieurs de ces stratégies.

Chapitre 6 : Etat de l'art des principales méthodes d'évaluation et de gestion des agents chimiques

6.1. Différents niveaux d'approches

La gestion des agents chimiques et des risques qu'ils présentent est structurée selon l'approche générale précédemment présentée. La notion de risque chimique et de son évaluation a été prise en charge par les sciences environnementales telles que l'écotoxicologie et la toxicologie. Les modes d'actions, tant de réalisation des évaluations du risque que d'encadrement des mesures de gestion ou management des agents chimiques sont principalement édictés par la législation (c.f. Partie I).

Cependant, différentes approches existent quant à la manière d'évaluer et aux modes de management qui en résultent. GEBEL et al. distinguent différents niveaux d'appréciation du risque chimique, tel que représenté figure 21.

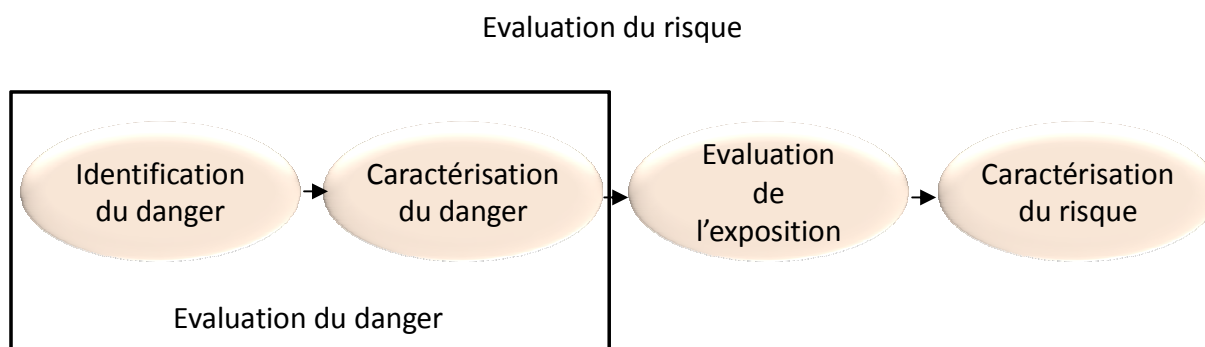


Figure 21 : Relation entre l'évaluation du danger et l'évaluation du risque, d'après (Gebel, Lechtenberg-Auffarth et al. 2009)

L'expression «évaluation du risque chimique » est souvent abusivement utilisée et ne recouvre finalement que la première étape du processus, soit l'évaluation des dangers. Ces deux approches conduisent à des modes de management différents. LEEUWEN en précise les grandes lignes :

- **Classification et labellisation** : les substances dangereuses sont classifiées et labellisées en fonction de propriétés intrinsèques. Cette approche consiste à assigner un symbole de danger, des phrases de risque et de sécurité, au regard de résultats obtenus lors de tests en laboratoire. Elle est une première étape du management des agents chimiques.

- **Standards de sécurité** : cette expression désigne les recommandations et règles de gestion pouvant être émises par des organismes (normes) ou des entités réglementaires. Différentes obligations ou préconisations sont publiées :
 - Des lignes directrices, constituées de données sur les précautions d'usage en mode normal,
 - Des valeurs limites d'exposition aux substances, dans des conditions données (Valeur Toxicologiques de Référence, etc.)
- **Mesures de réduction des risques** : nous retrouvons ici la mise en application des stratégies générales de réduction des risques, se traduisant dans le domaine spécifique du risque chimique par :
 - L'installation de barrières physiques telles que les protections collectives et individuelles,
 - L'édiction de procédures opérationnelles visant à minimiser les temps d'exposition des opérateurs aux agents chimiques,
 - La limitation de concentration de certaines substances dans des produits.

Pour appréhender le panorama des principales méthodes d'évaluation des propriétés des agents chimiques, et des modes de gestion utilisés au sein des industries manufacturières, nous distinguerons trois catégories :

- L'approche par l'évaluation des dangers,
- L'approche par l'évaluation des risques,
- Enfin, l'approche par l'analyse de cycle de vie, permettant d'envisager l'évolution des propriétés d'une substance dans le temps.

6.2. La gestion des agents chimiques par une approche danger

6.2.1. L'identification des dangers

L'identification des dangers d'une substance consiste à déterminer sa capacité à induire des dommages sur des individus, une population ou un écosystème (Chirila and Draghici 2009). L'identification des dangers d'une substance s'exécute à travers la réalisation de nombreux tests toxicologiques et écotoxicologiques, ainsi que la compilation de données de la littérature relative à ce domaine.

Les dangers d'une substance sont reliés à ses caractéristiques physico-chimiques, aux niveaux de concentration pour lesquels un effet négatif apparaît. Les dangers des substances chimiques peuvent être classés selon différents critères :

- Les propriétés physico-chimiques : substances explosives, oxydantes, extrêmement inflammables, etc....
- Les propriétés toxicologiques :
 - Toxicité aigüe (effets létaux et irréversibles après une seule exposition),
 - Toxicité subaigüe, subchronique ou chronique,
 - Effets corrosifs ou irritants,
 - Effets de sensibilisation,
 - Effets particuliers sur la santé.

De ces différents degrés découlent les classifications de toxicité : Très toxique (T+), Toxique (T), Nocif (Xn), Irritant (Xi), corrosif (C).

La classification peut prendre en compte les effets sur l'homme uniquement :

- Cancérogène,
- Mutagène,
- Reprotoxique

Enfin, les dangers identifiés portent sur les effets environnementaux, notamment les effets sur les systèmes aquatiques.

6.2.2. Le management des agents chimiques par une approche danger











6.2.2.1. Les systèmes de labellisation et Fiches de Données de Sécurité

La signalisation des dangers des substances et mélanges de substance est aujourd'hui, sur le territoire européen, encadrée par les **directives n°67/548/CE** et **n°1999/45/CE**, notamment via l'utilisation d'un système de pictogrammes ou symboles de danger.

A compter de juin 2015 en Europe, le système actuellement utilisé sera remplacé par un nouveau système de signalisation, d'envergure mondiale. Ce système, appelé **GHS** (Global Harmonized System), découle d'une action internationale menée par l'OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). La description du système GHS est inscrite dans le règlement européen n° 1272/2008 portant sur la classification, la labellisation et l'emballage des substances, également dénommé règlement **CLP** (IHCP 2009).

Le système GHS, progressivement mis en œuvre au sein des différents pays, permet d'assurer une homogénéité de la représentation des dangers. Les dangers sont notamment déterminés à partir de tests toxico/écotoxicologiques conduits selon des standards internationaux et permettent d'assurer une classification objective des substances. Le système identifie 28 classes de danger contre 15 actuellement. Les dangers sont classés en trois familles principales (dangers physicochimiques, toxicologiques et écotoxicologiques), elles-mêmes divisées en sous familles, possédant chacune de trois à quatre sous-catégories (figure 22).

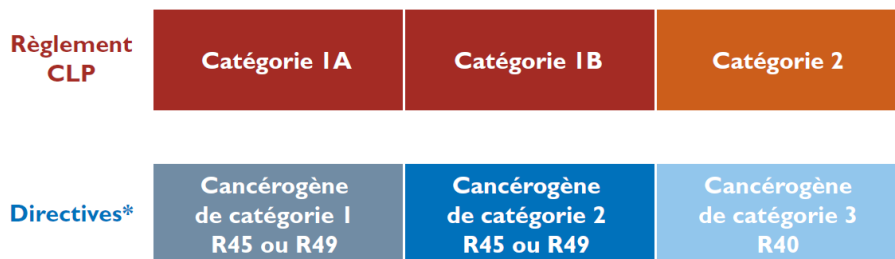
Pictogrammes de danger du règlement CLP - Classes et catégories de danger associées

SGH01	SGH02	SGH03	SGH04	SGH05	SGH06	SGH07	SGH08	SGH09
								
<ul style="list-style-type: none"> Explosibles instables Explosibles, divisions 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 Substances et mélanges autoréactifs, type A Peroxydes organiques, type A 	<ul style="list-style-type: none"> Gaz inflammables, catégorie 1 Aérosols inflammables, catégories 1, 2 Liquides inflammables, catégories 1, 2, 3 Matières solides inflammables, catégories 1, 2 Substances et mélanges autoréactifs, types C, D, E, F Liquides pyrophoriques, catégorie 1 Matières solides pyrophoriques, catégorie 1 Substances et mélanges auto-échauffants, catégories 1, 2 Substances et mélanges qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables, catégories 1, 2, 3 Peroxydes organiques, types C, D, E, F 	<ul style="list-style-type: none"> Gaz comburants, catégorie 1 Liquides comburants, catégories 1, 2, 3 Matières solides comburantes, catégories 1, 2, 3 	<ul style="list-style-type: none"> Gaz sous pression : <ul style="list-style-type: none"> - gaz comprimés - gaz liquéfiés - gaz liquéfiés réfrigérés - gaz dissous 	<ul style="list-style-type: none"> Substances ou mélanges corrosifs pour les métaux, catégorie 1 Corrosion/irritation cutanée, catégories 1A, 1B, 1C Lésions oculaires graves/irritation oculaire, catégorie 1 	<ul style="list-style-type: none"> Toxicité aiguë, catégories 1, 2, 3 	<ul style="list-style-type: none"> Toxicité aiguë, catégorie 4 Corrosion/irritation cutanée, catégorie 2 Lésions oculaires graves/irritation oculaire, catégorie 2 Sensibilisation cutanée, catégorie 1 Toxicité spécifique pour certains organes cibles – exposition unique, catégorie 3 	<ul style="list-style-type: none"> Sensibilisation respiratoire, catégorie 1 Mutagénicité sur les cellules germinales, catégories 1A, 1B, 2 Cancérogénicité, catégories 1A, 1B, 2 Toxicité pour la reproduction, catégories 1A, 1B, 2 Toxicité spécifique pour certains organes cibles – exposition unique, catégories 1, 2 Toxicité spécifique pour certains organes cibles – exposition répétée, catégories 1, 2 Danger par aspiration, catégorie 1 	<ul style="list-style-type: none"> Dangers pour le milieu aquatique - Danger aigu, catégorie 1 Dangers pour le milieu aquatique - Danger chronique, catégories 1, 2
 <ul style="list-style-type: none"> Substances et mélanges autoréactifs, type B Peroxydes organiques, type B 		<p>Pas de pictogramme de danger pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> Explosibles, divisions 1.5, 1.6 Gaz inflammables, catégorie 2 Substances et mélanges autoréactifs, type G Peroxydes organiques, type G Toxicité pour la reproduction, catégorie supplémentaire : effets sur ou via l'allaitement Dangers pour le milieu aquatique - Danger chronique, catégories 3, 4 						

1er décembre 2009

Figure 22 : Classes de danger selon le règlement CLP. Document INRS, décembre 2009

Chaque catégorie est définie selon des seuils physico chimiques ou toxico/écotoxicologiques. La figure 23 illustre un exemple de découpage d'une classe de danger en catégories, et compare les critères du règlement CLP avec ceux des anciennes directives en vigueur.



* Directives : Système européen préexistant – directives 67/548/CEE et 1999/45/CE modifiées (en France, arrêtés du 20 avril 1994 et du 9 novembre 2004 modifiés).

Figure 23 : Catégories de la classe de danger « cancérogénicité » selon le règlement CLP, comparé aux classes actuellement en vigueur (in (INRS 2009)).

Des **Fiches de Données de Sécurité (FDS)** devront également être éditées pour chaque substance ou mélange mis sur le marché, à destination des professionnels. Ces fiches comprennent seize paragraphes permettant l'identification de la substance ou du mélange, de sa composition, des dangers présentés, mais également des informations relatives aux modes de stockage, de transport, à la stabilité chimique, etc. ...

Ces FDS constituent une première étape pour l'aide au management des produits chimiques, notamment au sein d'usines de production employant substances et mélanges lors de la fabrication d'un bien. Au regard des dangers présentés par la substance mise en œuvre, des mesures de protection ou de prévention adaptées sont édictées (Pratt 2002), (Winder, Azzi et al. 2005).

6.2.2.2. Les listes

L'approche danger peut également être utilisée au travers de listes, définies par différentes entités, publiques ou privées, et dont les usages peuvent varier de la recommandation à l'obligation envers la chaîne des fournisseurs.

Par exemple, dans le cas d'une démarche publique, le groupe d'experts « VTR Reprotoxiques » (Afsset 2006) propose la réalisation d'une liste hiérarchisant les dangers d'un ensemble de substances à partir de données toxicologiques. L'objectif d'une telle liste est, au regard des dangers présentés par les substances étudiées, de fixer les priorités d'actions sur les substances les plus dangereuses et de dimensionner les programmes de recherche afférents.

Autre exemple, dans le domaine de l'industrie privée, le groupe Volvo, constructeur de véhicules automobiles, exige de ses fournisseurs la conformité à différents standards, visant à interdire la présence de certaines substances, dans les produits livrés ou les procédés utilisés (Volvo 2010). La figure 24 présente un extrait de cette liste.

VOLVO **Standard** **STD 100-0002**
 Volvo Group

Established March 2010 Version 5 Page 4(13)

Table 1E [Complete substance list in Excel version](#)

Substance group/ Substance	CAS No. ¹⁾	Generic examples	Application	Threshold (0,1 % unless otherwise is specified)	Risk ²⁾	Inclusion date
Amines, carcinogenic	Various	Curing agents in paints and adhesives, antioxidants in lubricants			C, E, T	Before 2006-02-01
4-Aminobiphenyl and its salts	Various	Impurities in textile and leather paints, antioxidants in lubricants, rubber/latex, plastics			C, T	Before 2006-02-01
Asbestos fibres	Various	Insulation			C	Before 2006-02-01
Asbestos minerals	Various	Insulation			C	2010-03-15
Azocolorants	Various	Colorants or additives in textiles and leather			A, C, E	Before 2006-02-01
Benzene	71-43-2	Solvent, fuel	Exception may be made for benzene in engine fuel		C, R, T	Before 2006-02-01
Benzidine and its salts	Various	Antioxidants in lubricants, component in dyes			C	Before 2006-02-01
Cadmium and its compounds	7440-43-9	Pigments in paints and plastics, electronics		0,01 %	C, E	Before 2006-02-01
Chlorinated hydrocarbons	Various	Solvents and dispersive applications			C, E, T	Before 2006-02-01

Figure 24: Extrait du standard STD 100-0002 émis par le groupe Volvo, dans le cadre de la gestion des substances dangereuses au sein de sa supply-chain (in (Volvo 2010))

Les substances identifiées par le groupe Volvo présentent des dangers (identifiés dans la colonne « risk »), ces substances peuvent potentiellement créer des dommages sur l'homme ou l'environnement :

- A : allergisant
- C : cancérogène
- T : toxique
- E : dangereux pour l'environnement
- N : neurotoxique
- R : dangereux pour la reproduction

Les fournisseurs de sous-ensembles ne peuvent ni vendre au groupe Volvo des produits susceptibles de contenir les substances citées, ni mettre en œuvre ces substances dans leurs procédés de fabrication, au-delà des seuils de concentration mentionnés. Dans le cas contraire, une

justification de l'emploi d'une substance listée par le standard STD 100-0002 doit faire l'objet d'une justification technico-économique auprès du groupe, et les mesures de protections et prévention idoines doivent être définies.

L'approche des listes, classifiant les substances au regard de la nature de leur danger, voire de la gravité de celui-ci, permet de déterminer des priorités d'actions dans le cadre du management des produits chimiques. Cette démarche demeure cependant monocritère, et de fait ne permettra pas à terme de discriminer deux éléments présentant des niveaux de danger équivalents.

6.3. La gestion des agents chimiques par une approche risque

6.3.1. Méthodes d'évaluation simplifiée du risque chimique

6.3.1.1. Principe

Les méthodes simplifiées d'évaluation du risque chimique correspondent, pour une substance ou un mélange, à la combinaison d'une évaluation du danger à une évaluation de l'exposition. Les méthodes sont dites simplifiées du fait que l'ensemble des données d'entrée nécessaire à la mise en œuvre de l'évaluation est aisément accessible par l'opérateur. D'autre part, les modes de calculs sont simplifiés et ne nécessitent pas de connaissance particulière dans le domaine de la gestion des risques chimiques.

De nombreuses méthodes existent. Nous proposons ici la description de deux méthodes d'évaluation simplifiées du risque chimique, dont l'intérêt est de fournir un résultat d'évaluation sous forme de scores, permettant ainsi une interprétation objective des résultats.

6.3.1.2. Méthode SIRIS

La méthode SIRIS (System of Integration of Risk with Interaction of Scores) a été développée à partir de 1982 au sein du laboratoire de Toxicologie de l'Unité d'Enseignement et de Recherche de Médecine Pharmacie de Rouen (France). Cette méthode d'évaluation simplifiée du risque chimique combine des critères portant sur les dangers potentiels et l'exposition, tirés de données physicochimiques et écotoxicologiques caractérisant les substances analysées. L'objectif de la méthode est de définir une hiérarchisation de l'ensemble des substances analysées, afin d'identifier des priorités d'étude et de gestion des risques présentés par ces dernières. Les résultats fournis permettent d'apporter une aide à la décision pour un gestionnaire d'agents chimiques.

Le risque est considéré comme une variable à deux dimensions : les **conditions d'exposition** et les **effets potentiels** (danger). Dans les deux cas, exposition et effets, des critères vont être choisis, ces derniers étant quantifiables ou mesurables, et connus. Pour chaque critère retenu, des classes sont ensuite définies, à partir de seuils numériques correspondant aux valeurs possibles des différents critères : classe favorable, classe medium, classe défavorable (figure 25).

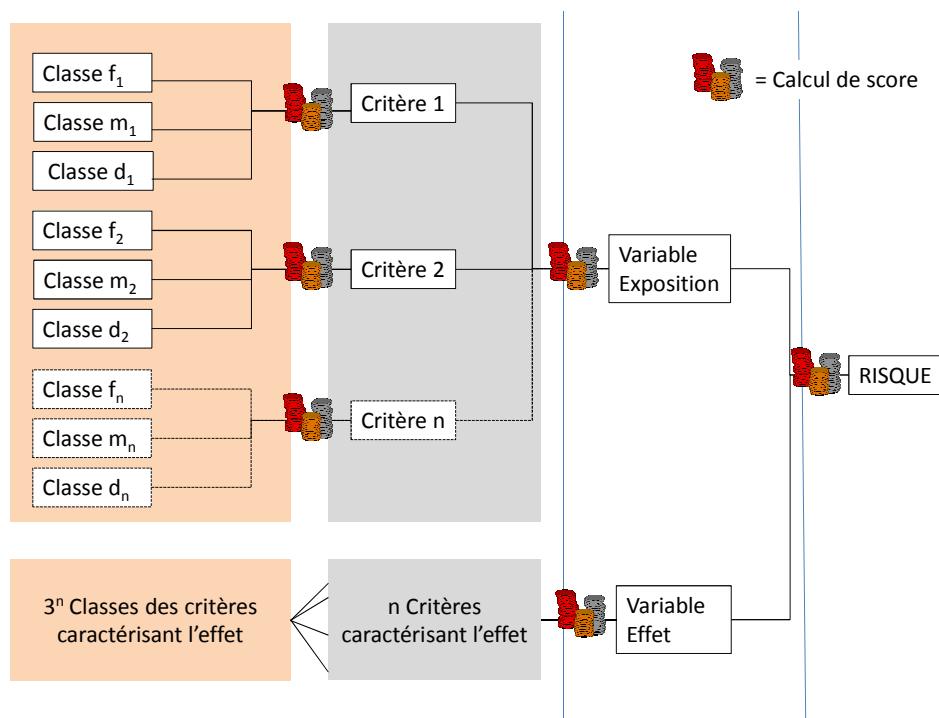


Figure 25 : Représentation schématique de la structure de la méthode SIRIS

Dans l'étude réalisée par GUERBET et al portant sur la hiérarchisation de 90 substances selon leurs risque pour l'environnement aquatique (Guerbet and Jouany 2002), les auteurs ont retenu pour caractériser l'exposition : l'hydrosolubilité de la substance (mg/l), la pression de vapeur (Pa), le coefficient de partition octanol/eau ($\log P_{ow}$) et la persistance (évaluation qualitative faible/moyen/fort). Ils ont ensuite défini pour chaque classe des valeurs de ces différents critères, représentées en table 2. Les critères peuvent ensuite être organisés selon leur importance relative dans la description de la variable « exposition » ou « effet ». Cette première hiérarchisation est réalisée selon avis d'expert, et en fonction de l'objet de l'évaluation (par exemple, le critère d'hydrosolubilité sera moins important si l'étude porte sur le milieu terrestre que le milieu aquatique).

Table 2 : Liste des critères caractérisant l'exposition et valeurs des classes, d'après (Guerbet and Jouany 2002)

Critère	Classe	Valeur
Hydrosolubilité (mg/l)		
Favorable	O	<100
Intermédiaire	M	100-1000
Défavorable	D	>1000
Pression de vapeur (Pa)		
Favorable	O	<0.1
Intermédiaire	M	0.1-1000
Défavorable	D	>1000
Coeff. Partition octanol-eau (logPow)		
Favorable	O	<2
Intermédiaire	M	2-3
Défavorable	D	>3
Persistance		
Favorable	O	Faible
Intermédiaire	M	Moyenne
Défavorable	D	Forte

Les calculs qui sont utilisés par la méthode SIRIS sont basés sur un profil de substance idéal, pour laquelle l'ensemble des critères, pour chaque variable, est classé favorable. Des règles de calcul incrémentales permettent d'attribuer des scores aux autres substances qui présentent pour un ou plusieurs critères des classes défavorables. Selon les différentes combinaisons de critères et la valeur des scores obtenus, les substances peuvent être classées et ordonnées (figure 26). La lecture des résultats finaux est objective et aisément interprétable (Gouzy, Le Gall et al. 2009), (Devillers, Devillers et al. 2009)

V1	V2	V3	Score	
f=0	f=0	f=0	0	
		m=1	1	
		d=2	2	
	m=2	f=0	2	
		m=1	3	
		d=3	5	
		f=0	5	
	d=5	m=2	7	
		d=4	9	
		f=0	4	
m=4	f=0	m=1	5	
		d=3	7	
		f=0	7	
	m=3	m=2	9	
		d=4	11	
		f=0	10	
		m=2	12	
	d=6	d=5	15	
		f=0	8	
		m=2	10	
d=8	f=0	d=4	12	
		f=0	11	
		m=2	13	
	m=3	d=5	16	
		f=0	15	
		m=3	18	
		d=6	21	
	d=7			

Figure 26 : Exemple de calculs de scores pour trois critères V1, V2 et V3, tels que V1>V2>V3, chacun étant définis par trois classes (f=favorable, m=intermédiaire, d= défavorable). D'après (Devillers, Devillers et al. 2009).

La méthode SIRIS est notamment utilisée dans le domaine du suivi des pesticides dans les milieux aqueux, et permet, à partir de données pouvant être aisément collectées, de définir pour différents milieux les profils de risques liés aux pesticides, puis d'établir les priorités de traitement (Gouzy, Le Gall et al. 2009).

6.3.1.3. Méthode d'évaluation simplifiée du risque chimique

VINCENT et al. élaborent en 2000 une méthode de hiérarchisation des risques potentiels, axée sur l'évaluation des risques chimiques (Vincent and Bonthoux 2000). Cette méthode¹⁴, développée au sein de l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité, France), est destinée aux entreprises et particulièrement aux médecins du travail, aux fonctions hygiène et sécurité du travail et aux Chefs d'Établissements impliqués dans l'identification et la maîtrise des risques liés aux activités de l'entreprise, au regard des exigences légales françaises.

L'objectif de la méthode est de déterminer les postes de travail présentant, du fait de la manipulation ou stockage d'agents chimiques, les plus forts niveaux de risque au sein d'un atelier. Cette méthode est contrainte par l'usage d'une quantité restreinte de données : au sein de l'entreprise, les informations relatives aux caractéristiques écotoxicologiques et physicochimiques des substances utilisées sont limitées aux Fiches de Données de Sécurité ; l'exposition à la substance, est définie par de nombreux paramètres qui ne sont pas toujours directement mesurables.

La méthode INRS est fondée sur la logique utilisée par la méthode SIRIS. Le risque est calculé à partir des variables **D « danger »** et **E « exposition potentielle »**.

La **variable D** est directement définie par 5 classes. La **variable E** est définie par deux critères : la **quantité Q** et la **fréquence d'exposition F**, ces deux critères étant chacun définis sur cinq classes (figure 27).

VINCENT et al finalisent cette méthode en 2005 et lui donnent l'ergonomie suffisante pour être aisément applicable dans le milieu de l'entreprise (Vincent, Bonthoux et al. 2005). Le guide ainsi rédigé propose un ensemble de tableaux et matrices permettant d'une part de déterminer les classes des différents critères mis en jeu dans la méthode, et enfin de calculer les scores liés à la combinaison des classes.

¹⁴ Dans la suite, cette méthode sera dénommée « méthode INRS »

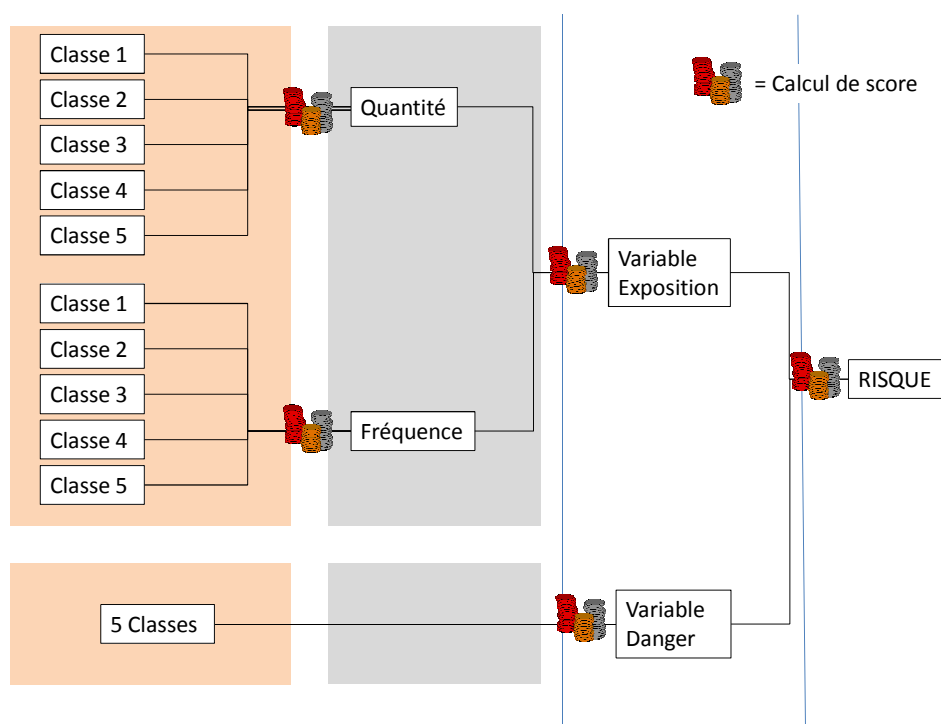


Figure 27: Représentation schématique de la structure de la méthode INRS

6.3.1.3.1 Evaluation du danger et de l'exposition potentielle

Afin de déterminer les valeurs des variables « danger » et « exposition potentielle », une étape d'inventaire des données doit être menée. Les auteurs listent les sources d'informations, permettant de déterminer les classes de danger, quantité et masse (table 3).

Table 3 : Typologie et sources des données nécessaires à l'application de la méthode d'évaluations de l'INRS

Critère	Donnée(s) recueillie(s)	Source
Danger	Phrases de risques, pictogramme de danger, Valeurs limites d'exposition	Etiquetage, Fiche de Données de Sécurité
Quantité	Quantité d'agent chimique consommé	Inventaire par atelier, inventaire des achats, approvisionnement
Fréquence	Durée d'utilisation de l'agent chimique par opération	Gamme de production, interview des opérateurs concernés

En fonction des grandeurs et valeurs identifiées pour l'agent chimique considéré, l'évaluateur se reporte à un ensemble de tables permettant d'associer une classe à chaque critère. Ces tables sont reprises aux références 4 à 7. **Le danger** est prioritairement déterminé à partir des phrases de risques figurant sur la Fiche de Données de Sécurité. A défaut, les auteurs préconisent de se reporter soit au(x) pictogramme(s), soit à la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP), ou proposent une classification des dangers en fonction de la nature de l'agent chimique.

Table 4 : Classes de danger en fonction de l'étiquetage, des valeurs limites d'exposition professionnelles et de la nature des agents chimiques émis lors de divers travaux

Classe de danger	Phrases de risque Combinaison	Pictogramme	Valeur VLEP	Nature de l'agent chimique
1	aucune	Aucun	>100mg/m ³	
2	R36, R37, R38, R36/37, R36/37/38, R37/38, R66	Xi Irritant	100 > V > 10 mg/m ³	Fer/ céréales et dérivés/ graphite/ matériaux de construction, / talc / ciment / matériaux composites / combustion bois traités / Soudures métaux-plastiques / vulcanisation / Calcmatières végétales-animales...
3	R20,R21,R22, R20/21, R20/22, R20/21/22, R21/22, R33, R34, R40, R42, R43, R42/43, R68/20, R68/21, R68/22, R68/20/21, R68/20/22, R68/21/22, R68/20/21/22, R48/20/22, R48/21/22, R48/20/21/22, R62, R63, R65, R67, R68	Xn Nocif	10 > V > 1 mg/m ³	Soudure inox/ fibres céramiques-végétales / peintures au plomb / meules / sables / huiles d'usinage, de coupe ...
4	R15/29, R23, R24, R25, R29, R31, R23/24, R23/25, R23/24/25, R24/25, R395, R39/23, R39/24, R39/25, R39/23/24, R39/23/25, R39/24/25, R39/23/24/25, R41, R45, R46, R48, R49, R48/23, R18/24, R48/23/24, R48/25, R48/23/24, R48/23/25, R48/24/25, R48/23/24/25, R60, R61	T Toxique	1 > V > 0.1mg/m ³	Bois et dérivés / plomb métallique / amiante et matériaux en contenant / fonderie et affinage du plomb / goudrons et brais / mercure / Essence (carburant)
5	R26, R27, R28, R32, R26/27, R26/28, R26/27/28, R27/28, R39, R39/26, R39/27,	T ⁺ Très Toxique	< 0.1 mg/m ³	

R39/28, R39/26/27, R39/26/28

La quantité est calculée selon un référentiel (quotidien, hebdomadaire, annuel...). Ce référentiel temporel constitue une base de calcul, permettant de calculer la classe de quantité suivant le ratio Q_i / Q_{max} , où Q_i représente la quantité d'agent chimique consommée, et Q_{max} , la quantité de l'agent le plus consommé.

Table 5 : Calcul des classes de quantité

Classe de quantité	Q_i / Q_{max}
1	< 1%
2	Entre 1% et 5%
3	Entre 5% et 12%
4	Entre 12% et 33 %
5	Entre 33% et 100%

La fréquence est appréciée à partir du même référentiel temporel que celui utilisé pour le calcul de la masse. La table 6 permet de déterminer les classes de fréquence.

Table 6 : Détermination des classes de fréquence d'utilisation

Utilisation	Occasionnell e	Intermittent e	Fréquente	Permanente
Jour	< 30 minutes	30-120 minutes	2-6 heures	>6 heures
Semaine	< 2heures	2-8 heures	1-3 jours	>3 jours
Mois	< 1 jour	1-6 jours	6-15 jours	>15 jours
Année	< 5 jours	15 jours – 2 mois	2-5 mois	>5 mois
Classe	1	2	3	4
0 : l'agent chimique n'a pas été utilisé depuis au moins un an, l'agent chimique n'est plus utilisé				

La classe d'exposition potentielle résulte de la combinaison de la classe de quantité et de la classe de fréquence évaluées pour l'agent chimique étudié. Si l'agent chimique résulte de la transformation de matériaux, cependant, seule la fréquence sera prise en compte. La classe d'exposition potentielle traduit ainsi la probabilité d'exposition d'un opérateur à l'agent chimique. Lorsqu'un agent chimique n'est plus utilisé, la classe affectée est alors nulle.

Table 7 : Détermination des classes d'exposition potentielle

Classe de quantité						Classe de fréquence
5	0	4	5	5	5	
4	0	3	4	4	5	
3	0	3	3	3	4	
2	0	2	2	2	2	
1	0	1	1	1	1	
	0	1	2	3	4	

6.3.1.3.2 Détermination du risque potentiel et hiérarchisation des scores

Le risque potentiel présenté par l'agent chimique résulte de la combinaison des classes de danger et d'exposition potentielle. Le risque est exprimé sous forme de score, adimensionnel. La table 8 permet de déterminer sa valeur en fonction des classes de danger et d'exposition potentielle. Cette table présente des valeurs approchées des résultats donnés par la formule de calcul initiale (Vincent and Bonthoux 2000). :

$$R=10^{(D-1)} \times 3,16^{(E-1)}$$

- avec *R* pour le score de risque,
- *D* pour la classe de danger,
- *E* pour la classe d'exposition potentielle

Table 8 : Détermination du risque potentiel

Classe d'exposition potentielle						
5	100	1000	10000	100000	1000000	
4	30	300	3000	30000	300000	
3	10	100	1000	10000	100000	
2	3	30	300	3000	30000	
1	1	10	100	1000	10000	
	1	2	3	4	5	Classe de danger

La valeur des scores est ensuite classée en trois intervalles, permettant d'assigner une priorité de traitement selon l'intensité du risque (table 9).

Table 9 : Caractérisation des priorités en fonction du score de risque potentiel par agent chimique

Score par agent chimique	Priorité
≥ 10000	Forte
100-10000	Moyenne
<100	Faible

Cette hiérarchisation permet ainsi à l'évaluateur de discriminer les priorités de traitement des risques parmi l'ensemble des agents chimiques utilisés au sein d'un atelier. La méthode INRS propose in fine un **outil d'aide à la décision**. Sa manipulation ne nécessite pas de connaissance particulière dans le domaine de la toxicologie.

Se référant à des données réglementaires, elle permet, en outre, de connaître rapidement la conformité des usages de produits chimiques mis en œuvre.

6.3.2. Autres méthodes d'évaluation du risque chimique

6.3.2.1. Principe

Des méthodes plus complexes d'évaluation du risque chimique sont utilisées à plus grande échelle dans le domaine industriel, notamment dans le cadre d'études d'impacts d'installations sur l'environnement, d'étude de pollution des sols, de mise sur le marché de substances.

Ces méthodes ont pour objectif de guider la prise de décision du gestionnaire de risque en offrant une évaluation systématique de la situation. Ces méthodes utilisent un grand nombre de données d'entrée et font appel à des modèles scientifiques, permettant notamment de prédire le devenir d'une substance dans le temps, en fonction de différents paramètres.

Ces méthodes d'évaluation du risque comportent en général quatre étapes (Duboudin 2006) :

- « **L'identification** du potentiel dangereux du ou des agents concernés, indépendamment de la probabilité d'apparition des effets néfastes,
- **L'estimation** de la relation dose-effet ou dose-réponse qui vise à quantifier la relation entre la dose d'exposition et la réponse de l'organisme ou sa probabilité de réponse,
- **L'évaluation** des expositions qui permet d'identifier les populations qui ont été, sont ou seront en contact avec l'agent dangereux ainsi que les voies, niveaux et durées d'exposition correspondants,
- **La caractérisation** du risque qui constitue l'étape de synthèse de la démarche, de présentation et de discussion des résultats. »

A titre d'illustration, nous évoquerons ci-après la méthode d'évaluation des risques chimiques préconisée par les instances européennes et notamment utilisée dans le cadre du règlement REACH (Chemical Safety Assessment/ CSA) pour l'établissement des rapports de sécurité chimique (Chemical Safety Report / CSR), devant être remis à l'Agence Européenne.

6.3.2.2. Technical Guidance Document on Risk Assessment (TGD)

Le TGD est édité en 2003 par la Communauté Européenne et pose les fondations méthodologiques de l'évaluation de risque chimique présenté par une substance (IHCP 2003). La méthode est constituée de trois étapes principales :

- Formulation du problème,
- Analyse de l'exposition et des effets,
- Caractérisation du risque.

Le principe de l'évaluation de risque préconisée par le TGD est fondé sur la relation pouvant être établie entre le niveau d'une contamination connue, pouvant raisonnablement être prédite dans l'environnement (Predicted Environmental Concentration : PEC) et le seuil d'apparition d'effets indésirables reliés à cette substance sur des organismes représentatifs du milieu considéré (Predicted No Effect Concentration : PNEC) (Guérit, Bocquené et al. 2008).

Les principes généraux de conduite de l'évaluation du risque et de la prise des décisions afférentes de gestion sont exposés figure 28.

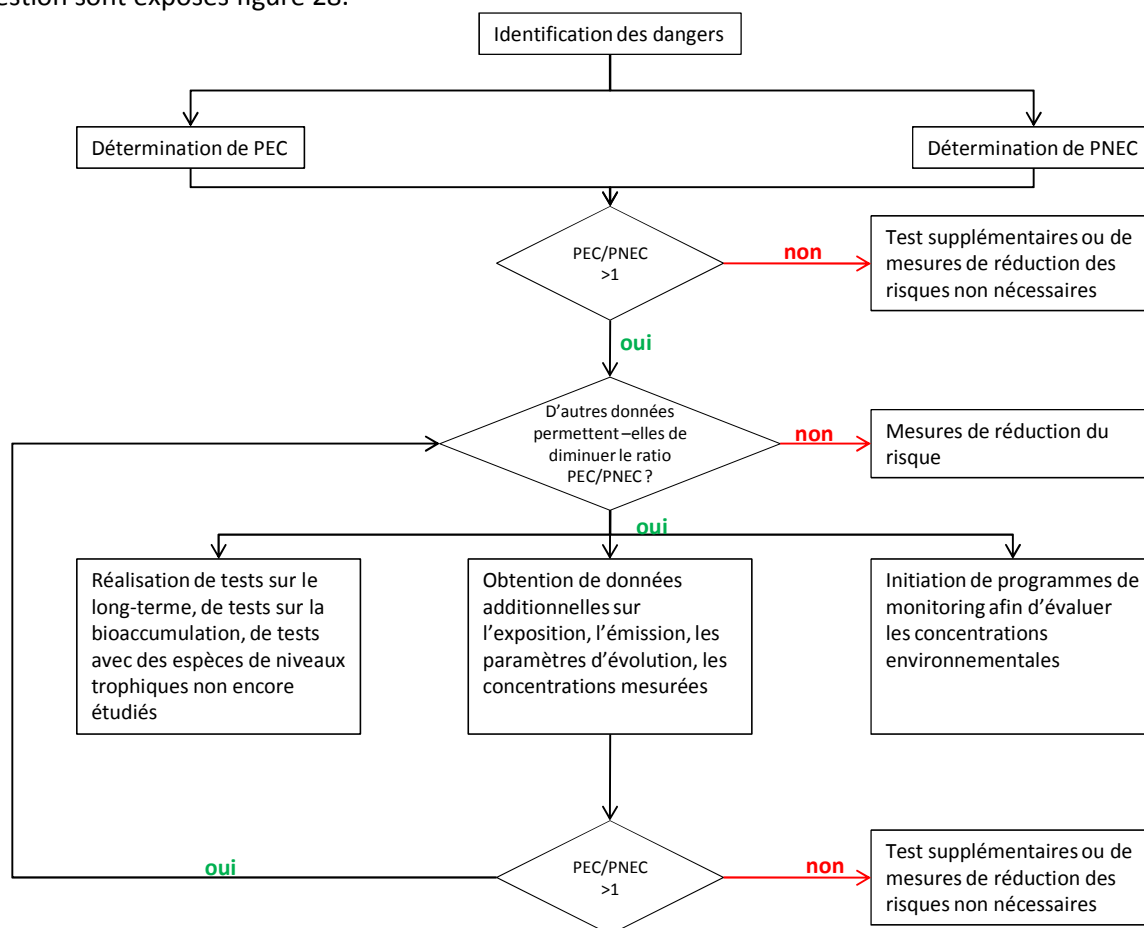


Figure 28 : Procédure générale d'évaluation du risque préconisée par le TGD, d'après (Guérit, Bocquené et al. 2008)

Dans le cadre du règlement REACH, les évaluations de risque sont menées pour documenter les rapports de sécurité chimique. Cette démarche est obligatoire pour tout organisme enregistrant un dossier auprès de l'Agence Européenne, lorsque la quantité de substance produite ou importée est supérieure ou égale à 10 t/ an.

6.3.3. Le management des agents chimiques par une approche risque

6.3.3.1. Sécurité des travailleurs


6.3.3.1.1 Lignes directrices

L'évaluation des risques chimiques présentés par une substance est utilisée dans le cadre de la détermination des mesures de prévention relatives à la sécurité d'un opérateur. Aussi, les méthodes d'évaluation, dites « simplifiées », seront privilégiées. Ces dernières demandent peu de données d'entrées pour être applicables, et ont été dimensionnées avec les types de données accessibles par les opérateurs.



L'approche par dangers est souvent la principale méthode utilisée pour la gestion des substances chimiques, lors de leur utilisation et stockage, par les entités en charge de l'hygiène et de la sécurité dans les entreprises. Cependant, l'usage de méthodes incluant la grandeur « exposition », telle que la méthode INRS, permet de définir de manière plus pertinente les mesures de protection et prévention à mettre en œuvre au niveau du poste de travail identifié.



6.3.3.1.2 Outils



L'évaluation des risques professionnels est une obligation réglementaire, en France (Article L4121-2 et L4121-3 du code du travail, décret n° 2001-1016 du 5 novembre 2001 et circulaire n° 6 de la Direction des relations du travail du 18 avril 2002), et au sein de la Communauté Européenne (directive cadre européenne du 12 juin 1989). Chaque entreprise doit décrire un document (« Document Unique ») recensant l'ensemble des risques liés aux activités, et décrire les mesures correctives et/ ou préventives associées. Les textes ne prévoient pas de formalisme particulier pour ce type de document, les types diffèrent d'une entité à une autre. A titre d'exemple, la Caisse Primaire d'Assurance Maladie d'Alsace–Moselle (France) propose un outil d'évaluation des risques chimiques appelé CLARICE (tableur informatique), utilisant la méthode INRS, et permettant une classification automatique des agents les plus dangereux, avec aide à l'association des mesures de prévention nécessaires (figures 29) Cet outil d'analyse peut être directement associé au Document Unique exigé par la circulaire précitée.






CLARICE
version CLP 25 lignes, septembre 2010

SGH 01  SGH06 

SGH02  SGH07 

SGH03  SGH08 


SGH04  SGH09 

SGH05 

Inventaire 3 lignes

	atelier Libellé	Agent chimique		FDS date	Etiquetage SGH ?	Phrases de risque ou men								
		Liste	Libellé			Ph. 1	Ph. 2	Ph. 3	Ph. 4	Ph. 5	Ph. 6	Ph. 7		
1	Peinture		vernis	12/10/2005		R63	R41	R2						
2	Peinture		Peinture A	25/08/2009		R5	R7							
3	Peinture		Peinture B	25/05/2010		R68/20	R39/23/24							

Etape 1 : Inventaire des agents chimiques, identification des dangers et des quantités utilisées




CLARICE
version CLP 25 lignes, septembre 2010

Raison sociale :
Etablissement :
Secteur concerné :
Inventaire par : atelier
Opérateur :
Etat au :

Evaluation du risque d'altération pour la santé

Rappel des données principales					Complément Utilisation fréquence	Résultats					Risque		Ordre numéro	
atelier Libellé	Agent chimique Appellation	Etiquette clp	Quantité t / an			danger	quantité	fréquence	exposition	Score HPP	Priorité	partiel		cumulé
1	Peinture	vernis	4,38		de 30 à 120 minutes par jour	4	5	2	5	100000	1	97,1%	97,1%	99999999
2	Peinture	Peinture A	0,09		de 2 à 6 heures par jour	1	2	3	2	3	3	0,0%	97,1%	2998
3	Peinture	Peinture B	0,11		de 30 à 120 minutes par jour	4	2	2	2	3000	2	2,9%	100,0%	2999997

Etape 2 : Evaluation automatique du score de risque potentiel, hiérarchisation



CLARICE
version CLP 25 lignes, septembre 2010

Raison sociale :
Etablissement :
Secteur concerné :
Inventaire par : atelier
Opérateur :
Etat au :

Bilan du risque d'altération de la santé

Rang	Agent chimique	atelier	Priorité	Risque		Propositions d'amélioration		
				partiel	cumulé	Action	Délai	Responsable
1	vernis	Peinture	1	97,1%	97,1%	Etude pour mise en place hotte, achat de masques à cartouche, gants et blouses, formation opérateurs	dec-2010	JM
2	Peinture B	Peinture	2	2,9%	100,0%	Port obligatoire des gants, affichage mode opératoire	sept-10	JM
3	Peinture A	Peinture	3	0,0%	100,0%			

Etape 3 : Proposition des actions correctives et préventives en fonction du niveau de risque identifié

Figure 29 : Capture d'écran de l'outil CLARICE, utilisé pour l'évaluation de risque et la description des mesures associées dans le cadre d'une activité de peinture.

6.3.3.2. Mise sur le marché de substances

Les méthodes plus complexes d'évaluation des risques chimiques, impliquant notamment la définition de **scenarii d'exposition**, sont utilisées principalement en amont de la mise sur le marché de substances chimiques, dans le cadre prévu par le règlement REACH par exemple. Ainsi, la responsabilité du producteur ou de l'importateur est en effet d'évaluer les **risques afférents à l'utilisation** de la substance, quant à l'utilisateur, il devra s'assurer de la validité des **scenarii d'utilisation retenus** et de l'adéquation de ces derniers avec son activité effective. GADE et al. (Gade, Øvrebø et al. 2008) indique que l'évaluation des scenarii d'exposition constitue non seulement une étape clé du processus d'évaluation des risques chimiques, mais également le cœur de la communication au sein de la supply-chain voulue par le règlement. Le scénario d'exposition décrit les conditions d'utilisation opérationnelles et les mesures de management de risques grâce auxquelles une utilisation sûre sera possible. En outre, cette évaluation doit être réalisée pour toutes les **étapes du cycle** de vie de la substance (de la production à la fin de vie), ceci impliquant un travail de recueil de données conséquent.

6.3.3.2.1 *Management du risque chimique dans le cadre du règlement REACH*

Le règlement REACH prévoit pour les substances et préparation produites ou importées à plus de 10 tonnes par an, la réalisation d'une évaluation de risque, documentée dans un rapport de sécurité chimique et synthétisée à travers une FDS qui sera transmise tout au long de la supply-chain. **Le rapport de sécurité chimique (CSR)** est rédigé suite à la conduite de l'évaluation de risque chimique et contient un ensemble de **Mesures de management du risque** : liste, modalités de mise en œuvre, modalités de communication :

- Caractéristiques de la substance et évaluation des risques :
- Dénomination, propriétés physico-chimiques
- Production et utilisation
- Classification et labellisation
- Devenir dans l'environnement
- Evaluation des dangers pour la santé humaine
- Evaluation des dangers pour la santé humaine liés aux propriétés physico-chimiques,
- Evaluation des dangers pour l'environnement
- Evaluation PBT et vPvB
- Evaluation de l'exposition
- Caractérisation du risque

La **FDS** est un document accompagnant obligatoirement tout agent chimique acheté dans le cadre professionnel. Ce document existe depuis la mise en œuvre des directives n°67/548/CEE et n° 1999/45/CEE. REACh conserve cette exigence, cependant des informations supplémentaires sont adjointes :

- Éléments sur le pouvoir biopersistant de la substance ;
- Valeur des PNEC pour les compartiments environnementaux et de la DNEC (Derived No Effect Level) pour l'Homme ;
- Scenarii d'exposition potentielle, identifiés lors de l'utilisation de la substance.

La FDS contient 16 chapitres regroupant l'ensemble des informations nécessaires à la connaissance des dangers mais aussi des risques liés à la substance. La figure 30 résume les liens entre Evaluation du risque chimique, CSR, FDS et mesures de management du risque, dans le cadre du règlement REACh.

