



HAL
open science

Élaboration et évaluation de stratégies territorialisées de valorisation des matériaux de deuxième vie par le design.

Baptiste Menu

► To cite this version:

Baptiste Menu. Élaboration et évaluation de stratégies territorialisées de valorisation des matériaux de deuxième vie par le design.. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2022. Français. NNT : 2022EMSEM018 . tel-03902067

HAL Id: tel-03902067

<https://theses.hal.science/tel-03902067>

Submitted on 15 Dec 2022

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.



SIS
SCIENCES
INGÉNIERIE SANTÉ
UNIVERSITÉ DE LYON

N° d'ordre NNT : 2022LYSEM018

**THÈSE de DOCTORAT DE L'ÉCOLE DES MINES DE
SAINT-ÉTIENNE
Une école de l'IMT**

**École Doctorale N° 488
Sciences, Ingénierie, Santé**

Spécialité de doctorat : Design
Discipline : SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX

Soutenue publiquement le 08/09/2022, par :
Baptiste Menu

**Élaboration et évaluation de stratégies
territorialisées de valorisation des
matériaux de deuxième vie par le design**

Devant le jury composé de :

MAILLEFERT, Muriel, Professeure / Université Lyon 3 / Rapporteur
MILLET, Dominique, Professeur / Université de Toulon / Rapporteur
VERILHAC, Isabelle, Docteur / Cité du Design / Examinatrice
BASSEREAU, Jean-François, Professeur / Mines Saint-Étienne / Directeur de thèse
LAFORÉST, Valérie, Directrice de recherche / Mines Saint-Étienne / Directrice de thèse
FAUCHEU, Jenny, Professeure / Mines Saint-Étienne / Directrice de thèse

Spécialités doctorales	Responsables :	Spécialités doctorales	Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX	K. Wolski Directeur de recherche	MATHEMATIQUES APPLIQUEES	M. Batton-Hubert
MECANIQUE ET INGENIERIE	S. Drapier, professeur	INFORMATIQUE	O. Boissier, Professeur
GENIE DES PROCÉDES	P.Grosseau	SCIENCES DES IMAGES ET DES FORMES	JC. Pinoli, Professeur
SCIENCES DE LA TERRE	B. Guy, Directeur de recherche	GENIE INDUSTRIEL	N. Absi, Maître de recherche
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	V.Laforest, Directeur de recherche	MICROELECTRONIQUE	Ph. Lalevée, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'Etat ou d'une HDR)

ABSI	Nabil	MR	Génie industriel	CMP
AUGUSTO	Vincent	MR	Génie industriel	CIS
AVRIL	Stéphane	PR	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR	Mathématiques appliquées	FAYOL
BEIGBEDER	Michel	MA	Informatique	FAYOL
BILAL	Blayac	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
BLAYAC	Sylvain	PR	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR	Informatique	FAYOL
BONNEFOY	Olivier	PR	Génie des Procédés	SPIN
BORBELY	Andras	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR	Génie Industriel	FAYOL
BOUILLOT	Baptiste	MC	Sciences de l'ingénieur	SPIN
BRUCHON	Julien	PR	Mécanique et ingénierie	SMS
CAMEIRAO	Ana	PR	Génie des Procédés	SPIN
CHRISTIE	Frédéric	PR	Science et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	MR	Sciences des Images et des Formes	SPIN
DEGEORGE	Jean-Michel	MA	Génie industriel	Fayol
DELAFOSSÉ	David	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
DELORME	Xavier	PR	Génie industriel	FAYOL
DESRAYAUD	Christophe	PR	Mécanique et ingénierie	SMS
DJENZIAN	Thierry	PR	Science et génie des matériaux	CMP
BERGER-DOUCE	Sandrine	PR	Sciences de gestion	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR	Mécanique et ingénierie	SMS
DUTERTRE	Jean-Max	PR	Microélectronique	CMP
EL MRABET	Nadia	MA	Microélectronique	CMP
FAUCHEU	Jenny	MA	Sciences et génie des matériaux	SMS
FAVERGEON	Loïc	MR	Génie des Procédés	SPIN
FEILLET	Dominique	PR	Génie Industriel	CMP
FOREST	Valérie	PR	Génie des Procédés	CIS
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GANSTER	Patrick	CR	Génie des Procédés	SMS
GAVET	Yann	MA	Sciences des Images et des Formes	SPIN
GERINGER	Jean	MA	Sciences et génie des matériaux	CIS
GONDRAN	Natacha	MA	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
GONZALEZ FELIU	Jesus	MA	Sciences économiques	FAYOL
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GRIMAUD	Frederic	EC	Génie mathématiques et industriel	FAYOL
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR	Génie des Procédés	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR	Génie des Procédés	SPIN
IANDOLA	Donata	MAA	Mécanique et ingénierie	CIS
ISMAILOVA	Esma	MC	Microélectronique	CMP
KERMOUCHE	Guillaume	PR	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	DR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LITIÉ	Pierre-Jacques	MA	Mécanique et ingénierie	SMS
MEDINI	Khaled	EC	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
MOLIMARD	Jérôme	PR	Mécanique et ingénierie	CIS
MOULIN	Nicolas	MA	Mécanique et ingénierie	SMS
MOUTTE	Jacques	MR	Génie des Procédés	SPIN
NAVARRO	Laurent	MR	Mécanique et ingénierie	CIS
NEUBERT	Gilles	PR	Génie industriel	FAYOL
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche	Mécanique et ingénierie	CMP
O CONNOR	Rodney Philip	PR	Microélectronique	CMP
PEILLON	Sophie	MA	Sciences de gestion	FAYOL
PICARD	Gauthier	PR	Informatique	FAYOL
PINOLI	Jean Charles	PR	Sciences des Images et des Formes	SPIN
RIGAUD	Jean-Baptiste	MA	Microélectronique	CMP
POURCHEZ	Jérémy	DR	Génie des Procédés	CIS
ROUSSY	Agnès	MA	Microélectronique	CMP
SANAUR	Sébastien	MA	Microélectronique	CMP
SERRIS	Eric	IRD	Génie des Procédés	FAYOL
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
VALDIVIESO	François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	MR	Génie industriel	CMP
ZIMMERMAN	Antoine	EC	Informatique	FAYOL