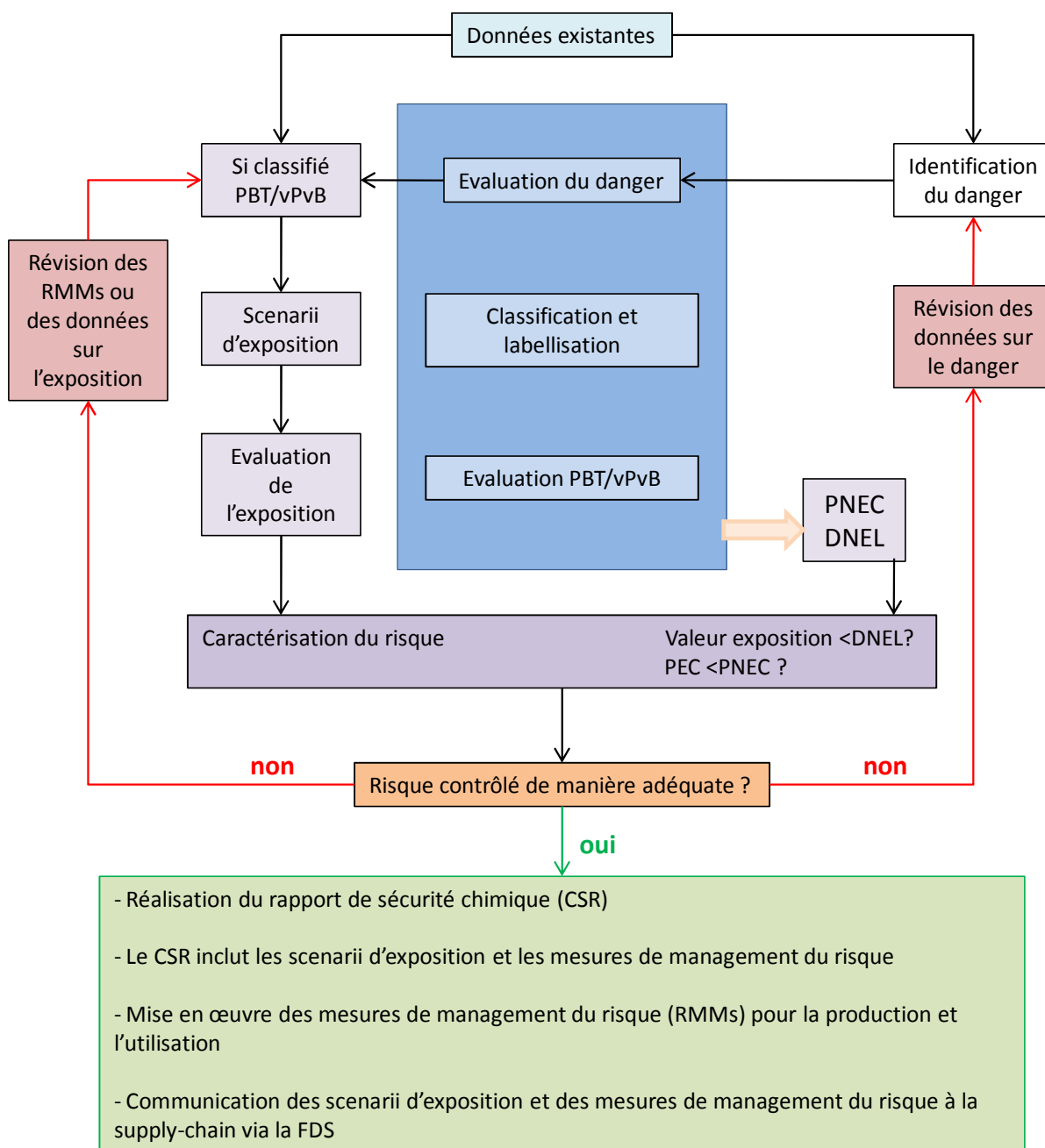


Figure 30 : Processus de définition du CSR, des mesures de management du risque (RMMs) et de la FDS à partir de l'évaluation de risque, dans le cadre du règlement REACH, traduit de (Leeuwen, Hansen et al. 2007)

6.4. La gestion des agents chimiques par une approche cycle de vie

6.4.1. Principes de l'analyse de cycle de vie

6.4.1.1. Définition générale

L'**analyse de cycle de vie** (ACV) est une démarche d'évaluation de l'impact environnemental d'un produit (au sens « manufacturé » du terme), d'un service ou d'un système, pour une fonction particulière de ce dernier, et sur toutes les étapes de son cycle de vie. La démarche d'ACV permet de comparer les impacts environnementaux de différentes solutions proposant une fonction identique, ou de comparer les impacts d'un produit, service ou système, sur ses différentes étapes de cycle de vie. Différentes méthodes d'ACV existent, reposant sur des modèles et des modes de calculs différents. Cependant, quelque soit la méthode choisie, les étapes sont toujours les mêmes.

6.4.1.2. Principales étapes de l'ACV

La démarche d'ACV, telle qu'elle est aujourd'hui connue, procède d'une approche de bilan environnemental des produits initiée dans les années 70. Trois organisations sont aujourd'hui impliquées dans la définition et le développement de la démarche d'ACV :

- L'ISO (Organisation Internationale de Normalisation),
- La SETAC (Société de Toxicologie et Chimie Environnementales)
- Le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement)

La mise en œuvre d'une démarche d'ACV est normalisée à travers le document de référence ISO 14040 : 2006, décrivant le cadre de la réalisation de l'ACV (ISO 2006)

JOLLIET et al. résumant les étapes de l'ACV de la manière suivante (Jolliet, Saadé et al. 2005):

- **Etape 1 - Définition des objectifs et du système** : cette étape permet de fixer le cadre de l'évaluation qui sera menée. Les objectifs et champs de l'étude sont définis. La fonction pour laquelle le service, produit ou système sera évalué est déterminée : **l'unité fonctionnelle** à laquelle seront rapportées toutes les données de l'inventaire est définie. Enfin, les **limites spatio-temporelles** du champ d'analyse sont posées.
- **Etape 2 – Inventaire des émissions et des extractions** : cette étape revient à établir la collecte des données quantifiant l'ensemble des émissions polluantes dans l'eau, l'air, le sol, ainsi que l'utilisation des matières nécessaires (extractions), pour la réalisation de la fonction du produit, service ou système étudié

- **Etape 3 – Analyse de l'impact environnemental** : l'ensemble des émissions et extractions inventoriées lors de l'étape précédente est soumis à une modélisation permettant de calculer les impacts environnementaux potentiels. Trois sous-étapes peuvent être dégagées :
 - **La classification** : liens réalisés entre les types d'émissions et les impacts auxquelles elles contribuent,
 - **La caractérisation intermédiaire** : pondération des émissions à l'intérieur de chaque catégorie d'impact (midpoints)
 - **La caractérisation des dommages** : regroupement des catégories d'impacts dans des catégories de dommages (endpoints)

Les catégories d'impact et les catégories de dommage peuvent être relativement nombreuses dans le cadre d'une étude. Lors de la caractérisation des dommages, certains ajustements complémentaires peuvent être réalisés, tels que la normalisation (évaluation de la contribution de l'objet d'étude à l'effet global d'une catégorie donnée de dommage). Une pondération sociale des dommages permet d'évaluer l'importance relative des différentes catégories, aux yeux d'une population, par exemple.

- **L'interprétation** est réalisée tout au long de la mise en œuvre de l'ACV. Pour chaque étape, les données sont évaluées, les incertitudes quantifiées et les analyses de sensibilité menées. L'interprétation permet de dégager des éléments prépondérants dans l'analyse. Par ailleurs, une confrontation du résultat environnemental brut aux données sociales et économiques peut offrir un éclairage intéressant aux résultats de l'étude.

Différentes méthodes d'ACV ont été développées, certaines d'entre elles présentent un intérêt particulier quant au traitement des problématiques liées à l'évaluation des pouvoirs toxicologiques et écotoxicologiques des substances, vis-à-vis de l'homme et de l'environnement.

6.4.2. Principes d'estimation des paramètres toxicologie et écotoxicologie dans une méthode de LCIA

6.4.2.1. Positionnement des méthodes de LCIA

Plusieurs méthodes de LCIA existent actuellement, se différenciant par leur approche : midpoints ou endpoints, voire la combinaison des deux. De fait, les résultats obtenus via ces différentes méthodes, en raison des modèles utilisés peuvent être différents. La figure 31 propose un positionnement de trois méthodes fréquemment utilisées : TRACI, ECO INDICATOR 99 et IMPACT 2002 + (figure 31).

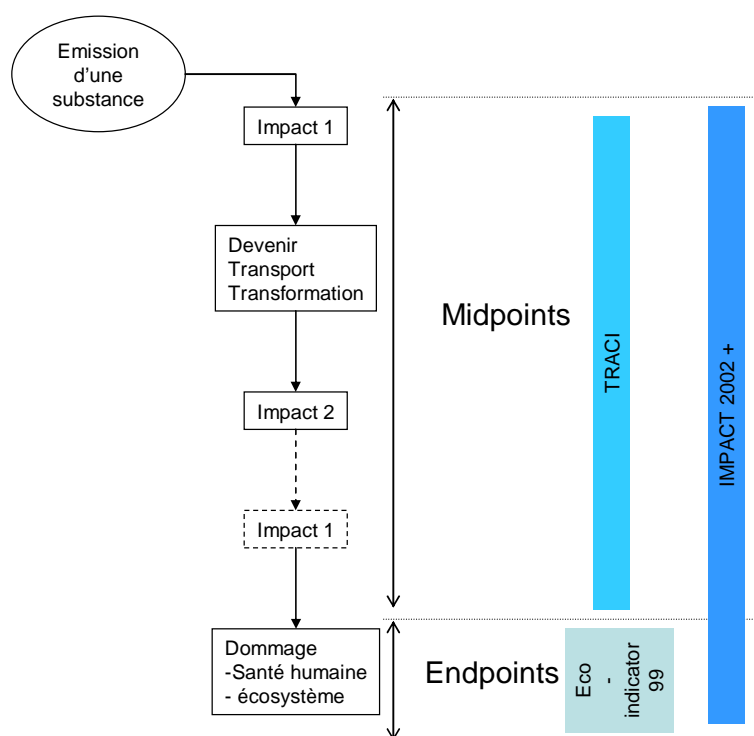


Figure 31 : Positionnement des méthodes de LCIA présentées, d'après (Finnveden et al., 2009)

A titre d'exemple, nous traiterons la méthode IMPACT 2002 +, qui couvre l'ensemble des domaines d'évaluation disponibles (midpoints et endpoints)

6.4.2.2. Méthode IMPACT 2002+

La méthode IMPACT 2002+ est proposée par JOLLIET et al. (Jolliet, Margni et al. 2003). Cette méthode permet des évaluations des impacts intermédiaires (midpoints) ainsi que des dommages (endpoints). La modélisation des différentes catégories intermédiaires fait appel à des méthodes connues, telles qu'Eco-indicator 99. La modélisation des impacts de substances toxiques sur l'homme ou l'écosystème fait appel à la méthode IMPACT 2002.

Dans le domaine de la santé humaine, ce modèle fournit des facteurs de caractérisation pour un millier de substances, fondés notamment sur :

- **le devenir chimique de la substance** avec $F_{m,n}$, facteur de devenir de la substance reliant les émissions d'un polluant dans un milieu m à une augmentation de sa masse dans le milieu n ,
- **l'exposition humaine**, avec $X_{n,inh/ing}$, facteur d'exposition, représentant la fraction équivalente de milieu n absorbé quotidiennement par la population
- **Le potentiel de risque sur la santé humaine** (cancer / autres maladies), avec $\beta_{inh/ing,m}$ facteur potentiel de risque, représentant le nombre probable de cas de mortalité pour une maladie donnée, par kg de substance absorbée par la population,
- **La gravité des maladies** avec D_m , facteur de gravité, exprimant la sévérité de l'effet m (maladie, mortalité) sur la santé humaine

Ainsi, le facteur de caractérisation des dommages (endpoints) d'une substance i , noté **HDF_i** (Human Damage Factor), exprimé en DALY, se calcule de la manière suivante :

$$HDF_i = F_{m,n} \cdot X_{n,inh/ing} \cdot \beta_{inh/ing,m} \cdot D_m = iF \cdot EF$$

iF représente la **fraction absorbée** ($kg_{ingéré}/kg_{émis}$) et **EF** représente le **facteur d'effet** en DALY/ $kg_{ingéré}$.

Le facteur de caractérisation intermédiaire (midpoint) d'une substance i , noté **HTP_i** (Human Toxicity Potentials) est obtenu par le rapport $HDF_i / HDF_{chloroéthylène}$. En exprimant les facteurs en unités-équivalent, les comparaisons entre différentes substances sont facilitées.

Dans le cas de l'étude de l'écotoxicité aquatique et terrestre, des similitudes existent avec le modèle précédent. De la même manière, un facteur de dommage de l'écotoxicité **EDF** (Ecotoxicological Damage Factor) est estimé à partir d'un facteur de devenir et d'un facteur d'effet.

Dans le cas de l'écotoxicité, les auteurs expriment le potentiel de risque en termes de fraction d'espèces affectées. Cette grandeur se calcule à partir de la moyenne géométrique des concentrations d'effet 50 (EC50)¹⁵ relatives à l'ensemble des espèces testées.

La figure 32 résume les modalités de calcul.

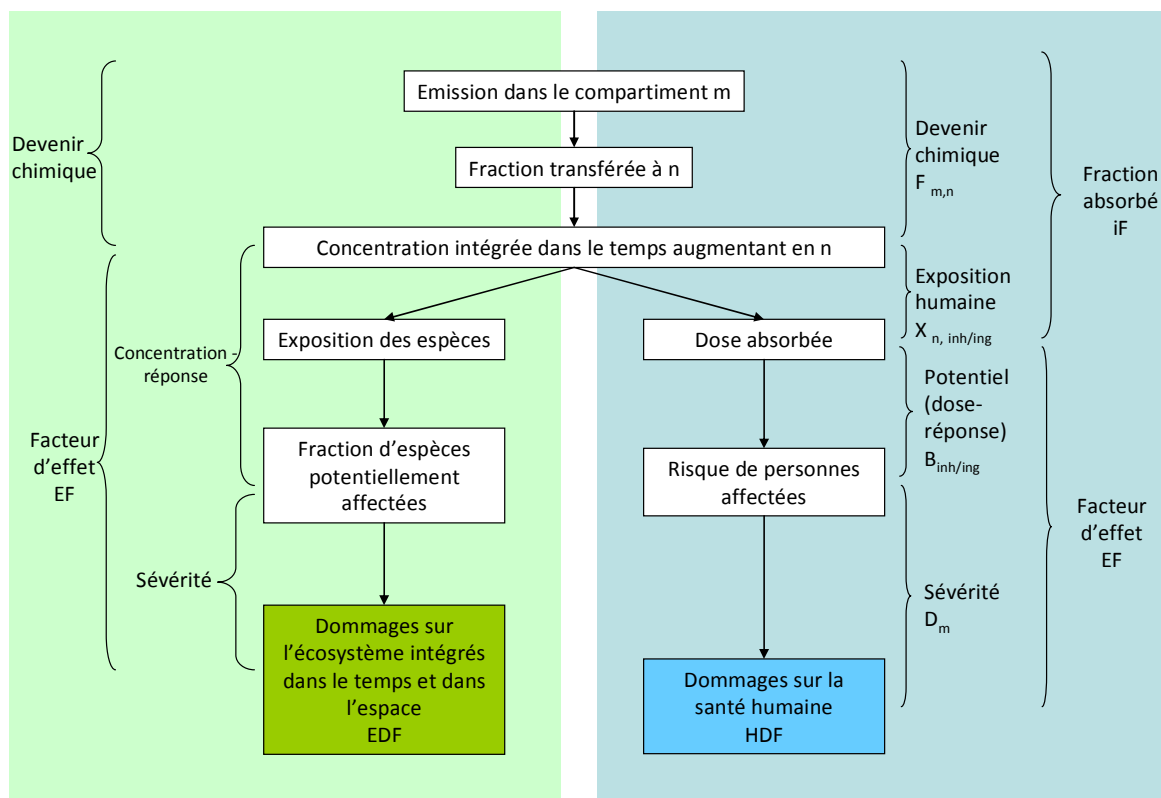


Figure 32 : Cadre général pour le calcul des dommages sur la santé et l'écosystème de la méthode IMPACT 2002 +, d'après (Jolliet et al., 2003)

Les méthodes de LCIA reposent sur le traitement d'un grand nombre de données d'entrée, à partir de modèles plus ou moins complexes de devenir des substances dans les compartiments environnementaux, ces derniers étant notamment fondés sur des valeurs statistiques issues de la toxicologie et de l'écotoxicologie. In fine, les dommages sont exprimés soit en unités équivalentes, permettant de comparer entre eux le pouvoir de différentes substances, soit en années de vie perdue (DALY).

¹⁵ Concentration d'effet 50 : 50% des individus d'une espèce testée sont affectés (mobilité, reproduction, mortalité)

6.4.3. Le management des agents chimiques par une approche cycle de vie

6.4.3.1. Des applications potentielles

OLSEN et al. (Olsen, Christensen et al. 2001) proposent quelques exemples d'applications potentielles de l'ACV au sein de différents organismes, en tant que support d'aide à la décision dans le cadre de la gestion des agents chimiques (table 10) :

Table 10: Exemples de domaines d'application des résultats d'ACV, d'après (Olsen, Christensen et al. 2001)

Contexte de prise de décision	Décisions stratégiques	Construction et conception	Approvisionnement	Vente
Acteurs				
Autorités	Support pour la réglementation Etudes portant sur les infrastructures - Identification de domaines de recherche	Dans les organismes d service public (eau, énergie...) - Etudes et prise de décision	- Choix entre des produits et/ou de fournisseurs selon des recommandations sur les « achats verts »	Ecolabelisation , recommandations
Entreprises	Lors de la sélection de procédés de production, de concepts marketing	Lors de la sélection de matériaux, de l'amélioration de procédés	Lors du choix de produits et/ou de fournisseurs	Déclaration environnementales
Particuliers	En tant que citoyen, choix de mode de vie	/	En tant que consommateurs, utilisation d'Ecolabels	/
Organisation non gouvernementales	Surveillance des politiques menées et lobbying	/	Recommandations	/

CHRISTENSEN et al. (Christensen and Olsen 2004) indiquent que l'ACV peut servir de mode d'évaluation complémentaire à l'analyse de risque telle qu'elle est prescrite par le TGD, et peut intégrer la boîte à outils utilisée par le législateur dans le cadre de l'autorisation de la mise sur le marché d'agents chimiques.

6.4.3.2. *Des limites évidentes*

FINNVEDEN et al. (Finnveden, Hauschild et al. 2009) identifient trois types de limitations quant aux méthodes de LCIA, dans le domaine de l'évaluation de la toxicité et de l'éco-toxicité :

- **le manque de données d'inventaire** concernant les émissions. Les données d'inventaires sont souvent orientées par des décisions politiques, positionnant des priorités d'études sur tel ou tel type d'émission. Ainsi, la connaissance des émissions reliées à l'utilisation et au devenir de milliers de substances est limitée.
- **Le manque de données toxicologiques et physicochimiques robustes** nécessaires à la réalisation de l'évaluation de l'impact. Le calcul des facteurs de caractérisation varie d'une méthode à l'autre, voire, ne sont pas calculables pour plusieurs substances présentes dans l'inventaire. En outre, si les données concernant les substances pour lesquelles une priorité sociétale existe sont relativement fiables, des lacunes seront observées dans le cas de l'évaluation de produits spécifiques.
- **Le manque de consensus dans l'utilisation des méthodes de caractérisation.** Les méthodes disponibles présentent des différences quant aux modèles qu'elles emploient, mais également sur les facteurs de caractérisation qu'elles produisent.

BOIZE et al. (Boize, Borie et al. 2008) analysent la pertinence de l'usage de l'ACV pour l'évaluation des risques sanitaires, la comparant avec la méthode de référence EQRS (Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires) utilisée par les autorités publiques françaises. Les auteurs soulignent que l'ACV tire sa richesse d'évaluation du fait d'une approche cycle de vie, cependant, « *les calculs d'indicateurs sanitaires ACV ne doivent pas être assimilés à des calculs de risque pour la santé* ». Les arguments utilisés convergent avec ceux présentés par FINNVENDEN :

- les données utilisées en ACV ne sont pas correctement actualisées (la mesure des DALY repose sur une table de référence éditée en 1996 et non actualisées depuis),
- le nombre de substances pouvant être évaluées par une ACV demeure restreint,
- les données sont génériques et les caractéristiques des populations sont simplifiées, ce qui, du point de vue de l'évaluation de l'exposition, entache le résultat d'incertitude.

Chapitre 7 : Spécification d'une méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel sur son cycle de vie

7.1. Objectif général de la spécification

Afin de répondre à la question de recherche, nous souhaitons, dans un premier temps, spécifier puis définir une méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel, sur son cycle de vie.

7.2. Contrainte sur l'échelle spatiale

En application de la réglementation européenne en vigueur, la méthode s'applique au produit et tout sous-ensemble qui en est extrait et qui est susceptible d'être commercialisé comme pièce de rechange.

7.3. Contrainte sur l'échelle temporelle

La méthode doit permettre d'évaluer le risque chimique du produit industriel aux différentes étapes de son cycle de vie, préalablement identifiées.

7.4. Contrainte sur le principe de fonctionnement

La méthode permet de calculer une grandeur « risque chimique », aux différentes étapes du cycle de vie du produit.

7.5. Contrainte sur la nature des résultats

La méthode permet de fournir un résultat de caractérisation du risque chimique présenté par le produit aux différentes étapes de son cycle de vie, dans l'optique d'une lecture immédiate des niveaux de risques acceptables ou non.

7.6. Confrontation des méthodes connues aux contraintes établies

L'ensemble des méthodes que nous venons de présenter s'intéressent à l'évaluation des effets liés aux agents chimiques sur l'homme et l'environnement, de manière plus ou moins élaborée et selon des référentiels spatio-temporels différents. Nous proposons ici, en nous inspirant de (Sonneman et al 2004), de dresser une comparaison synthétique des méthodes étudiées, en retenant les contraintes définies des paragraphes 7.2 à 7.5 (table 11). L'objectif de la table est de présenter une synthèse de l'adéquation des méthodes étudiées précédemment aux critères retenus dans le cadre de la spécification d'une méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel sur son cycle de vie.

Parmi les méthodes précédemment étudiées, seule l'ACV présente un périmètre d'application répondant à celui que nous définissons dans la spécification de besoin : produit et cycle de vie.

Cependant, nous notons que cette méthode ne répond pas aux critères relatifs au principe de fonctionnement de la méthode, soit une évaluation du risque chimique et également à ceux émis quant à la nature des résultats de la méthode, soit des résultats aisément hiérarchisables.

Nous proposons donc de retenir principalement les méthodes centrées sur l'évaluation des dangers et l'évaluation simplifiée de risque, en proposant de leur adjoindre une dimension produit et cycle de vie.

Table 11 : Comparaison multicritère des méthodes présentées

- : non adapté ; +° : peu adapté, ++ : moyennement adapté ; +++ : adapté

Contraintes	Evaluation des dangers § 2.2.1		Méthode INRS § 2.3.1		Evaluation du risque chimique § 2.3.2		Analyse de Cycle de Vie § 2.4.2	
§ 7.2 Echelle spatiale	Site	-	Site	-	Site	-	Produit	+++
§ 7.3 Echelle temporelle	Aucune	-	Dépend de l'activité	-	Dépend de l'activité	-	Cycle de vie de l'objet d'analyse	+++
§ 7.4 Principe de la méthode	Attribution de labels de danger en fonction de seuils	+	Quantification du risque présenté par un agent chimique dans des conditions données	+++	Comparaison de l'intensité de la nuisance avec la sensibilité de l'environnement	++	Potentiel d'impact environnemental des substances	-
§ 7.5 Résultats de la méthode	Labels / classification	+++	Score de risque chimique potentiel	+++	Probabilité d'occurrence de dangers	-	Score de dommage environnemental	-

Chapitre 8 : Proposition d'une méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit sur son cycle de vie

8.1. Synoptique général

Nous proposons de fonder l'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel sur deux étapes distinctes (figure 33).

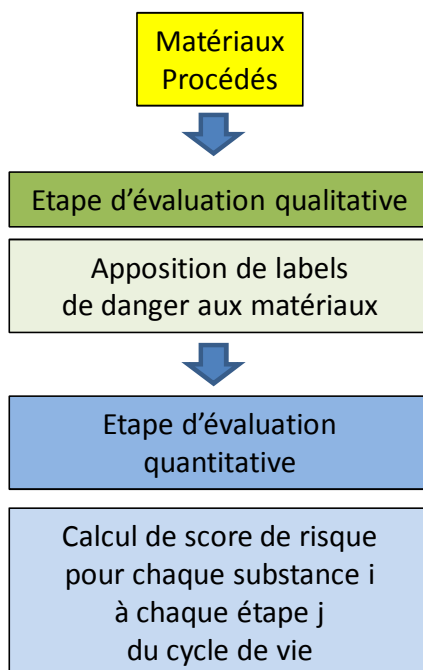


Figure 33: Synoptique général de la méthode d'évaluation du risque chimique proposée

Dans une première étape, l'évaluation est dite qualitative. En fonction de la nature des substances composant un matériau, un revêtement, ou entrant en jeu dans un procédé, l'évaluateur va apposer un « **label** » (niveau) de danger.

Dans une seconde étape, en ayant réalisé un filtre à partir des labels de danger, l'évaluateur s'intéressera à calculer un **score de risque chimique potentiel**, présenté par la **substance dangereuse identifiée**, pour une **phase de cycle de vie du produit définie**.

8.2. Notations

Dans la suite, nous utiliserons les notations suivantes, pour toute substance i et phase de cycle de vie j :

Grandeur	Notation
Danger	D_i
Exposition	$E_{i,j}$
Masse	$M_{i,j}$
Fréquence	$F_{i,j}$
Accessibilité	$A_{i,j}$
Risque	$R_{i,j}$

8.3. Evaluation qualitative du danger

Le danger d'un matériau, d'un revêtement ou d'un procédé est conféré par la substance de danger le plus élevé. Des règles de concentration peuvent être adoptées par l'évaluateur.

Nous proposons de nous référer aux listes de classifications de substances permettant de définir des labels ou niveaux de danger en fonction de la nature des substances. Elaborées à partir de la classification des phrases de risque, les classes de dangers prennent en compte les voies d'exposition pour lesquelles les substances produisent un effet (Exemples : R20 – nocif par inhalation, R28-très toxique en cas d'ingestion).

Le danger est une caractéristique intrinsèque de la substance, sa valeur est donc constante quelle que soit l'étape du cycle de vie considérée.

En fonction de la magnitude du danger de la substance, D_i prendra une valeur entière comprise entre 1 et 5, selon le modèle des classes de danger

8.4. Evaluation quantitative du risque chimique à chaque étape du cycle de vie du produit

8.4.1. Evaluation du score de risque chimique

L'évaluation du score de risque chimique s'appuie sur le mode de calcul proposé par la méthode INRS.

En fonction de la nature du produit à évaluer, des niveaux de classes, identiques à ceux définis par la méthode INRS sont attribués :

- au ratio de masse de la substance i exposée à l'environnement / masse totale du produit, pour une phase du cycle de vie j , dont les valeurs entières sont comprises entre 1 et 5,
- la fréquence d'exposition de la substance i pendant une phase du cycle de vie j , dont les valeurs entières sont comprises entre 0 et 4.

La valeur de l'exposition $E_{i,j}$ est calculée selon la matrice proposée par la méthode INRS.

8.4.2. Adjonction d'un facteur correctif, l'accessibilité physique

La substance présente sur un produit industriel n'est pas exposée de manière constante et identique au cours du cycle de vie. Aussi, un facteur correctif, que nous appelons « accessibilité physique » est défini ($A_{i,j}$). L'accessibilité physique est définie pour une substance et une phase de cycle de vie données. Sa valeur varie entre 0 et 1, en fonction de la portion de substance exposée, lors de la phase de cycle de vie choisie.

8.4.3. Formule générale de calcul du risque chimique

Ainsi, en reprenant la formule proposée par la méthode INRS pour le calcul du risque chimique, nous obtenons, pour une substance i , pour une phase de cycle de vie j :

$$R_{i,j} = A_{i,j} \times 10^{(D_i-1)} \times 3,16^{(E_{i,j}-1)} \quad (\text{équation 1})$$

Avec :

$R_{i,j}$: risque présenté par la substance i à l'étape du cycle de vie j

$A_{i,j}$: accessibilité physique de la substance i au cours de l'étape de cycle de vie j , $A_{i,j} \in [0,1]$

D_i : classe de danger de la substance, $D \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$

$E_{i,j}$: classe d'exposition potentielle de la substance i lors de l'étape de cycle de vie j ,

$E_{i,j} \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$

8.5. Résultats

Les valeurs de $R_{i,j}$ varient entre 0 et 1 000 000. Des intervalles sont alors décrits, repris sur ceux proposés par la méthode INRS, afin de définir un mode de hiérarchisation, correspondant au niveau d'acceptabilité du risque chimique :

Valeur de $R_{i,j}$	Niveau de hiérarchisation du risque
≥ 10000	Fort
100-10000	Moyen
<100	Faible

Conclusion

La première partie de la réponse à notre question de recherche consiste à **proposer un mode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel, sur son cycle de vie**. A cette fin, nous nous sommes proposés d'étudier les modalités d'évaluation du risque en général, et de réaliser un panorama des méthodes utilisées dans l'industrie, relativement au domaine du risque chimique.

La gestion des agents chimiques, dans le cadre d'une activité industrielle manufacturière, s'appuie sur différentes méthodes, développée soit sur la prise en compte unique du danger des agents chimiques, soit sur l'évaluation du risque qu'ils présentent, en associant au danger intrinsèque la grandeur exposition.-

Les méthodes d'évaluation aujourd'hui disponibles sont multiples et présentent des niveaux de complexité diverses, notamment relié à leur destination d'emploi, soit l'activité elle-même.

Cette étude nous a ainsi permis de spécifier les caractéristiques d'une méthode d'évaluation du risque chimique susceptible de répondre à la première partie de notre question de recherche.

Nous avons proposé une méthode structurée en deux étapes :

- **Evaluation qualitative du danger** : apposition de labels de danger aux matériaux, revêtements et procédés utilisés dans la réalisation du produit,
- **Evaluation quantitative du risque** : calcul d'un score de risque $R_{i,j}$ pour une substance i à chaque étape de son cycle de vie j .

Cette méthode repose sur l'usage de méthodes connues : les listes de danger et la méthode simplifiée d'évaluation du risque chimique INRS. Nous avons apporté quelques adaptations aux paramètres utilisés, afin de répondre aux exigences relatives à la notion de produit et de cycle de vie.

Maintenant, nous nous attacherons à l'examen des processus d'éco-conception, permettant la prise en compte d'une évaluation d'un facteur environnemental dans le cadre d'un processus de conception, puis aux particularités du processus de conception aéronautique, afin de déterminer les modes d'intégration de la méthode proposée.

PARTIE III :
INTEGRATION DE L'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE
D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE
DANS SON PROCESSUS DE CONCEPTION

Introduction	133
Chapitre 9 : Amélioration des caractéristiques environnementales d'un produit dès sa conception	134
Chapitre 10 : Processus générique de conception d'un produit aéronautique	147
Chapitre 11 : Spécifications pour l'intégration de la méthode d'évaluation du risque chimique dans le processus de conception aéronautique	156
Chapitre 12 : Synoptique général de la méthode	160
Conclusion	162

Introduction

Après avoir proposé une méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel sur son cycle de vie, nous nous intéressons désormais **aux modes d'intégration de ce type d'évaluation au sein du processus de conception et de développement du produit manufacturé lui-même**, afin de répondre à la deuxième thématique soulevée par la question de recherche.

Dans ce cadre, nous orienterons notre étude sur le domaine de l'éco-conception, démarche générale d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit sur son cycle de vie et de recherche de solutions, au sein du processus de conception, pour diminuer les impacts identifiés.

Le chapitre 9 traitera des caractéristiques majeures de l'éco-conception, notamment à travers le processus de conception et une revue rapide des outils, et se focalisera sur prise en charge du risque chimique, aujourd'hui, par les démarches d'éco-conception.

Le chapitre 10 sera consacré à une description de notre périmètre d'étude, le processus de conception et de développement d'un produit aéronautique.

Le chapitre 11 convergera sur un ensemble de spécifications relatives à l'intégration de la méthode d'évaluation du risque chimique proposée dans la partie II, au regard des enseignements tirés des chapitres 9 et 10.

Le chapitre 12 proposera un synoptique général de la méthode d'évaluation et de son intégration au sein du processus de conception détaillée d'un produit aéronautique, en réponse aux spécifications précédemment émises.

Chapitre 9 : Amélioration des caractéristiques environnementales d'un produit dès sa conception

9.1. L'éco-conception : processus global d'intégration des aspects environnementaux dans la conception de produits

Le « **Design for Environment** » (DfE) recouvre l'ensemble des approches utilisées dans le cadre du développement d'un produit ayant pour objectif de **diminuer les impacts environnementaux** du-dit produit sur **son cycle de vie**, tout en conservant ses **fonctionnalités** et ses caractéristiques **compétitives**. HAUSCHILD et al. (Hauschild, Alting et al. 2003) insistent sur le fait que la qualité environnementale d'un produit conçu dans une optique de réduction des impacts ne doit pas écraser l'ensemble des autres exigences qui président à sa conception sous peine, in fine, de voir le produit abandonné et le bilan environnemental demeurer inchangé. Ainsi, l'intégration de la dimension environnementale dans le processus de conception d'un produit doit s'effectuer initialement dans le cahier des charges du produit au même titre que toute autre exigence. La dimension environnementale peut devenir source d'une véritable créativité et d'innovation. La figure 34 met en évidence le principe d'intégration de l'environnement au même niveau que toute autre exigence et identifie l'activité de conception, finalement, comme étant un processus de compromis entre différentes exigences émanant de nombreuses parties intéressées.

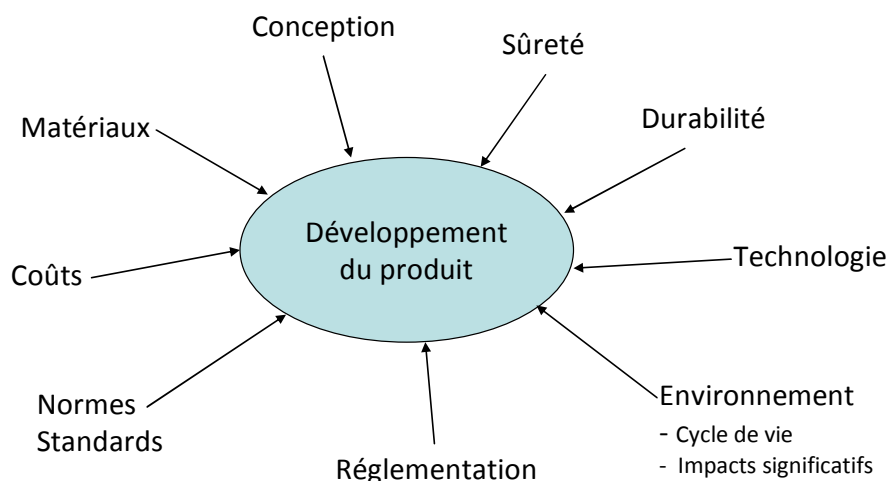


Figure 34 : Exemple d'exigences à prendre en compte dans le cadre du développement d'un produit, traduit de (Hauschild, Alting et al. 2003)

PLATCHECK et al. (Platcheck, Schaeffer et al. 2008) effectuent une revue de différentes méthodologies de conception et évaluent pour chacune les modes d'intégration de la composante environnementale. Quelle que soit la méthodologie envisagée, les auteurs affirment que la prise en compte de l'environnement dans les activités de conception (ici dénommée Ecodesign), doit s'effectuer en parfaite adéquation avec la **structure du processus de conception**. Les objectifs doivent être clairement établis afin de mener à bien cette démarche d'intégration. Dès lors que les impacts environnementaux d'un produit sont connus, la conception, le choix des matériaux, la production et l'utilisation du produit pourront être influés. Des solutions techniquement réalisables, en adéquation avec les besoins écologiques identifiés, doivent cependant être proposées.

CERDAN et al. (Cerdan, Gazulla et al. 2009) identifient différentes stratégies d'éco-conception. Ces stratégies sont reliées aux objectifs de l'entreprise mettant en œuvre le processus de conception, par exemple, mais également au type de produit ou aux attentes des parties intéressées. Huit types de stratégies sont identifiés :

- Réduction du nombre de matériaux et sélection des plus appropriés ;
- Réduction de l'impact lié à la phase de production,
- Optimisation de la phase de distribution,
- Réduction de l'impact environnemental lié à la phase d'utilisation,
- Augmentation de la durée d'utilisation du produit
- Simplification des modalités de désassemblage du produit (Design for Disassembly),
- Conception pour la réutilisation (Design for Reuse)
- Conception pour le recyclage (Design for Recycling).

Les deux stratégies les plus documentées, aujourd'hui, sont celles se rapportant à la réutilisation et au recyclage.

9.2. Evaluation environnementale et amélioration du produit

9.2.1. Lien entre amélioration environnementale et amélioration du produit

LE POCHAT (Le Pochat 2005) propose de distinguer deux étapes fondamentales dans le processus d'éco-conception : l'évaluation environnementale et l'amélioration environnementale. Pour l'auteur, **l'évaluation environnementale** « *consiste, d'une part à quantifier les impacts environnementaux du cycle de vie du produit étudié, et d'autre part, dans le but de proposer une interprétation propre au produit, à identifier et évaluer dans quelle mesure les différents paramètres, caractéristiques, et fonctionnalités du cycle de vie du produit sont à l'origine des impacts environnementaux mesurés* ». La **phase d'amélioration environnementale** correspond à l'analyse des résultats de l'évaluation, la recherche de solutions visant à diminuer les aspects environnementaux identifiés comme prioritaires ou critiques par l'évaluateur. La phase d'amélioration est **itérative**, les solutions proposées peuvent être de nouveau évaluées, jusqu'à atteindre un niveau de diminution d'impact environnemental satisfaisant, au regard des objectifs initiaux fixés.

L'éco-conception est une approche récente, dont l'objectif est d'intégrer le plus en amont possible du processus de développement du produit l'exigence environnementale, au même titre que toute autre exigence fonctionnelle ou technique. Cependant des principes demeurent, tenant à la structure même du processus de conception. L'amélioration environnementale doit se réaliser le plus en amont du processus de développement, lorsque la liberté (relative) des choix de solutions, architectures générales du produit demeurent. Ainsi, plus les propriétés du produit sont fixées par les choix réalisés dans le cadre du processus de conception du produit, plus la possibilité d'influencer la performance environnementale du produit est réduite (figure 35). Aussi, la démarche d'éco-conception doit-elle s'appuyer sur une connaissance solide du processus de conception auquel elle s'applique, afin de pouvoir déterminer, notamment le moment optimal (temps, données) permettant de mettre en œuvre un déroulement complet, soit évaluation environnementale, analyse des résultats, et amélioration du produit.

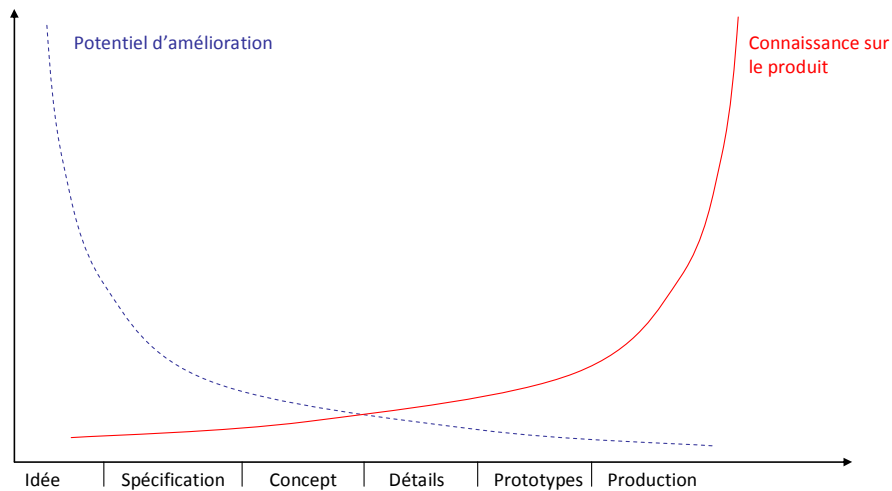


Figure 35 : "Evolution du potentiel d'amélioration environnementale d'un produit au cours de son développement, traduit de (Hauschild, Alting et al. 2003)

9.2.2. Un état de l'art des outils d'éco-conception

LE POCHAT et al. (Le Pochat, Bertoluci et al. 2007) dressent une revue des outils d'éco-conception disponibles et proposent une classification multicritère de ces derniers. La typologie des outils d'éco-conception est protéiforme. Ces outils ont autant été développés par des organismes académiques que par des industriels. Certains ont été conçus pour répondre à des problématiques spécifiques, liés à des secteurs d'activités particuliers, d'autres ont vocation à être utilisés pour différents types de produits.

Les outils d'éco-conception peuvent trouver leur application à différentes étapes du cycle de développement du produit ou être spécifiques de certaines d'entre elles. Aussi l'auteur note-t-il que pas moins de 150 outils utilisables au cours de l'étape de conception sont recensés. Des outils orientés sur la communication, la créativité, le design peuvent également être considérés comme des outils d'éco-conception. Parmi l'ensemble des catégories d'outils existants, LE POCHAT et al. mettent en exergue les outils d'évaluation environnementale et les outils d'aide à la décision en conception, dont l'objet est bien sûr d'aider les concepteurs à l'amélioration du produit (table 12).

Table 12 : Comparaison d'outils d'Ecodesign, in (Le Pochat, Bertoluci et al. 2007)

Type d'outil	Fonction	Niveau estimé d'expertise requis	Outil d'aide à la décision stratégique
Analyse de Cycle de Vie (ACV)	Evaluation	+++	Non
ACV simplifiée	Evaluation	++	Non
Eco-matrice	Evaluation	++	Non
Checklist	Evaluation / Amélioration	+	Non
Outils éco-paramétriques	Evaluation	+	Non
Lignes directrices (guidelines)	Amélioration	+	Non
Manuel	Amélioration	++	Non

De manière globale, les auteurs soulignent le fait que la plupart des outils actuellement disponibles, permettant d'intégrer le paramètre environnement aux activités de conception, requièrent des connaissances et une expertise dans le domaine. Ce constat est d'autant plus fort pour les outils d'évaluation environnementale s'appuyant d'une part sur une masse de données d'entrée conséquente et faisant appel à des compétences d'analyse et d'interprétation des résultats bien particulières, telle que l'ACV.

9.2.3. La prise en compte de la dimension humaine

REYES (REYES 2007) établit une revue bibliographique concernant l'adéquation des outils d'éco-conception avec les pratiques de conception et les niveaux d'appropriation par les utilisateurs. L'auteur constate, de manière générale, l'existence d'un écart entre les intentions du processus d'éco-conception et les outils proposés, tant dans le domaine de l'évaluation que de l'amélioration environnementale. Les principaux griefs relevés touchent :

- Aux limites d'exploitation des outils : niveau d'expertise requis, données d'entrée et de sortie nombreuses,
- A l'absence de lien explicite entre les résultats fournis et les attentes stratégiques des utilisateurs (entreprises),
- A la charge nécessaire (temps, ressources techniques, humaines, financières),
- A l'absence de réelle adéquation avec la nature du processus de conception visé.

L'expérience de terrain¹⁶ nous indique que le succès d'une démarche d'intégration de l'environnement au sein des activités de conception repose sur une réelle compréhension des modes de travail des équipes de conception. Un outil est utilisé lorsque celui répond effectivement à une ligne stratégique définie par l'organisme qui l'utilise, permettant de fédérer les utilisateurs autour de nouvelles pratiques. Par ailleurs, l'outil, qu'il soit d'évaluation ou d'amélioration voire le processus complet d'éco-conception, se doit d'être **miscible** dans les activités des bureaux d'études et non, comme le font remarquer l'ensemble des auteurs cités par REYES, être une activité complémentaire voire une excroissance du processus de conception. Un accompagnement progressif des concepteurs doit être réalisé (conduite du changement), les premières étapes visant à introduire la notion d'environnement à partir de pratiques connues. Ainsi, en conservant un lien systématique avec les pratiques, connaissances et informations mises en œuvre dans l'activité de conception, la démarche d'éco-conception présente de réelles chances de succès.

9.3. Le point de vue normatif

9.3.1. La norme ISO 14 062

La norme internationale XP ISO/TR 14 062 :2002 (AFNOR 2004) s'adresse aux concepteurs et développeurs et propose des principes généraux d'intégration de l'environnement dans leurs activités. Cette norme couvre tous les domaines de conception de produits et services.

L'intérêt de ce document est de proposer un point de vue unifié et générique sur les modalités d'intégration de la grandeur environnementale dans les activités de conception.

A partir d'un modèle de processus de conception, cette norme identifie les étapes clés et actions à mener, permettant l'intégration des exigences environnementales retenues. L'objectif est bien sûr d'intégrer le plus en amont possible du processus les aspects environnementaux, afin de les traiter au même niveau que les exigences techniques et fonctionnelles classiques.

L'évaluation du ou des aspects environnementaux présenté par le produit sur son cycle de vie est une étape importante de la démarche d'intégration des aspects environnementaux dans le processus de conception. Les outils d'aide à l'intégration de l'environnement dans le processus de conception

¹⁶ Projet interne à la société Hispano –Suiza d'intégration de l'environnement en conception, 2005 - 2007.

sont multiples, leurs objectifs différents, aussi la norme n'en spécifie-t-elle pas de type particulier. Une revue des différents outils s'avère cependant intéressante.

9.3.2. La norme NF E01-005 : exemple d'une méthodologie d'éco-conception de produits mécaniques

La norme NF E01-005 (AFNOR 2010) porte sur la proposition d'une méthodologie d'éco-conception. Cette norme est principalement à destination des Petites et Moyennes Entreprises (PME), qui n'ont pas forcément les ressources et moyens suffisants pour la mise en place d'un pôle dédié à l'éco-conception. La méthodologie proposée s'appuie sur quatre étapes principales, et insiste sur une mise en œuvre facilitée par le démarrage d'un projet à partir d'une re-conception de produit.

En effet, le point d'entrée de la méthode est la réalisation d'un profil environnemental du produit cible. Cette étape est d'autant plus facilitée que le produit cible existe, de fait la méthode présente davantage un objectif d'amélioration environnementale (figure 37 bis).

Dans un premier temps, les aspects environnementaux sont évalués, selon sept familles pré-identifiées.

A partir des résultats d'évaluation, des lignes directrices d'amélioration sont décrites, dont l'objectif est de concourir à la diminution des aspects identifiés, puis elles sont hiérarchisées en fonction de leur faisabilité technique et de leur cohérence stratégique.

Des indicateurs sont associés aux lignes directrices, permettant le suivi des évolutions et améliorations (étapes 3 et 4).

Enfin, une dernière étape est constituée par la capitalisation et le retour sur expérience.

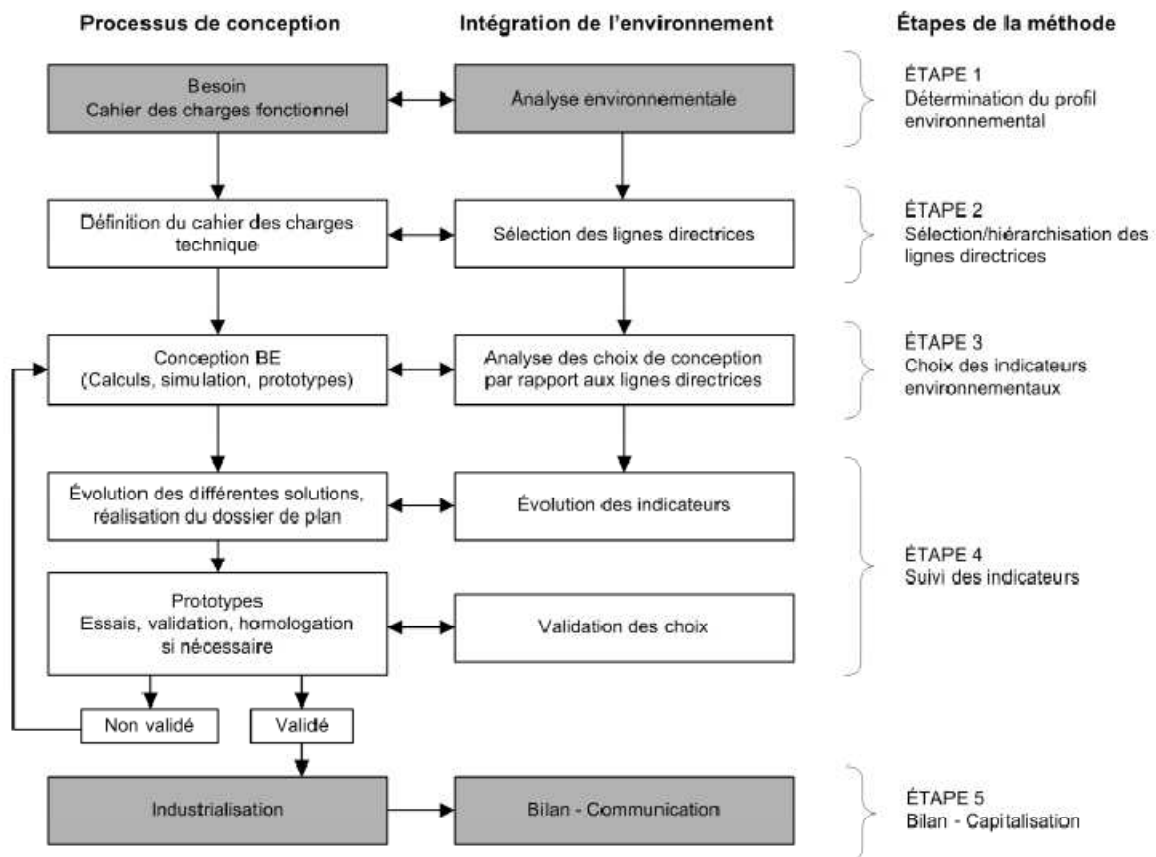


Figure 37 : Synoptique de la méthodologie d'éco-conception proposée par la norme NF E01-005, in (AFNOR 2010)

Les auteurs ont proposé une représentation du déroulement de la méthode vis-à-vis d'un processus de développement de produit générique. Les deux premières étapes de la méthode indiquent la nécessité de disposer d'une première version du produit à améliorer, permettant de dresser le profil environnemental qui sera la base du travail. Aussi, cette méthode semble d'application plus complexe dans le cas où le processus de développement du produit est uniquement initié par un cahier des charges fonctionnel, appelant à la réalisation d'un produit sans antécédent.