Mise à jour : 04/02/2021

Élaboration et évaluation de stratégies territorialisées de valorisation des matériaux de deuxième vie par le design

Soutenue publiquement le 08/09/2022, par :

Baptiste Menu

MAILLEFERT, Muriel, Professeure / Université Lyon 3 / Rapporteur
MILLET, Dominique, Professeur / Université de Toulon / Rapporteur
VERILHAC, Isabelle, Docteur / Cité du Design / Examinatrice
BASSEREAU, Jean-François, Professeur / Mines Saint-Étienne / Directeur de thèse
LAFORREST, Valérie, Directrice de recherche / Mines Saint-Étienne / Directrice de thèse
FAUCHEU, Jenny, Professeure / Mines Saint-Étienne / Directrice de thèse



Environnement,
Ville, Société
UMR 5600



REMERCIEMENTS

Mes pensées se tournent tout d'abord vers mes directeurs de recherche, Valérie Laforest, Jenny Faucheu et Jean-François Bassereau pour leur professionnalisme, leur soutien et leur implication dans le développement de ce travail. J'ai eu la chance de pouvoir mener ce travail de recherche dans un cadre idéal et de bénéficier d'un accompagnement humain d'une grande qualité. Je leur suis extrêmement reconnaissant d'avoir partagé leurs connaissances avec moi et de m'avoir ouvert la voie sur le monde de la recherche et de l'ingénierie.

Je remercie les membres du jury, Muriel Maillefert et Dominique Millet pour la qualité et la précision de leur travail de rapporteurs ainsi que pour leurs conseils avisés ; je remercie également Isabelle Vérilhac d'avoir été présente en tant qu'examinatrice.

Merci aux partenaires industriels et académiques. Je pense à Pierre-Marc Linder pour m'avoir ouvert les portes de son entreprise et présenté en détail les activités de l'entreprise LINDER. Johann Vandomber et Vincent Chevalier pour leur accueil cher Recyclivre. Enfin, je remercie chaleureusement le Professeur Monto Mani, de l'Indian Institute of Science de Bangalore, qui a accepté de me recevoir au sein du *Center for Sustainable Technologies*, laboratoire SuDesi, pour sa bienveillance, son aide et ses précieux conseils qui ont contribué à enrichir ce travail de recherche.