9.4. Maîtriser le risque chimique d'un produit manufacturé sur son cycle de vie par l'éco-conception

Comme vu précédemment, les méthodes d'éco-conception et les outils associés sont nombreux. Notre centre d'intérêt, dans cette étude, se concentrant sur la maîtrise du risque chimique présenté par un produit manufacturé sur son cycle de vie, il nous semble donc intéressant de constater les modes de prise en charge de cet aspect dans les méthodes d'éco-conception ou par certains outils.

9.4.1.1. Exemple 1 : méthode d'éco-conception de produits mécaniques

Nous nous concentrerons ici sur la méthode proposée par la norme NF E01 -005, puisque cette dernière fait l'objet d'un processus de normalisation, donc de consensus entre acteurs de différents secteurs d'activité. Cependant, cette norme n'a pas vertu d'être représentative de la totalité des méthodes pouvant être proposées à travers le monde.

Nous nous intéressons au traitement de l'aspect portant sur les substances dangereuses (noté (S)). Cet aspect est *lié aux substances présentes dans le produit et susceptibles de pénaliser la fin de vie du produit.*

L'aspect (S) va alors être coté, en valeur entière variant de 0 à 3 selon un arbre de décision représenté en figure 38. Les critères de cotation sont principalement orientés sur la présence de substances pouvant induire des difficultés de recyclage, notamment les substances pointées par la directive RoHS. La méthode ne semble pas indiquer de hiérarchisation particulière d'autres types de substances, la cotation s'appuyant sur le seul caractère dangereux de la substance.

Une fois l'aspect coté, les lignes directrices pertinentes visant à la diminution de cet aspect sont décidées. La norme propose une stratégie générale, associée à des lignes directrices et des indicateurs (table 13)

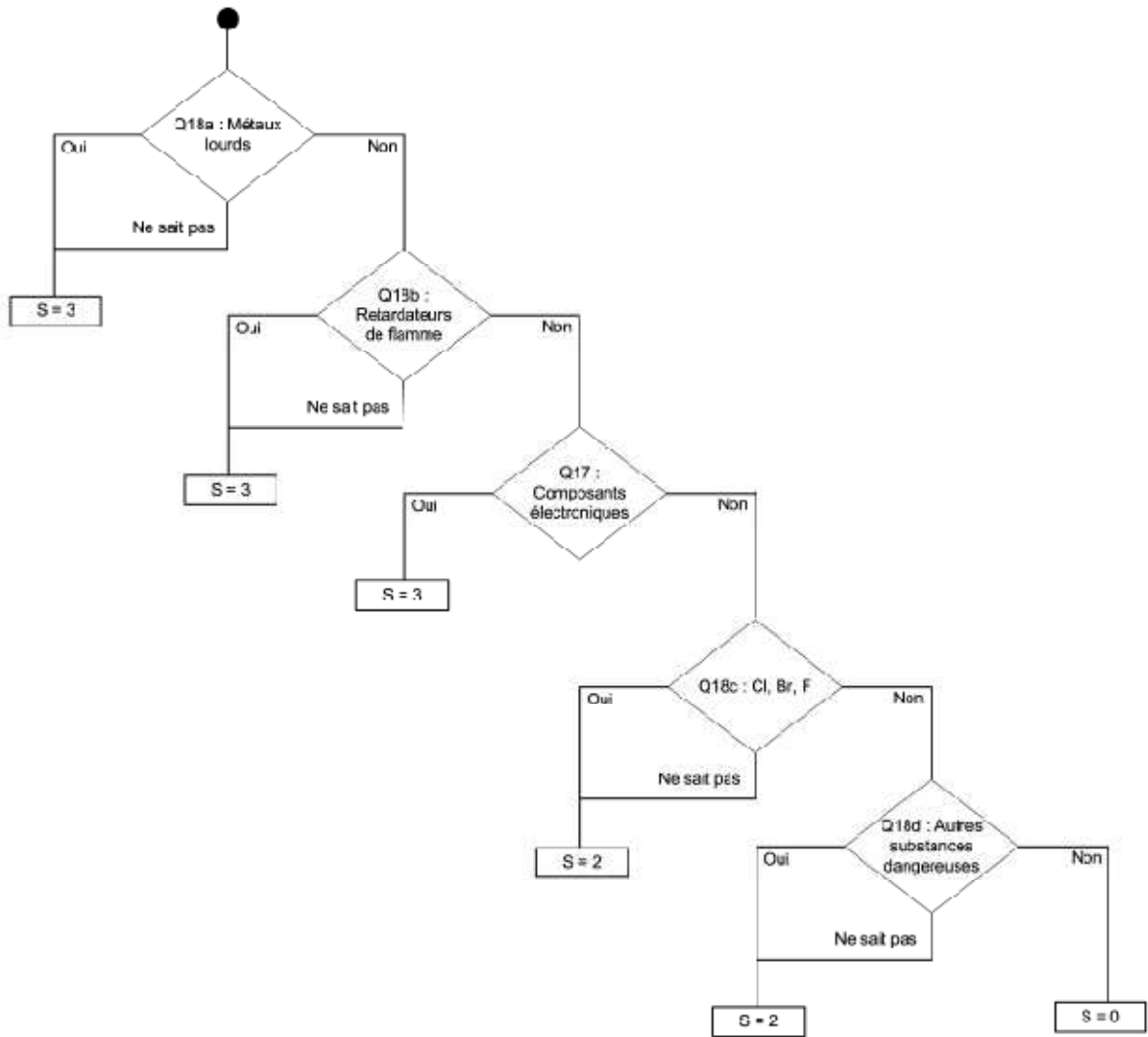


Figure 38 : "Arbre de décision pour l'aspect (S), in (AFNOR 2004)

Table 13 : Stratégie, lignes directrices et indicateurs pour l'aspect (S), in (AFNOR 2004)

Aspect	Stratégie	Lignes directrices	Indicateurs
(S)	Gérer les substances dangereuses	Réduire – Eliminer les substances dangereuses	Nombre, % substances dangereuse / produit
		Faciliter une incinération "sûre" (moins polluante) du produit	Nombre, % matériaux contribuant à la formation de substances dangereuses lors de l'incinération
		Faciliter une mise en décharge "sûre" (moins polluante) du produit	Nombre, % matériaux contribuant à la formation de substances dangereuses lors de la mise en décharge

La méthode ici proposée présente l'intérêt d'être d'une utilisation aisée, les données d'entrée ne nécessitant pas pour l'utilisateur de connaissances expertes dans les domaines de la chimie ou toxicologie. Les stratégies de diminution du danger lié aux substances et matériaux sont principalement applicables aux étapes de production et de fin de vie du produit. La méthode préconise la substitution des matériaux les plus dangereux et une diminution du nombre de différents matériaux utilisés dans l'architecture du produit afin de faciliter, notamment, les modes de traitement en fin de vie.

Cependant, cette méthode ne traite pas la notion de risque chimique, puisqu'elle se limite au danger d'une substance. En outre, les critères d'attribution des scores sont davantage liés au danger présenté en fin de vie du produit que sur l'ensemble du cycle de vie. En effet la présence d'une substance dangereuse dans un produit manufacturé ne préjuge pas de l'occurrence d'un risque en phase d'utilisation, par exemple.

9.4.1.2. Exemple 2 : maîtrise de la toxicité par le choix de matériaux

Le choix des matériaux est une donnée d'entrée intéressante dans le cadre d'une démarche d'éco-conception, a fortiori lorsque l'objectif porte sur une maîtrise de la toxicité présentée par le produit. LJUNBERG (Ljungberg 2007) identifie le choix des matériaux comme une composante essentielle concourant au développement d'un produit environnementalement performant. Pour certains produits la sélection des matériaux relève même d'une décision cruciale : de ce choix dépendront l'usage de produits chimiques ou la quantité d'énergie utilisée en production (corrélés aux procédés de production choisis), la durée de vie du produit, la fréquence des opérations de maintenance ... La sélection des matériaux procède généralement de la combinaison de critères techniques (densité, élasticité...), de critères de coûts, etc. Dans le cadre d'une démarche d'éco-conception, il est nécessaire d'adjoindre à ces critères de choix le paramètre environnemental.

KARANA et al. (Karana, Hekkert et al. 2008) s'intéressent à la disponibilité des informations touchant aux propriétés des matériaux, à partir de différentes sources existantes (manuels, bases de données ...) et à la classification de ces différentes propriétés par les utilisateurs, i.e, les concepteurs. Les propriétés environnementales du matériau se rapportent principalement aux caractéristiques de recyclabilité, et à la durée de vie de ce matériau. La notion de toxicité du matériau peut exister mais est peu représentative des données écologiques le caractérisant. En outre, si les propriétés environnementales du matériau intègrent sont progressivement intégrées par les concepteurs dans leurs critères de choix, ces caractéristiques n'arrive en général qu'à la fin d'une longue liste d'autres paramètres, liés aux propriétés physiques, chimiques et économiques du matériau.

Des méthodes d'éco-conception fondées sur le choix des matériaux et de leurs caractéristiques environnementales sont proposées (Holloway 1998; Zhou, Yin et al. 2009). Dans un premier temps, les caractéristiques environnementales des matériaux entrant dans l'étude sont évaluées à partir d'outils tels que l'ACV. Les résultats sont ensuite rapportés soit à des unités classiques relatives à des grandeurs caractéristiques des matériaux (module de Young, par exemple), soit exprimés en millipoint/kg. Puis, grâce à des modèles d'aide à la décision plus ou moins complexes, les matériaux répondant au mieux aux exigences tant techniques, fonctionnelles qu'environnementales sont sélectionnés.

Néanmoins, Les ACV utilisées pour déterminer la « valeur » environnementale du produit sont des analyses longues à mener, nécessitant des données d'entrée nombreuses, ce qui, également, porte la menace de limiter l'intégration de la problématique environnementale au sein d'un processus de conception. Les auteurs insistent notamment sur le fait que, plutôt que d'inciter les concepteurs à faire usage d'outils tels que l'ACV afin de déterminer les matériaux adéquats, la mise en œuvre d'outils réellement adaptés à leurs pratique serait davantage pertinent. Intégrant l'évaluation de la toxicité d'un produit sur son cycle de vie, l'ACV peut donc être utile pour déterminer, mais après traitement des résultats, le ou les matériaux qui répondront aux exigences fixées dans ce domaine. Cependant, la masse des données d'entrée, les problèmes d'incertitudes et la difficulté à manipuler cet outil dans le cadre d'un processus de conception sont des freins non négligeables à son utilisation réelle.

9.4.1.3. Bilan

La détermination du risque chimique présenté par un produit sur son cycle de vie ne semble pas aujourd'hui appartenir aux prérogatives des méthodes et outils utilisés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception.

A partir des quelques exemples illustrés ci-dessus, nous pouvons constater qu'une démarche simplifiée d'éco-conception, faisant l'objet d'une normalisation, ne fait appel qu'à l'aspect danger des substances dans le cadre de la caractérisation de l'aspect « toxicité ».

Si nous nous intéressons de plus près aux méthodes centrées sur le choix des matériaux, qui finalement sont la source du risque chimique présenté par un produit, ces dernières se fondent pour la plupart sur une utilisation de l'ACV, qui ne permet pas non plus la mesure du risque chimique sur le cycle de vie du produit.

L'éco-conception est ainsi une démarche qui est la porte d'entrée de l'amélioration de la performance environnementale du produit. Diverses stratégies existent, notamment l'amélioration par

le choix des matériaux. **Cependant, la prise en compte de la grandeur risque chimique est aujourd'hui absente des critères de choix.**

Chapitre 10 : Processus générique de conception d'un produit aéronautique

10.1. Vie d'un programme aéronautique et du processus de conception associé

10.1.1. Les programmes aéronautiques

Le secteur aéronautique subit de nombreuses pressions tant « externes » (augmentation du prix du carburant, entrée en vigueur de réglementations environnementales contraignantes...) qu'« internes » (modèles économiques « low-cost » des compagnies aériennes, exigences de flexibilité des opérations, amélioration du confort...). L'ensemble de ces cibles doit être atteint tant par le fabricant que l'investisseur, de fait, les exigences techniques doivent être remplies, au même titre que les exigences économiques. Le processus de définition d'un nouveau produit démarre par une analyse de marché, indiquant l'existence d'une opportunité particulière de développement. A partir de ce moment, les exigences techniques aéronautiques sont spécifiées. Les technologies qui seront mises en œuvre doivent être identifiées dès la phase de conception préliminaire, et leurs bénéfices potentiels, tant pour l'investisseur que le fabricant doivent être évalués (Szodruch 2001).

Caractérisée par des investissements lourds et des technologies de pointe, l'industrie aéronautique est structurée selon des processus d'activité complexes et fortement normalisés, permettant d'assurer la conception, production et maintenance de systèmes dans des délais de plus en plus courts et pour des durées de vie de plus en plus longues.

SCHMITT (Schmitt 2009) décrit le processus de conception aéronautique selon quatre niveaux:

- 1^{er} niveau : **le système de transport aérien** définit l'environnement et les contraintes dans lesquels l'aéronef sera utilisé,
- 2^{ème} niveau : **le processus industriel** s'articule autour de questions relatives à la taille de l'aéronef, de son positionnement compétitif, du choix d'une conception nouvelle ou dérivée, du niveau de technologie et du risque du système de propulsion, du nombre de partenaires et contractants, etc. ...Ce niveau correspond à la recherche d'un compromis entre le marketing, l'ingénierie, la finance et la production.

- 3^{ème} niveau : **l'ingénierie pure** regroupant toutes les disciplines telles que l'aérodynamique, les structures, la propulsion, etc. définit la configuration répondant au mieux aux différentes exigences, dans un souci de compromis entre toutes les disciplines sollicitées.
- 4^{ème} niveau : **la conception de sous-systèmes** doit également répondre à des exigences d'optimisation des fonctions, telles que les moyens de contrôle de l'avion, l'architecture des structures de communication au sein de l'aéronef et vis-à-vis de l'extérieur, la génération de puissance, etc.

L'industrie aéronautique est caractérisée par un cycle très long. Un nouveau produit (programme) est défini en 15 – 20 ans. Ce programme sera adapté aux nouvelles conditions de marché et produit en différentes versions dans les 20 à 50 prochaines années. Le dernier aéronef produit pourra rester en service durant les 20 prochaines autres années. La figure 39 propose une représentation générique du cycle de vie d'un programme.

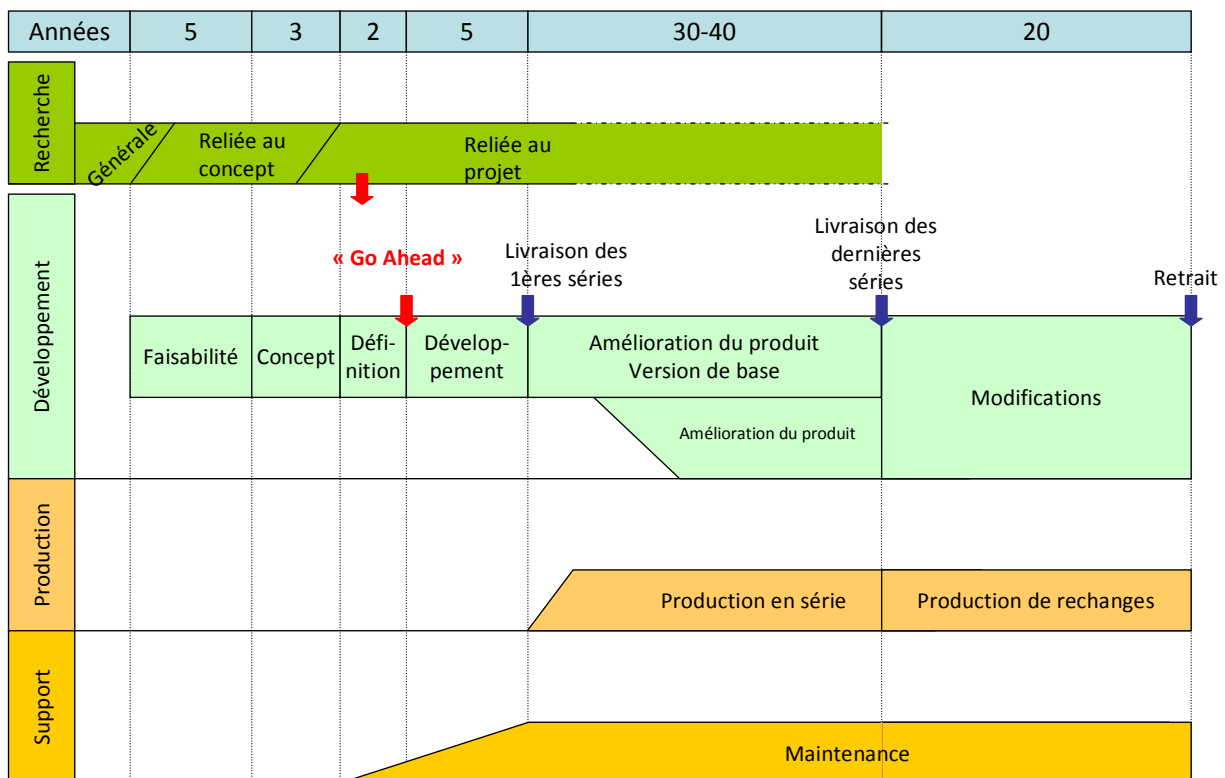


Figure 39 : Cycle de vie générique d'un programme aéronautique civil, d'après (Schmitt 2009)

L'étape « Go Ahead » signalée sur la figure représente le passage de la définition d'un avion « virtuel » au développement de l'avion « réel », sous entendant ainsi l'ensemble des investissements financiers nécessaires pour mettre en œuvre les lignes de production, l'obtention des premières pièces, le démarrage de la ligne d'assemblage, le début des premiers vols de tests menant à la

certification de l'aéronef, et finalement la livraison du premier aéronef au client, puis l'entrée en service. Ainsi, la phase de développement se déroule en même temps que la phase de production, qui démarre avec la réalisation des premières pièces (« first metal cut »).

10.1.2. Le processus de conception aéronautique

10.1.2.1. Les principales étapes

Les représentations des processus de conception sont multiples, en fonction des secteurs d'activité auxquels ils se réfèrent, par exemple. Dans le domaine aéronautique, trois étapes sont systématiquement identifiées (Price, Raghunathan et al. 2006) :

- Conception amont,
- Conception préliminaire,
- Conception détaillée.

Les exigences émises lors de l'expression des besoins agissent telles des contraintes sur la réalisation de la conception. La phase de production est mise en œuvre totalement en aval de la réalisation de la dernière phase de conception détaillée (figure 40).

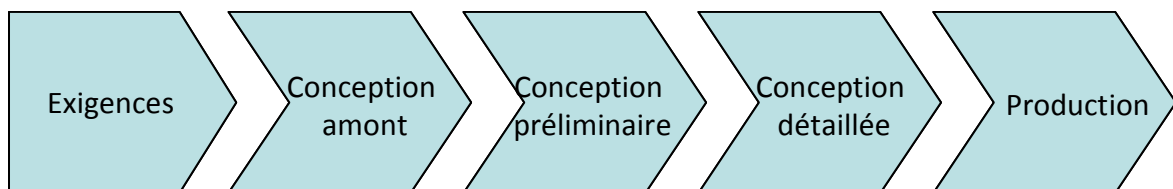


Figure 40 : Schéma d'un processus de conception simplifié, d'après (Price, Raghunathan et al. 2006)

Dans le cas de la conception d'un avion, les différentes phases de conception aboutissent à des modèles plus ou moins précis de la structure générale, faisant ainsi jouer un nombre de paramètres de plus en plus important.

10.1.2.1.1 Conception amont

Les principales exigences et fonctions désirées par le client sont considérées, et un certain nombre de configurations vont alors être retenues. Cette phase est hautement itérative, mais demeure cependant la phase de conception la moins contrainte et la plus ouverte : de nombreuses solutions de

conception peuvent alors être testées. La phase de conception amont aboutit à une configuration basique du produit : dans le cas d'un avion, les principaux éléments tels que les ailes, l'empennage, les moteurs, le fuselage ... sont déjà positionnés, et la taille finale de l'avion est déjà choisie. Ces éléments sont construits à partir d'équations et de données, souvent empiriques. Cependant, en même temps, le nombre de paramètres utilisés dans la conception augmente. La phase amont s'achève lorsqu'un niveau satisfaisant de fonctionnalités et les réponses à l'ensemble des exigences sont atteints. A ce niveau, une quantité suffisante de données existe sur le dimensionnement basique de la structure interne, des surfaces aérodynamiques, etc.

10.1.2.1.2 Conception préliminaire

Une fois le concept validé et accepté, la géométrie suffisamment bien définie, la phase de conception préliminaire peut démarrer. Chaque système majeur de l'avion est de nouveau étudié, et des estimations plus détaillées de la taille, de l'épaisseur, des matériaux sont réalisées.

10.1.2.1.3 Conception détaillée

La conception détaillée consiste en la réalisation des plans qui seront utilisés pour la fabrication de l'avion. Les détails sont alors ajoutés, tels que tous les moyens d'assemblage et leurs positionnement. Le nombre de variables de conception est alors considérable, et les modifications sont alors délicates à mettre en œuvre. Le niveau de contrainte des exigences est alors maximal.

10.1.2.1.4 Nature des données accessibles aux différentes phases du processus de conception

La nature de données caractérisant l'architecture d'un produit aéronautique évolue d'une étape de conception à l'autre. Les paramètres sont de plus en plus nombreux et la caractérisation des éléments constitutifs de plus en plus précise.

A titre d'exemple, la figure 41 propose une illustration de l'évolution des paramètres caractérisant la cellule d'un avion, au cours des étapes de conception.

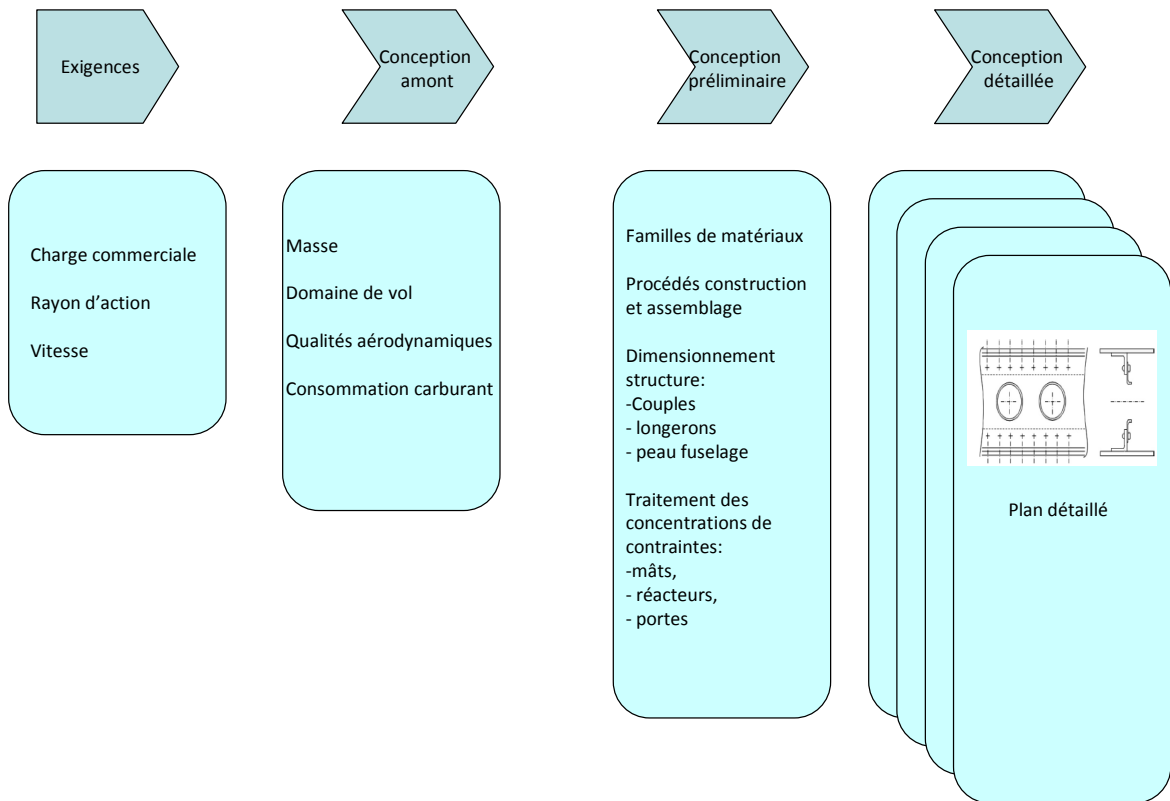


Figure 41 : Evolution du niveau de détail des exigences et paramètres de description pour une cellule d'avion.

10.1.2.2. L'ingénierie système

L'ingénierie système est aujourd'hui la principale approche mise en œuvre dans le domaine de l'aéronautique pour l'organisation des activités de conception et production. PRICE et al. (Price, Raghunathan et al. 2006) reprennent la définition suivante : l'ingénierie système est « *une approche interdisciplinaire, collaborative qui dérive, fait évoluer et vérifie une solution système sur l'ensemble de son cycle de vie* ». Cette démarche rassemble différents domaines et disciplines : depuis la conception amont, l'analyse fonctionnelle, l'architecture des systèmes, les études de marchés, la production, les procédures de tests de validation et vérification etc. à l'aérodynamique, la mécanique des structures etc. Les modes de management et la capitalisation des connaissances jouent bien sûr ici un rôle primordial dans l'articulation de l'ensemble des disciplines sollicitées, en tendant à les faire converger au mieux vers une palette d'exigences identifiées. L'ingénierie système permet de faire évoluer un système de manière complexe, depuis l'identification des exigences jusqu'à la production, tout en assurant un lien continu entre le produit et son environnement. La figure 42 représente le processus d'ingénierie système. A la différence du processus de conception décrit ci-avant, l'approche par

l'ingénierie système introduit de nombreuses boucles de vérification des exigences tout au long de la mise en œuvre des activités, tant de conception que de production.

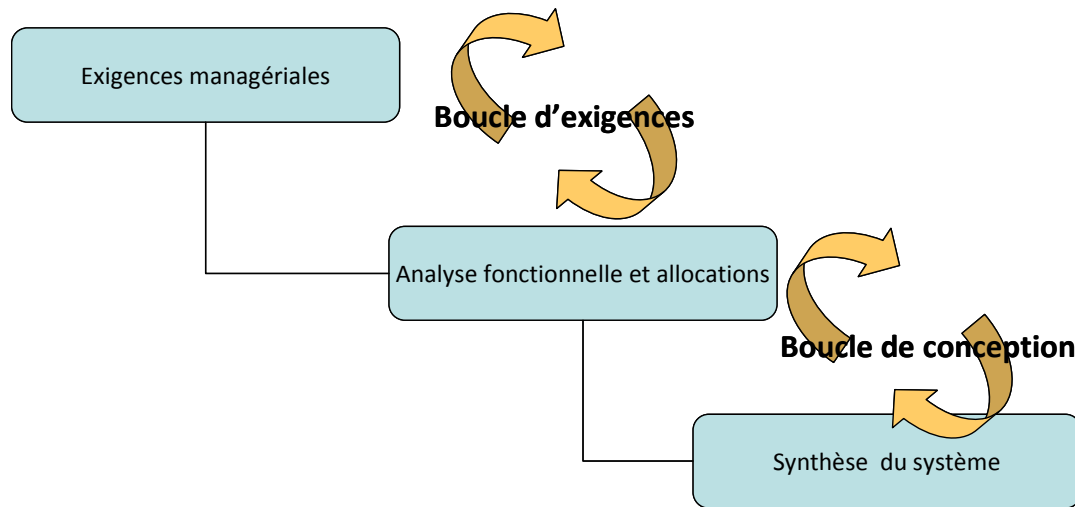


Figure 42 : Modèle simplifié du processus d'ingénierie système, dans le cas de la conception, traduit de (Price, Raghunathan et al. 2006)

Au cours de la conception, une vérification continue de l'adéquation des fonctions aux exigences est réalisée. Des modèles d'analyse sont utilisés pour s'assurer que les exigences sont satisfaites tant que la conception itère vers une solution stable. De la même manière, la vérification de l'adéquation des modes de production aux exigences fixées est vérifiée de manière continue tout au long du processus de fabrication.

10.2. Caractéristiques fondamentales du processus de conception aéronautique

*Ce chapitre reprend de manière synthétique les principaux éléments caractéristiques du processus de conception aéronautique, fondé sur une synthèse bibliographique des recommandations RGAéro, dont l'étude plus détaillée figure en **annexe 2**.*

10.2.1. Les documents clés

La structure documentaire utilisée dans le domaine aéronautique est complexe et les documents de référence nombreux. Les principaux documents utilisés au cours du processus de conception sont :

- **la spécification technique du besoin**, STB : ce document comporte l'ensemble des exigences de haut niveau initiant la conception du produit. Ce document est en général rédigé par le client, pour son fournisseur.
- **le dossier de définition**, DD : ce dossier contient l'ensemble des plans et documents descriptifs des fonctions et de l'architecture du produit,
- **le dossier de justification de la définition** DJD : ce dossier est un lien entre le client et le fournisseur, contenant l'ensemble des justifications techniques des choix de conception pris par le fournisseur afin de satisfaire les exigences édictées dans la STB.

L'ensemble de ces documents évolue au fur et à mesure de la maturité du processus de conception.

La figure 43 schématise les liens entre ces différents documents, en tenant compte des périmètres « client » et « fournisseur », systématiquement utilisés dans la description des phases d'un programme aéronautique.

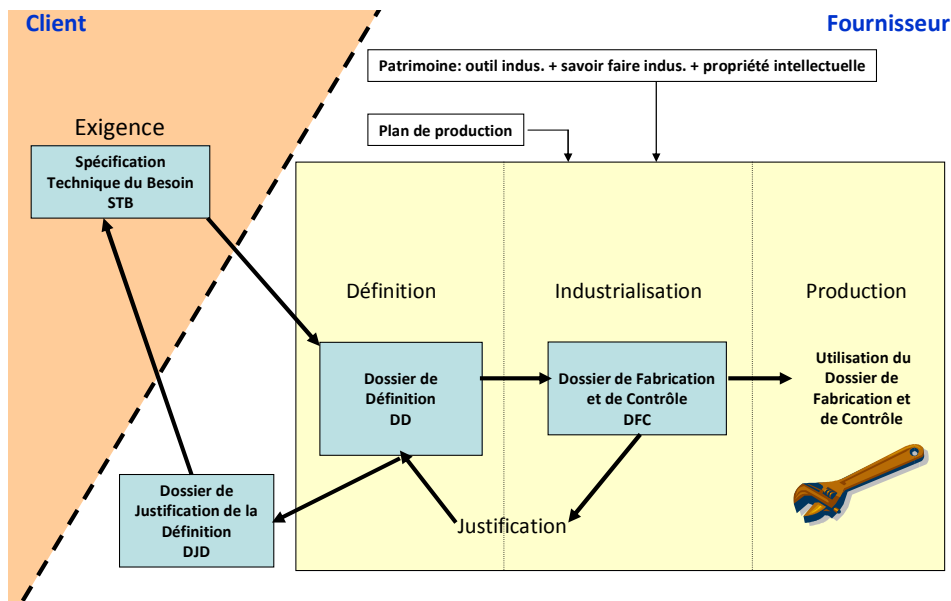


Figure 43 : Vue d'ensemble de l'architecture documentaire, d'après (RG Aéro 000 08 et RGAéro 000 12)

- **Le dossier de fabrication et de contrôle (DFC)** est élaboré dès le début de l'industrialisation du produit, soit vers la fin du processus de conception. Ce document contient l'ensemble des données relatives aux procédés mis en œuvre et gammes complètes de fabrication, ainsi que les exigences de réception du produit.

10.2.2. La sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est l'ensemble des aptitudes (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité) d'un produit qui lui permettent de disposer des **performances fonctionnelles spécifiées**, au **moment voulu**, pendant la durée prévue et sans dommage pour lui-même et son environnement.

Les performances de SdF d'un produit sont à considérer **au même titre** que les performances fonctionnelles attendues d'un produit. A cet égard, la durée de vie du produit est une caractéristique utile pour la conception du produit, et est incluse dans chacune des composantes de la sûreté de fonctionnement. Les activités de SdF permettent de définir des grandeurs caractéristiques du produit telles que le MTBF (Mean Time Between Failure), le MTTF (Mean Time To Failure), qui permettront de prévoir notamment les activités de maintenance liées au produit.

Les activités de SdF constituent avant tout une aide à la conception, en vue d'obtenir un produit « robuste » vis-à-vis des événements indésirables. Elles participent également à la justification de la conception du produit : les résultats des diverses analyses de SdF doivent être intégrés dans le DJD du produit concerné. Ainsi, **les activités de SdF ont un impact sur la conception du produit, son industrialisation et son soutien logistique.**

Les activités de SdF couvrent l'ensemble du cycle de vie du produit concerné, vivent au rythme du déroulement du programme, mais doivent être organisées et disposer de ressources.

10.2.3. Les principes de gestion de configuration

La gestion de configuration est un **mode de gestion documentaire**, fondé sur la maîtrise des données techniques à partager ou à échanger, en interne ou en externe. *Pour un programme donné, la gestion de la configuration est une activité de management du programme et est un support des processus du cycle de vie du produit.*

Dans le domaine aéronautique, le système documentaire relatif au produit est complexe et fondamental. Aussi, toute évolution technique a un impact sur ce système. La gestion de configuration permet de connaître précisément, à un instant donné, le moindre élément constitutif d'un produit aéronautique : de fait, la plus petite évolution survenant au cours de la vie du produit impactera le système documentaire de l'avion. La gestion de la configuration participe à l'amélioration des produits aéronautiques, grâce au principe de **traçabilité**, et permet de traiter les actions correctives avec discernement.

La gestion de configuration est un processus majeur pour la sécurité des vols. En effet, dans le cas d'un crash, et lorsque la ou les cause(s) matérielle(s) est (sont) identifiée(s), le système documentaire tel qu'il existe permet de déterminer immédiatement quels sont les avions équipés de(s) système(s) défaillant(s), ce qui permet alors de prendre des mesures préventives (interdiction de vol) jusqu'à ce que l'origine de la défaillance soit éradiquée.

Chapitre 11 : Spécifications pour l'intégration de l'évaluation du risque chimique dans le processus de conception aéronautique

11.1. Spécification des fonctions de la méthode

11.1.1.1. Mode de fonctionnement attendu

La méthode s'intègre comme un outil d'aide à la conception, au sein du processus de conception détaillée. La méthode utilise des données issues des versions du DD afin de réaliser les évaluations de risque chimique, permettant d'identifier les différents niveaux de ce type de risque présenté par le produit, sur son cycle de vie, à compter de la livraison.

11.1.1.2. Description des fonctions de la méthode

Les fonctions de la méthode sont décrites grâce au digramme pieuvre, premier élément de la méthode APTE[®] (figure 44)

Ainsi des fonctions principales et des fonctions contraintes de la méthode d'évaluation de risque chimique sont mises en évidence

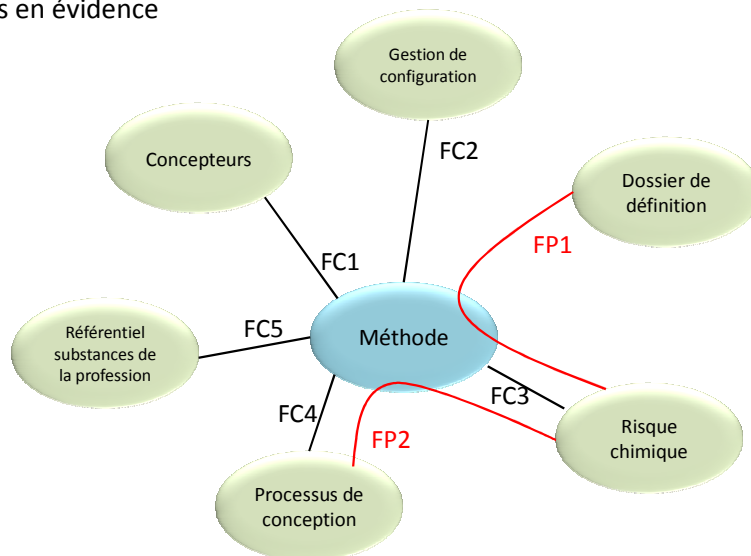


Figure 44 : Diagramme pieuvre représentant les fonctions principales (FP) et les fonctions contraintes (FC) de la méthode au regard des éléments de son environnement

La table 14 reprend les fonctions décrites sur le diagramme, en y associant leurs libellés, les données d'entrée nécessaires et les données de sortie attendues.

Table 14 : fonctions identifiées de la méthode, données d'entrée et de sortie

N°ordre	Libellé de la fonction	Donnée(s) d'entrée	Donnée(s) de sortie
FP1	Utiliser les données du DD pour calculer le risque chimique	Données de conception	risque chimique évalué / étape de cycle de vie du produit
FP2	Utiliser le risque chimique comme paramètre de choix dans le processus de définition	Evaluation risque chimique/ étape de cycle de vie du produit	Décision de conception en fonction du niveau d'acceptabilité du risque
FC1	Etre utilisée aisément par des concepteurs non experts	Données de conception	Résultat objectivement et simplement interprétable
FC2	Permettre une utilisation compatible avec les exigences du système de gestion de configuration	Données de conception	Données intégrables dans le système de gestion de configuration
FC3	Hierarchiser le risque chimique	Données de conception	Risque chimique hiérarchisable associé à la pièce
FC4	S'intégrer dans le processus de conception	Données de conception	Données de conception
FC5	Faire appel aux référentiels de substances connus de la profession	Listes de substances (référentiels NRJ, BTR, PDSL, DSL ...)	Evaluation du risque chimique

11.1.2. Contraintes de conception de la méthode

11.1.2.1. Contraintes d'utilisation

La méthode doit être utilisée au cours du processus de conception détaillé du produit. Elle ne doit pas faire appel à un traitement des données d'entrée trop important en termes de temps: en d'autres termes, les données utilisées pour mener à bien les calculs d'évaluation du risque chimique devront être exploitables le plus aisément possible.

11.1.2.2. Contraintes d'ergonomie, facteur humain, ressources humaines nécessaire à la mise en œuvre ou contraintes liées au personnel

Les utilisateurs cible de la méthode sont les concepteurs. Les concepteurs ne possèdent pas de compétences particulières dans le domaine de l'évaluation du risque chimique.

De fait la méthode doit être aisément accessible et compréhensible et fournir des résultats exploitables par les concepteurs dans le cadre de leur activité.

11.1.2.3. Contraintes logistiques

La documentation à destination des utilisateurs et la formation des utilisateurs doit être réduite : la méthode doit être d'application la plus intuitive possible.

11.1.2.4. Environnement de la méthode

Les données d'entrée utilisées pour la méthode doivent être directement extractibles du système documentaire et du système de gestion de configuration.

Les résultats issus de l'application de la méthode s'intègrent dans le processus de gestion documentaire et dans le système de gestion de configuration.

La capitalisation des résultats fournis par la méthode est à envisager, notamment dans le cas où la méthode est de nouveau appliquée à un produit dont la conception s'appuie sur un produit existant.

11.1.2.5. Exigences relatives aux interfaces.

La méthode utilisera des données extraites du processus de conception : aussi les données extraites de tout outil de gestion de configuration, nécessaires au fonctionnement de la méthode, doivent-elles être identifiées.

Les contraintes procédurales pour que la méthode s'intègre dans le processus de conception doivent également être identifiées.

11.1.2.6. Exigences d'étude de la méthode

La méthode doit s'intégrer au processus de conception sans le remettre en cause et sans entraîner de lourdes modifications des systèmes d'information utilisés par l'industriel.

11.1.3. Synthèse

La table 15, ci après, reprend en synthèse l'ensemble des exigences de conception de la méthode d'évaluation du risque chimique.

Table 15 : Guide de spécification de la méthode

1		Description générale de la méthode																																
1.1	Objectifs et résultats attendus de la méthode	<p>Objectifs: Fournir au cours du processus de conception détaillée d'un produit aéronautique, une évaluation du risque chimique des substances identifiées dangereuses, constituant les matériaux et revêtements du produit final, au différentes étapes de son cycle de vie, depuis la livraison du produit jusqu'à son retrait de service.</p> <p>Résultats:</p> <ul style="list-style-type: none"> ☒ Identification des substances dangereuses et évaluation de leurs pourcentages massiques contenus dans le produit final assemblé et identification ☒ Evaluation du risque chimique présenté par le produit final assemblé à la livraison, en utilisation, lors de la maintenance et lors du retrait de service 																																
1.2	Synoptique Vue globale du niveau d'intégration de la méthode dans le processus de conception	<p>voir Partie III, chapitre 12</p> <p>Intégration dans le processus de conception détaillée Extraction des données depuis le dossier de définition DD Application au plus tard lors de l'avant-dernière revue du processus de conception détaillée</p>																																
1.3	Liste générale des fonctions assurées par la méthode	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Réalisation d'une évaluation du risque chimique concernant les substances dangereuses présentes dans la composition du produit final ☒ Hiérarchisation des résultats de risque chimique 																																
2		Spécification des fonctions de la méthode																																
2.1	Mode de fonctionnement attendus de la méthode	Intégration dans le processus de conception détaillée et utilisation des données issues du DD.																																
2.2	Description des fonctions de la méthode	<table border="1"> <thead> <tr> <th>N°ordre</th> <th>Libellé de la fonction</th> <th>Donnée(s) d'entrée</th> <th>Donnée(s) de sortie</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FP1</td> <td>Utiliser les données du DD pour calculer le risque chimique</td> <td>Données de conception</td> <td>risque chimique évalué / étape de cycle de vie du produit</td> </tr> <tr> <td>FP2</td> <td>Utiliser le risque chimique comme paramètre de choix dans le processus de définition</td> <td>Evaluation chimique/ étape de cycle de vie du produit</td> <td>Décision de conception en fonction du niveau d'acceptabilité du risque</td> </tr> <tr> <td>FC1</td> <td>Etre utilisée aisément par des concepteurs non experts</td> <td>Données de conception</td> <td>Résultat objectivement et simplement interprétable</td> </tr> <tr> <td>FC2</td> <td>Permettre une utilisation compatible avec les exigences du système de gestion de configuration</td> <td>Données de conception</td> <td>Données intégrables dans le système de gestion de configuration</td> </tr> <tr> <td>FC3</td> <td>Hiérarchiser le risque chimique</td> <td>Données de conception</td> <td>Risque chimique hiérarchisable associé à la pièce</td> </tr> <tr> <td>FC4</td> <td>S'intégrer dans le processus de conception</td> <td>Données de conception</td> <td>Données de conception</td> </tr> <tr> <td>FC5</td> <td>Faire appel aux référentiels de substances connus de la profession</td> <td>Listes de substances (référentiels NRJ, BTR, PDSL, DSL...)</td> <td>Evaluation du risque chimique</td> </tr> </tbody> </table>	N°ordre	Libellé de la fonction	Donnée(s) d'entrée	Donnée(s) de sortie	FP1	Utiliser les données du DD pour calculer le risque chimique	Données de conception	risque chimique évalué / étape de cycle de vie du produit	FP2	Utiliser le risque chimique comme paramètre de choix dans le processus de définition	Evaluation chimique/ étape de cycle de vie du produit	Décision de conception en fonction du niveau d'acceptabilité du risque	FC1	Etre utilisée aisément par des concepteurs non experts	Données de conception	Résultat objectivement et simplement interprétable	FC2	Permettre une utilisation compatible avec les exigences du système de gestion de configuration	Données de conception	Données intégrables dans le système de gestion de configuration	FC3	Hiérarchiser le risque chimique	Données de conception	Risque chimique hiérarchisable associé à la pièce	FC4	S'intégrer dans le processus de conception	Données de conception	Données de conception	FC5	Faire appel aux référentiels de substances connus de la profession	Listes de substances (référentiels NRJ, BTR, PDSL, DSL...)	Evaluation du risque chimique
N°ordre	Libellé de la fonction	Donnée(s) d'entrée	Donnée(s) de sortie																															
FP1	Utiliser les données du DD pour calculer le risque chimique	Données de conception	risque chimique évalué / étape de cycle de vie du produit																															
FP2	Utiliser le risque chimique comme paramètre de choix dans le processus de définition	Evaluation chimique/ étape de cycle de vie du produit	Décision de conception en fonction du niveau d'acceptabilité du risque																															
FC1	Etre utilisée aisément par des concepteurs non experts	Données de conception	Résultat objectivement et simplement interprétable																															
FC2	Permettre une utilisation compatible avec les exigences du système de gestion de configuration	Données de conception	Données intégrables dans le système de gestion de configuration																															
FC3	Hiérarchiser le risque chimique	Données de conception	Risque chimique hiérarchisable associé à la pièce																															
FC4	S'intégrer dans le processus de conception	Données de conception	Données de conception																															
FC5	Faire appel aux référentiels de substances connus de la profession	Listes de substances (référentiels NRJ, BTR, PDSL, DSL...)	Evaluation du risque chimique																															
3		Contraintes de conception de la méthode																																
3.1	Contraintes d'utilisation	Exploitation la plus aisée possible des données issue du processus de conception en entrée de la méthode																																
3.2	Contrainte d'ergonomie, facteur humain, ressources humaines nécessaires à la mise en œuvre ou contraintes liées au personnel	Doit être aisément accessible et manipulable par les concepteur, sans pré-requis spécifique relatifs aux domaines des sciences du risque chimique																																
3.3	Logistique documentation et formation des utilisateurs (la méthode doit conduire à un minimum d'exigences dans ce domaine)	La méthode doit être la plus intuitive possible																																
3.4	Environnement de la méthode: intégration au système de gestion documentaire et de gestion de configuration	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Les données d'entrée son directement extractibles du système documentaire et du système de gestion de la configuration ☒ les résultats de la méthode s'intègrent dans le système documentaire et le système de gestion de la configuration ☒ La capitalisation des résultats est assurée. 																																
3.5	Exigences relatives aux interfaces: contraintes procédurales pour que la méthode s'intègre dans le processus de conception	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Identification des données d'entrées nécessaires et de leur localisations dans les systèmes documentaires et de gestion de la configuration ☒ Identification des contraintes procédurales d'intégration de la méthode dans le processus de conception 																																
3.6	Exigences d'étude de la méthode: s'intégrer au processus de conception sans le remettre en cause et sans entraîner de lourdes modifications des systèmes d'information utilisés par l'industriel	Intégration sans remise en cause du processus de conception et sans entraîner de lourdes modifications des systèmes d'information utilisés par l'industriel.																																

Chapitre 12 : Synoptique général de la méthode

La méthode que nous proposons est axée sur la prise en compte d'un seul critère environnemental et s'articule en trois étapes.

- Extraction des données : les données d'entrée de la phase d'évaluation environnementale sont extraites des documents constitutifs du dossier de définition DD. Elles consistent principalement en des informations sur la nature des matériaux et revêtements utilisés pour la réalisation du produit, des masses de l'article et de ses sous-ensembles, et enfin de données relatives aux aspects temporels (durée de vie, contraintes de sûreté de fonctionnement).
- Evaluation environnementale : La phase d'évaluation environnementale est découpée en trois principales étapes, caractérisées par un lien entrant / sortant et par un affinage progressif des résultats :
 - **Evaluation qualitative du danger** des matériaux et revêtements et identification des éléments correspondant aux substances préoccupantes au regard des règlements et listes,
 - **Calcul du ratio massique de ces substances**, soit par rapport à la masse totale de l'article, soit par rapport à la masse d'un sous-ensemble (cas de la pièce de rechange),
 - **Evaluation quantitative du risque chimique** appliqué à ces substances, pour les différentes étapes du cycle de vie de l'article, depuis la livraison.
- Amélioration environnementale : A partir des résultats obtenus suite à l'application du calcul du ratio massique de substance préoccupante présente dans l'article et de l'évaluation quantitative du risque chimique aux différentes étapes du cycle de vie, des recommandations relatives à la conception de l'article vont être prises, portant sur :
 - La notification de la présence de la substance préoccupante dans l'article,
 - Les moyens de diminution du risque chimique présenté par l'article.

Les équipes de conception vont être en mesure de discuter et d'identifier des moyens de diminution du risque, et d'inscrire ces recommandations dans les DD et DJD.

Plus cette méthode d'éco-conception peut faire l'objet d'applications itératives, plus elle sera applicable en amont du processus de conception.

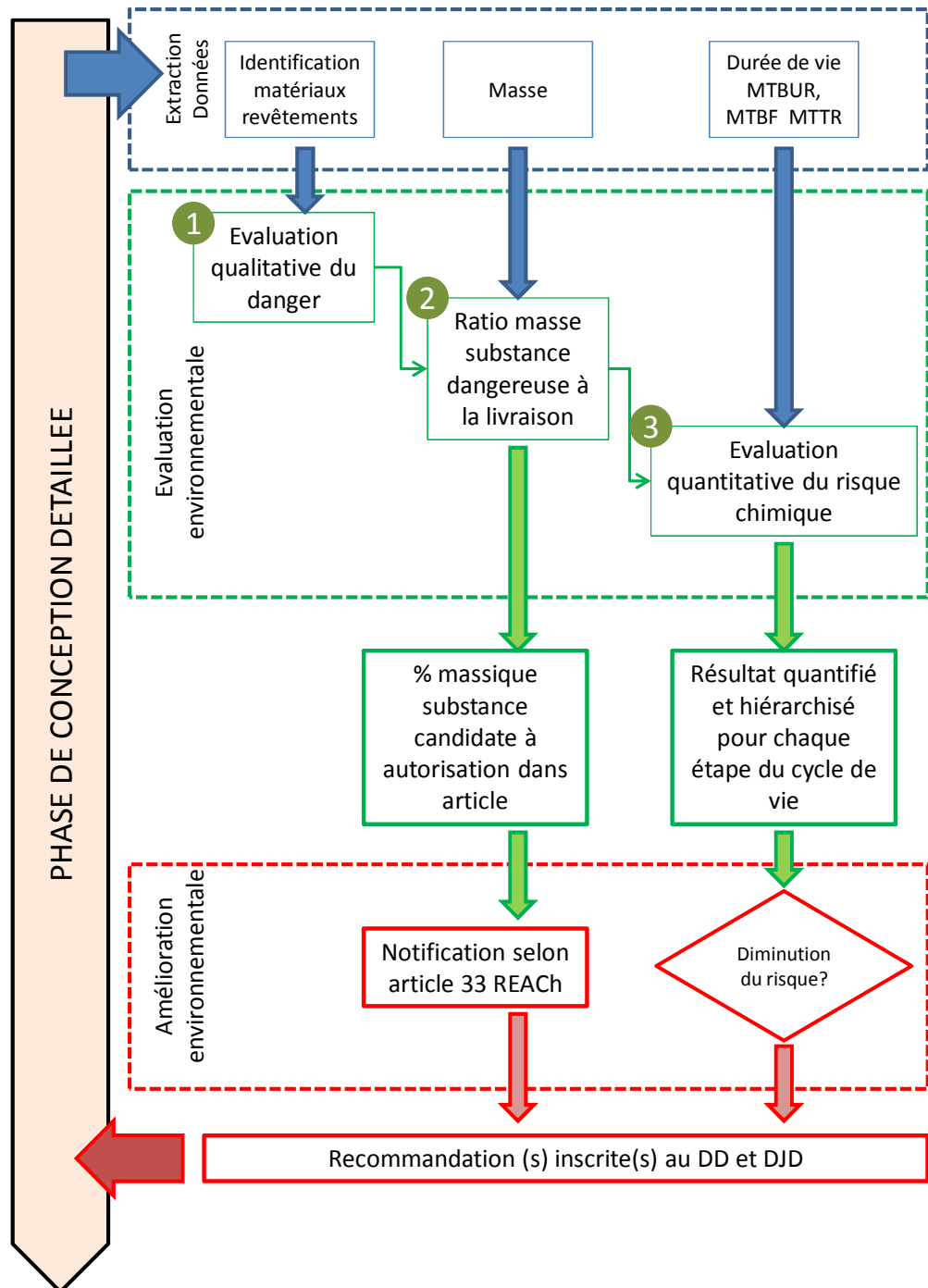


Figure 45 : Synoptique général de la méthode simplifiée proposée de prise en compte du critère « risque chimique » dans le processus de conception détaillée

Conclusion

La seconde partie de la réponse à notre question de recherche consiste à **proposer un mode d'intégration de la méthode d'évaluation du risque chimique présenté par un produit industriel, sur son cycle de vie, au sein du processus de conception aéronautique**. Aussi avons-nous étudié les approches actuelles proposées dans le cadre de l'éco-conception, particulièrement centrées sur l'intégration de la grandeur « risque chimique » dans les processus de conception, puis les particularités du processus de conception aéronautique afin d'aboutir à une spécification d'intégration de la méthode d'évaluation, et une proposition générale.

La maîtrise d'un impact environnemental généré par un produit, sur son cycle de vie, est réalisée le plus en amont possible du processus de développement, à partir des techniques d'éco-conception. De façon générale, l'objectif est de réaliser au plus tôt une évaluation des impacts environnementaux du produit et de définir des solutions de maîtrise au moment de la conception de celui-ci. Diverses méthodes et outils existent, dont les périmètres et objectifs sont différents et/ou complémentaires. Il ressort cependant que l'utilisation de ces méthodes et outil fait appel à des pré requis communs :

- nécessité d'une bonne connaissance du processus de conception d'application,
- nécessité d'une bonne connaissance, voire expertise, dans le domaine de la réalisation et de l'interprétation des évaluations environnementales.

A ces constats s'ajoutent celui d'une nécessaire intégration de l'outil aux pratiques des concepteurs, plutôt que la juxtaposition d'une démarche supplémentaire qui conduirait à modifier profondément les outils utilisés. L'étude de quelques méthodes et outils indique que la stratégie la plus communément utilisée pour gérer le pouvoir toxique d'un produit consiste à effectuer un choix de matériaux présentant des caractéristiques de danger moindre. Nous voyons cependant que la notion de risque chimique qui nous intéresse, prenant également en compte le paramètre exposition, n'est pas ici abordée, quel que soit le degré de complexité de la méthode d'éco-conception observée.

Suite à l'étude du processus de conception et développement d'un produit aéronautique, nous pouvons mettre en avant les caractéristiques principales suivantes :

- ce processus présente une longue durée de vie, elle-même jalonnée de nombreuses étapes,
- ce processus repose sur un système de justification des choix effectués tout au long des différentes étapes,
- la traçabilité de toute modification ou évolution implique la mise en œuvre d'un système de documentation complexe, la gestion de la configuration,
- les exigences de sûreté de fonctionnement président à de nombreux choix de solutions de conception.

La connaissance des principales étapes et caractéristiques nous indiquent que l'application d'une démarche d'éco-conception est possible, les phases d'intervention pertinentes étant celles de l'élaboration des DD, DFC et du traitement des évolutions techniques. Cependant, compte tenu de l'absence d'expertise technique environnementale des acteurs du processus, la démarche d'éco-conception doit être accessible, ce qui exclut d'entrée toute méthode demandant un traitement préalable des données. En outre, au regard des besoins relatifs à la justification des choix, la démarche d'éco-conception doit bien sûr offrir la possibilité de tracer le processus qui a mené au choix final de telle ou telle solution de diminution de l'impact environnemental.

Ainsi, au regard de l'ensemble de ces éléments, nous avons pu spécifier les modalités d'intégration de la méthode d'évaluation du risque chimique du produit aéronautique, sur son cycle de vie, au sein de son processus de conception, en tenant compte des particularités et attentes potentielles des concepteurs amenés à mettre en œuvre une telle démarche :

- Utilisation des données de conception afin de calculer le score de risque chimique du produit aux différentes étapes de son cycle de vie,
- Prise en compte de contraintes d'utilisation et d'ergonomie, visant à placer l'utilisateur (concepteur) au cœur de la démarche, en associant les paramètres utilisés quotidiennement dans son environnement de travail,
- Prise en compte des exigences structurelles du processus de conception aéronautique, en connectant la mise en œuvre de la méthode d'évaluation du risque chimique et le traitement des résultats aux systèmes documentaires et de gestion de la configuration.

Nous nous attacherons dans la suite à développer les modes opératoires permettant la mise en œuvre de la méthode au sein du processus de conception aéronautique.

PARTIE IV :
DESCRIPTION DES MODES OPERATOIRES DE LA METHODE
D'INTEGRATION DU RISQUE CHIMIQUE DANS LA CONCEPTION
D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE

Introduction :.....	166
Chapitre 13 : Extraction des données : typologie et sources.....	167
Chapitre 14 : Evaluation du risque chimique	168
Chapitre 15 : Intégration des résultats d'évaluation dans le processus de conception du produit ..	175
Conclusion	177

Introduction

La présente partie a pour objectif de décrire les modes opératoires d'application de la méthode au sein du processus de conception aéronautique. Cette méthode s'applique à un produit aéronautique, que nous considérons comme un ensemble de pièces manufacturées, désignées par le terme de Part Number (P/N).

Le chapitre 13 propose une synthèse des sources de données devant être extraites des systèmes documentaires et de gestion de configuration afin de permettre le déroulement de la méthode d'évaluation du risque chimique.

Le chapitre 14 décrit, pour chaque paramètre utilisé dans l'évaluation du score de risque chimique, d'une part les hypothèses applicables au secteur aéronautique, et d'autre part, les équations de calcul applicables.

Le chapitre 15 propose les modes d'interprétation des résultats obtenus dans le cadre de l'évaluation et leur intégration au sein du processus de conception aéronautique.

Chapitre 13 : Extraction des données et typologie des sources

Les grandeurs sont extraites du DD. La table 16, présentée ci-après, indique, pour chaque grandeur utilisée comme donnée d'entrée des outils d'évaluation environnementale cités ci-avant, les sources et éventuels traitements (type calcul) nécessaires à l'obtention de la donnée nécessaire.

Table 16 : Identification des données d'entrées nécessaires à l'application de la phase d'évaluation environnementale

Grandeur	Données source	Document source	Nécessité de traitement
Danger	Classification des substances dangereuses préoccupantes	Liste	OUI
	Identification des matériaux composant l'article	DD	
	Identification des revêtements (traitements de surface, peintures, vernis...)	DD	
	Identification des colles	DD	
	Composition chimique des matériaux, revêtements et colles	Fiches de Données de Sécurité	
Masse	Plans détaillés	DD	OUI
	Définition des caractéristiques géométriques des revêtements, peintures, etc. (épaisseur de couche ...)	DD	
Fréquence	Durée de vie	DD	OUI
	MTBF (Mean Time Between Failure)	DD	
	MTBUR (Mean Time Between Unit Removal)	DD	
	MTTR (Mean Time To Repair)	DD	

Le traitement des données s'effectue aux différentes étapes de l'évaluation environnementale, que nous allons définir ci-après.

Chapitre 14 : Evaluation du risque chimique

14.1. Danger d'une substance

Le danger d'une substance est défini selon la liste de classification des substances dangereuses en vigueur au sein de la profession (paragraphe 4.4). Les niveaux définis dans cette liste correspondent aux classes définies par la méthode INRS. Comme indiqué au paragraphe 6.2.1, les caractéristiques de classification du danger intègrent les notions de toxicité aiguë et chronique pour l'homme et l'environnement.

14.2. Ratio massique d'une substance aux différentes étapes du cycle de vie

Le ratio massique m_i de la substance i considérée correspond au rapport de la masse totale de substance i sur la masse totale de l'article de référence

La masse d'une substance contenue dans un matériau ou revêtement constituant le produit industriel est susceptible de varier au cours des différentes étapes de son cycle de vie. Les variations de masse peuvent avoir pour origine soit des phénomènes corrosifs soit des phénomènes tribologiques.

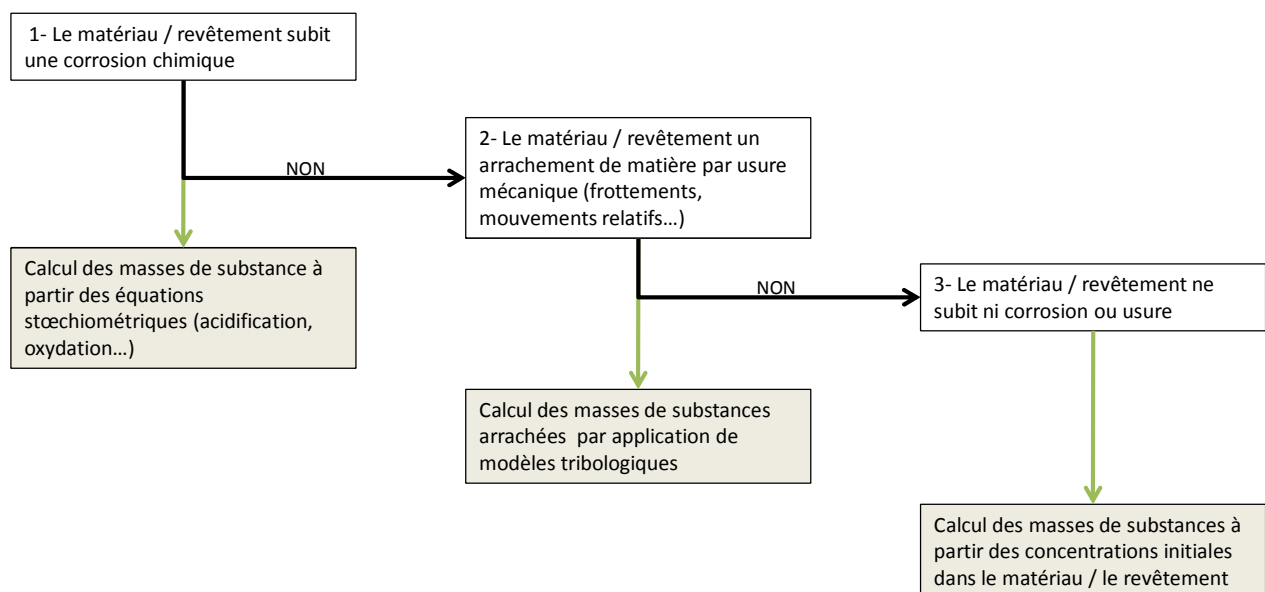


Figure 46 : Orientation des choix de modèles de calcul de la masse de substance évaluée.

Afin de déterminer les modes de calcul du ratio massique, l'évaluateur doit considérer les cas illustrés par la figure 46 :

- Calcul des masses de substances dangereuses résultant de réactions chimiques type acidification, oxydation, etc. à partir des coefficients stœchiométriques,
- Evaluation de la masse de matière contenant la substance dangereuse en appliquant des modèles d'usure.

Dans le domaine de l'aéronautique une pièce qui présenterait une évolution de masse significative identifiée lors des essais de qualification ne franchirait pas ce stade et pourrait donc pas obtenir la certification nécessaire à son intégration dans un aéronef.

En conséquence, soit la conception de la pièce est reprise, soit il est tenu compte de la durée de vie sans perte de masse significative de la pièce au titre du processus de maintenance, qui imposera son remplacement aux échéances adéquates.

En conclusion, nous faisons l'hypothèse que la masse de substance demeure constante pendant la vie du produit.

Les masses respectives sont déterminées à partir des données contenues dans les dossiers de définition et de fabrication de l'article (surface mouillée, épaisseur de couche de revêtement, ...)

Nous proposons de définir les classes de ratio massique m_i suivantes (table 17) :

Table 17 : classes de ratio massique m_i

Classe de ratio massique m_i	Valeur de m_i
1	$m_i < 10^{-4}$
2	$10^{-4} \leq m_i < 10^{-3}$
3	$10^{-3} \leq m_i < 10^{-2}$
4	$10^{-2} \leq m_i < 10^{-1}$
5	$10^{-1} \leq m_i$

Les valeurs de classe sont définies par analogie avec le seuil réglementaire prescrit à l'article 33 du règlement REACh.

14.3. Fréquence d'exposition de la substance aux différentes étapes du cycle de vie

Au regard du périmètre couvert par le règlement REACh (mise sur le marché d'un produit), les phases de cycle de vie étudiées sont arbitrairement limitées à l'utilisation et la fin de vie.

Les différentes phases retenues pour l'évaluation de l'exposition sont donc les suivantes :

- Phase de vol,
- Phase de parking,
- Phases de maintenance,
- Phase de fin de vie.

Un équipement aéronautique est conçu pour un potentiel d'heures de vol. Des visites de maintenance préventives de niveau 1 à 3 (maintenance sous aile, dépose partielle, dépose totale) doivent être effectuées selon une périodicité définie en intervalles d'heures de fonctionnement. Pour appréhender la notion de fréquence d'exposition, il convient d'examiner la fréquence de maintenance par rapport à l'utilisation de l'aéronef. Les fréquences d'exposition des autres phases de vie de l'équipement en seront ensuite déduites par complémentarité.

14.3.1. Phase de maintenance

Les données de calcul des fréquences d'exposition des substances sont obtenues via les activités de maintenance, et notamment dans le manuel de maintenance (Component Maintenance Manual – CMM).

Afin de déterminer les fréquences d'exposition relatives aux différents niveaux de maintenance, notés F_n , les grandeurs suivantes sont nécessaires :

T_u : temps d'utilisation annuel de l'avion (nombre d'heures de vol effectuées),

I_n : Intervalle de temps de fonctionnement entre visites de niveau n

D_n : Durée de l'opération de maintenance de niveau n

$$F_n = \frac{T_u}{I_n} \times D_n = \frac{D_n}{I_n}$$

$$F_n = \frac{D_n}{I_n} \text{ (équation 2)}$$

Dans la même logique, disposant des valeurs du MTBF (Mean Time Between Failure) et du MTTR (Mean Time To Repair), la formule de F_n devient :

$$F_n = \frac{MTTR}{MTBF} \text{ (équation 3)}$$

Cependant, les valeurs de MTTR et MTBF ne permettent pas de décrire les différents niveaux de maintenance des équipements.

14.3.2. Phase d'utilisation

La durée de la phase d'utilisation correspond au nombre d'heures de vol effectuées par l'aéronef. Ces données sont déterminées par retour d'expérience, la valeur de référence est donnée en nombre d'heures de vol par jour. La fréquence d'exposition de l'équipement en phase d'utilisation F_u est donnée par :

$$F_u = \frac{D_u \times N}{H} \text{ (équation 4)}$$

Avec

D_u : Durée d'utilisation journalière

N : nombre de jours calendaires (annuels)

H : nombre total d'heures calendaires

14.3.3. Phase de parking

La fréquence d'exposition de l'équipement en phase de parking F_p est déduite de la fréquence d'utilisation et de la somme des fréquences de maintenance :

$$F_p = 1 - F_u - \sum_1^n F_n$$

Or, $\sum_1^n F_n \ll 1$ (le nombre de phase de maintenance étant faible sur le cycle de vie), donc,

$$F_p = 1 - F_u \text{ (équation 5)}$$

14.3.4. Phase de fin de vie

La phase de fin de vie d'intervenant qu'une fois dans le cycle de vie du produit, nous faisons l'hypothèse que sa fréquence est très inférieure à 1.

14.3.5. Classes de fréquence

Nous proposons la classification suivante :

Table 18 : Classes de fréquence

Classe de Fréquence	Valeur de F_x ($x= n, u$ ou p)
0	$F_x < 10^{-3}$
1	$10^{-3} \leq F_x < 9.10^{-3}$
2	$9.10^{-3} \leq F_x < 9.10^{-2}$
3	$9.10^{-2} \leq F_x < 9.10^{-1}$
4	$9.10^{-1} \leq F_x < 1$

Les valeurs des classes ont été établies en fonction du retour d'expérience du taux d'utilisation des aéronefs et de leurs fréquences de maintenance.

14.4. Accessibilité physique d'une substance aux différentes étapes du cycle de vie

L'accessibilité physique $A_{i,j}$ est définie au paragraphe 8.4 comme un facteur permettant de corriger la valeur du score $R_{i,j}$ (correspondant à une exposition totale de la substance) à une valeur correspondant à la « portion » de substance exposée. L'accessibilité physique dépend donc de la configuration spatiale de la pièce, de sa facilité d'accès physique par un opérateur ou vis-à-vis de l'environnement.

14.4.1. Propositions de modes d'évaluation de $A_{i,j}$

14.4.1.1. Ratio surfacique

$A_{i,j}$ peut être rapportée au calcul d'un ratio de surfaces, dans le sens où le risque existe pour la surface de matériau ou de revêtement visible. De fait, pour un matériau ou un revêtement :

$$A_{i,j} = \frac{\text{surface accessible}}{\text{surface totale}} \text{ (équation 6)}$$

Ce ratio varie aux différentes étapes du cycle de vie, particulièrement en fonction de la nature des modes de maintenance (démontage total ou partiel).

14.4.1.2. Montage

L'accessibilité physique peut être reliée à la facilité d'accès à une pièce au regard des contraintes de montage. Afin d'attribuer une valeur à $A_{i,j}$, nous nous référons à la table proposée par (Lyonnet and Bouit 1998), ici adaptée à notre sujet (table 19) :

Table 19 Valeur de $A_{i,j}$ en fonction des contraintes de montage

$A_{i,j}$	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
Nombre de pièces à démonter pour accéder à l'élément	0	Moins de 3	Moins de 5	Moins de 7	Plus de 7 pour au moins un élément	Plus de 10 pour au moins un élément

14.4.1.3. Expertise du concepteur

A partir des plans d'ensemble et de détail, le concepteur attribue une note de 1 dans le cas où la pièce est directement accessible, 0 dans le cas où la pièce doit être démontée.

14.4.2. Mode d'évaluation retenu

L'évaluation de l'accessibilité physique d'une substance aux différentes étapes du cycle de vie de l'article est effectuée à partir des plans d'ensemble et de détail, extraits du dossier de définition ; ainsi que des manuels de maintenance de l'article (CMM). En effet ces différents documents permettent de déterminer l'accessibilité physique des pièces unitaires (Part Number –P/N) présentant la substance considérée.

Le facteur $A_{i,j}$ défini au paragraphe 8.4 prendra la valeur 0 si le P/N n'est pas accessible et 1 dans le cas contraire, en raison de l'accès réduit aux données de conception.

14.5. Calcul du risque chimique lié à la substance aux différentes étapes du cycle de vie

Le risque chimique est évalué en application de la formule présentée en paragraphe 8.4 :

$$R_{i,j} = A_{i,j} \times 10^{(D_i-1)} \times 3,16^{(E_{i,j}-1)} \text{ (équation 1)}$$

Avec :

$R_{i,j}$: risque présenté par la substance i à l'étape du cycle de vie j

$A_{i,j}$: accessibilité physique de la substance i au cours de l'étape de cycle de vie j, $A_{i,j} \in [0,1]$

D_i : classe de danger de la substance, $D \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$

$E_{i,j}$: classe d'exposition potentielle de la substance i lors de l'étape de cycle de vie j,

$E_{i,j} \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$

Chapitre 15 : Intégration des résultats d'évaluation dans le processus de conception du produit

Les résultats de calcul de risque sont hiérarchisés selon la classification définie au paragraphe 8.5. Cette classification guide le concepteur dans l'appréciation de l'importance du risque chimique présenté par la substance considérée.

La démarche d'analyse de ce résultat est résumée dans le synoptique ci-dessous (figure 47) :

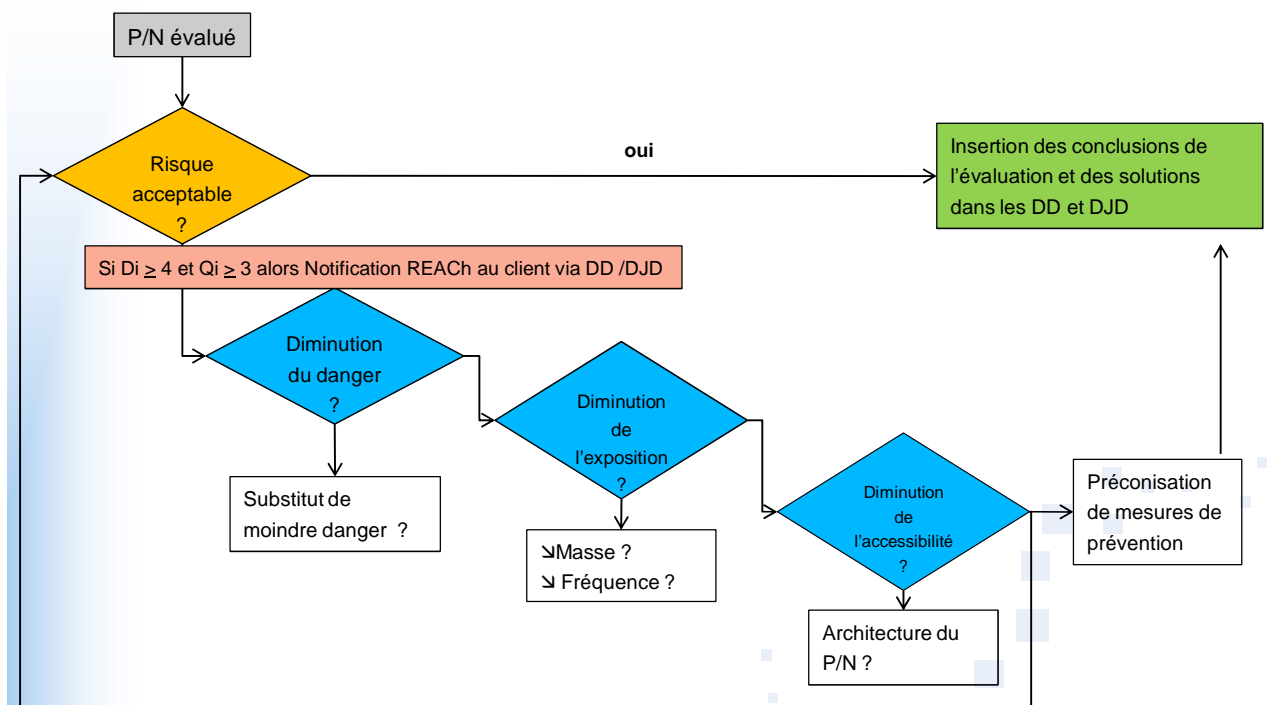


Figure 47 : Synoptique de la démarche d'analyse des résultats fournis par la méthode d'évaluation du risque chimique

Les orientations suivantes sont envisagées en fonction de la valeur du risque et du niveau accepté par l'équipe de conception :

- Diminution du risque par substitution de la substance dangereuse,
- Diminution du risque par réduction de l'exposition,
- Prévention du risque par prescriptions des mesures adéquates.

Après exploration de l'ensemble de ces possibilités, si aucune solution n'est trouvée, il convient alors de procéder à une demande d'exemption.

L'ensemble des résultats de l'évaluation de risque chimique et les solutions de conception afférentes est consigné dans le dossier de définition et le dossier de justification de la définition.

Conclusion

Cette partie nous a permis de montrer, de manière pratique, les hypothèses et calculs permettant de renseigner la méthode et de la mettre en œuvre, d'une part, et les éléments d'interprétation des résultats et leur intégration dans le processus de conception aéronautique :

- **La détermination de la classe de danger** présenté par les matériaux et substances est réalisée à partir des modes de classification en vigueur au sein de la profession,
- **La détermination de la classe d'exposition** s'effectue à partir du calcul de la **classe de masse** et de la **classe de fréquence**, en conservant les modes de calcul de la méthode INRS :
 - **La classe de masse** est déterminée selon le pourcentage massique de substance présente dans le matériau ou revêtement considéré, l'hypothèse étant faite d'une conservation de la masse au cours du cycle de vie au regard des exigences aéronautiques. Les classes de masse sont dimensionnées selon les seuils proposés par le règlement REACH,
 - **La classe de fréquence** est déterminée aux différentes étapes grâce à l'utilisation des grandeurs fournies par la sûreté de fonctionnement, caractérisant notamment les intervalles entre deux défaillances ou réparations. Les classes de fréquences sont déterminées au regard des grandeurs pertinentes rencontrées dans le domaine aéronautique,
- **Le risque chimique** est alors calculé par combinaison des classes de danger et exposition, pour une substance donnée, à une étape du cycle de vie donnée. Un facteur correctif, appelé **accessibilité physique** et spécifique de la substance et de l'étape du cycle de vie considéré est utilisé, afin de faire correspondre la valeur de risque évaluée à la configuration physique du produit.

Au regard de la valeur du score de risque chimique calculé et du niveau d'acceptabilité défini par les équipes de conception, des mesures de réduction du risque vont alors être proposées et intégrées au processus de conception, privilégiant la substitution du matériaux dangereux, puis examinant les modalités de diminution de l'exposition. Enfin, si aucun de ces axes ne peut être amélioré, des mesures de prévention liées à la manipulation de la pièce incriminées pourront être décrites.

Description des modes opératoires de la méthode d'intégration du risque chimique dans la conception d'un produit aéronautique

PARTIE V : ÉTUDE DE CAS

Introduction.....	180
Chapitre 16 : Produit étudié et processus de conception	181
Chapitre 17 : Outils utilisés.....	186
Chapitre 18 : Extraction des données.....	191
Chapitre 19 : Evaluation du risque chimique.....	195
Chapitre 20 : Intégration des résultats d'évaluation dans le processus de conception.....	204
Chapitre 21 : Discussion des résultats	208
Conclusion	212

Introduction

Nous proposons ici l'application à un cas pratique de la méthode d'évaluation présentée ci-avant. Cette mise en application s'appuie largement sur l'implémentation de la méthode sous forme d'outil logiciel réalisée au sein de l'entreprise.

L'ensemble des travaux ayant permis d'aboutir à la construction de ce cas d'étude a été étalé sur plusieurs années (2007-2009), et s'est déroulé **au sein des bureaux d'études Transmission de puissance / Hydromécanique et Electrique Electronique de la société Hispano-Suiza.**

Le déroulement complet des différentes étapes de l'évaluation du risque chimique est présenté et les résultats sont par la suite analysés. Les opportunités de conception identifiées grâce à la méthode sont alors présentées.

Le chapitre 16 positionne l'étude de cas par la présentation du produit et de son processus de conception.

Le chapitre 17 présente l'ensemble des outils utilisés pour la réalisation de l'étude de cas, qu'il s'agisse d'outils existants ou développés à cette fin.

Le chapitre 18 consigne les modalités pratiques d'extraction des données relatives au produit étudié.

Le chapitre 19 détaille les étapes d'évaluation du risque chimique.

Le chapitre 20 se concentrera sur l'intégration des résultats d'évaluation dans le processus de conception, et présentant quelques exemples de solutions d'amélioration environnementales envisageables suite à la réalisation de l'évaluation.

Le chapitre 21 présentera une discussion des résultats, au regard de la question de recherche initiale, soulèvera les limites de la méthode et les pistes d'amélioration sont finalement énoncées.

Chapitre 16 : Produit étudié et processus de conception

16.1. Produit étudié et cycle de vie

Le produit étudié est un équipement hydromécanique : le FUEL METERING UNIT ou FMU

Le FMU est le bloc de dosage et de régulation du carburant. Cet équipement est constitué d'environ 500 pièces, dont des pièces mécaniques, des servovalves et des connecteurs électroniques.

L'équipement est conçu au sein des bureaux d'études du groupe Safran. Les pièces et sous-ensembles sont fabriqués par des fournisseurs internes et externes et approvisionnés en vue du montage en interne du FMU. L'équipement subit ensuite un ensemble d'essais sur des bancs puis est monté sur le turbopropulseur.



Figure 48 : Fuel Metering Unit

Le cycle de vie du FMU, pris en compte dans cette étude s'articule autour des étapes suivantes :

- **Livraison du Produit** : le FMU est prêt à être monté sur le moteur. L'ensemble des procédés de fabrication, montage et essais ont été réalisés.
- **Utilisation** : le FMU monté sur le turbopropulseur équipant l'aéronef, cette phase correspond à la disponibilité de l'aéronef, soit la phase de vie pendant la quelle l'aéronef est utilisé ou potentiellement utilisable.

- **Parking** : l'aéronef est stocké.
- **Maintenance** : l'équipement subit à intervalle régulier de son utilisation des opérations de maintenance préventive, dont la fréquence est déterminée à travers les exigences de sûreté de fonctionnement. Les opérations de maintenance sont classées en trois niveaux (1, 2, 3), en fonction de la nature des activités ou encore de la nécessité de dépose de l'équipement. Des actions de maintenance curatives sont menées en fonction des besoins.
- **Fin de vie** : l'équipement est mis au rebut, soit avant le retrait de service du turbopropulseur si des défaillances majeures sont constatées (échange), soit lors du retrait de service du turbopropulseur.

Nous pouvons schématiser le cycle de vie de l'équipement de la manière suivante (figure 49). Le périmètre de l'étude est figuré par le contour rouge, et prend donc en compte les phases depuis la livraison jusqu'à la fin de vie.

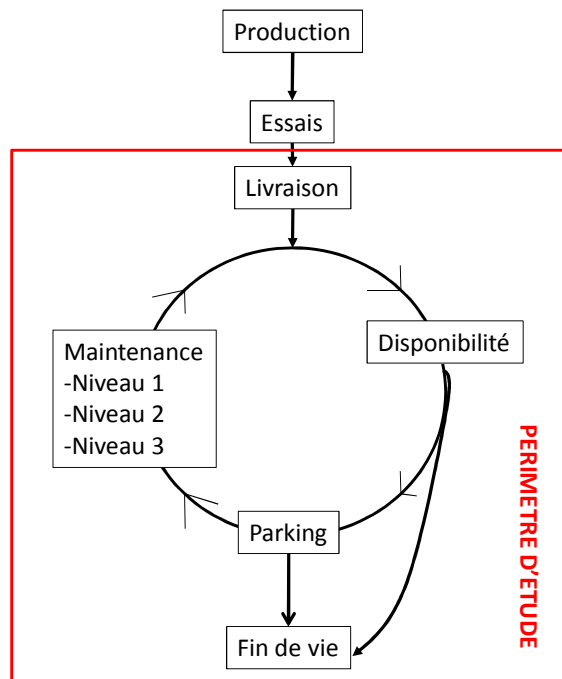


Figure 49 : Représentation schématique du cycle de vie d'un équipement aéronautique, d'après document interne Hispano-Suiza.

16.2. Description du processus de conception d'un équipement hydromécanique

Le processus de conception du FMU s'est articulé comme suit (processus de conception en vigueur dans l'entreprise, figure 50) :

- la phase de recueil et d'analyse des exigences,
- la phase d'architecture
- la phase de conception globale,
- la phase de conception détaillée,
- la phase de vérification (intégration, qualification, certification).



Figure50 : processus de conception d'un équipement hydromécanique, d'après document interne confidentiel

16.2.1. Phase de recueil et d'analyse des exigences

Les besoins du client sont recueillis et analysés. L'ensemble des exigences constitue le point d'entrée de cette phase de conception. L'objectif de cette phase est de vérifier la faisabilité des exigences et d'en assurer la traçabilité tout au long du processus de développement.

A l'issue de cette phase, un cahier des charges contenant la solution globale ainsi que le choix soit d'une réutilisation de technologies existantes ou soit de l'utilisation de technologies nouvelles est émis.

16.2.2. Phase d'architecture

Cette phase concerne une première définition de l'équipement, incluant son architecture fonctionnelle et organique, définie à partir des données du cahier des charges.

Des spécifications techniques sont élaborées et le cahier des charges des essais à réaliser est rédigé. La Preliminary Design Review (PDR) valide cette phase: le pré-dimensionnement et predesign sont arrêtés. Les liens entre besoin et architecture du système sont définis : ainsi, des choix de matériaux en fonction de l'ambiance chaude ou froide de fonctionnement, ou des choix de revêtements en fonction de l'agressivité de l'environnement peuvent déjà être arrêtés.

16.2.3. Phase de conception globale

Cette phase permet de valider la cohérence des différentes spécifications de l'équipement avec l'ensemble des exigences. Les études et choix technologiques sont alors réalisés. Les dessins sont exécutés et figés, ainsi que les calculs mécaniques.

La Critical Design Review (CDR) clôt cette phase, une matrice de conformité aux exigences est alors renseignée et auditée. L'architecture de l'équipement est quasiment figée, mais des recommandations peuvent être émises par les auditeurs, notamment en rapport avec le design, les modes de fabrication, les modes de fonctionnement.

L'élaboration des Dossiers de Validation Industrielle (DVI) démarre également à partir de la CDR. Ces dossiers définissent de manière détaillée les modes opératoires et gammes relatives à certains procédés de production critiques (traitement thermiques, traitement de surface, protection, anodisation, cuivrage, rectification...). Les DVI définissent les critères d'acceptabilité de l'équipement produit. Ils constituent le lien entre les concepteurs et les équipes d'industrialisation.

16.2.4. Phase de conception détaillée

Cette phase permet de figer au niveau le plus détaillé le dossier de conception de l'équipement. Ce document est validé lors de la Detailed Design Review (DDR). La DDR correspond à une revue de liasse. Les auditeurs s'assurent de la cohérence des plans détaillés avec les exigences émises quant aux modes de fonctionnement de l'équipement.

Les phases de production et de vérification peuvent démarrer.

16.2.5. Phase de vérification

Cette phase a pour objectif la réalisation de la fabrication, des essais et montage de l'équipement. C'est également à ce moment que seront réalisés les essais de qualification (démonstration de la conformité de l'équipement aux spécifications techniques) et de certification (reconnaissance légale de la conformité de l'équipement aux exigences applicables).

L'organisation de la production en série est préparée.

16.2.6. Revues techniques

Les principales phases du processus sont conclues par des revues de conception (PDR, CDR, DDR) au cours desquelles se déroule l'audit des dossiers de définition et de justification de la définition. Ces revues sont décrites au sein d'un référentiel. A chaque étape de la conception sont vérifiés les différents éléments de l'architecture, les calculs et choix de matériaux et procédés. Ces résultats sont présentés aux auditeurs, qui valident le passage d'une phase à l'autre du processus et sont consignés sous forme de matrices de conformité, jointes au dossier de définition de l'équipement.

Entre ces revues majeures, les équipes de conception collaborent (uniquement entre concepteurs, ou avec d'autres corps de métiers tels que l'industrialisation, les achats, etc..) dans le cadre de revues dédiées : c'est au niveau de ces revues que le dossier de définition évolue pleinement.

Chapitre 17 : Outils utilisés

17.1. Outils internes pré-existants

17.1.1. Gestion des nomenclatures

L'ensemble des références et des éléments descriptifs d'un équipement est géré informatiquement à l'aide de l'outil Product Manager® (noté PM dans la suite). Les nomenclatures des équipements sont ainsi extractibles par un concepteur et permettent d'obtenir une image conforme de la configuration d'un équipement à un moment donné.

17.1.2. Conception assistée par ordinateur

L'ensemble des plans de détail et d'ensemble sont réalisés à partir d'un logiciel de conception assistée par ordinateur, CATIA®. Ce logiciel permet également de réaliser des calculs de surfaces (surfaces d'épargne, par exemple) et de volumes, nécessaires dans la suite de l'application de la méthode d'évaluation.

17.1.3. Base de gestion des données fournisseurs

Les références des sous ensembles achetés ainsi que diverses informations relative à leur nature sont gérés dans une base de données fournisseur, appelée Challenger®.

17.2. Base de données matériaux procédés développées

Dans le but de faciliter l'évaluation du danger lié aux matériaux et revêtements utilisés pour la réalisation des équipements, une base de donnée a été créée par les équipes « éco-conception » du groupe (Lobreau 2007).

La base est construite avec le logiciel MS Excel® et repose sur cinq niveaux de classification :

- **Substances** : les substances chimiques identifiées par un n° CAS sont associées à leur label de danger défini par la liste de référence.

onglet « SUBSTANCES » :

L A B	N E R J	L E B	B E T R	nom chimique	synonymes	NUMÉRO CAS	NUMÉRO CE	DANGERS/PHRASES DE RISQUES
-------------	------------------	-------------	------------------	--------------	-----------	------------	-----------	----------------------------

Chaque substance est définie par six informations :

- Label (NRJ et BTR, selon liste de référence),
 - Nom chimique : désignation normalisée de la substance,
 - Synonyme : désignation usuelle de la substance,
 - Numéro CAS : numéro attribué par le Chemical Abstract Service,
 - Numéro CE : numéro type EINECS ou ELINCS,
 - Danger / Phrase de risque.
- **Ingrédients** : les ingrédients désignent tous les mélanges chimiques qui entrent en jeu dans la réalisation d'un procédé (colle, peinture, vernis, etc....). Les ingrédients sont labellisés en fonction des règles de mélanges décrites par le groupe Safran.

Onglet « INGREDIENTS » :

Label NRJ	Label BTR	dénomination usuelle	Code fabricant	fabricant	Forme (liquide, solide, poudre...)	Applications typiques	Code OTA	Norme de référence	Sociétés utilisatrices	Spécifications	Edition FDS (date)	Origine FDS	Phrases de risque
--------------	--------------	----------------------	----------------	-----------	---------------------------------------	-----------------------	-------------	-----------------------	---------------------------	----------------	-----------------------	-------------	-------------------

Chaque ingrédient est caractérisé par les éléments suivants :

- Label (NRJ/BTR)
 - Dénomination usuelle : nom commercial
 - Code fabricant
 - Fabricant
 - Forme : liquide, solide, poudre, pâte, gaz
 - Applications typiques : procédés appelant ces ingrédients
 - Code OTAN nécessaire pour le transport de matières dangereuses
 - Norme de référence
 - Sociétés utilisatrices
 - Spécification : référence des spécifications appelant l'ingrédient
 - Edition FDS : année d'édition
 - Origine FDS : éditeur
 - Phrases de risque
- **Préparation** : ce terme désigne des mélanges d'ingrédients, réalisés en interne, et d'application spécifique. L'identification de la composition des ingrédients s'effectue à partir de la prise de

connaissance de la Fiche de Données de Sécurité. Les substances présentes dans le mélange, leurs concentrations (souvent données sous forme d'ordre de grandeur), et à minima, les phrases de risques de l'ingrédient, y sont spécifiées. Dans le cas de la préparation, les règles de mélange sont reprises.

Onglet « PREPARATIONS » :

LABEL NRJ	LABEL BTR	composition	Applications typiques	Normes de référence
-----------	-----------	-------------	-----------------------	---------------------

Les colonnes de références pour l'onglet « préparations » sont similaires à celles utilisées pour l'onglet « ingrédients ».

- **Matériaux** : les matériaux sont l'ensemble des matériaux métalliques et non métalliques utilisés pour la réalisation des pièces.

Onglet « MATERIAUX » :

Label NRJ	Label BTR	dénomination usuelle	Dénomination	applications usuelles	Spécifications	intitulé	édition	Date	FDS (QIN)	Date FDS	Phrases de risque
-----------	-----------	----------------------	--------------	-----------------------	----------------	----------	---------	------	-----------	----------	-------------------

Les matériaux sont caractérisés de la manière suivante :

- o Label (NRJ/BTR)
 - o Dénomination usuelle
 - o Dénomination normalisée
 - o Applications usuelles
 - o Spécifications
 - o Intitulé des spécifications
 - o Edition de la spécification
 - o Date de la spécification
 - o Existence d'une Fiche de Données de Sécurité
 - o Date de la FDS
 - o Phrases de risque
- **Procédés** : les procédés sont caractérisés en fonction des ingrédients et/ou préparation mis en œuvre pour leur réalisation. Le label est appliqué au procédé, toujours selon les règles de mélange.

Onglet « PROCEDES » :

Label PRO	Spécifications	intitulé	édition	Date	Applications typiques	opérateur	référence	label NRJ	label BTR
-----------	----------------	----------	---------	------	-----------------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Un procédé peut faire appel à plusieurs sous procédés. Dans ce cas, le label du procédé relève d'une combinaison des labels des sous procédés.

- Spécification : référence du document décrivant la gamme opératoire
- Intitulé
- Edition
- Date
- Application typique
- Opérateur : ET / OU
- Référence : étape de la fabrication
- Label (NRJ/BTR)

Afin de pouvoir être utilisée par les concepteurs, la base de données est structurée et offre une interface de recherche, permettant à l'utilisateur d'effectuer ses requêtes à partir de différents critères. La pratique nous a en effet indiqué que le concepteur utilisait préférentiellement les références de spécifications, la dénomination de procédés voire le nom commercial des ingrédients utilisés comme champ de recherche. La figure 51 présente les champs de recherche retenus :

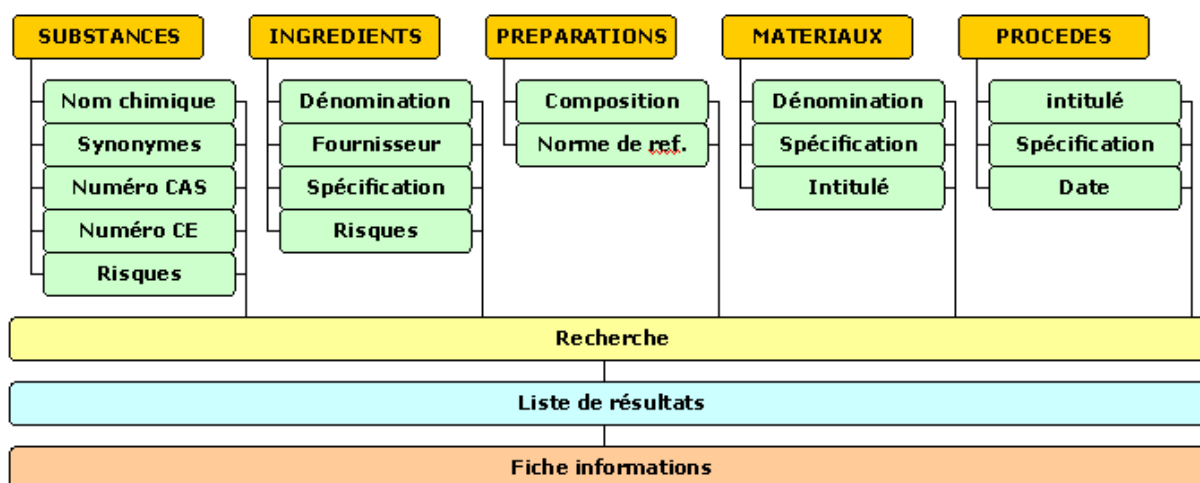
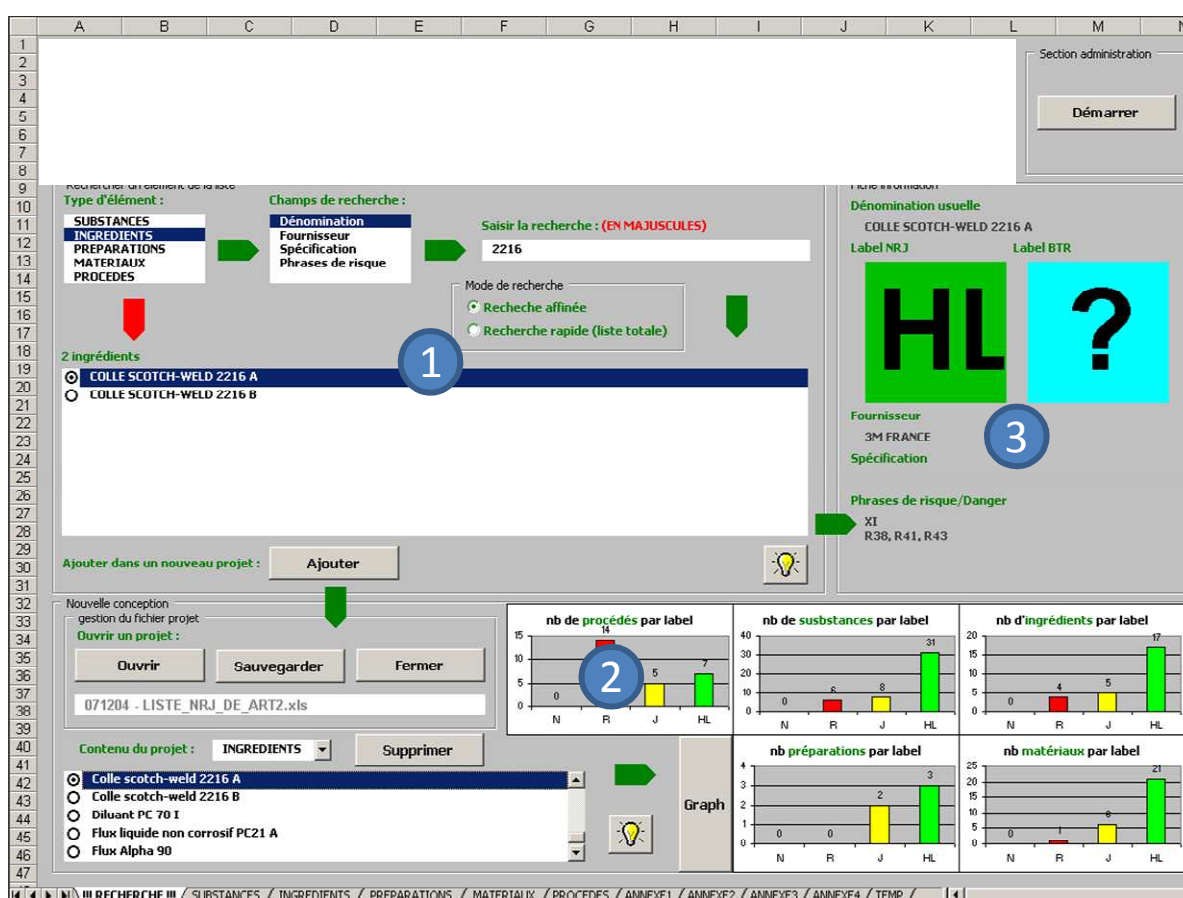


Figure 51 : liste des champs utilisables pour la recherche au sein de la base de données, in [Lobreau 2007]

La base a été conçue afin de pouvoir implémenter les différents constituants d'un équipement (ingrédients, préparations, matériaux) et de vérifier la dangerosité des procédés mis en œuvre dans un nouveau fichier, qui par la suite peut être exploitable, soit de manière directe, pour une cartographie et comptage simple des éléments dangereux, soit comme donnée d'entrée d'une analyse de risque chimique de l'équipement. La figure 52 présente une copie d'écran de l'interface d'accueil.