Je remercie le personnel de l'École des Mines de Saint-Étienne, et notamment David Delafosse, pour la confiance qui m'a été accordée en me permettant de travailler au sein du centre SMS (Sciences des Matériaux et des Structures), département MPI (Mécanique Physique et Interfaces), pour mener à bien ces travaux de thèse. Je pense aussi à ceux qui m'ont aidé à l'école, les collègues ingénieurs et l'équipe administrative : Arnaud Ducoulombier, Maydine Ghestin, Aubin Geoffre, Vinicius Rodrigues-De-Almeida, Bastien Durif, Julie Blanc, Sophie Carrier, Christophe Rivaillon.

Je remercie également tous ceux qui m'ont soutenu et aidé dans le développement de ce travail de recherche : Camille Duteyrat, Françoise Vanhulle, Valentin Menu, Nicolas Bouckaert, Charlotte Seuzaret.

1	INTRODUCTION GENERALE	11
2	LES MODELES DE CIRCULATION DE LA MATIERE.	13
2.1	ÉVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION DE L'ARTISANAT A L'INDUSTRIALISATION.....	13
2.1.1	<i>Du matériau de rencontre à l'artisanat.</i>	13
2.1.2	<i>De l'artisan à l'artisanat : savoir-faire adapté à la matière et à l'outil.</i>	15
2.1.3	<i>De l'artisanat à l'organisation industrielle.</i>	17
2.1.3.1	Une accélération progressive et un découpage rationnel des séquences de fabrication.....	17
2.1.3.2	Le produit, l'objet, l'œuvre.	21
2.1.3.3	La forme et la fonction des produits.....	22
2.1.3.4	Conception et design.....	24
2.2	DESCRIPTION DU SYSTEME INDUSTRIEL LINEAIRE.	25
2.2.1	<i>La place des matériaux dans le système industriel linéaire.</i>	25
2.2.2	<i>Les étapes du système industriel linéaire</i>	28
2.2.3	<i>Concevoir dans un système industriel linéaire.</i>	29
2.2.4	<i>Produire pour alimenter la croissance et la consommation.</i>	32
2.2.5	<i>Les enjeux du système industriel linéaire face aux limites de la planète</i>	33
2.2.6	<i>Évaluer les performances d'un système industriel.</i>	34
2.2.7	<i>Hiérarchiser les modes de traitements des déchets</i>	35
2.2.7.1	Définition du déchet.....	36
2.2.7.2	Définition des termes relatifs à la valorisation des matériaux.	37
2.3	LE MODELE CIRCULAIRE.....	38
2.3.1	<i>Description du modèle circulaire.</i>	38
2.3.2	<i>Concevoir dans un système circulaire.</i>	39
2.3.2.1	L'approche produit.....	41
2.3.2.2	L'approche service et le couple produit-service.....	43
2.3.2.3	L'approche système et l'approche Produit-Service-Système (PSS).....	44
2.3.2.4	La dimension environnementale dans la conception	45
2.3.3	<i>Critique et limites du modèle circulaire.</i>	46
2.4	VERS UN NOUVEAU MODELE DE GESTION DES MATERIAUX ?.....	50
2.4.1	<i>Le réemploi : alternative ou hypothèse d'avenir ?</i>	50
2.4.2	<i>Précisions sémantiques sur la notion de réemploi.</i>	51
2.4.3	<i>Des ouvertures sur la notion de réemploi ?</i>	52
2.4.4	<i>Positionnement et caractérisation du « modèle réemploi ».</i>	53
2.4.4.1	Le cadre associatif / expérimental.....	54
2.4.4.2	Le cadre public.	55
2.4.4.3	Le cadre public / privé.	55
2.4.4.4	Le cadre privé.....	57
2.4.5	<i>Faire circuler les objets de deuxième vie.</i>	57
2.4.5.1	Identifier les critères de circulation des matériaux.....	57
2.4.5.2	Évaluer la réemployabilité d'un gisement.....	58
2.5	CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.	60
3	EXPLORER LE POTENTIEL DE NOUVELLES FILIERES.....	61
3.1	L'ÉTAT DES LIEUX : DOCUMENTER LA NATURE DES GISEMENTS	61
3.1.1	<i>Différents types de déchets</i>	61
3.1.1.1	Les déchets de fabrication sans usage.....	62
3.1.1.2	Les déchets post-consommation.....	63
3.1.1.3	Les déchets de fabrication avec usage.....	65
3.1.2	<i>Réaliser un état des lieux en vue du diagnostic : collecter des données sur les gisements de déchets.</i> 67	
3.1.2.1	Les informations sur le matériau et les procédés de fabrication.	68
3.1.2.2	Les informations quantitatives.....	69
3.1.2.3	Les informations qualitatives.	70
3.1.2.4	Les informations temporelles.....	70
3.1.2.5	Les informations territoriales.....	71
3.2	LE DIAGNOSTIC : ENVISAGER DES OPTIONS ALTERNATIVES.....	71
3.2.1	<i>Design, entre méthodes de conception et méthodes de création.</i>	71
3.2.2	<i>Circulation de la matière : mise en forme, forme et transformation</i>	74