De cette manière, le concepteur peut rapidement connaître le danger associé au matériau ou au procédé qu'il souhaite mettre en œuvre. Cet outil participe également à la sensibilisation du concepteur sur les aspects environnementaux.



- 1 : Zone de Recherche (par type d'élément, référence, élément de nom)
- 2 : Affichage du label de l'élément
- 3 : Zone de gestion de projet (ajout de l'élément dans un fichier projet)

Figure 52: Interface d'accueil de la base de données

Chapitre 18 : Extraction des données

L'ensemble des données nécessaires pour la réalisation de l'évaluation s'effectue à partir de plusieurs sources (table 20). La figure 53 indique les étapes de la procédure d'extraction des données. Les modalités de travail sont semi automatisées, des masques de tableaux et des outils de récupération automatique des données de nomenclatures ayant été créés (Mollet 2007). La table ci-après propose une synthèse de la typologie des données de sorties et des sources :

Table 20 : Données nécessaires, source et traitement

Donnée	Source	Extraction directe
Repère niveau de nomenclature	PM ¹⁷	Oui
Désignation de la pièce	PM	Oui
P/N (référence)	PM	Oui
Equivalent P/N	PM	Oui
Quantité	PM	Oui
Type (article, sous-ensemble, équipement, matériau, montage, essais, procédés)	PM	Oui
Fournisseur	Challenger ¹⁸	Oui
Masse totale	Catia ¹⁹	Oui
Surface des articles	Catia	Oui
Surface des procédés appliqués	DVI ²⁰	Non : mais les données du DVI permettent de calculer les surfaces d'épargne

L'ensemble des données peuvent ainsi être extraites au sein du bureau d'études et compilée dans un tableau qui sert de base à l'évaluation des dangers.

¹⁷ PM : ProductManager, logiciel de gestion de nomenclature

¹⁸ Challenger : Logiciel de gestion des références fournisseurs

¹⁹ Catia : Logiciel de CAO

²⁰ DVI : Dossier de Validation Industrielle

L'extraction PM donne le périmètre d'application de l'évaluation, soit l'ensemble des pièces constitutives de l'équipement.

Certaines pièces pouvant être spécifiées à des fournisseurs, ou achetées directement sur étagère, une requête auprès d'eux s'avère nécessaire dans certains cas pour connaître leur composition. La pratique nous montre, cependant, qu'en raison du secret industriel pesant sur les procédés et matériaux pouvant être mis en œuvre, le recueil d'information auprès des fournisseurs peut s'avérer difficile.

Les données géométriques, telles que la masse et les surfaces, sont accessibles à partir de l'outil de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) utilisé dans le bureau d'études (CATIA dans l'entreprise), dans certains cas une lecture et interprétation des plans peut s'avérer nécessaire.

Enfin, les données relatives aux surfaces revêtues sont accessibles dans les DVI, au sein desquels sont explicités l'ensemble des critères d'acceptabilité d'un produit suite à application d'un procédé. Ainsi, le DVI fournira des informations géométriques relatives aux couches de revêtements.

La figure 54 est une copie d'écran des données citées ci-dessus, relatives au FMU.

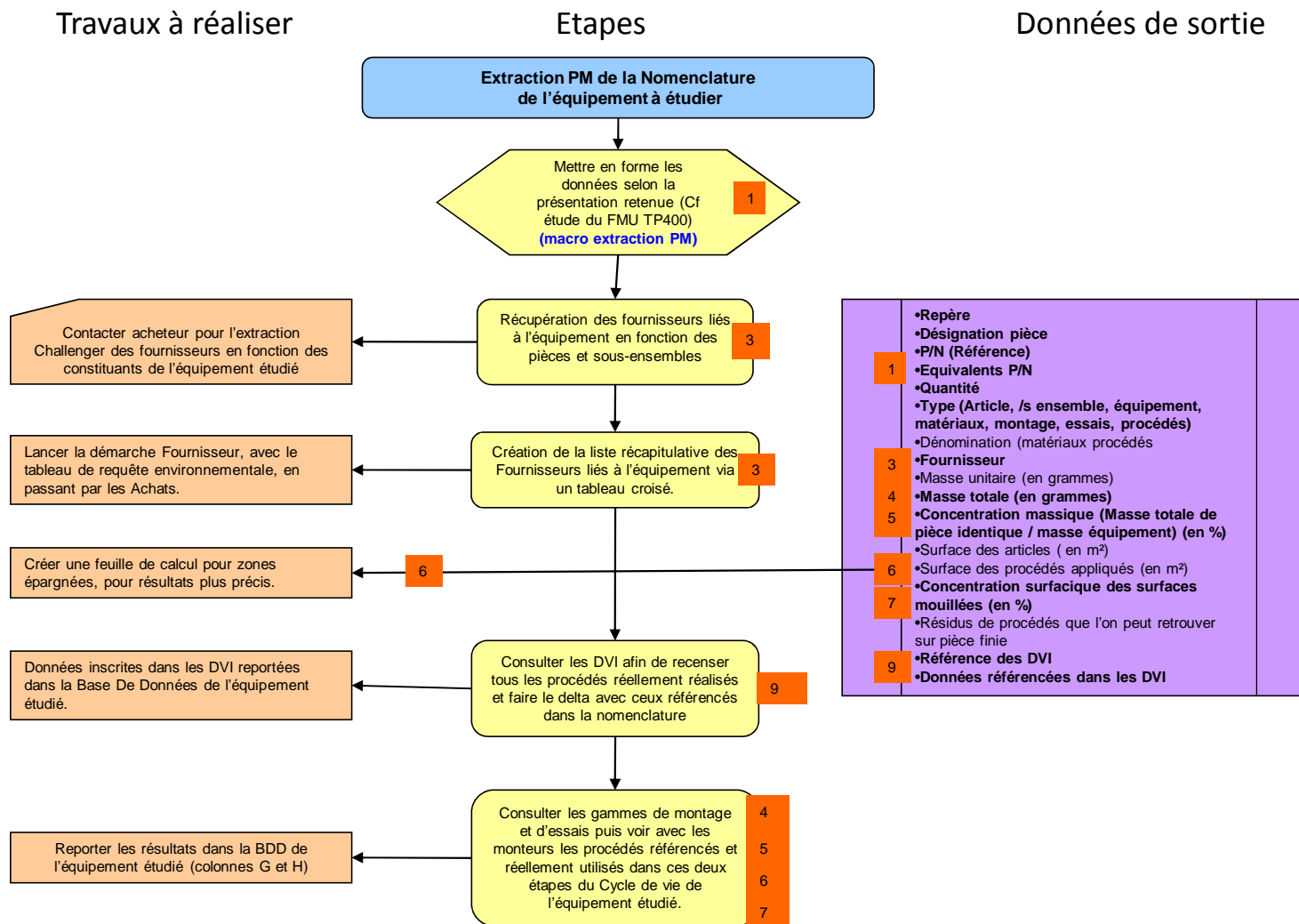


Figure 53 : Procédure d'extraction des données nécessaires à la réalisation d'une évaluation de risque chimique, d'après [Mollet,Q., 2008]

NB : les numéros indiquent la correspondance entre étapes et données de sortie

1	2	3	4	5	A	B	C	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
					Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Référence (PM)	Phrases de Risques	Fournisseur (Challenger)	masse unitaire (g) (CATIA)	masse totale (g) (Excel)	masse/masse FMO (Excel)	Surface des articles (CATIA)	surface procédé appliqué (CATIA/Excel)	Surface procédé/surface totale (Excel)	Résidus procédé restant après application sur la pièce (Concepteur)
1	0									9936,923	9936,923		1,08746			
2																
3																
4																
5																
6	1									4898,534	4898,534	49,29628618	0,376862	0,376862	34,66%	
7																
8										4850	4850	48,80786537	0,365527			
11										18,194	163,746	164,785417	0,027621			
14	A01									4850	4850	48,80786537	0,365527	0,365527	33,61%	
17	A02									0,31	4,34	0,043675492	0,001806	0,001806	0,17%	
20	A03									1	11	0,110698251	0,003124	0,003124	0,29%	
23	A04									0,96	8,64	0,086948445	0,003069			
26	A05									0,494	3,952	0,039770863				
29	A06									0,267	3,204	0,032243382				
32	A07									0,109	2,398	0,024132219				
35	A08									2,5	15	0,150952161	0,003336	0,003336	0,31%	
38	2									942,302	942,302	9,482834878	0,11722899	0,11722899	10,78%	
39																
41	B01									499	499	4,921040447	0,050962			
42	1									0	0	0	0			
43	1									333	333	3,351137973	0,036134			
47	2									156	156	1,563902474	0,014828			
50	1									0	0	0	0			
51	B02									6	6	0,060380864	0,000685			
54	B03									0,5	0,5	0,005031739	0,000132			
57	B04									8	8	0,080507819	0,000249			
60	B05									1,056	1,056	0,010627032	0,000207			
63	B06									21,247	21,247	0,213818704	0,005356	0,005356	0,49%	
64										21	21	0,211333025	0,005172			
67										0,247	0,247	0,002485679	0,000184			
70	B07									0,13	0,13	0,001308252				
74	B08									0,27	0,27	0,002717139	0,000164	0,000164	0,02%	
77	B09									8	8	0,080507819	0,002485			
80	B10									62,801	62,801	0,631996444	0,01353	0,01353	1,24%	
81										62	62	0,623935599	0,01353			

Figure 54 : Ensemble des données d'entrées nécessaires à la réalisation de l'évaluation

Chapitre 19 : Evaluation du risque chimique

19.1.Synoptique de réalisation de l'évaluation de danger

La phase d'évaluation du danger consiste en l'apposition de labels reliés à la liste de référence aux différentes pièces (P/N) de l'équipement, en fonction des substances identifiées et connues. La figure 55 ci après, reprise de la procédure d'extraction des données, indique le cheminement final de création du tableau contenant la nomenclature du FMU et des labels de dangers relatifs.

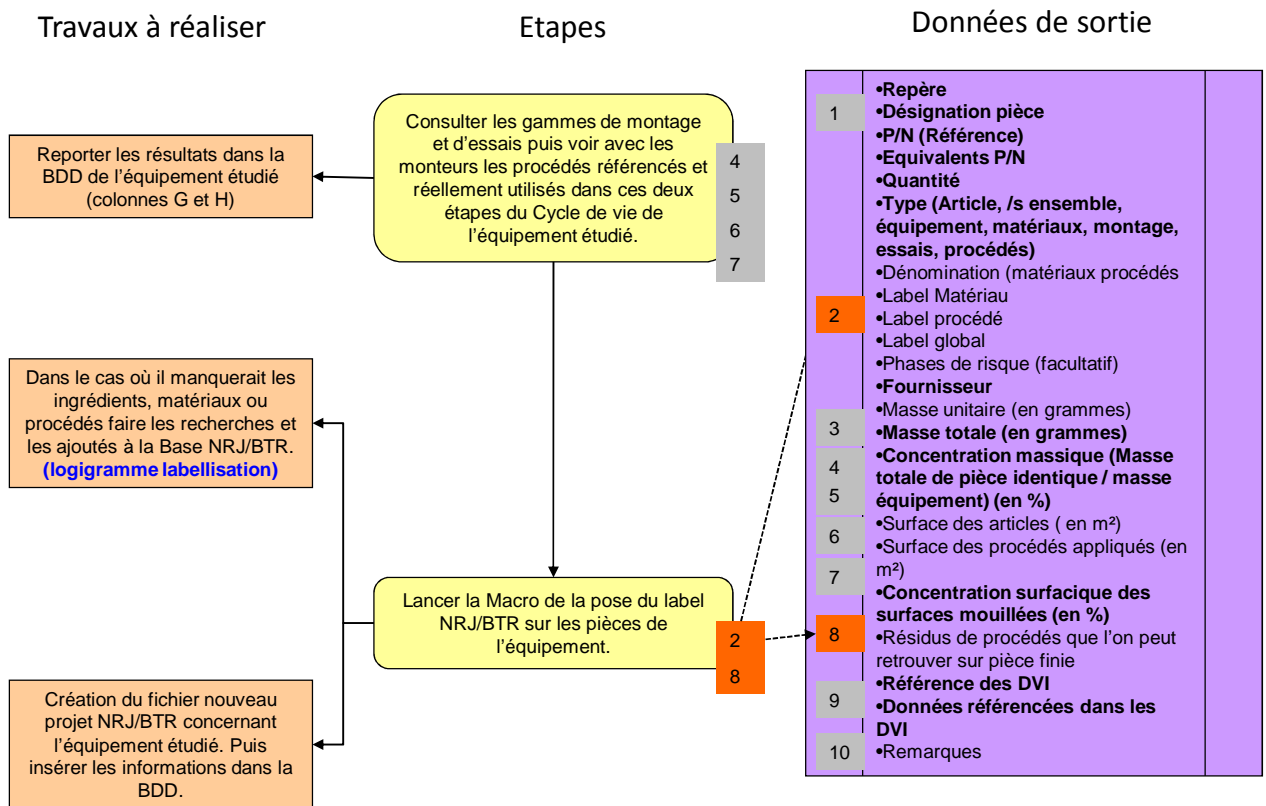


Figure 55 : Extrait de la procédure d'extraction des données, portant sur l'apposition des labels de danger (2), d'après [Mollet 2008]

NB : les numéros indiquent la correspondance entre étapes et données de sortie. Les numéros grisés correspondent aux étapes traitées dans la figure 53.

Une macro MS Excel® permet de mettre en regard des pièces constituant le FMU leur label de danger.

1	2	3	4	5	A	B	C	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
					Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Référence (PM)	Quantité (PM)	Type (PM)	Dénomination (Concepteur)	Label DM	Label DMP	Label Total	Phase de Risque	Fournisseur (Challenger)	masse unitaire (g) (CATIA)	masse totale (g) (Excel)	masse/masse FMU (Excel)	Surface des aticles (CATIA)	surface procédé appliqué (CATIA/Excel)	Su pro su to (E
	2				0			1	Produit fini		J	R	(R)			9936,923	9936,923		1,08746		
	3								Essais / Contrôle	ARDROX 3D1		HL	HL								
	4								Essais / Contrôle	Lanoline		HL	HL								
	5								Essais / Contrôle	Z10CND18											
	6				1			1	IS Ensemble		HL	R	HL			4898,534	4898,534	49,29628618	0,376862	0,376862	34
	7								Essais / Contrôle			***	***								
	8							1	Article		HL	HL	HL			4850	4850	48,80786537	0,365527		
	9							9	Article		HL	HL	HL			18,194	163,746	1,64785417	0,027621		
	14				A01			1	Article		HL	R	R			4850	4850	48,80786537	0,365527	0,365527	3
	17				A02			14	Article		HL	R	R			0,31	4,34	0,043675492	0,001806	0,001806	0
	20				A03			11	Article		HL	R	R			1	11	0,10638251	0,003124	0,003124	0
	23				A04			9	Article		HL	HL	HL			0,96	8,64	0,086948445	0,003069		
	26				A05			8	Article		HL	HL	HL			0,494	3,952	0,039770963			
	29				A06			12	Article		HL	HL	HL			0,267	3,204	0,032243382			
	32				A07			22	Article		HL	HL	HL			0,109	2,398	0,024132219			
	35				A08			6	Article		HL	J	J			2,5	15	0,150952161	0,003336	0,003336	0
	38				2			1	IS Ensemble		HL	R	R			942,302	942,302	9,482834878	0,11722899	0,11722899	10
	39								Essais / Contrôle			***	***								
	41				B01			1	Article		HL	HL	HL			489	489	4,321040447	0,050962		
	42				1			183	Article		HL	HL	HL			0	0	0	0		
	43				1			1	Article		HL	HL	HL			333	333	3,351137973	0,036134		
	47				2			1	Article		HL	HL	HL			156	156	1,569902474	0,014828		
	50				1			145	Article		HL	HL	HL			0	0	0	0		
	51				B02			1	Article		HL	HL	HL			6	6	0,060380964	0,000665		
	54				B03			1	Article		HL	HL	HL			0,5	0,5	0,005031739	0,000132		
	57				B04			1	Article		HL	HL	HL			8	8	0,080507819	0,000249		
	60				B05			1	Article		HL	HL	HL			1,056	1,056	0,010627032	0,000207		
	63				B06			1	Article		HL	HL	HL			21,247	21,247	0,213918704	0,005356	0,005356	0
	64							1	Article		HL	HL	HL			21	21	0,211333025	0,005172		
	67							1	Article		HL	HL	HL			0,247	0,247	0,002485679	0,000184		
	70				B07			1	Article		HL	HL	HL			0,13	0,13	0,001308252			
	74				B08			1	Article		HL	R	R			0,27	0,27	0,002717139	0,000164	0,000164	0
	77				B09			1	Article		HL	HL	HL			8	8	0,080507819	0,002485		

Labels de danger

Figure 56 : Labellisation danger des pièces constitutives du FMU

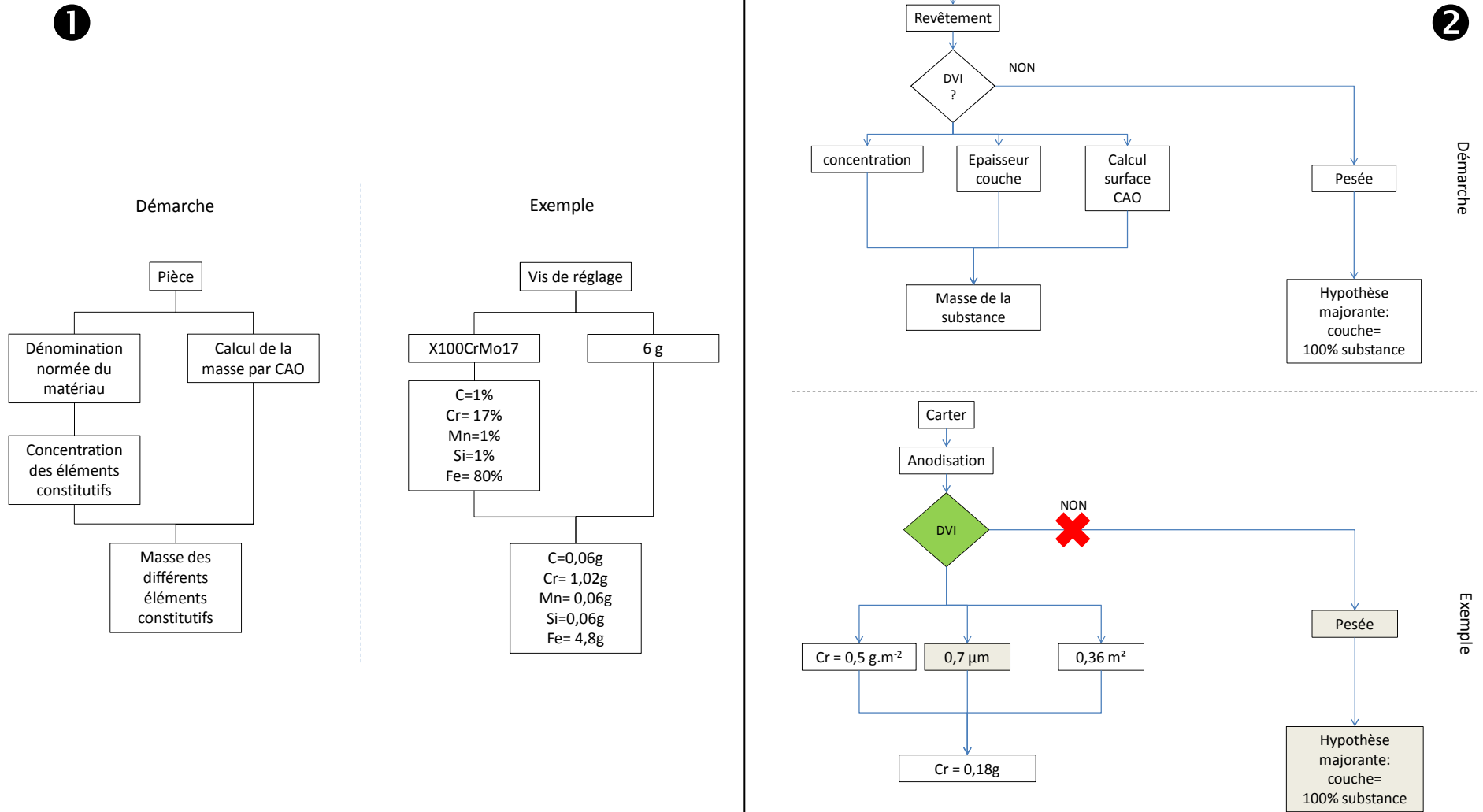
Pour une pièce spécifiée en interne, le concepteur recherche les données relatives à sa composition au sein des documents du dossier de définition et des dossiers de validation industrielle. Si la pièce est spécifiée par un fournisseur, une démarche d'interrogation de ce dernier est réalisée.

Une fois les données relatives à la composition regroupées, une recherche des phrases de risques caractérisant matériaux et revêtements est réalisée, à partir de données des FDS, disponibles dans des bases de données internes, ou dans les ateliers, ou nécessitant une requête auprès du distributeur. La figure 56 présente une copie d'écran de la labellisation danger des pièces constitutives du FMU.

Pour chaque pièce, un label de danger est attribué à l'ensemble des matériaux (notés DMD) et à l'ensemble des procédés (notés DMP). Le label total de la pièce est déduit de l'élément le plus critique. Dans certains cas (cases bleues) les données n'ont pas été suffisantes pour pouvoir labelliser le danger de la pièce.

19.2.Calcul des masses des substances

Pour le calcul des masses de substances, deux cas de figure se présentent : présence ou non de données sur les concentrations et l'ensemble des grandeurs physiques nécessaires au calcul (volume, surface...). Les synoptiques ci-après expliquent la marche suivie par le concepteur lorsque l'accès aux données existe (figure 57). Dans le cas contraire, le concepteur doit effectuer une pesée de la pièce, avant et après application du procédé (collage, vernissage, par exemple) et en déduire par différence la quantité de substance appliquée sur la pièce, ce qui n'est possible que dans le cas d'une re-conception, par exemple. Aussi, dans certains cas, la valeur de la masse ne peut pas être calculée ou évaluée.



Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Dénomination (Concepteur)	Substance	Label DMD	Label DMP	Label Total	masse unitaire (g) (CATIA)	masse totale (g) (Excel)	% masse article/ masse FMU (Excel)	Masse substance	% Masse substance / Masse FMU	% Masse Substance/ Masse article	Surface des articles (CATIA)	surface procédé appliqué (CATIA/Excel)	Surface procédé/ surface totale (Excel)
0				J	R	(R)	9936,923	9936,923					08745939		
1				HL	R	HL	4898,534	4898,534	49,2963	0,1884	0,0019	0,0038	0,376862	0,376862	34,66%
2			anodisation	HL	R	R	942,302	942,302	9,4828	0,0586	0,0006	0,0062	0,11722899	0,11722899	10,78%
B08			anodisation	HL	R	R	0,27	0,27	0,0027	0,0001	0,0000	0,0304	0,000164	0,000164	0,02%
B10			anodisation	HL	R	R	62,801	62,801	0,6320	0,0068	0,0001	0,0108	0,01353	0,01353	1,24%
B13			anodisation	HL	R	R	62	62	0,6239	0,0068	0,0001	0,0109	0,01353		
B14			anodisation	HL	R	R	77,482	77,482	0,7797	0,0000	0,0000	0,0000	0,012747		
B21			anodisation	HL	R	R	76	76	0,7648	0,0059	0,0001	0,0077	0,011724	0,011724	1,08%
B21			anodisation	HL	R	R	4	4	0,0403	0,0010	0,0000	0,0252	0,002014	0,002014	0,19%
B21			anodisation	HL	R	R	7,136	7,136	0,0718	0,0000	0,0000	0,0000	0,005356		
B21			anodisation	HL	R	R	7	7	0,0704	0,0026	0,0000	0,0369	0,005172	0,005172	0,48%
B21			anodisation	HL	R	R	113	113	1,1372	0,0142	0,0001	0,0126	0,028462	0,028462	2,62%
B21			anodisation	HL	R	R	758,41	758,41	7,6322	0,0412	0,0004	0,0054	0,082312	0,082312	7,57%
731005002			anodisation	HL	R	R	1,89	1,89	0,0190	0,0000	0,0000	0,0000	0	0	0,00%
731005011			anodisation	HL	R	R	13	13	0,1308	0,0016	0,0000	0,0122	0,003169	0,003169	0,29%
731005012			anodisation	HL	R	R	3,9	3,9	0,0392	0,0004	0,0000	0,0102	0,000792	0,000792	0,07%
18			anodisation	HL	R	R	1012,333	1012,333	10,1876	0,0714	0,0007	0,0071	0,142888	0,142888	13,14%
D06			anodisation	HL	R	R	2	2	0,0201	0,0004	0,0000	0,0187	0,000748	0,000748	0,07%
D07			anodisation	HL	R	R	3	3	0,0302	0,0004	0,0000	0,0148	0,00089	0,00089	0,08%
D08			anodisation	HL	R	R	1,12	1,12	0,0113	0,0002	0,0000	0,0213	0,000477	0,000477	0,04%
D14			anodisation	HL	R	R	101,801	101,801	1,0245	0,0000	0,0000	0,0000	0,017913		
D17			anodisation	HL	R	R	101	101	1,0164	0,0085	0,0001	0,0084	0,016971	0,016971	1,56%
D17			anodisation	HL	R	R	107,602	107,602	1,0829	0,0000	0,0000	0,0000	0,016698		
D18			anodisation	HL	R	R	106	106	1,0667	0,0074	0,0001	0,0070	0,014814	0,014814	1,36%
D24			anodisation	HL	R	R	1,3	1,3	0,0392	0,0004	0,0000	0,0102	0,000792	0,000792	0,07%
D26			anodisation	HL	R	R	70	70	0,7044	0,0097	0,0001	0,0138	0,019348	0,019348	1,78%
D28			anodisation	HL	R	R	3,36	3,36	0,0338	0,0003	0,0000	0,0101	0,000678	0,000678	0,06%
D28			anodisation	HL	R	R	6	6	0,0604	0,0010	0,0000	0,0169	0,002029	0,002029	0,19%
25			anodisation	HL	R	R	320	320	3,2203	0,0084	0,0001	0,0026	0,016834	0,016834	1,55%
58			anodisation	HL	R	R	5,5	5,5	0,0553	0,0010	0,0000	0,0188	0,002087	0,002087	0,19%

Filtere de tous les procédés rouges (anodisation)

Calcul des % massiques. Si > 0,01%, notifié en orange

Figure 58 : Calcul des masses et pourcentages massiques de substances dangereuses contenues dans les pièces du FMU

Le calcul ne s'effectue que pour les pièces possédant un label de danger (figure 58). Dans le cas du FMU, seuls les calculs de masse des substances identifiées comme dangereuses sont effectués, correspondant ici au dépôt d'anodisation.

Le calcul est réalisé pour une concentration surfacique de chrome de $0,5\text{g.m}^{-2}$. Le ratio massique (masse de la substance / masse de référence) est calculé par rapport au référentiel « FMU » et au référentiel « P/N », qui peut également être commercialisé seul dans le cas d'une rechange.

Ce ratio est toujours inférieur à 0,1% lorsque la référence de calcul est la masse du FMU, cependant, des ratios supérieurs à 0,1% sont identifiés pour certains P/N. Dans ce cas, une notification devra être réalisée vis-à-vis du client, selon les exigences de l'article 33 du règlement REACH.

19.3. Calcul des fréquences d'exposition des substances

Le tableau (table 21) ci-après regroupe les données nécessaires au calcul des classes de fréquence de l'équipement. Ne disposant pas de toutes les informations caractéristiques de chacune des pièces constituant le FMU, nous avons pris, par défaut, les valeurs générales relatives à l'équipement.

Table 21 : valeur des classes de fréquence pour les différentes phases de l'équipement.

	Temps d'intervention	Intervalle d'intervention	F_x	Classe
Utilisation	4h / jour	/	$F_u=0,16$	3
Maintenance niveau 1	4h	1000 h	$F_1=4.10^{-3}$	1
Maintenance niveau 2	2 jours	10 000h	$F_2=2.10^{-3}$	1
Maintenance niveau 3	15 jours	20 000h	$F_3=7,5.10^{-3}$	1
Parking	/	/	$F_p=0,84$	3
Fin de vie	?	?	$<10^{-3}$	1

Pour réaliser les calculs, nous avons tenu compte des valeurs suivantes traditionnellement utilisées en aéronautique :

- Année = 365 jours = 8760 heures
- 1 journée = 10 heures.

Dans le cas de la fin de vie, nous ne disposons pas de valeurs, cependant, nous faisons l’hypothèse raisonnable que cette phase n’intervient qu’une seule fois dans la vie du produit.

Les classes de fréquence sont directement assignées dans le tableur.

19.4. Evaluation de l’accessibilité

L’accessibilité des pièces (P/N) est évaluée simplement, à partir des données du DD et de l’expérience des concepteurs. L’accessibilité revient à déterminer si, pour une phase donnée, une pièce est démontée ou non. Dans le cas où une pièce est démontée, son accessibilité prend la valeur 1. Dans le cas contraire, son accessibilité prend la valeur 0 (figure 59).

	A	B	G	V	W	X	Y	Z	AA
	Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Dénomination (Concepteur)	Surface procédée/ surface totale	Accessibilité vol/parking	accessibilité maintenance niveau 1	accessibilité maintenance niveau 2	accessibilité maintenance niveau 3	accessibilité fin de vie
164									
165									
166	9								
167									
168									
169									
170	10								
171									
172					0	0	1	1	1
173									
174	11								
175									
176									
177	12				0	0	0	1	1
178									
179									
180									
181	13								
182					1	1	1	1	1
183									
184	731005001								
185	1				0	0	1	1	1
186									
187									
188	1					0	0	0	0
189	2					0	0	0	0
190			X100CrMo17	0,00%					
191			Turbonycoil 13B						
192			Lanoline						
193	3					0	0	0	0

Figure 59 : Attribution des valeurs d’accessibilités aux pièces de la nomenclature pour les différentes phases du cycle de vie.

19.5. Risque chimique présenté par le produit aux différentes étapes de son cycle de vie

Le risque chimique présenté par la pièce aux différentes étapes du cycle de vie est calculé automatiquement selon la formule initiale de la méthode INRS, à laquelle nous adjoignons un facteur correctif « accessibilité ». Les résultats sont directement inscrits dans une feuille MS Excel® en regard des éléments de nomenclature. Les P/N devant faire l'objet d'une notification en conformité avec l'article 33 sont identifiés (nous n'avons ici fait l'application que dans le cas des pièces anodisées). La matrice de conformité vis-à-vis du risque chimique, qui synthétise les résultats de l'évaluation, est partiellement représentée figure 60.

Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Label Total	Notification REACH	Risque Utilisation	Risque parking	Risque Maintenance 1	Risque Maintenance 2	Risque Maintenance 3	Risque Fin de vie
1		HL	NON	0	0	0	0	0	0
		HL	NON	10	10	10	10	10	0
		HL	NON	0	0	0	0	1	0
		HL	NON	0	0	0	0	0	0
A01		R	NON	9986	9986	9986	9986	9986	1266
A02		R	OUI	0	0	31554	31554	31554	1266
A03		R	NON	0	0	1000	1000	1000	1266
A04		HL	NON	0	0	0	0	0	0
A05		HL	NON	0	0	0	0	0	0
A06		HL	NON	0	0	0	0	0	0
A07		HL	NON	0	0	0	0	0	0
A08		I	NON	0	0	0	10	10	6
2		R	NON	0	0	0	9986	9986	1266
B01		HL	NON	0	0	1	1	1	0
1		HL	NON	0	0	0	0	1	0
1		HL	NON	0	0	0	0	0	0
2		HL	NON	0	0	1	1	1	0
1		HL	NON	0	0	0	0	1	0
B02		HL	NON	0	0	1	1	1	0
B03		HL	NON	0	0	0	1	1	0
B04		HL	NON	0	0	1	1	1	0
B05		HL	NON	0	0	0	0	0	0
B06		HL	NON	0	0	0	1	1	0
		HL	NON	0	0	0	1	1	0

Figure 60 : Extrait de la matrice de conformité

Une fois remplie, la matrice de conformité donne ainsi une évaluation du risque chimique pour les 500 pièces constituant le FMU, sur les différentes phases de vie de l'équipement.

Par exemple :

- Dans le cas de la pièce notée A02,
 - o Une substance appartenant à la liste des SVHC est présente à plus de 0,1% en masse (en prenant la pièce en référence massique). De fait une notification devra être faite au client

- quant à la présence de cette substance, au titre des exigences de l'article 33 de règlement REACH, pour la pièce vendue en statut « rechange ».
- Un risque identifié comme « fort » pour les phases de maintenance devra faire l'objet d'un examen approfondi, au cours duquel des solutions visant à diminuer le risque devront être proposées, validées et consignées dans les DD et DJD.
 - Dans le cas de la pièce notée 2,
 - la présence d'une substance très dangereuse est identifiée, mais sa concentration massique n'induit pas d'obligation de notification.
 - Un risque « moyen » est cependant évalué pour certaines phases de maintenance et pour la fin de vie de la pièce. Ce constat devra conduire (dans une priorité moindre que celle apposée à la pièce A02) à un examen des mesures de réduction pertinentes du risque.

Chapitre 20 : Intégration des résultats de l'évaluation dans le processus de conception

Les résultats de l'analyse du FMU peuvent être interprétés par les équipes de conception en 2 niveaux : la conformité REACH et les opportunités d'amélioration visant à diminuer le risque chimique présenté par certaines pièces de l'équipement, sur son cycle de vie.

20.1.Conformité vis-à-vis de l'article 33 du règlement REACH. Cas de l'anodisation.

Dans cet exemple, nous ne traitons que le cas du procédé d'anodisation, qui engendre le dépôt d'une couche de chrome, dont certains composés tombent sous le coup de la réglementation REACH. Les résultats que nous proposons sont ici issus d'hypothèses majorantes (100% de composés chromés soumis à autorisation dans la couche). Une extraction ciblée (filtre sous MS Excel®) des pièces soumises à notification pour cette substance est représentée en figure 61.

A	B	C	D	E	F	G
Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Notification REACH	Risque pièce nue		notification FMU	OUI
A02		OUI	99712			
B08		OUI	31554			
B10		OUI	31554			
		OUI	31554			
B14		OUI	31554			
		OUI	31554			
61		OUI	31554			
7,3E+08		OUI	31554			
7,3E+08		OUI	31554			
D06		OUI	31554			
D07		OUI	31554			
D08		OUI	31554			
D18		OUI	31554			
11		OUI	31554			
D26		OUI	31554			
D28		OUI	31554			
58		OUI	31554			
D24		OUI	31554			

Figure 61 : Pièces soumises à notification d'après l'article 33 du règlement REACH

Dans le cas des composés chromés, nous avons identifié 18 pièces sur 500 devant être notifiées au client, si celles-ci lui sont fournies en tant que rechange.

L'équipement complet, FMU, devra lui aussi faire l'objet d'une notification pour les composés chromés ciblés, la somme de la masse de composés présents sur les pièces confèrent à l'équipement un ratio supérieur à 0,1% massique. La notification sera portée dans le dossier de justification de la définition (DJD) de l'équipement.

Par ailleurs, nous proposons ici une évaluation du risque chimique présenté par la pièce nue, par exemple lorsque cette dernière est livrée. L'analyse des résultats nous indique que le risque est relié à la masse importante de substance dangereuse. En un premier temps, des mesures de précaution d'emploi des pièces devront être observées, lors de la manipulation. Par la suite, les concepteurs et équipes de méthodes devront réfléchir soit à une diminution de l'épaisseur de la couche de revêtement, soit à la substitution de ce revêtement.

20.2. Opportunités de réduction du risque chimique présenté par un produit

La matrice de conformité au critère « risque chimique » peut être exploitée par les équipes de conception sous différents angles, leur permettant :

- Soit d'envisager des solutions d'amélioration du produit en vue de diminuer les risques d'une part (cas n°1),
- Soit de justifier l'emploi de certaines substances qui, bien que dangereuses, présentent un risque chimique jugé acceptable (cas n°2).

Cas n°1 : Amélioration du produit

Nous nous concentrons sur les pièces qui présentent en phase de vol et de parking un risque important, ces phases représentent respectivement 16 % et 74 % de la vie de l'équipement (figure 62).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Notification REACh	Risque Utilisation	Risque parking	Risque Maintenance 1	Risque Maintenance 2	Risque Maintenance 3	Risque Fin de vie	Proposition
174	61		OUI	31554	31554	9986	9986	9986	1266	
344	11		OUI	31554	31554	9986	9986	9986	1266	
511	D24		OUI	31554	31554	9986	9986	9986	1266	
848										

Figure 62 : Extrait de la matrice de conformité risque chimique

Les pièces sont des couvercles, aisément accessibles par un opérateur. Ces pièces ne peuvent pas être protégées pour permettre ainsi une diminution de l'exposition directe. De fait, le concepteur peut proposer :

- soit de signaler les risques liés à la manipulation des couvercles, impliquant de mettre en œuvre des mesures de protection des opérateurs. Un marquage du danger pourrait ainsi être envisagé ;
- soit d'étudier les possibilités de substitution du procédé d'anodisation, notamment en vérifiant l'existence de procédés utilisant des substances moins dangereuses, mais offrant des garanties de résistance à la corrosion similaires.

Cas n°2 : Acceptabilité du risque présenté par une substance dangereuse et justification

Nous nous intéressons ici à la présence de substances identifiées très dangereuses (R), dont le ratio massique est inférieur à 0,1%. La matrice de conformité donne (figure 63) :

Repère (PM)	Articles/matériaux (PM)	Label Total	Notification REACH	Risque Utilisation	Risque parking	Risque Maintenance 1	Risque Maintenance 2	Risque Maintenance 3	Risque Fin de vie
A01		R	NON	9986	9986	9986	9986	9986	1266
A03		R	NON	0	0	1000	1000	1000	1266
2		R	NON	0	0	0	9986	9986	1266
B13		R	NON	0	0	1000	1000	1000	1266
		R	NON	0	0	9986	9986	9986	1266
B21		R	NON	0	0	0	1000	1000	1266
13		R	NON	0	0	0	9986	9986	1266
7,3E+08		R	NON	0	0	0	0	1000	1266
18		R	NON	0	0	0	9986	9986	1266
D14		R	NON	1000	1000	1000	1000	1000	1266
		R	NON	9986	9986	9986	9986	9986	1266
D17		R	NON	0	0	1000	1000	1000	1266
		R	NON	0	0	9986	9986	9986	1266
81		R	NON	0	0	1000	1000	1000	1266
82		R	NON	0	0	1000	1000	1000	1266
83		R	NON	0	0	1000	1000	1000	1266

Figure 63 : Extrait de la matrice de conformité cas n°2

Toutes les pièces ici identifiées sont en partie constituées d'un composé chromé dangereux et indésirable, et dont les directives internes visent à terme à interdire l'emploi. Cependant, il n'existe à l'heure actuelle aucun matériau de substitution présentant une dangerosité moindre et des caractéristiques techniques similaires. De plus, les risques identifiés aux différentes étapes du cycle de vie sont d'un niveau faible à moyen.

La matrice de conformité est ici un outil permettant de justifier de l'usage d'une substance dangereuse, dans la mesure où le risque présenté est faible à moyen, et pouvant être considéré comme acceptable.

Le concepteur pourra ainsi justifier de l'emploi de cette substance d'un point de vue environnemental puisque cette dernière, telle qu'elle est utilisée sur la pièce, ne présente pas un risque majeur.

L'identification de ces substances, notamment pour les opérations de maintenance, permet de mettre à jour le CMM, en indiquant certaines précautions devant être observées au regard du risque identifié.

20.3.Intégration des résultats dans les revues de conception

La matrice de conformité est utilisée lors des revues techniques afin de justifier auprès des auditeurs d'une évaluation effective du risque chimique de l'équipement en cours de conception. Les équipes de conception ont identifié au sein du processus de conception d'un produit hydromécanique les étapes stratégiques de prise en compte d'une telle évaluation (figure 64). L'objectif est à minima, d'identifier les niveaux de risque et soit de permettre la notification (Article 33) soit de fournir les mesures préventives pertinentes (notamment protection des opérateurs). Cependant, il doit tendre à la recherche d'une diminution du risque par le biais de solutions de conception, qu'elles concernent l'architecture du produit ou la nature des matériaux mis en œuvre.



Figure 64 : Revues intégrant l'évaluation du risque chimique dans le processus de conception d'un équipement hydromécanique(en orange), document interne confidentiel

Chapitre 21 : Discussion des résultats

21.1. Réponse à la question de recherche

La réalisation de l'étude de cas sur un équipement complexe a permis de démontrer les éléments suivants, en réponse d'une part aux contraintes fixées dans le cadre de la définition de la méthode, et d'autre part, à la question de recherche :

1. L'étude de cas a montré que la méthode proposée est applicable en cours de conception car les données d'entrées sont accessibles aux concepteurs à partir de documents qu'ils connaissent. L'étude a été en effet entièrement menée dans un bureau d'études, les recherches d'information ayant été réalisées par des concepteurs et concepteurs-stagiaires.
2. Les résultats sont compréhensibles de manière objective par les utilisateurs, i.e. les concepteurs du bureau d'études, qui peuvent ainsi connaître l'existence d'un risque chimique présenté par un élément donné, quelle que soit l'étape du cycle de vie.
3. Les résultats fournis par l'outil d'évaluation sont exploitables par les équipes de conception dans le cadre du processus de conception. Leur analyse peut en effet mener les équipes à prendre des décisions de conception et peut être le vecteur de la diminution du risque chimique présenté par un équipement. Les résultats sont aisément inclus dans les revues de conception et le dossier de définition de l'équipement et servent également d'éléments de justification de la définition.

A partir de cette analyse, nous pouvons répondre positivement à la question de recherche : la réduction du risque chimique d'un produit aéronautique sur son cycle de vie peut en effet être mise en œuvre dès sa conception, notamment avec la méthode proposée.

21.2. Identification des limites

La mise en œuvre de cette méthode a démontré quelques limites que nous proposons de soulever ici.

Le périmètre du cycle de vie traité a arbitrairement été limité depuis l'étape de livraison du produit à sa fin de vie, notamment en raison du périmètre encadré par le règlement REACH (mise

sur le marché). La méthode ne traite pas de la partie production et notamment des risques chimiques liés à la mise en œuvre des procédés.

En outre, la méconnaissance des traitements appliqués en fin de vie des équipements aéronautique, notamment du fait de l'émergence récente de centres de démantèlement d'aéronefs, ne permet sans doute pas de donner une image conforme à la réalité des modes opératoires utilisés en fin de vie.

La phase de conception concernée par l'application de la méthode est la phase de conception détaillée, au sein de laquelle la définition du produit est relativement figée. L'objectif d'une démarche d'éco-conception étant d'être appliquée le plus en amont possible du processus de conception, afin d'ouvrir un spectre de solutions variées et innovantes, n'a pas pu être ici montrée. En effet, l'ensemble des données nécessaires à la mise en œuvre de la méthode n'a pu être obtenu qu'au sein des Dossiers de Définition.

21.3.Principales pistes d'amélioration de la méthode et de l'outil associé

21.3.1. Amélioration de la base de données matériaux et procédés

Afin de pouvoir être déployée dans l'industrie, la base de données regroupant l'ensemble des caractéristiques des matériaux et procédés utilisés dans la société doit être complétée au maximum. Nous proposons d'adjoindre à une entrée matériau ou procédés, non seulement la caractérisation de dangers, mais également des données relatives aux grandeurs permettant de calculer les masses de substances en présence (épaisseurs moyennes de couches de revêtement, concentrations surfaciques, quantités moyennes d'espèce chimiques résultant d'une corrosion physique ou chimique par unité de masse, etc..).

Cette amélioration de la base de données nécessite de rassembler les données issues des dossiers de validation industrielle, mais aussi d'investigation au sein des ateliers de production (échantillonnage de données pour des procédés manuels), voire auprès d'experts procédés et matériaux. La volumétrie des travaux à mener est conséquente, mais une telle base de données est nécessaire pour permettre d'affiner les calculs et l'évaluation du risque chimique aux différentes étapes du cycle de vie de l'équipement.

21.3.2. Amélioration par l'industrialisation et l'appui sur une structure PLM

L'outil mis en œuvre pour l'étude de cas n'est encore qu'une maquette : afin d'être plus stable, plus souple à l'utilisation, un développement informatique plus poussé devrait être mis en œuvre. L'utilisation de cet outil a démontré le recours à de nombreuses données, émanant tant des outils de gestion de conception, que des documents relatifs aux gammes de production, à la sûreté de fonctionnement ou encore les outils de gestion des approvisionnements et fournisseurs. D'autres bases de données peuvent être sollicitées, telles que celles consignant les éléments relatifs aux fiches de données de sécurité et indications toxicologiques relatives aux matériaux et substances, etc..

Un flux très important de données est donc à utiliser dans la mise en œuvre de l'outil, et un rapprochement entre les données relatives aux calculs du risque chimique pour différentes configurations de l'équipement doit être effectué, afin de permettre une meilleure efficacité dans la prise de décision. Aussi, nous suggérons que l'appui d'une structure **Product Life-cycle Management** (PLM) serait un excellent atout dans l'objectif d'amélioration de l'outil d'évaluation du risque chimique proposé. Le PLM est « *une stratégie d'entreprise qui met en œuvre un ensemble cohérent de solutions qui permet la création collaborative, la gestion, la diffusion et l'utilisation de l'information de définition du produit et de ses processus. Cette stratégie a pour caractéristiques de :*

- *Supporter l'entreprise étendue,*
- *Couvrir l'ensemble du cycle de vie du produit ou de l'usine,*
- *Intégrer les personnes, les processus et les systèmes d'information. »*

(cité par (Morenton 2009)).

Une structure PLM permet de mettre en regard au sein de l'entreprise différents outils de gestion des informations, des processus, à différentes étapes du cycle de vie du produit, et d'extraire les éléments idoines, nécessaires à la réalisation d'activités données (figure 65).

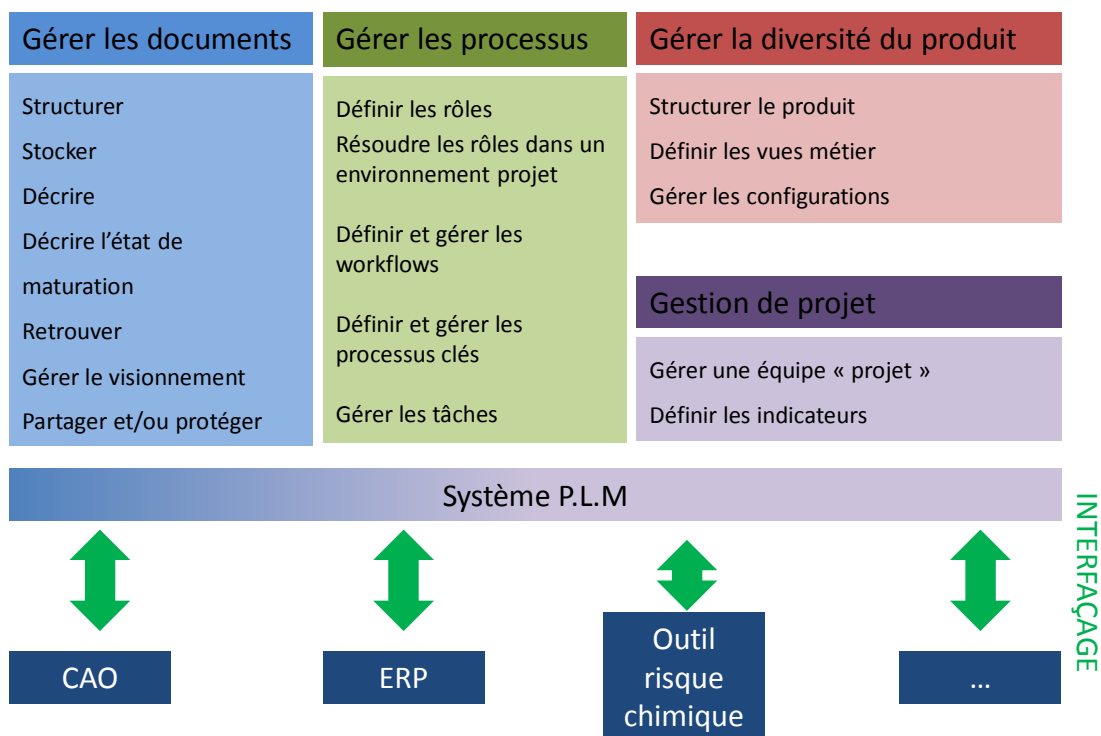


Figure 65 : Principales fonctionnalités d'un système d'information du PLM et interfaçage avec l'outil d'évaluation du risque chimique, adapté de (Morenton 2009)

Le recours à une telle structure de gestion des données et à l'interfaçage de l'outil d'évaluation du risque chimique sera nécessairement une source d'optimisation de la prise en compte du risque chimique dans la conception d'un produit.

21.3.3. Extension du périmètre d'application de la méthode

En application de la question de recherche, la phase production de l'article n'a pas été traitée. Si le besoin de l'évaluation du risque chimique pendant cette phase du cycle de vie se faisait jour, les principes développés dans la méthode pourraient alors lui être appliqués.

L'évaluation du risque chimique, par exemple lié au relargage de substances (tissus, peintures...) pourrait être envisagée, mais les données relatives à l'exposition devraient être réévaluées, notamment en raison des problématiques de renouvellement d'air dans ce type d'environnement, qui ne sont pas ici prises en compte.

Conclusion

L'étude de cas appliquée à un équipement aéronautique complexe a permis de démontrer que le risque chimique présenté par un produit manufacturé à différentes étapes de son cycle de vie pouvait être évalué, à partir des seules données disponibles en conception.

Les résultats de cette évaluation sont exploitables par un bureau d'études et peuvent guider les concepteurs vers des choix induisant la diminution de ce risque.

En outre, cette démarche participe pleinement du processus de justification, caractéristique des processus de conception complexes, tels que ceux mis en œuvre dans le domaine aéronautique.

Des limites ont été soulevées quant aux phases d'application de la méthode, non traitées aujourd'hui de manière satisfaisante, notamment par manque de données.

En outre, afin de répondre totalement aux objectifs d'une démarche d'éco-conception, il nous semble important que la méthode puisse être appliquée le plus en amont possible du processus de conception aéronautique, soit en conception préliminaire.

L'outil ici présenté est une maquette. Nous pensons que son industrialisation passe d'une part via une amélioration de la collection de données de la base Matériaux / Procédés, et d'autre part, par une prise d'appui sur un système PLM, du fait de la multiplicité des données à gérer sur le cycle de vie du produit.

Cet outil d'évaluation fournit des résultats aisément, compréhensibles par des non-experts, et exploitables dans le cadre d'un processus de conception.

CONCLUSION GENERALE

Les agents chimiques sont employés de manière exponentielle dans l'industrie pour l'apport de leurs différentes qualités techniques. Le corollaire de cet usage est lié aux effets néfastes pouvant résulter de leur production et usage.

Les sciences environnementales ont établi un cadre de recherche sur la notion de danger et de risque chimique (écotoxicologie), le contexte sociétal, à travers la réglementation, a évolué vers une approche plus complète de l'encadrement des risques chimique. Le règlement européen REACh (2007) apporte de nouvelles exigences pour les industriels, notamment la notion de principe de précaution et de renversement de la charge de la preuve. Les conséquences majeures de telles réglementations pour les industriels se traduisent notamment par une nécessaire mise en œuvre de la gestion de l'obsolescence, relative à la disparition de substances, et par la gestion de la traçabilité des substances présentes dans les produits mis sur le marché.

Le secteur aéronautique, contexte de notre étude, est principalement axé sur la gestion d'impacts tels que la pollution de l'air ou le bruit ne propose aujourd'hui que des démarches répondant partiellement aux problématiques réglementaires et potentiellement limitantes dans le développement du produit. Aussi, nous sommes-nous interrogés nous sur **l'opportunité d'utiliser le risque chimique comme un paramètre intégrable dans la conception des produits, notamment dans le domaine aéronautique.**

Afin de répondre à cette question de recherche :

- nous avons étudié, dans un premier temps, les **méthodes d'évaluation du risque chimique** disponibles et proposons une méthode, en posant les principes tels que l'applicabilité au **cycle de vie d'un produit** et la **hiérarchisation des résultats**.
- via l'étude, en général, des modalités des principes d'**éco-conception** et, en particulier, du **processus de conception aéronautique**, nous avons spécifié les **modes d'intégration** de la méthode d'évaluation au sein du processus de conception aéronautique, permettant ainsi l'utilisation de données d'entrée issues uniquement de la conception détaillée, et réinjectant dans le processus des résultats relatifs au risque chimique présenté sur le produit, directement utilisable par les concepteurs, dans l'optique d'une **amélioration environnementale du produit final**.

L'application de la méthode a été effectuée sur un équipement moteur aéronautique et a permis de démontrer la **faisabilité de la démarche (réponse à la question de recherche)**.

Réponse à la question de recherche

Les travaux que nous venons de présenter permettent de répondre à la question de recherche, à travers la proposition d'une méthode (outil) d'évaluation simplifiée du risque chimique, applicable à toute étape du cycle de vie du produit aéronautique, d'une part, et l'intégration de cet outil dans le processus de conception aéronautique grâce à l'utilisation des grandeurs issues des étapes de la conception détaillée et des documents afférents.

Les concepteurs peuvent donc travailler à la diminution du risque chimique présenté par un produit aéronautique, aux différentes étapes de son cycle de vie, en suivant des lignes directrices simples en fonction de la valeur des résultats de l'évaluation.

Les travaux ont été guidés par un objectif d'ancrage dans le domaine industriel de la réponse proposée. Aussi nous a-t-il semblé important de construire notre proposition à partir d'outils connus de la profession, afin d'envisager par la suite les améliorations pertinentes en réponse à notre question de recherche.

La méthode a été développée au sein de bureaux d'études, ce qui lui confère une réelle dimension d'appropriation par les équipes utilisatrices.

Apport de la démarche

La contrainte réglementaire apportée par REACH, touchant à la gestion du risque chimique, est ici traité au sens d'une **opportunité d'amélioration de la conception de produits industriels**. La prise en compte du paramètre « risque chimique » via une méthode d'évaluation, intégrée au sein du processus de conception d'un produit, ouvre la voie à des solutions innovantes, moins impactantes pour l'environnement et l'homme, au cours de leur cycle de vie.

La méthode proposée, permettant de répondre à cet enjeu, s'articule d'une part sur **l'évaluation du risque chimique**, et, d'autre part, sur une **proposition d'aide à l'interprétation des résultats et à leur intégration au sein du processus de conception** : depuis une solution radicale, telle que la substitution de la source de substance(s) dangereuse(s) jusqu'à la justification de l'usage d'une telle source, en l'absence de modes de substitution, tout en proposant des mesures de prévention appropriées, en fonction de l'intensité du risque chimique. Une palette de solutions intermédiaires

peut être envisagée, consistant notamment en la diminution du facteur « exposition », grâce à la proposition d'architectures différentes, par exemple.

- **La dimension « utilisateur »** a été fondamentale tout au long du processus de développement de la méthode, reposant sur le constat l'appropriation de l'outil par les concepteurs relevait d'une bonne connexion entre les données utilisées quotidiennement par ces derniers et le fonctionnement global de l'outil.
- La méthode proposée a été structurée **de sorte à s'intégrer au mieux au processus de conception**, en se fondant sur des paramètres issus des documents classiques de conception, l'objectif, in fine, étant d'en faire une « boîte noire », permettant au concepteur, par l'usage de paramètres connus, de produire une évaluation du risque chimique présenté par le produit qu'il conçoit, sur son cycle de vie, sans avoir à mettre en œuvre des outils complexes, nécessitant, par exemple, un prétraitement des données d'entrée.
- Cette méthode montre également des **qualités pédagogiques**. Les résultats sont exprimés de manière hiérarchisée, le concepteur a donc accès rapidement à une vision des impacts générés par le produit en cours de conception.
- La méthode présente enfin la qualité d'être mise en œuvre à partir de **données d'entrées simples**, ne pouvant soulever d'ambiguïté, et de la même manière, elle produit des **résultats aisément compréhensibles par de non-experts dans le domaine de l'environnement**.

Limites de la recherche

L'accès aux données constitue une réelle limite posée à la réalisation de l'évaluation du risque chimique. **Dans le cas de sous-ensembles achetés**, l'évaluateur se heurte au secret industriel, les compositions ne peuvent être connues. Aussi, les hypothèses de calcul de masse de substance sont par défaut majorantes. Cette approche peut induire des erreurs d'appréciation au niveau des résultats de l'évaluation.

Les phases du cycle de vie qui ont été considérées s'intéressent au produit depuis sa livraison chez le client jusqu'à sa fin de vie, notamment en raison des prescriptions de l'article 33 du règlement REACH qui a permis de définir ce périmètre.

Cependant, il pourrait être intéressant d'intégrer les phases relatives à la **production** du produit, mais nous revenons ici à une problématique difficile, traitée par le génie environnemental et la chimie, et les limites du système deviennent alors très complexes à formaliser.

Dans le cas d'un produit aéronautique, la phase de **fin de vie** demeure pour le moment complexe à envisager. Jean-Pierre CASAMAYOU, journaliste aéronautique, indique que depuis les débuts de l'aéronautique, les aéronefs sont passés d'une durée de vie de quelques mois (l'avion de Blériot) à une espérance de vie d'un siècle (A380 AIRBUS) ! (Benichou 2007). Aussi, une limite certaine, relative au traitement de la phase de fin de vie du produit aéronautique apparaît. Quels seront les traitements utilisés d'ici à cent ans ?

Enfin, le cas d'application présenté ici ne nous a pas permis d'utiliser des données issues de la conception préliminaire, afin de pouvoir anticiper au mieux les choix et orienter de manière sans doute plus efficace les priorités de traitement du risque chimique, ainsi que de définir des solutions adaptées au regard de l'ensemble des contraintes de conception (coûts, qualité, délais, etc.).

Pistes d'amélioration et perspectives

Les pistes d'amélioration majeures de la méthode proposée reposent sur la **gestion des informations**. La maquette présentée dans le cas d'étude fait appel à un ensemble déjà important de données, dont le travail amont d'extraction a représenté la mobilisation de plusieurs ressources. Cependant, l'utilisation d'un tableur montre rapidement des limites lorsque le nombre de données augmente, ne serait-ce que pour la manipulation des différentes lignes et colonnes. Aussi, la notion d'**ergonomie** de l'outil est-elle très importante pour assurer une prise en charge optimale par les concepteurs. Il nous semblerait donc intéressant, dans un développement futur, d'examiner non seulement les outils existants sur le marché, tels que les bases de données matériaux, mais également les modes de travail et de recherche des concepteurs. Rendre miscible la démarche d'éco-conception au sein d'un bureau d'études doit s'appuyer sur une bonne connaissance de l'existant : habitudes du métier, vocabulaire consacré et références utilisées. Le développement d'outil ex-nihilo peut être source d'un abandon précoce d'une méthode, et c'est bien en ce sens que nous avons souhaité privilégier l'assemblage et l'amélioration d'éléments existants.

La démarche proposée pourrait être nettement améliorée par l'emploi de structure de gestion de l'information, telles que les systèmes PLM, qui par ailleurs permettraient la comparaison de différentes configurations de produit, de manière instantanée.

La proposition d'une telle méthode ouvre la voie à des représentations dynamiques du risque chimique présenté par un produit, sur son cycle de vie. Nous pourrions envisager, par exemple, de représenter par une cartographie colorée de la maquette numérique, la « localisation » des sources de risque chimique, ce qui permettrait, par une lecture aussi directe, la proposition de solutions sans doute encore plus pertinentes quand à la réduction du facteur risque. De fait, les concepteurs seraient alors en réelle possession d'un outil d'amélioration environnementale du produit, pleinement intégré à leurs activités.

Dans le domaine de l'intégration de l'environnement dans les activités de conception, au sein d'un secteur encore peu familiarisé tel que l'aéronautique, le déploiement de méthodes et d'outils ne peut se faire sans tenir compte de la réalité industrielle, soit du **tissu humain de l'entreprise**. Intégrer ne veut pas dire ajouter un élément dans un processus, mais utiliser les mêmes données d'entrée et en extraire une nouvelle donnée de sortie, elle-même exploitable dans les activités consécutives. De fait, il est évident que la bonne compréhension et prise en compte des modes de fonctionnement, humains et matériels, est une clé fondamentale au succès d'une démarche d'éco-conception.

ANNEXES

Annexe 1 : Impacts environnementaux liés au produit aéronautique.....	214
Annexe 2 : Structure et documentation du processus de conception aéronautique	222

ANNEXE 1 :
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX
LIES AU PRODUIT AERONAUTIQUE

Le bruit

La santé d'un individu est caractérisée par son bien-être physique, physiologique et social. En ce sens, le bruit peut être à l'origine de troubles de la santé. Avec l'accroissement du trafic aérien, les populations voisines des aéroports sont de plus en plus soumises au bruit généré par les mouvements aériens. Le bruit est source de gêne pour ces populations, se traduisant par des effets physiologiques et physiques identiques à ceux provoqués par le stress (Black, Black et al. 2007). Le bruit généré par les avions a différentes origines : jet des gaz de combustion, bruits aérodynamiques (figure A). Le passage de l'air autour des structures de l'avion provoque des variations de pression, créant ainsi des phénomènes turbulents à l'origine du bruit perçu par l'oreille humaine. La mesure du bruit s'effectue à différents points lors du décollage et de l'atterrissage de l'avion (Antoine 2004).

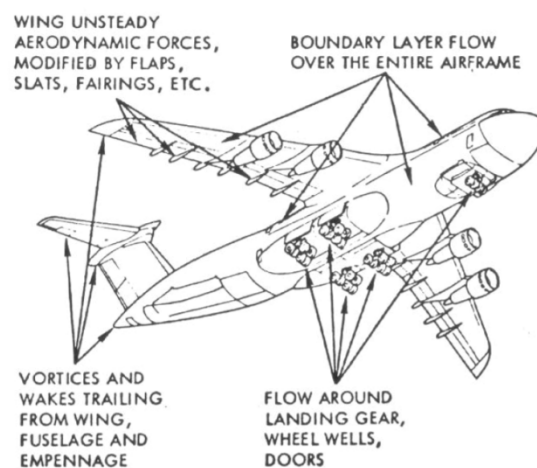


Figure A : Les sources aérodynamiques de bruit, in (Antoine 2004)

Les émissions atmosphériques

Le réchauffement climatique lié aux activités humaines est désormais scientifiquement prouvé. Comme tous les autres modes de transports, les activités aériennes génèrent des gaz à effet de serre, principalement du CO₂ et des NO_x. Leur contribution est évaluée à environ 3% de la totalité des émissions reliées aux activités humaines (Zhang, Gudmundsson et al. 2010)

En 1998 ; BRASSEUR et al. (Brasseur, Cox et al. 1998) produisent une étude complète sur les effets des émissions atmosphériques des avions, à destination de la Communauté Européenne. Les

avions émettent des gaz et particules au niveau de la troposphère (0-20 km d'altitude), pouvant également diffuser jusqu'à la basse stratosphère (20-30 km d'altitude) :

- Le **CO₂** est un gaz à effet de serre : les molécules réfractent les rayonnements infrarouges émis par la Terre, ayant pour conséquence de provoquer une augmentation de la température.
- L'**eau H₂O**, émise sous forme de vapeur, provoque, par condensation, les trainées observées dans le sillage d'un avion à haute altitude. Ces trainées auraient également pour effet de forcer les effets radiatifs également à l'origine du processus d'effet de serre. La présence des trainées serait également susceptible de modifier les systèmes nuageux, ayant pour conséquence de contribuer à des réactions chimiques à l'origine de la destruction de l'ozone.
- **Les particules solides et aérosols liquides** ont également des effets radiatifs à l'origine de l'effet de serre. En outre, ces éléments sont suspectés d'intervenir dans des réactions chimiques participant à la destruction de l'ozone.
- **Les oxydes d'azote ou NO_x** sont impliqués dans les réactions de destruction de l'ozone, dans les conditions physico-chimiques existantes au niveau de la troposphère et de la basse stratosphère.

LEE et al. proposent une synthèse des conséquences liées aux émissions atmosphériques d'un réacteur sur la chimie de l'air, que nous reprenons en figure B :

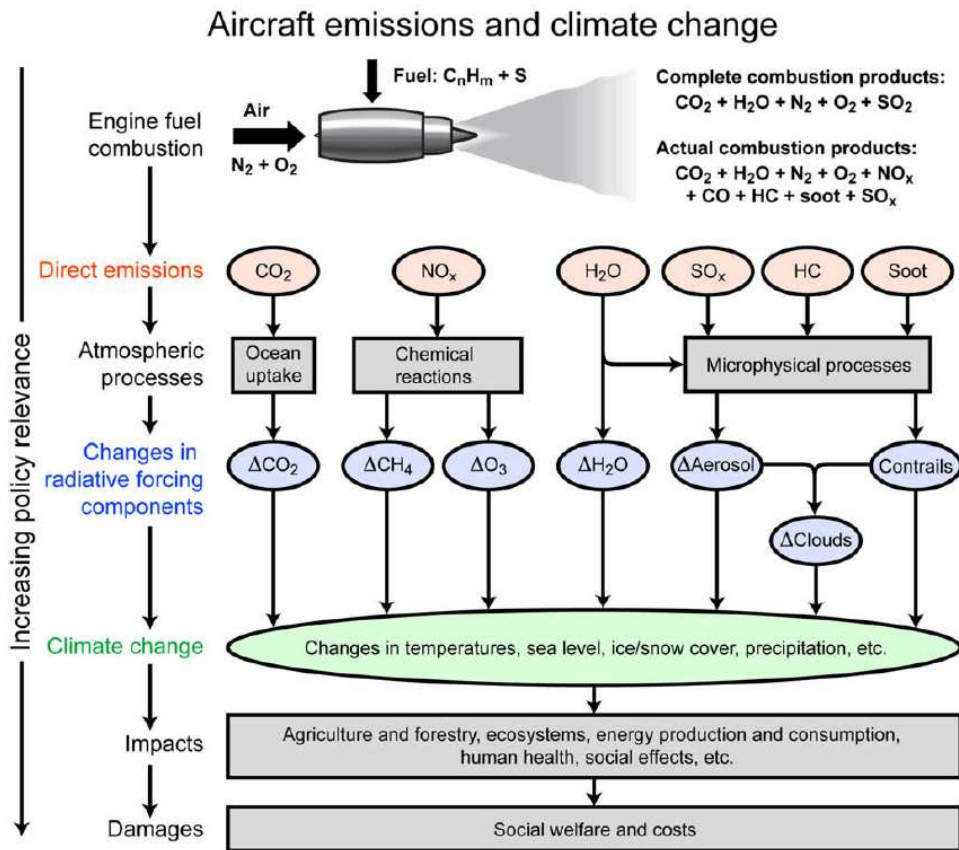


Figure B : principales réactions chimiques liées aux opérations aériennes et caractérisation des impacts dans l'atmosphère, in (Lee, Fahey et al. 2009)

La consommation des ressources fossiles

La consommation de kérosène est en moyenne de 5 litres par passager pour 100km. Ce carburant est issu du raffinage du pétrole. WARDLE (Wardle 2003) pointe les risques liés à la consommation de cette ressource fossile, donc l'accès pourrait être impossible d'ici à une cinquantaine d'années, au rythme actuel de consommation (incluant l'ensemble des activités humaines y ayant recours).

Les sites de production

Comme tous sites industriels, les sites de production de produits aéronautiques peuvent être, à travers les activités qu'ils hébergent, à l'origine d'impacts sur l'environnement. Notre expérience de management environnemental au sein d'un site industriel aéronautique significatif (figure C) nous a amené à gérer différents aspects environnementaux, liés aux activités de fabrication, essais et maintenance d'équipements aéronautiques :

- Des rejets atmosphériques peuvent être liés au fonctionnement d'installations (traitement de surface, installations de peintures, essais des équipements et moteurs),
- Des effluents liquides peuvent provoquer une pollution des sols et ou des eaux souterraines (utilisation d'huile et de kérosène dans le cadre d'essais, déversement de produits chimiques...)
- Le bruit généré par les essais d'équipements voire de moteur complet peut induire une nuisance pour le voisinage.



Figure C : Vue aérienne du centre aéronautique de Réau-Villaroche, 82 ha , 5000 personnes, activités de développement, essais, production, maintenance (France)

Les structures aéroportuaires

Les structures aéroportuaires concentrent de nombreuses activités à l'origine d'impacts sur l'environnement immédiat (Upham, Thomas et al. 2003) :

- **Impact sur l'air** : au-delà des émissions générées par les avions lors des mouvements de décollages et d'atterrissages, de multiples activités, présentées en table A, sont à l'origine d'émissions de gaz et particules altérant la qualité de l'air. Les zones aéroportuaires étant souvent situées près de zones habitées dans les pays industrialisés, cet impact est d'autant prépondérant.
- **Impact sur le voisinage** : le bruit est relié à la fréquence des mouvements des avions (atterrissages, décollage)
- **Impact sur l'eau et les sols** : les activités de stockage de kérosène, ainsi que le ruissèlement des eaux pluviales sur les pistes, bâtiments et voies d'accès peuvent potentiellement être à l'origine de pollution des sols et, par infiltration, des eaux souterraines
- **Impact sur la biodiversité** : l'utilisation de grandes surfaces nécessaires à l'implantation des aéroports se fait au détriment des écosystèmes, de la faune et de la flore présentes (Blackwell, DeVault et al. 2009).

Table A : Sources de pollution atmosphérique dans une zone aéroportuaire et fréquence d'émissions, d'après (STAC 2010)

Aéronefs			Sources Fixes		
Activité		Polluants	Activité		Polluants
Antigivrage	P	COVNM	Bande dégagée	P	N ₂ O/NH ₃ /CH ₄ /COVNM
Approche	J	CO ₂ / NO _x / CO/ HC/ SO _x	Centrale d'énergie	C	HFC/NO _x /CO ₂ /CH ₄ /COVNM
Atterrissage	J	CO ₂ / NO _x / CO/ HC/ SO _x	Déverglaçage	P	COVNM
Auxiliary Power Unit APU	J	CO ₂ / NO _x / CO/ HC/ SO _x	Essais de feu	P	CO ₂ /NO _x /CO/CH ₄ /HC/SO _x
Avitaillement	J	COVNM	Groupes électrogènes	P	CO ₂ /NO _x /CO/COVNM/SO ₂
Décollage	J	CO ₂ / NO _x / CO/ HC/ SO _x	Maintenance bâtiments	P	COVNM
Dégivrage des aéronefs	P	COVNM	Nettoyage bâtiment	P	COVNM
Délestage de carburant	P	CO ₂ /vapeur d'eau	Peinture bâtiment	P	COVNM
Maintenance des aéronefs	P	COVNM	Postes fixes à incendie	P	HFC
Montée	J	CO ₂ / NO _x / CO/ HC/ SO _x	Sources biogéniques	P	N ₂ O/NH ₃ /CH ₄ /COVNM
Nettoyage extérieur des aéronefs	P	COVNM	Stations service	C	COVNM
Peinture des aéronefs	P	COVNM	stockage de krosène	C	COVNM
Roulage	J	CO ₂ / NO _x / CO/ HC/ SO _x	Traitement des déchets	C	CH ₄ /CO ₂ /COVNM

Sources mobiles			Autres sources		
Activité		Polluants	Activité		Polluant
Engins spéciaux espaces verts	P	NO _x /CO/CO ₂ /COVNM/PM10/PM2,5/SO ₂ /O ₃	Travaux aménagement	P	COVNM
Engins spéciaux industrie	P	NO _x /CO/CO ₂ /COVNM/PM10/PM2,5/SO ₂ /O ₃			
Engins spéciaux aéroports	J	NO _x /CO/CO ₂ /COVNM/PM10/PM2,5/SO ₂ /O ₃			
Fret	J	NO _x /CO/CO ₂ /COVNM/PM10/PM2,5/SO ₂ /O ₃			
Ground Power Unit (GPU)	P	CO ₂ /NO _x /CO/COVNM/SO ₂			
Véhicules de service	J	NO _x /CO/CO ₂ /COVNM/PM10/PM2,5/SO ₂ /O ₃			
Maintenance véhicules	P	COVNM			
Nettoyage des véhicules	P	COVNM			
Peinture des véhicules	P	COVNM			
Trafic routier extérieur	J	NO _x /CO/CO ₂ /COVNM/PM10/PM2,5/SO ₂ /O ₃			

Légende : P : activité ponctuelle, J : activité journalière, C : activité continue, PM 2,5 et PM10 : particules ;

COVNM : Composés organiques volatiles non méthaniques.

ANNEXE 2 :
STRUCTURE ET DOCUMENTATION DU PROCESSUS DE
CONCEPTION AERONAUTIQUE

Sommaire

A.	AVANT-PROPOS	231
B.	SYNOPTIQUE GENERAL	232
1	1 CONCEPTION AMONT.....	232
	<i>i.</i> Phase d'expression initiale du besoin.....	232
	<i>ii.</i> Jalon n°0 : lancement de la faisabilité.....	233
	<i>iii.</i> Phase de faisabilité.....	235
	<i>iv.</i> Jalon n°1 : lancement de la définition	236
2	CONCEPTION PRELIMINAIRE	236
	<i>i.</i> Phase de définition.....	236
	<i>ii.</i> Jalon n° 2' : lancement du développement	237
3	PHASE DE DEVELOPPEMENT	237
4	CONCEPTION DETAILLEE	238
	<i>i.</i> Description.....	238
	<i>ii.</i> Jalon n° 2'' : lancement de la réalisation des exemplaires de développement	238
5	AUTRES PHASES DU PROGRAMME	239
6	LA SPECIFICATION TECHNIQUE DE BESOIN (STB)	241
	<i>i.</i> Objectifs de la STB.....	241
	<i>ii.</i> Structure d'une STB	242
7	LE DOSSIER DE DEFINITION (DD)	245
	<i>i.</i> Objectifs du DD.....	245
	<i>ii.</i> Structure d'un DD	248
8	LE PLAN DE JUSTIFICATION DE LA DEFINITION (PJD) ET LE DOSSIER DE JUSTIFICATION (DJD)	250
	<i>i.</i> Objectifs de la Justification de la définition.....	250
	<i>ii.</i> Structure d'un PJD	251
	<i>iii.</i> Structure d'un DJD.....	252
9	SYNTHESE	253

C.	LE CYCLE EN V, UNE ARCHITECTURE TYPIQUE DE PROCESSUS DE CONCEPTION	
	AERONAUTIQUE.....	254
D.	DOMAINES PARTICULIERS LIES A LA CONCEPTION AERONAUTIQUE.....	257
1	LE DOSSIER DE FABRICATION ET DE CONTROLE (DFC).....	257
	iv. <i>Objectifs du DFC</i>	257
	v. <i>Données d'entrée et de sortie du DFC</i>	257
	vi. <i>Contenu général du DFC</i>	258
	vii. <i>Evolution du DFC</i>	260
2	LA GESTION DE LA CONFIGURATION.....	261
	i. <i>Objectifs généraux de la gestion de la configuration</i>	261
	ii. <i>Principes généraux de la gestion de la configuration</i>	261
	a) <i>Champ d'application</i>	261
	b) <i>Articles de configuration, données de configuration et configurations de référence</i>	262
	c) <i>Traitement d'une évolution technique</i>	265
3	SURETE DE FONCTIONNEMENT (SdF).....	266
	i. <i>Définition et principes</i>	266
	ii. <i>Objectifs de SdF</i>	266
	iii. <i>Partage des responsabilités de SdF</i>	267
	iv. <i>Construction de la SdF</i>	268
	v. <i>Logique de déroulement de la SdF</i>	270
	vi. <i>Croissance de la SdF</i>	270
4	BILAN.....	270

A. Avant-propos

Le Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace est un organisme français exerçant son activité tant au niveau national, qu'euro péen et international.

Au plan international, le BNAE est mandaté par l'AFNOR (Association Française de Normalisation) en tant que membre du comité technique ISO/TC 20, spécialisé pour l'aéronautique et l'espace.

Au niveau européen, le BNAE participe aux nombreux travaux de normalisation pilotés par l'ASD-STAN (Aerospace and Defence Industries Association of Europe).

Enfin, au niveau français, le BNAE prépare en collaboration avec des experts de l'industrie et des administrations, les positions françaises qui seront par la suite défendues auprès des instances internationales de normalisation. Le BNAE élabore également des documents normatifs français :

- normes au sens strict du terme (NF L)
- recommandations (RG)

Les recommandations générales rédigées par le BNAE, portant notamment sur le management de programme, sont considérées par la profession comme des documents de référence.

Les paragraphes suivants, dont l'objet est de présenter les principaux éléments constitutifs et particuliers du processus de conception aéronautique sont donc fondés sur l'ensemble des recommandations RG Aéro et en reprennent la substance.

B. Synoptique général

Le diagramme présenté en figure A décrit l'ensemble de la logique de déroulement d'un programme. Nous détaillerons dans les paragraphes suivants les différentes phases depuis la phase d'expression initiale jusqu'à la phase de mise en service.

Le déroulement d'un programme est structuré en sept phases, délimitées par des jalons. Le passage d'une phase à une autre est conditionné par le passage du jalon correspondant, matérialisé par une revue spécifique (RG Aéro 000 41 2002)

1 1 Conception Amont

i. Phase d'expression initiale du besoin

Cette phase consiste à identifier, réunir et valider **le besoin** auquel répondra le programme, et les bases de son lancement par le client. Ce dernier exprime son besoin en termes de service attendu, d'horizon calendaire et d'enveloppe de ressources ; il explicite ce besoin de façon nécessaire et suffisante, éventuellement de façon itérative.

Le client établit un bilan des **études amont** afin de synthétiser les informations disponibles et d'identifier le contexte à prendre en considération en fonction de l'horizon prévu.

Le client effectue une analyse fonctionnelle du besoin, afin d'identifier les fonctions de service du produit. Ce service est complété par d'autres contraintes identifiées par le client.

Une fois identifié et justifié (processus de validation du besoin), le besoin est exprimé dans le **Cahier des Charges Fonctionnelles initial** (CdCF) : une première approche de **l'arborescence fonction** est réalisée, un premier **organigramme des tâches** est construit.

Le client formalise ses **stratégies d'acquisition** et de **maîtrise des risques**. Il traduit sa stratégie de maîtrise des risques en objectifs mesurables à vérifier lors des principaux jalons de l'avancement du programme.

Processus mis en œuvre lors de la phase d'expression initiale du besoin :

- première partie du processus **d'expression du besoin**,
- première partie du processus de **validation du besoin**
- une partie du processus de **conception (amont)** qui se concrétisera par un bilan des études amont

ii. Jalon n°0 : lancement de la faisabilité

Le Jalon n°0 est constitué par la décision de lancement de la phase faisabilité et se concrétise par une **revue de conception programme** (RCP). Les grandes lignes du CdCF initial y sont entérinées. Les éléments nécessaires à la décision de lancement sont réunis et formalisés : la nécessité de mise en place du programme est ainsi évaluée. Le Jalon n°0 est passé lorsque un ou plusieurs **actes contractuels** commandant les études de faisabilité sont conclus auprès du (des) concepteur(s) réalisateur(s) retenu(s) suite à l'exploitation des conclusions de la RCP et la validation du CdCF.

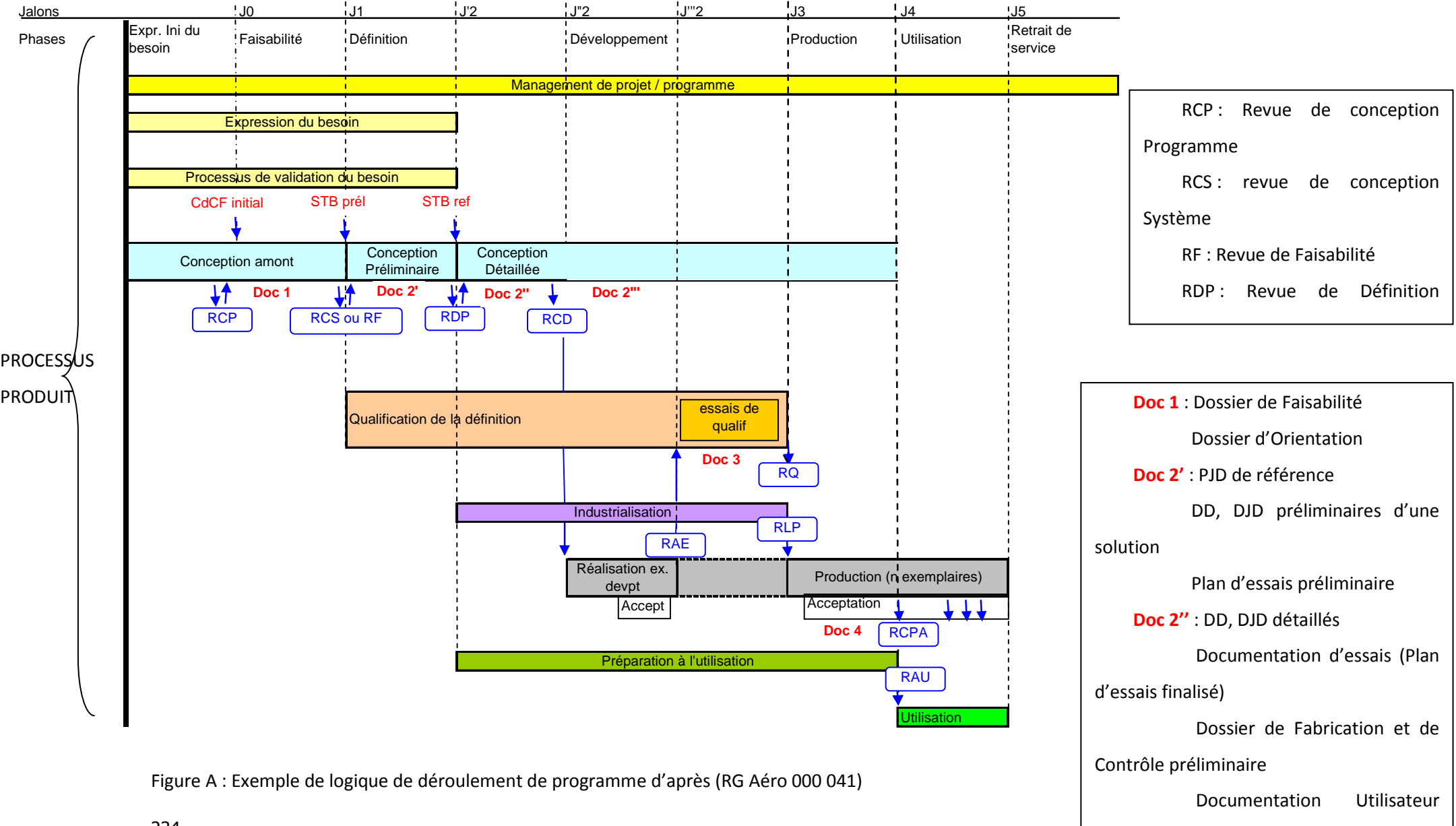


Figure A : Exemple de logique de déroulement de programme d'après (RG Aéro 000 041)

iii. Phase de faisabilité

Cette phase du programme consiste à explorer différents concepts envisageables répondant à un besoin exprimé en termes d'objectifs à atteindre (performances, coûts, délais).

Au cours de cette phase :

- chaque concept étudié dans un **avant-projet** est présenté, associé à une **proposition financière** (coûts et délais), pour la phase de définition,
- la **faisabilité technique et industrielle** est évaluée, et les éléments critiques de chaque concepts sont mis en évidence au regard des objectifs spécifiés,
- des **objectifs mesurables**, convenus pour le jalon n°1, dans le plan de management des risques, sont convenus pour chaque concept réputé « faisable »,
- l'arborescence fonction est figée, l'arborescence produit est provisoirement établie et l'organigramme des tâches est enrichi,

Le concept considéré comme répondant aux objectifs spécifiés ainsi que, le cas échéant, le (ou les) concepteur(s) réalisateur(s) associés sont proposés pour la phase ultérieure,

Le besoin du demandeur est mis à jour et formalisé, via :

Un **CdCF figé** à partir duquel seront gérées les évolutions au titre de la Gestion de Configuration,

Une version préliminaire de la STB, appuyée le cas échéant par une mise à jour du document de traçabilité du besoin (DJE)

L'ensemble de ces documents est regroupé dans un **dossier de faisabilité** et examiné lors d'une **revue de spécification**.

Un « dossier d'orientation » est établi à la fin de la phase de faisabilité, synthétisant, sous la responsabilité du client, les éléments réunis à l'appui de sa décision de lancement de la **phase de définition**.

Processus mis en œuvre lors de la phase de faisabilité :

la seconde partie du processus d'**expression du besoin**, concrétisé par la Spécification Technique du Besoin Préliminaire (STB préliminaire), et, éventuellement, la mise à jour du CdCF initial,

la seconde partie du processus de **validation du besoin** dont les résultats sont intégrés dans le dossier de faisabilité²¹,

une seconde partie du processus de **conception amont** qui se concrétise par le dossier de faisabilité.

²¹ Dossier de faisabilité : dossier précisant la description des solutions possibles satisfaisant l'expression du besoin et argumentant la solution proposée.

iv. Jalon n°1 : lancement de la définition

Tous les éléments rassemblés au cours de la phase de faisabilité sont examinés au cours d'une **revue de conception système** (RCS) ou d'une **revue de faisabilité** (RF) dont l'issue est de décider du démarrage du programme si toutes les conditions prévues sont réunies ou au contraire de demander un complément à la phase de faisabilité, voire, d'arrêter le programme.

Ce jalon aboutit au **choix du concept** et initie la **phase de définition**, après avoir:

- exploité les conclusions de la **RCS** ou de la **RF**,
- vérifié la pertinence et la validité du **CdCF de référence** et de la **STB préliminaire**.

2 Conception préliminaire

i. Phase de définition

La phase de définition consiste en l'étude du (des) concept(s) retenu(s) afin d'aboutir à une **architecture de solution** de nature à satisfaire le besoin exprimé, et dont les **incertitudes** sont identifiées et jugées **compatibles** avec la décision de **lancement de développement**.

Au cours de cette phase, le fournisseur :

- approfondit l'étude de la solution technique correspondant au concept retenu précédemment, et en évalue les **performances** (au plan techniques, coûts, délais),
- gère les **risques** conformément au plan de management retenu et tiendra à jour le tableau de bord ad hoc,
- s'assure de l'obtention des **objectifs mesurables** convenus pour le jalon n°2' dans le plan de management des risques,
- met à jour en conséquence avec le client le **plan de management** et le **référentiel de gestion des risques** pour la phase de développement,
- fige avec le client la STB à l' « état de référence »,
- établit les STB du niveau aval et si possible l'**arborescence** à respecter pour l'ensemble des spécifications,
- met à jour le document de traçabilité du besoin qui sera examiné lors de la revue de spécification,
- réunit les éléments constitutifs du « **dossier de lancement du développement** » :
 - STB de référence,
 - Organigramme des tâches,

- Plan de management associé au Plan de développement,
- STB de niveau aval,
- Dossier de Définition Préliminaire,
- Plan de Justification de la Définition de référence et le plan d'essai préliminaire,
- Dossier de Justification de la Définition Préliminaire,

Processus mis en œuvre lors de la phase de définition :

- sortie de la troisième partie du processus d'**expression du besoin**,
- sortie du processus de **validation du besoin**
- sortie du processus de **conception préliminaire**
- engagement du processus de qualification de la définition

ii. Jalon n° 2' : lancement du développement

« La phase de définition se termine par la **revue de définition préliminaire** (RDP), dont l'objectif est de vérifier que le concept retenu au niveau système est **optimisé** en terme de performances, de coûts et de délais et est susceptible de **répondre aux objectifs spécifiés**, notamment à la **STB système**. La revue doit en conséquence fournir les éléments d'aide à la décision visant à lancer la phase de développement, demander un complément à la phase de définition ou arrêter le programme et, par conséquent :

- entériner la STB système de référence,
- retenir le cas échéant le concept de solution,
- approuver l'architecture système,
- entériner à partir de ces éléments « la configuration de référence de développement ».

La phase de développement débute par le franchissement du jalon n°2' qui entérine la proposition de la RDP et valide la STB de référence. »

3 Phase de développement

La phase de développement consiste en l'étude en détail de la solution retenue afin d'aboutir à une **définition qualifiée et productible** des produits et livrables.

La phase de développement est découpée en trois sous phases et autant de jalons, dont une seule sous-phase correspond purement à une activité de conception :

- conception détaillée,
- { réalisation des exemplaires de développement
- qualification et industrialisation

4 Conception détaillée

i. Description

La phase de conception détaillée consiste à étudier en détail la solution retenue afin d'aboutir à une définition validée en vue de la fabrication des exemplaires de développement.

Processus mis en œuvre lors de la phase de conception détaillée :

- processus de conception détaillée,
- première partie du processus de **préparation à l'utilisation**,
- poursuite du processus de qualification de la définition,
- processus d'industrialisation.

Les documents principaux émanant de la phase de conception détaillée, par ailleurs gérés en configuration sont :

- le **Dossier de Définition** détaillé du produit et de chaque exemplaire de développement),
- la Documentation Utilisateur préliminaire,
- le Dossier de Justification de la Définition détaillée,
- la **Documentation d'Essais** nécessaire pour les essais de qualification (plan d'essais finalisés, etc....),
- les Dossiers de Fabrication et de Contrôle préliminaires.

ii. Jalon n° 2'' : lancement de la réalisation des exemplaires de développement

« Tous les documents établis lors de la conception détaillée font l'objet d'un examen, lors de la **revue de conception détaillée** (RCD). Cette revue a pour objectif :

- d'examiner la **définition détaillée du système**, en vue de réaliser le(s) exemplaire(s) nécessaire(s) aux essais faisant partie du **processus de qualification**,
- de statuer sur l'atteinte des **objectifs** du **processus de conception détaillée**, ainsi que sur le contenu et l'avancement des **processus de qualification** et éventuellement d'**industrialisation**.

La sous-phase [de réalisation des exemplaires de développement] débute par le franchissement du jalon n° 2'' qui entérine le choix de la RCD. »

5 Autres phases du programme

Les autres phases du programme, n'étant plus à proprement parler des phases de conception, sont consignées dans le tableau descriptif ci après (table A), reprenant pour chacune leur définition, les processus auxquels elles font appels et les documents caractéristiques qui y sont produit. Les jalons importants sont également décrits.

Table A : Description des phases du programme suivant la conception détaillée, d'après (RG Aéro 000 41)

PHASE / JALON	Définition	Processus mis en œuvre	Document sortants	
PHASE DE DEVELOPPEMENT	Sous phase de réalisation des exemplaires de développement	Consiste à réaliser les exemplaires de développement et à les mettre au point en vue des épreuves de qualification	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Processus de production ▣ Processus d'acceptation ▣ Processus de qualification de la définition ▣ Processus de préparation à l'utilisation et d'industrialisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Procès verbal de contrôle de chaque exemplaire ▣ Mise à jour des dossiers élaborés en phase de conception détaillée (DD, DJD, DE, DFC) ▣ Dossier d'aptitude aux essais => gestion des documents en configuration
	JALON N°2": Lancement des essais de qualification	"La sous phase de réalisation des exemplaires de développement se termine par la revue d'aptitude aux essais (RAE). Cette revue doit permettre d'examiner la configuration réalisée de ces exemplaires et l'avis de la défincement de leur mise au point, et de décider s'ils sont suffisamment représentatifs de la définition attendue et si les conditions sont réunies pour leur faire subir des essais de qualification représentatifs (présentation en essais de qualification) La sous-phase d'exécution des essais de qualification débute par le franchissement du jalon n°2", qui e ntérine les conclusions de la RAE."		
	Sous phase de qualification et d'industrialisation	Consiste à soumettre les exemplaires de développement aux épreuves de qualification et à rendre l'outil industriel apte à la production en série	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Processus de qualification ▣ Processus de conception détaillée ▣ Processus de préparation à l'utilisation ▣ Processus d'industrialisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Mise à jour du Dossier de jJustification de la Définition ▣ Dossier de Définition Détaillée de référence ▣ Documentation Utilisateur et Soutien Logistique et Opérationnel ▣ Mise à jour des Dossiers de Fabrication et de Contrôle
	JALON N°3: Lancement de la production	"Tenue de la Revue de qualification (RQ), ayant pour objectif de vérifier que la définition du système satisfait à toutes les exigences de la STB et qu'elle est productible, en: - analysant l'adéquation de la définition avec les exigences de la STB et vérifiant la productibilité, - analysant le DJDet en le comparant avec les justifications attendues au titre du PJD - vérifiant que les risques résiduels sont ramenés à un niveau compatible avec le prononcé de la qualification. En résumé, la RQ doit fournir les éléments permettant de prononcer la qualification du système à lancer en production. Dans le même temps, la revue de lancement de la production(RLP) clôt le processus d'industrialisation. Cette revue doit permettre après examen des DFC, notamment, de décider si le produit est reproductible; elle peut autoriser la reproduction en série. La phase de production débute par le franchissement du jalon n°3 qui implique l'acceptation des conclusi ons des revues de qualification et de la revue de lancement en production."		
PHASE DE PRODUCTION	Phase de production	Consiste à réaliser et à fournir à l'utilisateur les produits commandés conformes à l'état défini ainsi que les moyens nécessaires à son utilisation	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Processus de production en série (fabrication de produits incluant les approvisionnements nécessaires; fourniture de produits, réalisation et mise à disposition des moyens nécessaires à l'utilisation) ▣ Processus de préparation à l'utilisation ▣ Processus d'acceptation (bouclage) 	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Document Utilisateur de Référence ▣ Livret Suiveur ▣ Procès Verbal d'acceptation du premier exemplaire ▣ Registre Individuel de Contrôle
	JALON N°4 : Mise en service	"Les documents établis ay cours de la phase de production sont examinés au cours de la Revue Critique de Premier Article (RCPA), puis de la revue d'Aptitude à l'Utilisation (RAU). Les objectifs respectifs de ces revues sont: ▣ Pour la RCPA: - analyser la conformité d'un des premiers articles de série par rapport à la définition qualifiée du produit, - vérifier l'aptitude des moyens de production à assurer la reproductibilité de la définition qualifiée, - entériner le dossier de Fabrication et de Contrôle pour la série, - permettre la fourniture des produits au client, ▣ Pour la RAU: - vérifier que l'environnement d'utilisation (soutien logistique et opérationnel, formation) a été constitué et approvisionné conformément aux documents établis, - vérifier la compatibilité de cet environnement avec les produits livrés, - permettre au client de déclarer l'aptitude du produit à l'emploi qui conditionne le début de sa vie opérationnelle le jalon n°4 qui entérine les conclusions de ces deux revues permet la fourniture du produit puis a mise en service"		
PHASE D'UTILISATION	Phase d'utilisation	Phase au cours de laquelle sont mis en service, utilisés et soutenus le système et les moyens nécessaires à l'exécution de la mission opérationnelle	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Processus d'utilisation ▣ Processus de tenue à jour des Livrets suiveurs des exemplaires livrés En parallèle, d'autres processus peuvent se poursuivre: <ul style="list-style-type: none"> ▣ Processus de conception et de qualification de la définition ▣ Processus de production et d'acceptation associée Tout au long de la phase: <ul style="list-style-type: none"> ▣ Processus de retour d'expérience 	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Livrets Suiveurs ▣ Registres de Contrôle Individuels
	JALON N°5 : Décision de retrait de service	"Cette décision peut concerner un retrait partiel ou total"		
Phase de retrait de service	Phase du programme consistant à préparer et à réaliser, de façon coordonnée et conformément aux dispositions réglementaires en vigueur, la cessation totale ou partielle d'utilisation du système et le démantèlement des produits et des moyens associés"			

6 La Spécification Technique de Besoin (STB)

(RG Aéro 000 08 2000)

i. Objectifs de la STB

La **STB**, établie sous la responsabilité du client, a pour objet d'exprimer le **besoin en termes techniques**, compatibles avec le CdCF et d'expliciter les exigences résultant du choix de concept, telles que :

- les exigences fonctionnelles associées au profil de vie²², en tenant compte des conditions d'environnement prévues ;
- les exigences de Sûreté de fonctionnement, d'ergonomie, de soutien logistique, d'environnement ;
- les exigences relatives aux interfaces du produit et de son milieu environnant ;
- les exigences concernant la conception et la production (conception à coûts objectif, solutions imposées ou interdites, normes à appliquer ...) ;
- les exigences d'assurance de résultat : justification et prononcé de qualification, acceptation.