3.2.3	<i>From Product to dust : visualisation des transformations.</i>	77
3.2.4	<i>From Product to dust : test opérationnel de l'outil</i>	82
3.2.4.1	Exploration des transformations de la matière : « from dust to product »	84
3.2.4.2	Identifier des options prometteuses.	87
3.3	INTEGRER L'ÉVOLUTION TEMPORELLE ET LA VARIABILITE DES OBJETS, PRODUITS ET MATERIAUX COMME MOTEUR D'INNOVATION.	88
3.3.1	<i>Repenser la notion de filière : vers des logiques multi-filières décentralisées ?</i>	88
3.3.2	<i>Concevoir et fabriquer des produits et matériaux qui s'adaptent aux évolutions des gisements : l'outil « arborescence produit »</i>	92
3.3.3	<i>Adapter les processus de conception : vers un design agile ?</i>	95
3.4	PRODUITS, OBJETS ET MATERIAUX : REPENSER LES LIENS AVEC LE TERRITOIRE	99
3.4.1	<i>Supercyclage : Circulation de matière, valeurs et territoire</i>	99
3.4.2	<i>Organisation des connaissances liées aux aspect territoriaux</i>	103
3.5	EXPERIMENTER UN PROCESSUS DE CONCEPTION DANS UNE DEMARCHE DE SUPERCYCLAGE	104
3.5.1	<i>Expérimentation 1 : logique produit : Reconcevoir une chilienne poussée par le matériau</i>	108
3.5.2	<i>Expérimentation 2 : logique produit : Reconcevoir une chilienne avec un stock de matériau limité.</i>	112
3.5.3	<i>La place du matériau dans le processus de reconception des chiliennes</i>	116
3.5.4	<i>Études de cas complémentaires : logique produit - concevoir un produit poussé par le matériau.</i>	123
3.5.5	<i>Expérimentation 3 : logique matériaux : « diverger » à partir des matériaux</i>	125
3.6	CONCLUSION DU CHAPITRE 2	131
4	OUTILS D'ÉVALUATION DE SCENARIOS DE CIRCULATION DE LA MATIERE	133
4.1	VISION GLOBALE, PRESENTATION DES PHASES DE TRAVAIL, DES ACTIONS ET DES OUTILS.	134
4.1.1	<i>Phase 1 : diagnostic</i>	134
4.1.2	<i>Phase 2 : évaluation de l'existant</i>	136
4.1.3	<i>Phase 3 : proposition</i>	138
4.1.4	<i>Phase 4A : implémentation (test, pilote, massification)</i>	145
4.1.5	<i>Phase 4B : évaluation (test, pilote, massification)</i>	154
4.2	DESCRIPTION DES INDICATEURS D'ÉVALUATION D'UN SCENARIO.	158
4.2.1	<i>Description des 4 familles d'indicateurs</i>	158
4.2.2	<i>Les indicateurs matières</i>	159
4.2.3	<i>Les indicateurs économiques</i>	160
4.2.3.1	L'indicateur économique « Logistique » : <i>EcoLogistique</i>	161
4.2.3.2	L'indicateur économique « Produit » : <i>EcoProduit</i>	163
4.2.3.3	L'indicateur économique « Process » : <i>EcoProcess</i>	165
4.2.4	<i>Les indicateurs des qualités</i>	167
4.2.4.1	Indicateur d'utilisabilité : <i>QualitéUtilisabilité</i>	168
4.2.4.2	Indicateur de fonctionnalité : <i>QualitéFonctionnalité</i>	168
4.2.4.3	Indicateur de préciosité : <i>QualitéPréciosité</i>	169
4.2.5	<i>Les indicateurs de dynamique territoriale</i>	172
4.2.5.1	Indicateur lié aux acteurs mis en jeu dans les scénarios <i>TerritoireActeurs</i>	172
4.2.5.2	Indicateur lié au gisement des scénarios <i>TerritoireGisement</i>	173
4.3	APPLICATION DES INDICATEURS AU CAS D'ÉTUDES « LIVRES »	174
4.3.1	<i>Présentation générale des scénarios étudiés</i>	174
4.3.2	<i>SERIE DES SCENARIOS 0 : revente de livres d'occasion</i>	177
4.3.2.1	Description des scénarios	177
4.3.2.2	Calcul des indicateurs pour les scénarios de la série 0	184
4.3.3	<i>SÉRIES DE SCÉNARIOS 1 et 2 : fabrication de panneaux de structures (1) et de fauteuils à partir de ces panneaux de structure (2)</i>	188
4.3.3.1	Description du scénario 1.1	189
4.3.3.2	Description du scénario 2.1 et 2.2 : fabrication de fauteuils	190
4.3.3.3	Calculs des indicateurs pour les scénarios 1.1, 2.1 et 2.2	194
4.3.4	<i>Discussion des résultats – Analyse critique</i>	197
4.3.4.1	Choix des scénarios et résultats	197
4.3.4.2	Comparaison des résultats pour les indicateurs matière	198
4.3.4.3	Comparaison des résultats pour les indicateurs économiques	199
4.3.4.4	Comparaison des résultats pour les indicateurs de qualité	201