Les exigences de la STB son **nécessaires et suffisantes** pour que le concepteur puisse élaborer une définition du produit qui satisfasse le besoin. Lorsque le développement du système s'effectue par étapes successives, il est recommandé qu'une STB corresponde à chaque étape : ainsi chaque version du système peut être considérée comme un système en soi.

La STB a pour rôle de permettre l'établissement de la **Définition du produit à développer** ou le **choix d'un produit existant** répondant aux exigences exprimées par le client.

Ce document constitue une référence pour :

- prendre la décision de qualification de la définition du produit ;
- instruire les évolutions techniques de la Définition du produit, elle constitue ainsi un élément de la configuration de référence du produit ;

²² Profil de vie : Description chronologique des situations qu'un produit est appelé à subir depuis sa sortie d'usine jusqu'à sa mise hors service (RG Aéro 000 08)

- décider de la suite à donner à une demande de dérogation dans le cas où les éléments de Dossier de Définition ne suffisent pas pour statuer sur cette demande.

La STB est le support des **exigences du client**, formulées au **fournisseur**. La STB est donc un élément du **contrat**.

La STB peut se bâtir à plusieurs phases du programme :

- à la fin de la phase de faisabilité : **STB préliminaire**, transcription du besoin exprimé dans le CdCF,
- à la fin de la phase de définition : **STB de référence**. La STB est complétée de points ayant nécessité des approfondissements, et devient un des documents nécessaire au lancement du développement.

ii. Structure d'une STB

La recommandation RG Aéro 000 08 suggère la structure suivante pour une STB :

1. Objectif

Présentation de l'utilisation et des missions du produit

2. Documents et terminologie

- 2.1 Documents à appliquer
- 2.2 Documents de référence
- 2.3 Terminologie et sigles utilisés

3. Exigences techniques

3.1 Exigences fonctionnelles

Définition des exigences liées aux fonctions attendues du produit et, par conséquent, performances attendues du produit dans toutes les situations prévues de son profil de vie, en précisant pour chacune d'elle :

- la (ou les) configuration(s) matérielle(s) et fonctionnelle(s) du produit,
- les durées minimales requises,
- les conditions d'environnement associées

3.2 Sûreté de Fonctionnement

- **Disponibilité** : les objectifs de disponibilité doivent être précisés en tenant compte des conditions d'utilisation et de maintenance pour lesquelles un taux de disponibilité est demandé (Modes dégradés ou secourus et les transitions entre les différents modes)
- **Fiabilité** : les objectifs de fiabilité doivent être précisés en tenant compte des conditions clairement définies (fonctionnement, stockage, etc., ...) dans lesquelles chaque objectif doit être atteint et en veillant à ce que l'ensemble des objectifs de fiabilité couvre tout le profil de vie et toutes les fonctions du produit.
- **Maintenabilité** : Les exigences de maintenabilité doivent être précisées au regard :
 - de la testabilité,
 - de la surveillance des paramètres,
 - de l'aptitude à la recherche de panne,
 - des facilités de réparation
 - de l'interchangeabilité,
 - des niveaux d'intervention,
 - de la logistique.
- **Sécurité** des personnels, des matériels et de l'environnement : les exigences de niveau de sécurité doivent être fixées pour chacune des situations de profil de vie et des configurations d'emploi du produit. [...]

Les exigences de **durée de vie** doivent être précisées en tenant compte notamment :

- des situations d'emploi prévues,
- des taux de défaillance admissibles,
- des rénovations prévues.

3.3 Ergonomie – Facteurs Humains

Il convient dans ce paragraphe d'exprimer les exigences qui ont pour objet la facilité d'emploi du produit (interface homme-machine, dimensions, volumes, masses, manoeuvrabilité, protection contre les erreurs humaines, ...).

Les contraintes liées au personnel doivent aussi être précisées (définition du profil de l'utilisateur...)

3.4 Logistique

Doivent être exprimés dans ce paragraphe :

- les contraintes concernant la maintenance (périodicité minimale, durée d'intervention, infrastructure, outillage, modalités d'intervention,...)
- les exigences concernant les emballages, le transport, la manutention, le stockage,
- les exigences relatives à la formation des utilisateurs du produit,
- les exigences relatives à la Documentation Utilisateur,
- les exigences relatives à la mise en œuvre du produit chez l'utilisateur.

3.5 Environnement

Il convient, en partant des différentes situations du profil de vie du produit à réaliser, de définir dans ce paragraphe :

- les agents d'environnement²³ considérés comme significatifs,
- les valeurs correspondant à chacun d'eux, déterminées à l'aide :
 - des valeurs typiques synthétisées à partir de relevés antérieurs d'environnement réels (Banques de données),
 - de modèles de calcul de l'environnement réel,
 - d'essais partiels,
 - de mesures spécifiques de l'environnement réel.
- les valeurs des agents d'environnement compte tenu des effets induits connus,
- les valeurs des agents de l'environnement induit par le produit lui-même.

3.6 Exigences relatives aux interfaces

Il convient dans ce paragraphe de définir les contraintes fonctionnelles et physiques imposées au produit pour assurer ses relations avec les produits environnants et avec le monde extérieur, dans son utilisation au cours de tout son profil de vie et dans tous les domaines, en tenant compte, le cas échéant, des exigences induites par les STB des niveaux supérieurs et inférieurs.

²³ Agent d'environnement : Phénomène physique, chimique, biologique, etc..., susceptible d'avoir un effet direct ou indirect, immédiat ou différé, sur les êtres vivants, sur les activités humaines et sur les matériels ou leur fonctionnement

3.7 Exigences d'études et solutions imposées

Il convient dans ce paragraphe de traiter les contraintes qui ont pour conséquence de limiter la liberté de conception et de fabrication.

4. Exigences d'assurance et de résultat

4.1 Justification et qualification de la définition

4.2 Acceptation du produit

5. Sécurité de l'information

Paragraphe optionnel

7 Le Dossier de Définition (DD)

(RG Aéro 000 14 2003)

i. Objectifs du DD

Le dossier de définition a pour objectif de présenter la description technique de la solution retenue par le concepteur pour réaliser un produit répondant aux exigences du client. La définition d'un produit s'acquiert par intégration dans son DD des données de définition de ses constituants.

Le concepteur du produit doit mettre en œuvre :

- Un système d'identification permettant d'assurer la relation bi-univoque entre les références successives des données de définition et le produit correspondant,
- Un système d'enregistrement garantissant l'intégrité, la traçabilité, la pérennité, la confidentialité et la communicabilité de ces données.

Le DD est considéré comme un référentiel pour les éléments suivants :

- L'établissement des instructions de fabrication, de contrôle et d'essais,
- L'établissement des exigences, y compris celles liées à l'intégration, des niveaux inférieurs (sous-traitance...),
- L'approvisionnement des constituants de provenance extérieure ou de sous systèmes,
- L'élaboration de la documentation technique et de la documentation utilisateur associée au produit,

- L'attestation de conformité, l'acceptation.

Avec la STB, le DD sert de base pour :

- La qualification et la certification du produit concerné,
- Le traitement des anomalies, des incidents et des demandes d'évolution,
- La gestion de la configuration de ce produit.

Les principales données d'entrée à la réalisation d'un DD sont donc les éléments contenus dans la **STB de référence**, définissant notamment les **performances** attendues du produit. D'autres exigences, telles que les moyens à mettre en œuvre, les délais et les coûts vont avoir un impact sur la définition du produit. La réalisation d'un DD se déroule en deux étapes, correspondant respectivement aux phases de **conception préliminaire** et de **conception détaillée**.

◆ Le **DD préliminaire** rassemble donc l'ensemble des éléments issus de la **conception préliminaire** du produit, qui s'appuie directement sur la STB de référence. **Un concept de solution** est ainsi décrit, répondant aux objectifs de performances, coûts et délais. Celui-ci recouvre :

- L'ensemble des choix technologiques retenus pour le produit et ses constituants,
- La décomposition du produit en ses principaux constituants (éléments constitutifs de l'arborescence-produit),
- La répartition des fonctions de service et de l'ensemble des exigences entre les constituants,
- L'identification et la caractérisation des fonctions techniques résultant de ces choix, de cette décomposition, de cette répartition, ainsi que les valeurs de l'
- L'environnement retenues et adaptées au profil de vie du produit,
- La répartition topographique des divers constituants.

Le **DD préliminaire** contient les éléments suivants :

- **L'architecture physique du produit** ou du système décrite en ses principaux constituants, obtenue à partir de l'analyse des fonctions attendues,
- La définition préliminaire des **interfaces internes**,
- Les allocations préliminaires des performances aux constituants,*
- **Les données de définition** déjà obtenues et celles relatives aux produits imposés par le client,
- L'identification des divers constituants qui présentent des criticités de développement, de production, de soutien logistique.

◆ Le **DD qualifié** est issu de la phase de **conception détaillée**. Cette phase permet d'aboutir à une définition complète du produit, via un ensemble de tâches (études, calculs, essais, simulations...), à partir d'un concept de solution retenu, et d'étudier et *valider les principaux moyens et procédés assurant que cette définition est productible*. Des critères de dimensionnement des produits vis-à-vis de l'environnement sont retenus, et les fonctions techniques validées.

- Le DD qualifié contient à minima les éléments suivants :
- La référence de la STB à laquelle il répond,
- Une arborescence plus ou moins détaillée du produit en ses constituants,
- La référence des constituants de premier niveau,
- Les clés d'accès aux données de définition des constituants de niveau immédiatement inférieur [...]

Eventuellement, un descriptif technique permettant la compréhension des caractéristiques du produit, en termes compatibles avec la STB de référence,

Les données de définition élaborées par le concepteur dont celles nécessaires pour l'intégration.

ii. Structure d'un DD

La recommandation RG Aéro 000 14 établit une liste guide des éléments nécessaires à la rédaction d'un DD de référence, répartis selon quatre catégories structurantes :

- Les informations générales,
- Les informations de gestion du Dossier de Définition,
- Les informations descriptives du produit,
- **Les informations particulières** aux activités de production, d'intégration, d'acceptation, d'utilisation et de soutien du produit.

Nous nous intéresserons ici aux informations descriptives du produit et aux informations particulières. Nous ne traiterons pas des informations spécifiques aux logiciels.

Les informations descriptives du DD portent sur :

- L'architecture du système** et les arborescences produit,
- Les caractéristiques **physiques** et **fonctionnelles**,
- Les définitions des :
 - Matériaux et produits semi-ouvrés,
 - Fluides** et **ingrédients** constitutifs ou utilisés par les procédés imposés,
 - Colles, vernis, peinture.
- La description détaillée des constituants ou les références de leurs DD
- Les dessins
 - D'ensemble, de sous-ensembles,
 - D'assemblages,
 - De détail, de face,
 - D'encombrement,
 - Schémas
- Les données d'interconnexions
- La **nomenclature** des constituants
- Le plan d'intégration
- Les produits standards

Les informations particulières du DD sont reprises dans la table B.

Table B :Liste guide des informations particulières relatives au produit à porter dans le Dossier de Définition de référence (RG Aéro 000 14 2003) [par ordre alphabétique]

Libellé	Commentaires	Production / Intégration	Acceptation	Utilisation	Soutien
Caractéristiques physiques et fonctionnelles à vérifier	Valeurs et tolérances	X	X		X
Contraintes d'exploitation	Fonctionnement autorisé, péremption, mise et retrait du service, sécurité des personnes, sécurité informatique		X		
Critères d'acceptation du produit et de ses constituants	Pouvant inclure un catalogue de défauts acceptables		X		
Etats intermédiaires et état final du produit	Y compris les fournitures associées	X			
Informations concernant l'environnement	Valeurs d'environnement retenues	X		X	X
Informations concernant : Les approvisionnements*, L'interchangeabilité	Y compris les équivalences	X		X	X
Informations relatives à la traçabilité	Si imposées dans la STB ou par le concepteur	X		X	X
Informations liées: A la propreté, Au déverminage		X			
Informations nécessaires au : Stockage, déstockage, Manutention, transport, Utilisation et soutien.		X		X	X
Marquage d'identification des constituants	Voir NF L 09-001 A et NF L 09-020	X		X	
Marquage fonctionnel et marquage de sécurité		X		X	
Procédés imposés ou spéciaux : De fabrication, De contrôle et d'essais, D'assemblage,	Y compris qualification des opérateurs	X			
Rechanges	Si différentes du nominal	X		X	X

8 Le Plan de Justification de la Définition (PJD) et le Dossier de Justification (DJD)

(RG Aéro 000 15 2000)

i. Objectifs de la Justification de la définition

La justification d'un produit consiste à apporter des arguments et des preuves permettant de démontrer que la définition du produit répond aux exigences auxquelles celui-ci doit satisfaire. Le fournisseur propose une démarche de justification de la définition, consistant à :

- **Recenser d'un commun accord les exigences**, voire les objectifs, contenus dans la STB **ainsi que la réglementation** pour lesquels les justifications de la définition du produit sont requises et s'assurer de leur bonne et même compréhension,
- **Identifier les risques de non-satisfaction** des exigences ou de non-atteinte des objectifs et estimer leur gravité et leur occurrence,

Et, après accord mutuel, disposer d'une **référence commune** (exigences identifiées et leur décomposition compte tenu des risques acceptés) pour l'élaboration des documents à fournir, à savoir :

- le Plan de Justification de la Définition
- Le Dossier de Justification de la Définition

Les arguments et les preuves recueillies par le fournisseur au cours du développement du produit et rassemblés dans le DJD, contribuent au prononcé par le client, de la qualification de la définition de ce produit.

La Justification s'appuie sur des éléments d'ordre **théorique, expérimental**, sur l'**expérience acquise dans des réalisations similaires** ainsi que sur le **savoir faire du fournisseur**. La Justification de la définition est la **démonstration**, à l'aide de preuves que les exigences exprimées par le client dans la STB sont satisfaites.

La justification de la définition d'un produit est réalisée au cours de la conception de ce dernier :

- Lors de la phase de **conception préliminaire**, la justification est préparée au travers du **PJD**,
- Lors de la phase de **conception détaillée**, la justification est construite au travers de l'élaboration du **DJD**.

ii. Structure d'un PJD

Le PJD est établi pendant la phase de **conception préliminaire** et est **figé** à l'entrée de la phase de **conception détaillée**. Le PJD sert de **document d'entrée au processus de qualification de la définition** et fournit la trame du DJD. Le PJD est rédigé par le fournisseur, parallèlement à la mise au point de la STB de référence, il peut être inclus dans le **Plan de développement**. Il peut prendre en compte, tout au long du développement du produit, les études et calculs, les essais et simulations qui participent à l'acquisition des informations de justification.

Le PJD contient :

L'énumération de la totalité des exigences identifiées et exprimées dans la STB [...],

La **décomposition de chaque exigence** exprimée en termes directement exploitables par le fournisseur pour préciser la ou les justifications à acquérir compte tenu du niveau de visibilité négocié [...],

Pour chacune des justifications à acquérir :

La **nature des travaux** destinés à acquérir les informations de justification,

Les **moyens à mettre en œuvre** pour la justification de ces travaux [...],

Les **conditions d'environnement** simulé déduites des exigences exprimées dans la STB,

Si nécessaire, la « **date objectif** » d'acquisition des justifications, en cohérence avec le Plan de Développement.

Un PJD peut se présenter sous forme d'un tableau, introduisant les items suivants (table C) :

Table C : Exemple de présentation d'un PJD d'après (RG Aéro 000 15 2000)

Exigences identifiées	Décomposition de l'exigence	Nature des travaux				Moyens / outils à mettre en œuvre			Date Objectif	Observations
		Calculs	Etudes	Essais	Autres	Listes	Existantes	À réaliser		

iii. Structure d'un DJD

Le DJD est établi au cours de la phase de **conception détaillée**, conformément au PJD et :

Permet d'accéder aux informations de justification demandées ;

Présente un bilan des justifications acquises

Constitue un élément déterminant pour la décision de qualification de la définition du produit.

Le DJD permet de disposer d'**informations cohérentes et argumentées** pouvant contribuer aux prises de décision pour **l'instruction des évolutions** ou pour le **traitement des anomalies**. Le DJD donne également les éléments justificatifs relatifs à la **productibilité** et la **reproductibilité** du produit.

Le DJD est constitué de deux parties :

Une **clé d'accès aux supports d'information** (référence de la STB, du DD, du PJD, etc....), sous forme de tableau, par exemple,

Un bilan de l'ensemble des justifications :

Les points spécifiés et non tenus, avec les propositions d'actions et le calendrier correspondant,

Les impasses éventuelles,

Les justifications acquises et celles restant à acquérir,

L'analyse des justifications non apportées ou insuffisantes et des risques afférents,

Les marges vis-à-vis des performances requises (si nécessaires à la justification),

L'état d'avancement des justifications par rapport au PJD.

Un exemple de présentation est donné en table D.

Table D : exemple de présentation d'un dossier de justification d'après (RG Aéro 000 15, 2000)

Référence doc :....

Référence STB :....

Référence DD :....

Référence PJD :....

Exigences identifiées	Décomposition de l'exigence	Références au document de définition au dossier descriptif	Références des documents contenant la justification (*)
(*) Repérer les documents remis au client			

9 Synthèse

Le schéma de synthèse représenté en figure B propose de replacer les différents documents (STB, DD, PJD et DJD) dans le processus de conception aéronautique, au sein des phases de conception préliminaire et détaillée, et de pointer la particularité liée à la notion de justification

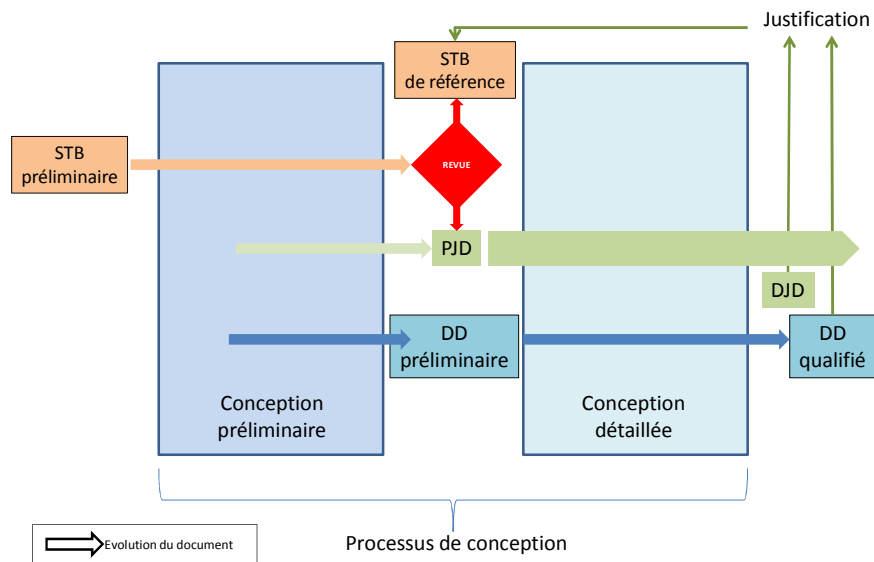


Figure B : Principaux documents utilisés dans le processus de conception aéronautique, d'après (RG Aéro 000 15)

Le processus de conception aéronautique est hautement itératif, cependant, du fait des exigences touchant notamment à la traçabilité, l'ensemble des décisions doit être tracé et consigné dans des documents parfaitement gérés au sein d'un système documentaire. Une vérification continue de l'adéquation des solutions choisies aux exigences de performance, coût et délai doit être effectuée.

La description du processus de conception ne se limite pas à celle des documents majeurs constituée par la STB, le DD, le PJD et le DJD. Dans la suite, nous apporterons un éclairage à deux points complémentaires et particuliers :

- Les architectures des processus de conception : exemple du cycle de conception en V,
- Les domaines particuliers liés à la conception :
- La fabrication,
- La gestion de configuration,
- La sûreté de fonctionnement.

C. Le Cycle en V, une architecture typique de processus de conception aéronautique

Différentes architectures de processus de conception sont utilisées dans le domaine aéronautique. La plus fréquemment utilisée, aujourd'hui, correspond à une représentation dite en « V » (figure C), qui correspond à une succession de définitions de plus en plus détaillée d'un produit au fur et à mesure de l'avancement du développement, corrélée, tel un miroir, à des actions de validation et de justification vis-à-vis des documents de référence. Nous reprenons ici la définition rédigée dans la recommandation RG Aéro 000 41.

La représentation en « V » souvent utilisée pour le développement d'un produit, permet de situer le développement propre des constituants en fonction de leur niveau dans l'arborescence produit.

Elle permet de représenter la synchronisation des cycles de développement entre niveaux. Dans la branche descendante est représentée l'élaboration des définitions aux différents niveaux ; dans la branche remontante, les intégrations.

Cette représentation se définit comme suit :

1) **Processus de déclinaison du besoin** du niveau 0 de l'arborescence produit jusqu'aux niveaux aval n, n+1, ...

Les documents correspondants sont :

- Niveau 0 : **CdCF** (Jalon J0) **STB** (Jalon J'2),
- Niveau n **STB** correspondantes.

2) **Processus d'élaboration de la définition** des niveaux ...n+1, n, au niveau 0, concrétisé à chaque niveau par le **dossier de définition** (DD) correspondant.

3) **Processus d'élaboration de la justification de la définition** des niveaux ...n+1, n..., au niveau 0, concrétisé à chaque niveau par le dossier justificatif de la définition (DJD).

4) **Processus de qualification de la définition**, effectué à chaque niveau permettant de s'assurer que le DD, en s'appuyant sur les justifications du DJD, répond aux exigences de la STB.

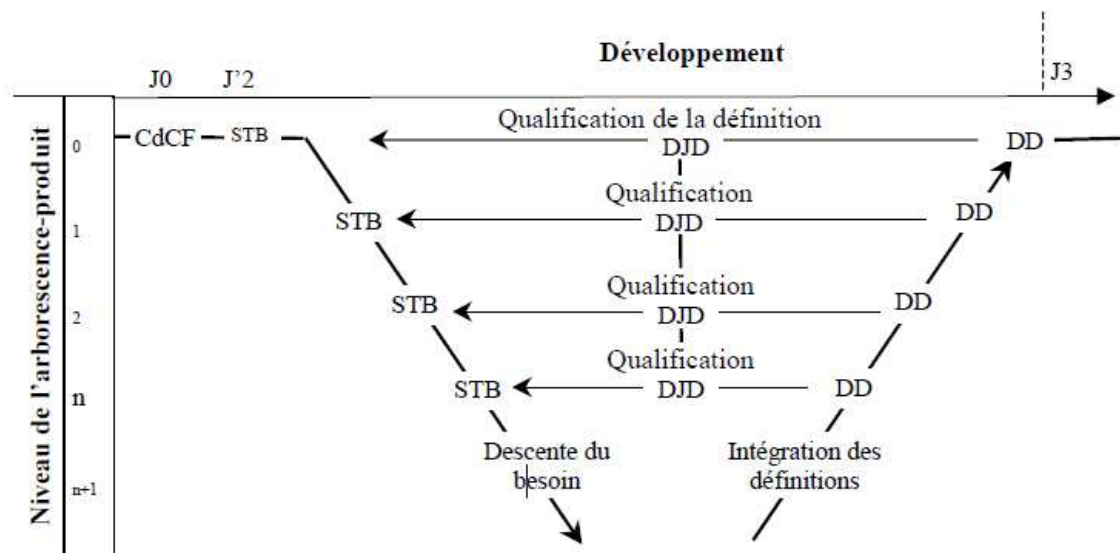


Figure C : Représentation d'un cycle de conception en V (RG Aéro 000 41)

A titre d'exemple, nous reprenons ici le cycle de conception utilisé chez Parker Aerospace, figure D (MOIR et SEABRIDGE, 2XXX). Le schéma représente les différentes étapes pour la conception d'un système intégré à un avion, décomposant les étapes depuis le besoin client jusqu'au dessin de définition des pièces constitutives. Chacune des étapes doit être placée en regard d'une activité de vérification. Le processus en V se déroule sur toute la vie du programme, depuis la signature du contrat, jusqu'à la mise en service de l'avion.

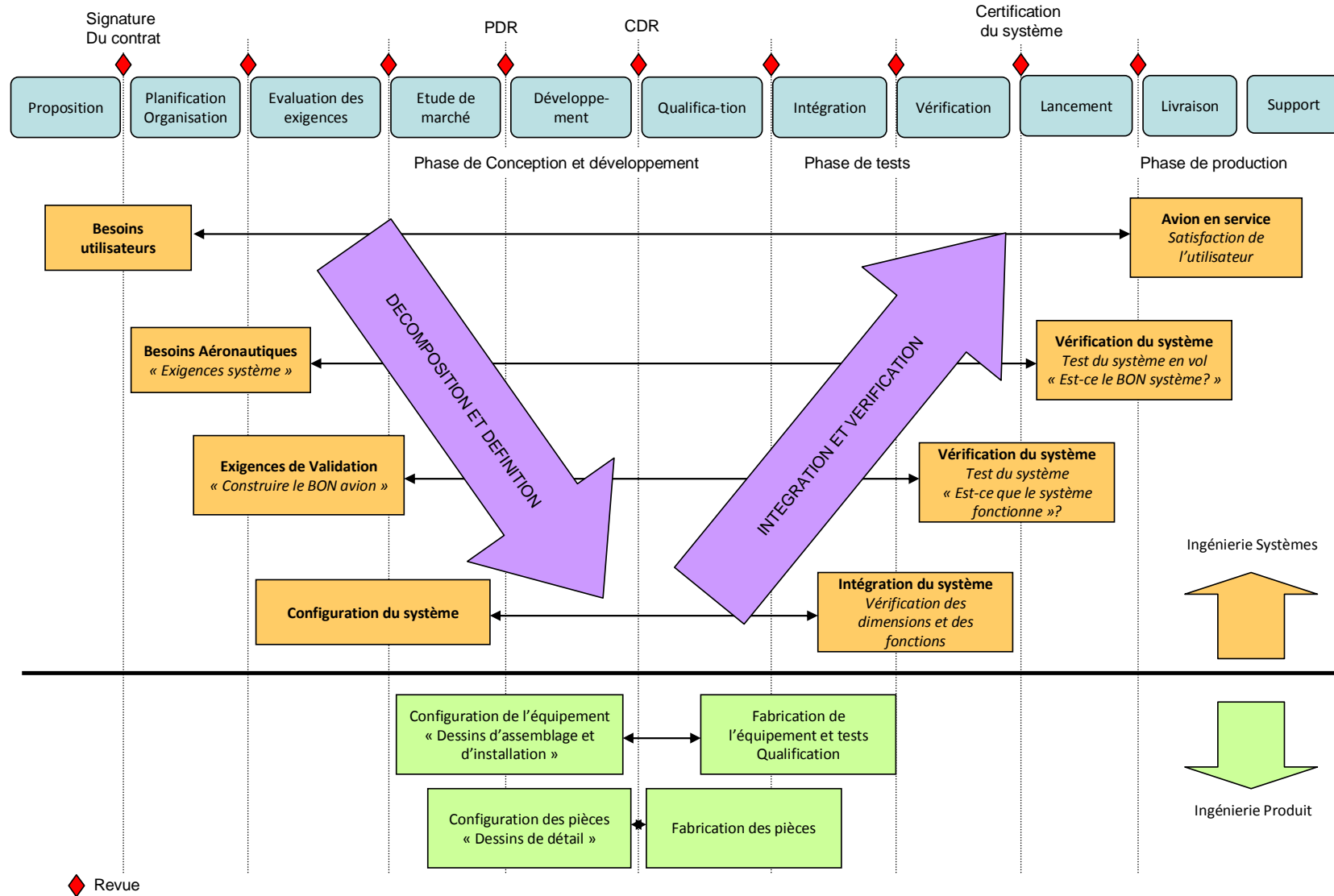


Figure D : Représentation d'un cycle de conception en V appliqué à un équipement aéronautique (d'après et traduit de (MOIR et SEABRIDGE, 2XXX))

D. Domaines particuliers liés à la conception aéronautique

1 Le dossier de fabrication et de contrôle (DFC)

La structure et le contenu du DFC sont décrites dans la recommandation RG Aéro 000 12 (RGAéro 000 12 1999)

iv. Objectifs du DFC

Le DFC constitue le **référentiel de production** définissant les éléments nécessaires à la production et la reproductibilité d'un produit en **minimisant les risques** liés à la production et en assurant la **traçabilité** nécessaire (notamment vis-à-vis des réglementations). Les données de ce référentiel sont contraintes par les exigences de qualité, coût, cadence et délais (cycle de production) et bien sûr le contexte industriel de réalisation.

Le DFC est élaboré dès le début de la conception du produit et est complété au fur et à mesure de la structuration du DD. Le DFC n'est validé qu'après qualification de la définition du produit.

v. Données d'entrée et de sortie du DFC

Le DFC est construit à partir des données du **DD**. Les éléments de sortie du DFC sont notamment l'ensemble des documents décrivant les gammes de production, la planification de la production, les moyens de vérification et de contrôle (figure E). Le contenu du DFC intervient également dans le processus de justification.

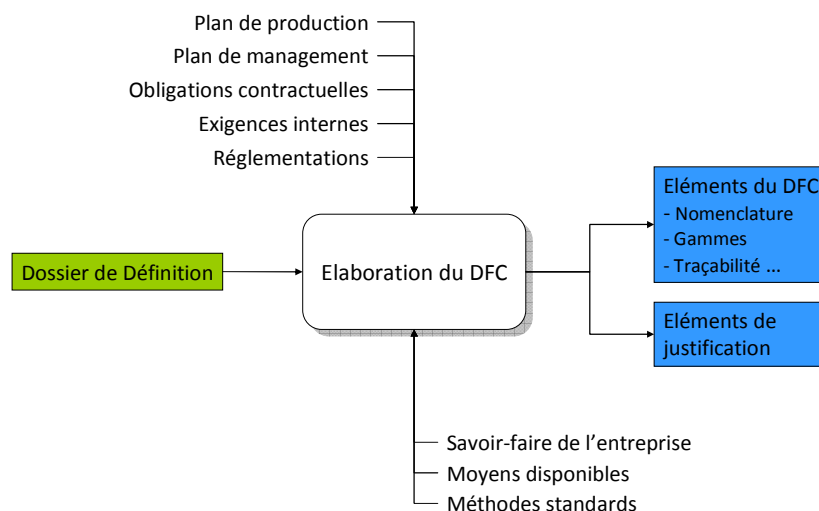


Figure E : Données d'entrée et de sortie du DFC, d'après (RG Aéro 000 12, 1999)

vi. Contenu général du DFC

Le DFC doit faire apparaître six catégories principales d'information :

- le synoptique de fabrication et de contrôle,
- la nomenclature de production,
- les gammes de production
- Les procédures d'acceptation de livraison,
- les fiches d'approvisionnement,
- les supports d'enregistrement de contrôle et de traçabilité.

La table E propose une synthèse des principaux éléments constitutifs du DFC et de leurs contenus génériques.

Table E: Principaux éléments constitutifs du DFC d'après (RG Aéro 000 12, 1999)

Élément principal	Principaux éléments appelés	Description
Synoptique de fabrication et de contrôle		Positionne les approvisionnement, les étapes essentielles de fabrication et contrôle, les étapes de contrôle point-clé (conditionnant la poursuite du processus)
Nomenclatures de production		Liste exhaustive : des constituants (références fabricant ou articles, références normalisées, fiches d'approvisionnement), des documents (instructions de procédés, fiches opératoires...) des outillages, des programmes de pilotage des moyens
Gammes de production		La Gamme décrit le processus de production géré en phases et en temps correspondant aux différents postes de travail
	Fiches opératoires	Procédure technique détaillée des opérations de fabrication et de contrôle à effectuer
	Instructions de procédés	Description des procédés validés à mettre en œuvre dans certaines opérations de fabrication ou de contrôle
	Compétences des opérateurs	Précision des compétences et/ou éventuellement des habilitations ou qualifications requises
	Moyens et outillages	Répertoire des moyens et outillages appelés par la gamme. Les moyens et outillages sont identifiés, mis au point, vérifiés et formellement validés
	Programmes de pilotage des moyens	/
Procédures d'acceptation et de livraison		Procédures d'essais fonctionnels et de contrôle final pour réponse à la spécification d'acceptation contenue dans le DD Procédures de contrôle point clé avant livraison Procédures de conditionnement et de transport
Support d'enregistrement de contrôle et de traçabilité		Ensemble des éléments justificatifs du processus de réalisation et de vérification du produit livré au client
Fiches d'approvisionnement		Explicitation des exigences techniques du besoin pour chaque matière première ou composant à approvisionner, transmise au service achat, au fournisseur et au contrôle de réception.

vii. Evolution du DFC

Le DFC reproduit des données identifiées comme données de configuration du produit (par exemple : caractéristiques dimensionnelles, procédés imposés...) qui sont soumises au processus de maîtrise de la configuration (**voir paragraphe 1.4.2**). [...] La gestion des évolutions du DFC commence à partir d'une référence de ce DFC établie avant le lancement des spécimens de qualification du produit. La figure F présente les principaux types d'évolutions possibles et leurs conséquences sur les DD et DFC.

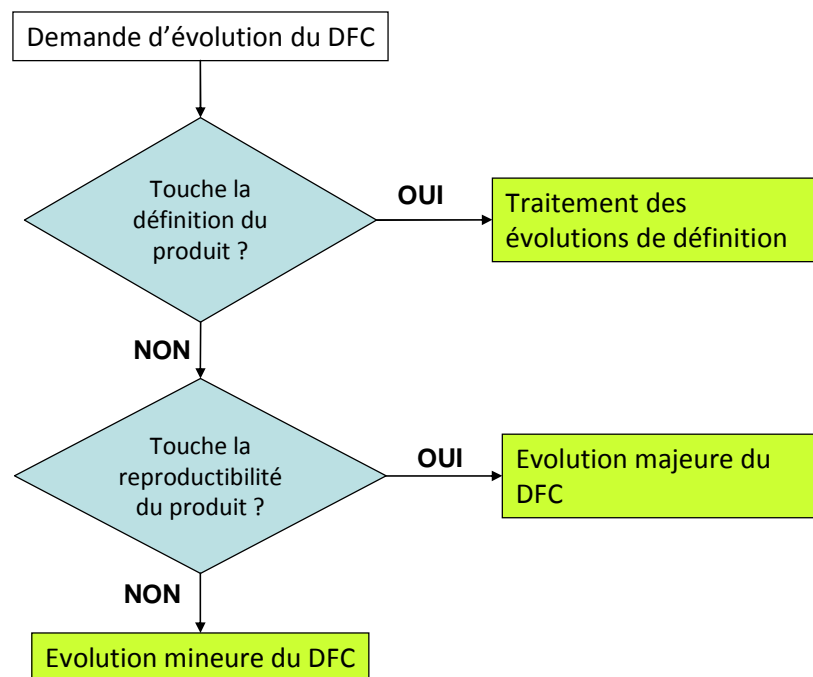


Figure F : Typologie des évolutions du DFC, d'après (RG Aéro 000 12, 1999)

2 La gestion de la configuration

Les principes de gestion de la configuration sont décrits dans la recommandation RG Aéro 000 23 (RG Aéro 000 23 2003)

i. Objectifs généraux de la gestion de la configuration

La gestion de configuration est un **mode de gestion documentaire**, fondé sur la maîtrise des données techniques à partager ou à échanger, en interne ou en externe. *Pour un programme donné, la gestion de la configuration est une activité de management du programme et est un support des processus du cycle de vie du produit.*

Dans le domaine aéronautique, le système documentaire relatif au produit est complexe et fondamental. Aussi, toute évolution technique a un impact sur ce système. La gestion de configuration permet de connaître précisément, à un instant donné, le moindre élément constitutif d'un produit aéronautique : de fait, la plus petite évolution survenant au cours de la vie de produit impactera le système documentaire de l'avion. La gestion de la configuration participe à l'amélioration des produits aéronautiques, grâce au principe de **traçabilité**, et permet de traiter les actions correctives avec discernement.

La gestion de configuration est un processus majeur pour la sécurité des vols. En effet, dans le cas majeur d'un crash, et lorsque la ou les cause(s) matérielle(s) est (sont) identifiée(s), le système documentaire tel qu'il existe permet de déterminer immédiatement, quels sont les avions équipés de(s) système(s) défaillant(s), ce qui permet alors de prendre des mesures préventives (interdiction de vol) jusqu'à ce que l'origine de la défaillance soit éradiquée.

ii. Principes généraux de la gestion de la configuration

a) Champ d'application

Le processus de gestion de la configuration permet d'identifier un certain nombre d'éléments relatifs au produit :

- le produit lui-même,
- les liens avec les articles qui le constituent,
- les liens avec les articles dans lesquels il va s'intégrer,
- les documents qui décrivent ses caractéristiques fonctionnelles et physiques.

Les évolutions techniques, déviations et dérogations doivent également être identifiées.

b) Articles de configuration, données de configuration et configurations de référence

Le processus de gestion de la configuration s'appuie sur une architecture descriptive du produit. Celle-ci est décomposée en sous ensembles constitutifs du produit appelés **articles de configuration**. L'ensemble des informations relatives à leur définition, fabrication, etc. ...constituent les **données de configuration**. Cette architecture évolue tout au long de la vie du programme (depuis la faisabilité jusqu'au retrait de service).

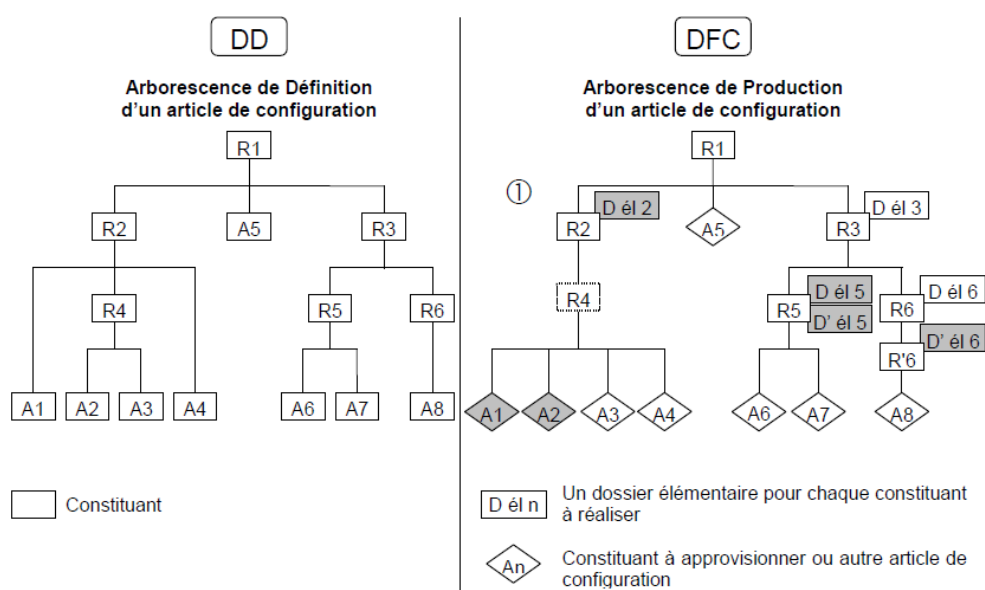


Figure G : Evolution de l'architecture descriptive d'un produit. Comparaison entre l'arborescence de définition et l'arborescence de production d'un article de configuration, in (RG Aéro 000 15, 1999)

La figure G illustre les différentes possibilités de correspondance entre l'arborescence de définition et l'arborescence de production d'un article de configuration.

- Le Dossier élémentaire 2 (D él 2) décrit l'ensemble des tâches nécessaires à la réalisation de R2 en y incluant celles de R4.
- Les dossiers élémentaires D él 5 et D' él 5 offrent une alternative pour la réalisation de R5.
- Le dossier élémentaire D' él 6, créé pour des besoins de production, décrit les tâches pour réaliser un constituant intermédiaire R'6 de R6.
- Les différents constituants à approvisionner ont leurs propres DFC chez le fabricant.

A différentes étapes identifiées du programme, l'état d'évolution de l'architecture produit est figé et constitue une **configuration de référence** (figure H et I). La traçabilité entre ces différentes configurations de référence est assurée, quel que soit le système de gestion de configuration.

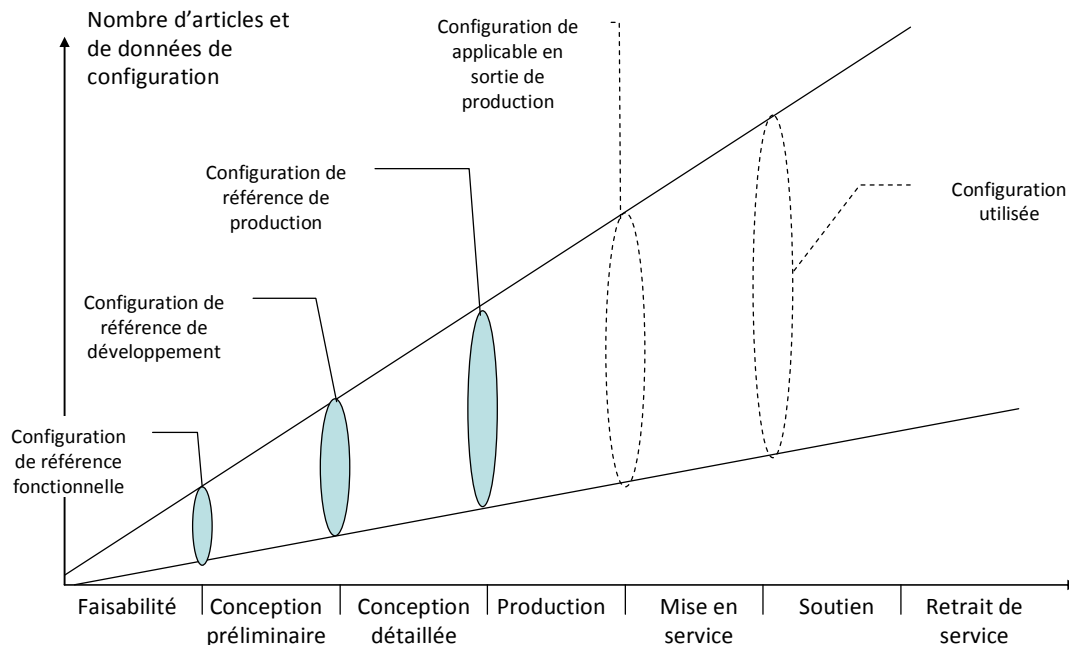


Figure H : Positionnement des configurations de référence par rapport aux étapes d'un programme, d'après (Montenon, 2009)

La configuration de référence est établie chaque fois qu'il est nécessaire de convenir, au cours du cycle de vie du produit, d'une référence qui sert de base pour identifier les configurations ultérieures. Trois configurations de référence sont distinguées :

- la configuration de référence fonctionnelle,
- la configuration de référence de développement,
- La configuration de référence de production.

◆ **La configuration de référence fonctionnelle** est la référence établie en tant que point de départ pour lancer les activités de conception préliminaire. Elle est essentiellement composée de la STB en vigueur à ce stade, voire du CdCF. Cette configuration peut être examinée au cours de la Revue de Conception Système.

◆ **La configuration de référence de développement** est la référence établie en tant que point de départ pour lancer la conception détaillée. Elle est constituée de la STB, d'éléments de définition convenus en réponse à la STB, pouvant être formalisés sous forme d'un DD préliminaire (architecture

physique de l'article, définition des interfaces internes, allocation préliminaire de performance des constituants, données de définition convenues). Cette configuration peut être examinée au cours de la Revue de Définition Préliminaire.

◆ **La configuration de référence de production** est la référence établie en tant que point de départ de l'industrialisation et/ou de la production. Cette configuration est acquise lorsque l'avancement de la conception détaillée est tel que la définition acquise est suffisamment justifiée pour servir de référence pour l'industrialisation et/ ou la production, et que les risques identifiés sont à un niveau compatible avec les engagements à tenir.

Cette configuration est constituée de la STB en vigueur, de tout ou partie du DD nécessaire pour chaque acteur de la production, de l'utilisation et du soutien. Cette configuration doit être traçable par rapport aux configurations antérieures (bilan des évolutions) et fait l'objet d'une revue spécifique.

D'autres configurations remarquables peuvent être déduites de l'une des trois configurations de référence et attachées à des étapes clé de la vie d'un exemplaire :

- **la configuration actualisée** : configuration de référence complétée de toutes les évolutions techniques décidées,
- **la configuration applicable attendue en sortie de production** : configuration de référence actualisée et déviations²⁴ décidées,
- **la configuration réalisée** : configuration de l'exemplaire constatée après réalisation, ie, configuration de référence et des écarts de conformité²⁵, faisant l'objet de dérogations²⁶. Elle comprend les conséquences sur la configuration des faits techniques, anomalies, réparations, potentiels de vie consommés, etc.. ayant affecté le produit avant sa livraison.
- **La configuration utilisée** : configuration tenant compte des conséquences sur la configuration de l'exemplaire des évènements intervenant au cours de sa vie opérationnelle (évolutions techniques, déviations décidées et appliquées, dérogations acceptées pendant cette phase de vie, faits techniques et anomalies telles que la consommation de potentiels ou conséquences des actions de Maintien en Condition Opérationnelle)

²⁴ Déviation : Synonyme de « dérogation (avant production) » (RG Aéro 00023 , 2003)

²⁵ Ecart de conformité : par différence avec une non-conformité, un écart de conformité peut également être un dépassement de l'exigence (RG Aéro 000 23 , 2003)

²⁶ Dérogation : autorisation d'utiliser ou de mettre à disposition un produit non conforme aux exigences spécifiées (RG Aéro 000 23, 2003)

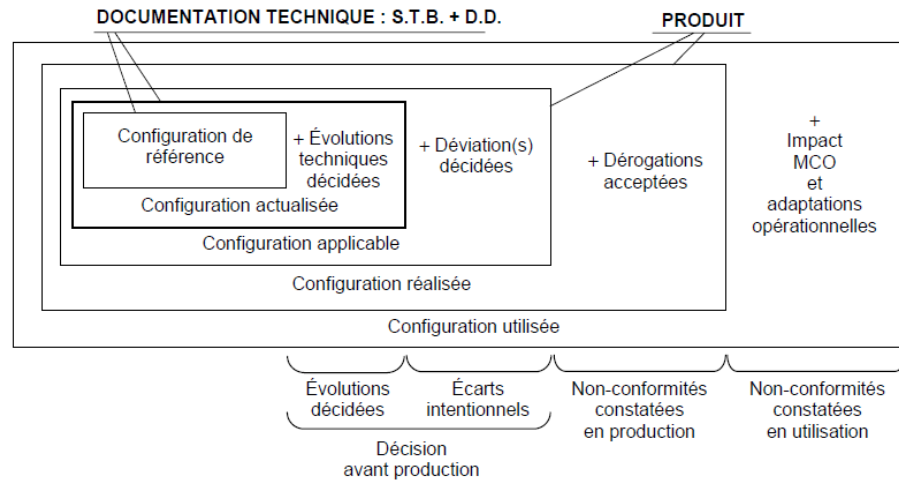


Figure I : Configurations remarquables, in (RG Aéro 000 23, 2003)

c) Traitement d'une évolution technique

Au titre de la gestion de configuration, la STB, le DD et le Document Utilisateur peuvent être **impactés**. Une évolution technique, quelque soit l'état d'avancement du programme (et ce jusqu'à la fin de vie du programme), doit être tracée et référencée. La figure J présente le cheminement de la prise en charge d'une évolution technique et son intégration dans les différents documents de référence.

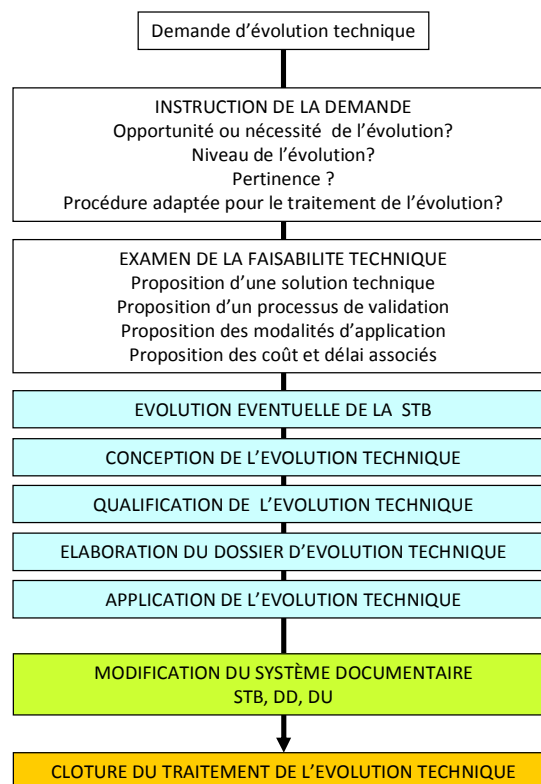


Figure J : Processus de traitement d'une évolution technique et conséquence sur le système documentaire, d'après (RG Aéro 000 23, 2003)

3 Sûreté de fonctionnement (SdF)

Les principes de sûreté de fonctionnement sont décrits dans la recommandation RG Aéro 000 27 (RG Aéro 000 27 1999)

i. Définition et principes

La sûreté de fonctionnement est l'ensemble des aptitudes (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité) d'un produit qui lui permettent de disposer des **performances fonctionnelles spécifiées**, au **moment voulu**, pendant la durée prévue et sans dommage pour lui-même et son environnement.

Les performances de SdF d'un produit sont à considérer **au même titre** que les performances fonctionnelles attendues d'un produit. A cet égard, la durée de vie du produit est une caractéristique utile pour la conception du produit, et est incluse dans chacune des composantes de la sûreté de fonctionnement.

Les activités de SdF constituent avant tout une aide à la conception, en vue d'obtenir un produit « robuste » vis-à-vis des événements indésirables. Elles participent également à la justification de la conception du produit : les résultats des diverses analyses de SdF doivent être intégrés dans le DJD du produit concerné. Ainsi, **les activités de SdF ont un impact sur la conception du produit, son industrialisation et son soutien logistique.**

Les activités de SdF couvrent l'ensemble du cycle de vie du produit concerné, vivent au rythme du déroulement du programme, mais doivent être organisées et disposer de ressources.

ii. Objectifs de SdF

Les objectifs de SdF sont généralement déterminés à partir :

- des besoins de l'utilisateur et de l'environnement d'utilisation prévu pour le système (ou le produit),
- de la connaissance des événements indésirables et de leurs conséquences,
- de l'exploitation du retour d'expérience,
- de la réglementation en vigueur.

Les objectifs de SdF peuvent s'exprimer sous différentes formes :

- **quantitative** : probabilités, MTBF²⁷, durée de vie, MTTR²⁸, taux de couverture des tests, délais de détection des défaillances, etc....
- **qualitative** : règles de conception, barrières de sécurité, documents normatifs ou réglementaire, critères de panne unique, modes dégradés, etc....

Les objectifs de SdF doivent être accompagnés d'informations complémentaires définissant :

- l'objet concerné par les objectifs de SdF (système, équipement ...) en précisant le cas échéant les éléments exclus,
- les conditions d'environnement,
- les phases du cycle de vie du produit considéré,
- si besoin, les formulations mathématiques.

Les objectifs doivent être vérifiables, et à cet effet, les moyens et les hypothèses de vérification (justification) doivent être définis.

iii. Partage des responsabilités de SdF

La SdF concerne les utilisateurs, le client final et les fournisseurs.

◆ **Les utilisateurs** exploitent le système (ex. compagnie aérienne): ils le mettent en œuvre et contribuent à son maintien en conditions opérationnelles. Ils sont notamment responsables de l'acquisition et de la transmission des **données de retour d'expérience** relatives à la SdF au fournisseur de premier niveau.

◆ **Le client final** est responsable (ex. Avionneur) :

de l'expression du besoin technique : définition du profil de vie, des profils de mission, des environnements associés aux situations de profil de vie, des fonctions de service ; des conditions de réussite de mission (conditions normales et conditions dégradées), des exigences quantitatives et qualitatives de SdF,

²⁷ MTBF : Mean Time Between Failure

²⁸ MTTR: Mean Time To Repair

de l'expression des exigences relatives au management de la SdF,
de l'acceptation des Plans de SdF.

◆ **Les fournisseurs** (ex : motoriste, équipementiers) sont en charge des modalités de management de la SdF, de la mise en place des ressources nécessaires, du respect des coûts et délais liés au respect des objectifs établis, et du montage de plans et dossiers.

iv. Construction de la SdF

La SdF est une activité qui se construit tout au long de la vie du programme, et dont la nature et l'importance des tâches varie en fonction du déroulement du programme (table F).

- **Les tâches exécutées en phase de faisabilité et de définition** doivent aboutir à un consensus sur les objectifs de sûreté de fonctionnement spécifiés pour le produit attendu. Elles sont menées en liaison entre le client et le fournisseur et doivent être accomplies dans tout le programme.
- **Les tâches exécutées au cours des phases de développement, production et utilisation** sont déterminées par le fournisseur, celui-ci établissant également le choix des outils et méthodes à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs spécifiés pour le produit à réaliser.
- L'ensemble des tâches de construction de la sûreté de fonctionnement doit être décrites dans le **Plan de Sûreté de Fonctionnement** et dans le **PJD**, pour acceptation par le client.

Table F : Principales tâches à mener pour la construction de la SdF d'après (RG Aéro 000 27, 1999)

Phase du programme	Objectif général de la phase	Principales activités	Données de sortie
Faisabilité	Exploration des différents concepts envisageables répondant à un besoin exprimé dans le CdCF en termes d'objectifs à atteindre (performances, coûts, délais), et en prenant en considération le profil de vie et l'environnement opérationnel du système attendu.	<ul style="list-style-type: none"> • Initialisation de l'analyse fonctionnelle, identification des scénarii critiques, définition des exigences de fonctionnement en mode dégradé. • Définition des événements indésirables et de l'échelle de gravité correspondante • La définition des exigences qualitatives et quantitatives de SdF au niveau du système et de ses fonctions et la définition des critères de conception • La définition de la logique des tâches à effectuer pour satisfaire les exigences de SdF et l'établissement du Plan de SdF • La participation aux évaluations comparatives des concepts et la réalisation des analyses préliminaires afin d'identifier et de comparer les différentes options, au point de vue SdF • La participation aux études relatives au soutien logistique 	Chapitre SdF de la STB et de la Spécification de Management
Définition	choix parmi les concepts retenus à l'issue de la phase de faisabilité de la solution à développer et précision des exigences.	<ul style="list-style-type: none"> • Intégrées aux tâches de conception, avec un degré de détail différent selon les phases: • Répartition des exigences qualitatives et quantitatives de SdF pour la conception du système et l'élaboration des spécifications de niveau inférieurs, • Définition et mise en place du processus de Logique de Traitement des incidents 	Qualification de la définition du produit au regard des objectifs de SdF
Développement	Etude en détail de la solution retenue à l'issue de la phase de définition, afin d'aboutir à une définition qualifiée et productible en série	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre des analyses, essais, démarches de croissance et autres tâches prévues au plan de SdF • Evaluation des niveaux de SdF prévisionnels et constatés, • Participation aux autres activités du programme telles que la maîtrise des coûts; définition du soutien logistique, etc.... 	
Production	Réalisation des produits conformément à leur qualification qualifiée	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien des performances de SdF (Logique de traitement des incidents, gestion des points critiques, • Maîtrise au regard de la SdF ds évolutions des produits, des moyens de production, des processus • Mise en œuvre de tâches spécifiques (déverminage, essais prévus ou nécessaires) 	Produits répondants aux objectifs de SdF
Utilisation et retrait de service	Mise en service, utilisation et soutien des produits acquis dans le cadre du programme, ainsi que des moyens logistiques nécessaires à l'exécution des missions opérationnelles	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des performances de SdF • Recueil et exploitation des faits techniques, • Participation aux processus d'évolution des produits et de leurs éléments de soutien 	Capitalisation de l'expérience acquise tout au long du déroulement du programme

v. Logique de déroulement de la SdF

La table 19 propose une synthèse des principales tâches à mener par les différents acteurs identifiés dans le cadre du management et la construction de la SdF.

vi. Croissance de la SdF

La démarche de croissance de la SdF a pour vocation de s'assurer de façon itérative, essentiellement pendant le développement du produit, que les **objectifs spécifiés pour les différentes caractéristiques de SdF pourront être atteints dans les délais voulus**. Les activités concourant à la croissance de la SdF s'appuient principalement sur l'exploitation pertinente des incidents survenant tout au long du cycle de vie du produit, et doivent permettre :

- **de dépister** les faiblesses du produit (conception, production, ergonomie, maintenance...)
- **de rechercher et de vérifier** les marges de fonctionnement,
- **de valider** l'efficacité des actions correctives,
- **de vérifier** les tolérances aux fautes,
- **de justifier l'atteinte** de la maturité des caractéristiques de SdF.

4 Bilan

Un programme aéronautique est caractérisé par une durée de vie longue, depuis l'émergence du concept jusqu'au retrait de service. Quelle que soit la nature du produit, depuis l'équipement jusqu'à l'aéronef complet, le phasage des programmes est identique, permettant d'assurer deux caractéristiques fondamentales de la conception aéronautique : la traçabilité et la sûreté de fonctionnement.

La conception aéronautique repose sur un processus complexe, découpé par de nombreux jalons et structuré par une systématisation des justifications de toutes les décisions prises. Une vérification continue de l'adéquation de la solution choisie aux exigences exprimées est réalisée, depuis la proposition du concept jusqu'à la réalisation du plan détaillé. A chaque phase de la conception sont appelés des documents particuliers dont le formalisme est parfaitement encadré et respecté, permettant ainsi une communication des données entre fournisseur et client.

La traçabilité de toutes les évolutions, qu'elles touchent à la définition du produit ou aux activités de production, soutien etc. ... est assurée grâce au processus de gestion de la configuration,

permettant de connaître instantanément l'architecture complète d'un système et la nature de ses constituants.

Les exigences de sûreté de fonctionnement font partie intégrante des exigences initiales au lancement d'un programme et évoluent au cours de ce dernier, se précisant tout au long du cycle de vie. La conception d'un programme aéronautique doit prendre en compte la SdF au même titre que toute exigence technique stipulée dans la STB.

Bien que complexe, la structuration du processus de conception aéronautique permet de déterminer les étapes à partir desquelles les données sur le produit sont suffisantes pour obtenir une image fiable de sa constitution, notamment en termes de matériaux et autres revêtements. Ainsi, alors que la phase de conception préliminaire ne sera pas une source suffisante d'informations quant à la composition du produit, la phase de conception détaillée donnera, au fur et à mesure des itérations, une image de plus en plus précise du produit aéronautique, accompagnées de données exploitables pour l'application de divers modes d'évaluation des qualités et performances du produit.

BIBLIOGRAPHIE

A.L.B. (2010). Comment Safran adapte sa gestion des FDS aux exigences de REACH. Techniques de l'Ingénieur.

AFNOR (2004). NF EN ISO 14001 Systèmes de management environnemental Exigences et lignes directrices pour son utilisation, AFNOR: 25.

AFNOR (2010). Produits mécaniques - Méthodologie d'éco-conception.

afssaps (2009). Obsolescence des dispositifs médicaux, Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé: 13.

Afsset (2006). Identification d'une liste de substances toxiques pour la reproduction et le développement et Proposition d'une méthode de hiérarchisation pour l'analyse des Valeurs Toxicologiques de Référence. Maison-Alfort, Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail, Groupe d'Experts "VTR reprotoxiques": 72.

AIRBUS SAS (2007). SITE AND PRODUCT ORIENTED ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEM SPOEMS General presentation. Toulouse: 16.

AIRBUS SAS, SAFRAN, et al. (2008). REACH guide de lecture. Version 2: 77.

Antoine, N. E. (2004). Aircraft optimization for minimal environmental impact. Aircraft Aerodynamics and Design Group. Palo Alto, Stanford University. **PhD**: 109.

ASD (2008). REACH Global aviation industry opinion on what constitutes a substance, preparation and article (with and without release), Aerospace -Defence Trade Association of Europe: 38.

Assmuth, A., M. Hildén, et al. (2010). "Beyond REACH: Roadblocks and shortcuts en route to integrated risk assessment and management of chemicals." Science of the Total Environment **under press**.

Bare, J. C., G. A. Norris, et al. (2003). "TRACI The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts." Journal of Industrial Ecology **6**(3-4): 49-78.

Benichou, M. (2007). Un premier siècle d'aviation française, Editions Larivière.

Bierwagen, G., R. Brown, et al. (2010). "Active metal-based corrosion protective coating systems for aircraft requiring no-chromate pretreatment." Progress in Organic Coatings **68**(1-2): 48-61.

Black, D. A., J. A. Black, et al. (2007). "Aircraft noise exposure and resident's stress and hypertension: A public health perspective for airport environmental management." Journal of Air Transport Management **13**(5): 264-276.

Blackwell, B. F., T. L. DeVault, et al. (2009). "Wildlife collisions with aircraft: A missing component of land-use planning for airports." Landscape and Urban Planning **93**(1): 1-9.

BNAE (2010). TR9535 Substance Declaration Form, BNAE.

Boize, M., A. L. Borie, et al. (2008). "Pertinence de l'analyse de cycle de vie (ACV) pour l'évaluation des impacts sanitaires: comparaison avec l'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS)." Environnement, Risques et Santé **7**(4): 265-277.

Bounias, M. (1999). Traité de toxicologie générale, Springer-Verlag.

Brasseur, G. P., R. A. Cox, et al. (1998). "European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions." Atmospheric Environment **32**(13): 2329-2418.

Cerdan, C., C. Gazulla, et al. (2009). "Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case-study." Journal of Cleaner Production **17**: 1638-1643.

Chirila, E. and C. Draghici (2009). Risk assessment of mixtures of chemical pollutants in the environment. Exposure and Risk Assessment of Chemical Pollution — Contemporary Methodology. L.I. Simeonova and M.A. Hassanien, Springer: 51-67.

Christensen, F. and S. Olsen (2004). "The potential role of life cycle assessment in regulation of chemicals in the European union." The International Journal of Life Cycle Assessment **9**(5): 327-332.

Commission des Communautés Européennes (2001). Livre Blanc - Stratégie pour la future politique dans le domaine des substances chimiques. Bruxelles: 37.

Conseil Européen (1967). Directive n° 67/548/CEE du 27/06/67 concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses, Journal Officiel de la Communauté Européenne. **67/548/CEE**.

Devillers, J., J. Devillers, et al. (2009). Use of Multicriteria Analysis for Selecting Ecotoxicity Tests. Ecotoxicology Modeling, Springer US. **2**: 117-143.

Duboudin, C. (2006). Evaluation quantitative des risques: principes, intérêts et limites, Afsset: 6.

Duijne, F. H. v., D. v. Aken, et al. (2008). "Considerations in developing complete and quantified methods for risk assessment." Safety Science **46**: 245-254.

European Chemicals Agency (2008). Guidance on requirements for substances in articles: 118.

Fairhurst, S. (2003). "Hazard and risk assessment of industrial chemicals in the occupational context in europe: some current issues." Food and Chemical Toxicology **41**(11): 1453-1462.

Finnveden, G., M. Z. Hauschild, et al. (2009). "Recent developments in Life Cycle Assessment." Journal of Environmental Management **91**(1): 1-21.

Fryer, M., C. D. Collins, et al. (2006). "Human exposure modelling for chemical risk assessment: a review of current approaches and research policy implications." Environmental Science and Policy **9**: 261-274.

Führ, M. and K. Bizer (2007). "REACH as a paradigm shift in chemical policy - responsive regulation and behavioural models." Journal of Cleaner Production **15**: 327-334.

Gade, A. L., S. Øvrebø, et al. (2008). "Testing REACH draft technical guidance notes for conducting chemical safety assessments--The experience of a downstream user of a preparation." Regulatory Toxicology and Pharmacology **51**(2): 168-180.

Gebel, T., E. Lechtenberg-Auffarth, et al. (2009). "About hazard and risk assessment: Regulatory approaches in assessing safety in the European Union chemicals legislation." Reproductive Toxicology **28**: 188-195.

GIFAS (2005). Guide de management des obsolescences de composants électroniques, électriques et électromécaniques. Paris, Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales, Commission Technique GEAD: 21.

GIFAS (2008). La profession s'engage Les recommandations de la Profession Les outils. Journées d'informations REACH. Toulouse.

Goedkoop, M. and R. Spriensma (2001). The Eco-Indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Assessment Methodology report. Amersfoort: 144.

Gouzy, A., A. C. Le Gall, et al. (2009). SIRIS-Pesticides: Validation of a tool to aid decision making for monitoring pesticides in freshwater. ORP 2009. Paris.

Granta Design. (2010). "Environment Energy and sustainability Symposium and exhibition." 2010, from http://www.grantadesign.com/news/event_training/e2s2-abstracts/html.

Granta Design. (2010). "Restricted Substance Data Module." 2010, from <http://www.grantadesign.com/products/data/rsdb.htm>.

Gravier, M. J. and S. M. Swartz (2009). "The dark side of innovation: Exploring obsolescence and supply chain evolution for sustainment-dominated systems." The Journal of High Technology Management Research **20**(2): 87-102.

Guerbet, M. and J. M. Jouany (2002). "Value of the SIRIS method for the classification of a series of 90 chemicals according to risk for the aquatic environment." Environmental Impact Assessment Review **22**: 377-391.

Guérit, I., G. Bocquené, et al. (2008). "Environmental risk assessment: a critical approach of the European TGD in an in situ application." Ecotoxicology and Environmental Safety **71**(1): 291-300.

Harscoet, E. (2007). Développement d'une comptabilité environnementale orientée vers la création de valeur: l'application à un investissement de prévention des pollutions. Génie Industriel. Chambéry, Institut Conception, Mécanique et Environnement, ENSAM Chambéry. **Thèse de Doctorat**: 373.

Hauschild, M., L. Alting, et al. (2003). Life cycle engineering - from methodology to culture. Design and manufacture for sustainable development.

Hollnagel, E. (2008). "Risk + barriers = safety?" Safety Science **46**(2): 221-229.

Holloway, L. (1998). "Material selection for optimal environmental impact in mechanical design." Materials & Design **19**: 133-143.

ICAO. (2010). "Environment (ENV) Branch CAEP." Retrieved 2010, from <http://www.icao.int/icao/en/env/caep.html>.

IGHR (2004). Guidelines for good exposure assessment practice for human health effects of chemicals. Leicester, Institute for Environment and Health, Interdepartmental Group on Health Risks from Chemicals, : 81.

IHCP (2003). Technical Guidance Document on Risk Assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substance Commission Regulation(EC) No1488/94 on Risk Assessment for existing substances Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market, Institute for Health and Consumer Protection, European Chemical Bureau.

IHCP (2009). Guidance to regulation (EC) No 11272/2008 on classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures, DG Joint Research Centre European Commission: 525.

INRS (2009). "Le nouveau système de classification et d'étiquetage des produits chimiques." Documents pour le Médecin du Travail(118): 181-198.

ISO (2006). ISO 14040:2006 Management Environnemental Analyse du Cycle de Vie Principes et cadre. **23**.

Jolliet, O., M. Margni, et al. (2003). "IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology." The International Journal of Life Cycle Assessment **8**(6): 324-330.

Jolliet, O., M. Saadé, et al. (2005). Analyse du cycle de vie Comprendre et réaliser un écobilan. Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Journal officiel des Communautés Européennes (1998). DIRECTIVE 98/24/CE DU CONSEIL du 7 avril 1998 concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail (quatorzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE): 13.

Karana, E., P. Hekkert, et al. (2008). "Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers." Materials & Design **29**(6): 1081-1089.

Le Pochat, S., G. Bertoluci, et al. (2007). "Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs." Journal of Cleaner Production **15**: 671-680.

Lee, D. S., D. W. Fahey, et al. (2009). "Aviation and global climate change in the 21st century." Atmospheric Environment **43**(22-23): 3520-3537.

Lee, J. J. (2010). "Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems?" Energy Conversion and Management **51**(1): 189-196.

Leeuwen, C. J. v. (2007). General Introduction. Risk assessment of Chemicals: An introduction. C. J. v. Leeuwen and T.G.Vermeire, Springer: 1-36.

Leeuwen, C. J. V., B. G. Hansen, et al. (2007). The Management of Industrial Chemicals in the Eu. Risk Assessment of Chemicals: 511-551.

Leeuwen, C. J. v., B. J. Hansen, et al. (2007). The management of industrial chemicals in the EU. Risk Assessment of Chemicals: An Introduction. C. J. v. Leeuwen and T. G. Vermeire, Springer: 511-551.

Lemagnen, M., F. Mathieux, et al. (2009). Managing chemical risk during design in aeronautics: from technical product data to exposure assessment. Ecodesign 2009. Sapporo.

Ljungberg, L. Y. (2007). "Materials selection and design for development of sustainable products." Materials & Design **28**: 466-479.

Lobreau, L. F. (2007). Intégration de l'environnement en phase de conception / application aux équipements électriques et électroniques. Matériaux Technologie Economie. Troyes, Université de Technologie de Troyes. **Projet de Fin d'Etudes Ingénieur**: 39.

Løkke, S. (2006). "The Precautionary Principle and Chemicals Regulation: Past Achievements and Future Possibilities." Environmental Science and Pollution Research **13**(5): 342-349.

Lyonnet, P. and B. Bouit (1998). Contraintes de maintenance. Conception de produits mécaniques. M. Tollenaere. Paris, Hermes: 575.

Marcellan, E. (2006). Intégration de la santé , de la Sécurité et de l'Environnement en conception: un outil au service des concepteurs et des auditeurs. Paris, Safran - ISIGE: 10.

Marsh, N. (2007). The impact of REACH on the aerospace sector - a DU's perspective & response.

Meent, D. V. D. and J. H. M. D. Bruijn (2007). Environmental Exposure Assessment. Risk Assessment of Chemicals: 159-193.

Michot, Y. (2004). Rapport sur l'industrie aéronautique et spatiale française, . Paris, Rapport pour le Premier Ministre M. Jean-Pierre RAFFARIN: 53.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (2005). Décret no 2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements, Journal Officiel de la République Française: 9.

Mistry, S., H. Smith, et al. (2009). Commercial Aircraft Design for Reduced Noise and Environmental Impact. Variational Analysis and Aerospace Engineering: 291-312.

Mollet, Q. (2007). Eco-conception: INTégration de l'Environnement en phase de Conception. Génie des Systèmes Mécaniques. Troyes, Université de Technologie de Troyes. **Stage ingénieur 2ème année**: 54.

Morenton, P. (2009). Fondements, concepts et enjeux d'une démarche de Product LifeCycle Management. (Support de Formation), Ecole Centrale de Paris: 165.

Olsen, S. I., F. M. Christensen, et al. (2001). "Life cycle impact assessment and risk assessment of chemicals - a methodological comparison." Environmental Impact Assessment Review **21**: 385-404.

Parlement Européen et Conseil Européen (2006). RÈGLEMENT (CE) N°1907/2006 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n°793/93 du Conseil et le règlement (CE) n°1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission
Journal officiel de l'Union européenne: 849.

Petry, T., R. Knowles, et al. (2006). "An analysis of the proposed REACH regulation." Regulatory Toxicology and Pharmacology **44**: 24-32.

Platcheck, E. R., L. Schaeffer, et al. (2008). "Methodology of ecodesign for the development of more sustainable electro-electronic equipments." Journal of Cleaner Production **16**: 75-86.

Porter, S. and J. Wettig (1999). "Policy issues on the control of major accident hazards and the new Seveso II directive." Journal of hazardous materials **65**: 1-14.

Pratt, I. S. (2002). "Global harmonisation of classification and labelling of hazardous chemicals." Toxicology Letters **128**(1-3): 5-15.

Price, M., S. Raghunathan, et al. (2006). "An integrated systems engineering approach to aircraft design." Progress in Aerospace Sciences **42**: 331-376.

Ramade, F. (1992). Précis d'écotoxicologie. Paris, Masson.

Rentsch, R. (2008). EU Directives and their impact on the Aerospace Industry. DSPO Conference.

REYES, T. (2007). L'éco-conception dans les PME: les mécanismes du cheval de Troie méthodologique et du choix de trajectoires comme vecteurs de l'intégration de l'environnement en conception. Génie Industriel. Toulon, Université du Sud Toulon-Var. **PhD**: 232.

RG Aéro 000 08 (2000). Expression du Besoin Guide pour l'élaboration de la spécification technique du besoin, Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. **RG.Aéro 000 08**: 12.

RG Aéro 000 14 (2003). Définition d'un produit Guide pour l'élaboration du dossier de définition, Bureau National de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. **RG. Aéro 000 14**: 14.

RG Aéro 000 15 (2000). Justification de la définition Guide pour l'élaboration du dossier de justification de la définition, Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. **RG.Aéro 000 15**: 10.

RG Aéro 000 23 (2003). Management de programme Guide pour la mise en oeuvre des principes de la gestion de configuration, Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. **RG.Aéro 000 23**: 36.

RG Aéro 000 27 (1999). Management de programme Guide pour la sûreté de fonctionnement, Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. **RG. Aéro 000 27**: 20.

RG Aéro 000 41 (2002). Management de Programme Recommandations pour la mise en oeuvre de la logique de déroulement, Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. **RG.Aéro 000 41**: 56.

RGAéro 000 12 (1999). Réalisation d'un produit Guide pour l'élaboration du dossier de fabrication et de contrôle, Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. **RG.Aéro 000 12**: 20.

Rice, G., M. MacDonell, et al. (2008). "An approach for assessing human exposure to chemical mixtures in the environment." Toxicology and Applied Pharmacology **233**(1): 126-136.

Risk Assessment and Toxicology Steering Committee (1999). Risk Assessment Approaches Used by UK Government for Evaluating Human Health Effects of Chemicals. Leicester, MRC Institute for Environment and Health.

Ritzén, S. and C. Beskow (2001). "Actions for integrating environmental aspects into product development." Journal of Sustainable Product Design **1**(91-102).

Rogers, M. D. (2003). "Risk analysis under uncertainty, the Precautionary Principle, and the new EU chemicals strategy." Regulatory Toxicology and Pharmacology **37**(3): 370-381.

Rolt, A. and N. Baker (2009). Intercooled Turbofan Engine Design and Technology Research in the EU Framework 6 NEWAC Programme. ISABE.

Schmitt, D. (2009). Different levels of Optimization in Aircraft Design. Variational Analysis and Aerospace Engineering: 447-459.

Service National d'Assistance Réglementaire sur REACH / BERPC. (2009). "Les substances préoccupantes (SVHC): vue d'ensemble." Retrieved 24/07/2009, 2009.

Signoles, J. (2005). La démarche SSE en conception au sein du groupe Safran. Mise en place d'un outil pour l'étape "Fabrication - Mise en oeuvre des procédés". Institut Supérieur d'Ingénierie et de Gestion de l'Environnement. **Thèse professionnelle**: 118.

Simmonds, C. (2006). European Lead-Free Soldering NETWORK. SEMICON. Munich.

SME Environnement (2007). METHODE D'ELABORATION DE LA LISTE DE SUBSTANCES BT GIFAS Commission Environnement et Développement Durable: 44.

Soutis, C. (2005). "Fibre reinforced composites in aircraft construction." Progress in Aerospace Sciences **41**(2): 143-151.

STAC. (2010). "Guide pour l'évaluation et le suivi de la qualité de l'air aéroport et dans l'environnement d'un aéroport." Retrieved 29/07/2010, from http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/guide_air.

Szodruch, J. (2001). "Aircraft Design and Development." Air & Space Europe **3**(3/4).

Task Force on REACH (2008). Automotive industry guideline on REACH version 2: 69.

Traas, T. P. and C. J. V. Leeuwen (2007). Ecotoxicological Effects. Risk Assessment of Chemicals: 281-356.

Upham, P., C. Thomas, et al. (2003). "Environmental capacity and airport operations: current issues and future prospects." Journal of Air Transport Management **9**(3): 145-151.

Valerdi, R. and R. J. Kohl (2004). An Approach to Technology Risk Management. Engineering Systems Division Symposium MIT, Cambridge, MA.

Vincent, R. and F. Bonthoux (2000). "Evaluation du risque chimique Hiérarchisation des "risques potentiels"." Cahier de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail **178**: 29-34.

Vincent, R., F. Bonthoux, et al. (2005). "Méthodologie d'évaluation simplifiées du risque chimique: un outil d'aide à la décision." INRS - Hygiène et sécurité du Travail - Cahier de notes documentaires **200**: 39-62.

Volvo (2010). Chemical substances which must not be present in processes or products within the Volvo Group. **STD 100-0002**: 13.

Wardle, D. A. (2003). "Global sale of green air travel supported using biodiesel." Renewable and Sustainable Energy Reviews **7**(1): 1-64.

Wilfert, G., S. Joerg, et al. (2007). New Environmental Friendly Aero Engine Core Concepts. ISABE.

Winder, C., R. Azzi, et al. (2005). "The development of the globally harmonized system (GHS) of classification and labelling of hazardous chemicals." Journal of Hazardous Materials **125**(1-3): 29-44.

Wright, E. I., S. Rahimifard, et al. (2009). "Impacts of environmental product legislation on solid oxide fuel cells." Journal of Power Sources **190**(2): 362-371.

Zhang, A., S. V. Gudmundsson, et al. (2010). "Air transport, global warming and the environment." Transportation Research Part D: Transport and Environment **15**(1): 1-4.

Zhou, C. C., G. F. Yin, et al. (2009). "Multi-objective optimization of material selection for sustainable products: Artificial neural networks and genetic algorithm approach." Materials & Design **30**: 1209-1215.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE 6	
LISTE DES ACRONYMES	11
LISTE DES FIGURES.....	14
LISTE DES TABLEAUX.....	19
INTRODUCTION GENERALE	21
PARTIE I : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL, SOCIETAL ET INDUSTRIEL	26
INTRODUCTION	27
CHAPITRE 1 : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL: SUBSTANCES CHIMIQUES ET RISQUE CHIMIQUE	29
1.1. <i>La toxicologie et l'écotoxicologie, domaines d'étude de l'impact d'une substance chimique sur l'homme et l'environnement</i>	<i>29</i>
1.2. <i>La notion de risque chimique</i>	<i>30</i>
1.2.1. Le risque chimique et ses liens avec les domaines de la toxicologie et de l'écotoxicologie	30
1.2.2. Les composantes majeures du risque chimique	31
1.2.2.1. Le danger	31
1.2.2.2. L'exposition.....	31
1.2.2.2.1 Définition	31
1.2.2.2.2 La diversité des modèles d'exposition	32
1.2.3. Bilan	34
CHAPITRE 2 : CONTEXTE SOCIETAL : LA REGLEMENTATION ENVIRONNEMENTALE ET LE RISQUE CHIMIQUE.	35
2.1. <i>Principaux périmètres d'application de la réglementation portant sur le risque chimique.....</i>	<i>35</i>
2.1.1. La réglementation du risque chimique : histoire, évolution et conséquences	35
2.1.1.1. La prise en charge des impacts liés aux substances chimiques par la réglementation : de l'évaluation du danger à l'évaluation du risque chimique	35
2.1.1.2. La gestion (management) du risque chimique.....	37
2.1.1.2.1 Etapes générales.....	37
2.1.1.2.2 La gestion des risques et le principe de précaution	39
2.2. <i>Réglementations portant sur le risque chimique, applicables à l'industrie manufacturière et aux produits manufacturés.....</i>	<i>40</i>
2.2.1. Le risque chimique et les activités manufacturières industrielles	40
2.2.1.1. Le risque chimique et l'environnement	40
2.2.1.2. Le risque chimique et la protection des travailleurs.....	41
2.2.2. Le risque chimique et les produits manufacturés	42
2.2.2.1. Maîtrise du risque chimique lié au choix des matières premières.....	43
2.2.2.2. Maîtrise du risque chimique lors de la fin de vie des produits manufacturés	43

2.2.2.3.	Maîtrise du risque chimique pour les autres phases du cycle de vie	43
2.3.	<i>Un nouveau paradigme réglementaire : le règlement européen REACH</i>	44
2.3.1.	Un nouveau règlement pour combler les lacunes de l'encadrement du risque chimique	44
2.3.1.1.	Généralités.....	44
2.3.1.2.	Les principaux changements apportés par REACH à la réglementation européenne	45
2.3.1.2.1	Le passage d'une approche « danger » à une approche « risque »	45
2.3.1.2.2	Le principe de précaution (PP).....	46
2.3.1.2.3	Le renversement de la charge de la preuve	46
2.3.2.	Principaux mécanismes de mise en œuvre du règlement REACH	47
2.3.2.1.	L'enregistrement (Registration).....	48
2.3.2.2.	L'évaluation (Evaluation)	48
2.3.2.3.	L'autorisation (Authorisation).....	49
2.3.2.4.	La restriction (Restriction)	50
2.3.2.5.	La transmission de l'information au sein de la supply-chain	50
2.3.2.6.	Vue générale de la structure du règlement	51
CHAPITRE 3 : CONTEXTE INDUSTRIEL GENERAL : PRINCIPALES INTERPRETATIONS DU REGLEMENT REACH		
POUR L'INDUSTRIE MANUFACTURIERE	52	
3.1.	<i>Les principaux impacts relevés par les industriels.....</i>	52
3.2.	<i>Les conséquences du règlement REACH sur la gestion des substances dangereuses</i>	
<i>présentes dans les produits manufacturés</i>	53	
3.2.1.	Obsolescence	53
3.2.1.1.	Définition	53
3.2.1.2.	Illustration : la gestion de l'obsolescence des composés au plomb dans les domaines de	
l'aéronautique et de la défense	54	
3.2.1.2.1	Un parallèle entre la directive RoHS et le règlement REACH	54
3.2.1.2.2	L'obsolescence des composés électroniques : conséquences pour les industries	
aéronautiques et de défense	55	
3.2.1.2.3	Mise en œuvre de plans de management de l'obsolescence des composés au plomb....	56
3.2.1.3.	Bilan	57
3.2.2.	Traçabilité des substances	58
3.2.2.1.	Exigences relatives au contenu en substances d'un article	58
3.2.2.1.1	Exigences incluses dans le règlement.....	58
3.2.2.1.2	Guide d'interprétation des exigences relatives aux substances présentes dans les articles	
édité par l'Agence Européenne.....	61	
3.2.2.2.	Extension du processus industriel de traçabilité à l'identification de substance chimiques	
62		
3.2.2.3.	Pistes de réponses à la problématique de traçabilité des substances dans l'industrie	64
3.2.2.4.	Bilan	64
3.3.	<i>Anticiper la gestion des substances dès la conception des produits manufacturés....</i>	65

CHAPITRE 4 : CONTEXTE DE L'ETUDE : L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE	66
4.1. <i>Caractéristiques générales de l'industrie et du produit aéronautique</i>	66
4.1.1. L'industrie aéronautique.....	66
4.1.2. Le produit aéronautique	69
4.2. <i>Impacts environnementaux, exigences environnementales et réponses du secteur ..</i>	69
4.2.1. Principaux aspects environnementaux du produit aéronautique.....	69
4.2.2. Typologie des exigences environnementales	71
4.2.2.1. Certifications et réglementations	71
4.2.2.1.1 Certifications.....	71
4.2.2.1.2 Réglementations.....	72
4.2.2.2. Les parties intéressées.....	72
4.2.3. Des réponses technologiques	74
4.2.3.1. Conception de nouvelles architectures de produit.....	74
4.2.3.2. Amélioration des procédés de fabrication et choix des matériaux.....	74
4.2.4. Des réponses structurelles.....	75
4.3. <i>Positionnement de l'industrie aéronautique par rapport au règlement REACH et</i>	
<i>réponses mises en œuvre</i>	76
4.3.1. Des actions axées sur le lobbying et l'information de la supply-chain.....	76
4.4. <i>Exemple de réponses mises en œuvre par le secteur</i>	77
4.4.1. Listes NRJ/BTR/DSL/PDSL.....	77
4.4.1.1. Principe des listes de substances utilisées dans le secteur aéronautique	77
4.4.1.2. Des substances aux matériaux et procédés	79
4.4.1.3. Création d'une base de données	79
4.4.1.4. Material Declaration Form.....	80
4.4.1. Utilisation de bases de données matériaux	80
CONCLUSION ET QUESTION DE RECHERCHE	82
PARTIE II : PROPOSITION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE	85
INTRODUCTION	86
CHAPITRE 5 : ROLE DE L'EVALUATION DU RISQUE DANS LES ACTIVITES INDUSTRIELLES.....	87
5.1. <i>De la connaissance des risques liés à une activité à la mise en place de mesures de</i>	
<i>sûreté / sécurité</i>	87
5.2. <i>Les étapes de l'évaluation du risque et du management du risque</i>	87
5.3. <i>L'acceptabilité du risque</i>	89
5.4. <i>Les moyens de diminution du risque</i>	90
CHAPITRE 6 : ETAT DE L'ART DES PRINCIPALES METHODES D'EVALUATION ET DE GESTION DES AGENTS	
CHIMIQUES	93

6.1.	<i>Différents niveaux d'approches</i>	93
6.2.	<i>La gestion des agents chimiques par une approche danger</i>	95
6.2.1.	L'identification des dangers	95
6.2.2.	Le management des agents chimiques par une approche danger.....	96
6.2.2.1.	Les systèmes de labellisation et Fiches de Données de Sécurité	96
6.2.2.2.	Les listes.....	98
6.3.	<i>La gestion des agents chimiques par une approche risque</i>	100
6.3.1.	Méthodes d'évaluation simplifiée du risque chimique	100
6.3.1.1.	Principe	100
6.3.1.2.	Méthode SIRIS	100
6.3.1.3.	Méthode d'évaluation simplifiée du risque chimique	104
6.3.1.3.1	Evaluation du danger et de l'exposition potentielle	105
6.3.1.3.2	Détermination du risque potentiel et hiérarchisation des scores.....	108
6.3.2.	Autres méthodes d'évaluation du risque chimique	110
6.3.2.1.	Principe	110
6.3.2.2.	Technical Guidance Document on Risk Assessment (TGD).....	110
6.3.3.	Le management des agents chimiques par une approche risque.....	112
6.3.3.1.	Sécurité des travailleurs.....	112
6.3.3.1.1	Lignes directrices	112
6.3.3.1.2	Outils.....	112
6.3.3.2.	Mise sur le marché de substances	114
6.3.3.2.1	Management du risque chimique dans le cadre du règlement REACH.....	114
6.4.	<i>La gestion des agents chimiques par une approche cycle de vie</i>	117
6.4.1.	Principes de l'analyse de cycle de vie.....	117
6.4.1.1.	Définition générale	117
6.4.1.2.	Principales étapes de l'ACV.....	117
6.4.2.	Principes d'estimation des paramètres toxicologie et écotoxicologie dans une méthode de LCIA	119
6.4.2.1.	Positionnement des méthodes de LCIA	119
6.4.2.2.	Méthode IMPACT 2002+	120
6.4.3.	Le management des agents chimiques par une approche cycle de vie	122
6.4.3.1.	Des applications potentielles.....	122
6.4.3.2.	Des limites évidentes	123
CHAPITRE 7 : SPECIFICATION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE PRESENTE PAR UN PRODUIT INDUSTRIEL SUR SON CYCLE DE VIE		
7.1.	<i>Objectif général de la spécification</i>	124
7.2.	<i>Contrainte sur l'échelle spatiale</i>	124
7.3.	<i>Contrainte sur l'échelle temporelle</i>	124
7.4.	<i>Contrainte sur le principe de fonctionnement</i>	124

7.5. <i>Contrainte sur la nature des résultats</i>	124
7.6. <i>Confrontation des méthodes connues aux contraintes établies</i>	125
CHAPITRE 8 : PROPOSITION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE PRESENTE PAR UN PRODUIT SUR SON CYCLE DE VIE.....	127
8.1. <i>Synoptique général</i>	127
8.2. <i>Notations</i>	128
8.3. <i>Evaluation qualitative du danger</i>	128
8.4. <i>Evaluation quantitative du risque chimique à chaque étape du cycle de vie du produit</i>	128
8.4.1. Evaluation du score de risque chimique	128
8.4.2. Adjonction d'un facteur correctif, l'accessibilité physique	129
8.4.3. Formule générale de calcul du risque chimique	129
8.5. <i>Résultats</i>	130
CONCLUSION	131
 PARTIE III : INTEGRATION DE L'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE DANS SON PROCESSUS DE CONCEPTION	133
INTRODUCTION	134
CHAPITRE 9 : AMELIORATION DES CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES D'UN PRODUIT DES SA CONCEPTION	135
9.1. <i>L'éco-conception : processus global d'intégration des aspects environnementaux dans la conception de produits</i>	135
9.2. <i>Evaluation environnementale et amélioration du produit</i>	137
9.2.1. Lien entre amélioration environnementale et amélioration du produit.....	137
9.2.2. Un état de l'art des outils d'éco-conception.....	138
9.2.3. La prise en compte de la dimension humaine	139
9.3. <i>Le point de vue normatif</i>	140
9.3.1. La norme ISO 14 062	140
9.3.2. La norme NF E01-005 : exemple d'une méthodologie d'éco-conception de produits mécaniques	141
9.4. <i>Maîtriser le risque chimique d'un produit manufacturé sur son cycle de vie par l'éco-conception</i>	143
9.4.1.1. Exemple 1 : méthode d'éco-conception de produits mécaniques.....	143
9.4.1.2. Exemple 2 : maîtrise de la toxicité par le choix de matériaux.....	145
9.4.1.3. Bilan	146
CHAPITRE 10 : PROCESSUS GENERIQUE DE CONCEPTION D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE	148

10.1. Vie d'un programme aéronautique et du processus de conception associé.....	148
10.1.1. Les programmes aéronautiques	148
10.1.2. Le processus de conception aéronautique	150
10.1.2.1. Les principales étapes.....	150
10.1.2.1.1 Conception amont	150
10.1.2.1.2 Conception préliminaire	151
10.1.2.1.3 Conception détaillée	151
10.1.2.1.4 Nature des données accessibles aux différentes phases du processus de conception.....	151
10.1.2.2. L'ingénierie système	152
10.2. Caractéristiques fondamentales du processus de conception aéronautique.....	154
10.2.1. Les documents clés	154
10.2.2. La sûreté de fonctionnement.....	155
10.2.3. Les principes de gestion de configuration.....	156
CHAPITRE 11 : SPECIFICATIONS POUR L'INTEGRATION DE L'EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION AERONAUTIQUE.....	157
11.1. Spécification des fonctions de la méthode.....	157
11.1.1.1. Mode de fonctionnement attendu	157
11.1.1.2. Description des fonctions de la méthode	157
11.1.2. Contraintes de conception de la méthode.....	158
11.1.2.1. Contraintes d'utilisation	158
11.1.2.2. Contraintes d'ergonomie, facteur humain, ressources humaines nécessaire à la mise en œuvre ou contraintes liées au personnel	158
11.1.2.3. Contraintes logistiques	159
11.1.2.4. Environnement de la méthode	159
11.1.2.5. Exigences relatives aux interfaces.	159
11.1.2.6. Exigences d'étude de la méthode.....	159
11.1.3. Synthèse.....	159
CHAPITRE 12 : SYNOPTIQUE GENERAL DE LA METHODE	161
CONCLUSION	163
PARTIE IV : DESCRIPTION DES MODES OPERATOIRES DE LA METHODE D'INTEGRATION DU RISQUE CHIMIQUE DANS LA CONCEPTION D'UN PRODUIT AERONAUTIQUE.....	166
INTRODUCTION	167
CHAPITRE 13 : EXTRACTION DES DONNEES ET TYPOLOGIE DES SOURCES	168
CHAPITRE 14 : EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE	169
14.1. Danger d'une substance.....	169
14.2. Ratio massique d'une substance aux différentes étapes du cycle de vie.....	169
14.3. Fréquence d'exposition de la substance aux différentes étapes du cycle de vie.....	171

14.3.1.	Phase de maintenance.....	171
14.3.2.	Phase d'utilisation.....	172
14.3.3.	Phase de parking.....	172
14.3.4.	Phase de fin de vie.....	173
14.3.5.	Classes de fréquence.....	173
14.4.	Accessibilité physique d'une substance aux différentes étapes du cycle de vie.....	173
14.4.1.	Propositions de modes d'évaluation de $A_{i,j}$	174
14.4.1.1.	Ratio surfacique.....	174
14.4.1.2.	Montage.....	174
14.4.1.3.	Expertise du concepteur.....	174
14.4.2.	Mode d'évaluation retenu.....	175
14.5.	Calcul du risque chimique lié à la substance aux différentes étapes du cycle de vie	175
CHAPITRE 15 : INTEGRATION DES RESULTATS D'EVALUATION DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DU		
PRODUIT	176	
CONCLUSION.....		178
PARTIE V : ETUDE DE CAS..... 180		
INTRODUCTION.....		181
CHAPITRE 16 : PRODUIT ETUDIE ET PROCESSUS DE CONCEPTION..... 182		
16.1.	<i>Produit étudié et cycle de vie.....</i>	<i>182</i>
16.2.	<i>Description du processus de conception d'un équipement hydromécanique.....</i>	<i>184</i>
16.2.1.	Phase de recueil et d'analyse des exigences.....	185
16.2.2.	Phase d'architecture.....	185
16.2.3.	Phase de conception globale.....	185
16.2.4.	Phase de conception détaillée.....	186
16.2.5.	Phase de vérification.....	186
16.2.6.	Revue techniques.....	186
CHAPITRE 17 : OUTILS UTILISES..... 187		
17.1.	<i>Outils internes pré-existants.....</i>	<i>187</i>
17.1.1.	Gestion des nomenclatures.....	187
17.1.2.	Conception assistée par ordinateur.....	187
17.1.3.	Base de gestion des données fournisseurs.....	187
17.2.	<i>Base de données matériaux procédés développées.....</i>	<i>187</i>
CHAPITRE 18 : EXTRACTION DES DONNEES..... 192		
CHAPITRE 19 : EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE..... 196		
19.1.	<i>Synoptique de réalisation de l'évaluation de danger.....</i>	<i>196</i>
19.2.	<i>Calcul des masses des substances.....</i>	<i>198</i>

19.3. Calcul des fréquences d'exposition des substances	201
19.4. Evaluation de l'accessibilité	202
19.5. Risque chimique présenté par le produit aux différentes étapes de son cycle de vie	203
CHAPITRE 20 : INTEGRATION DES RESULTATS DE L'EVALUATION DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION	205
20.1. Conformité vis-à-vis de l'article 33 du règlement REACh. Cas de l'anodisation.....	205
20.2. Opportunités de réduction du risque chimique présenté par un produit.....	206
20.3. Intégration des résultats dans les revues de conception	208
CHAPITRE 21 : DISCUSSION DES RESULTATS	209
21.1. Réponse à la question de recherche.....	209
21.2. Identification des limites	209
21.3. Principales pistes d'amélioration de la méthode et de l'outil associé.....	210
21.3.1. Amélioration de la base de données matériaux et procédés.....	210
21.3.2. Amélioration par l'industrialisation et l'appui sur une structure PLM.....	211
21.3.3. Extension du périmètre d'application de la méthode.....	212
CONCLUSION	213
CONCLUSION GENERALE	214
ANNEXES 220	
ANNEXE 1 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIES AU PRODUIT AERONAUTIQUE	221
ANNEXE 2 : STRUCTURE ET DOCUMENTATION DU PROCESSUS DE CONCEPTION	
AERONAUTIQUE	228
A. Avant-propos.....	231
B. Synoptique général	232
C. Le Cycle en V, une architecture typique de processus de conception aéronautique	254
D. Domaines particuliers liés à la conception aéronautique	257
BIBLIOGRAPHIE	272
TABLE DES MATIÈRES.....	283