4.3.4.5	Comparaison des résultats pour les indicateurs de dynamique territoriale.....	202
4.3.4.6	Analyse critique des indicateurs.....	204
4.3.4.7	Synthèse des limites et perspectives sur la méthode d'évaluation	209
5	CONCLUSION GENERALE	211
6	BIBLIOGRAPHIE.....	213

ACRONYMES

ACV : Analyse du Cycle de Vie
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFD : Alliance Française des Designers
AFNOR : Association Française de Normalisation
APD : Avant-Projet Définitif
APS : Avant-Projet Sommaire
AQC : Agence Qualité Construction
ASBL : Association Sans But Lucratif
AURA : Auvergne Rhône-Alpes
BIM : *Building Information Modeling*
CESE : Conseil Economique, Social et Environnemental
CDC : Cahier Des Charges
C2C : *Cradle to Cradle*
C2RMF : Centre de recherche et de Restauration des Musées de France
COFREND : Confédération Française pour les Essais Non Destructifs
CNRTL : Centre National de Ressources Textuelles et Linguistique
COV : Composés Organiques Volatils
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
DEA : Déchets d'Élément d'Ameublement
DEEE : Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques.
DfA : *Design for Adaptability*
DfC : *Design for Change*
DfD : *Design for Dismantling / Disassembly / Deconstruction*
DfE : *Design for Environment*
DfR : *Design for Recycling.*
DfRem : Design for Remanufacturing.
DIB : Déchet Industriel Banal
DMC : *Domestic Material Consumption*
DN MADE : Diplôme National des Métiers d'Art et du Design
EMSE : École des Mines de Saint-Étienne
EI : Écologie Industrielle
EIT : Écologie Industrielle et Territoriale.
ESS : Économie Sociale et Solidaire
EXE : Études et plans d'Exécution
FDES : Fiches de Données Environnementales et Sanitaires
FFME : Fédération Française de Montagne et d'Escalade
JO : Journal Officiel
JORF : Journal Officiel de la République Française
ICSID : Conseil International des Sociétés de Design Industriel
ICM : Ingénieur Civil des Mines
IPO : Indicateurs de Performances Opérationnelles
ISBN : *International Standard Book Number*
ISMH : Inventaire Supplémentaire des Monuments Historiques.
ISO : Organisation internationale de normalisation (*International Organization for Standardization*)
MFA : *Material Flow Analysis*
MTD : Meilleures Techniques Disponibles
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ONU : Organisation des Nations Unies.
OSB : *Oriented Strand Board* (panneau de lamelles orientées)
PAP : Porte à Porte
PAV : Points d'Apport Volontaires
PIB : Produit Intérieur Brut
PME : Petite ou Moyenne Entreprise
PSS : Produit Services System
REP : Responsabilité Elargie du producteur
RSC : *Reverse Supply Chain*
SMICVAL : Syndicat Mixte Intercommunal de Collecte et de Valorisation
TLC : Textile, Linge de maison, Chaussures
TPE : Très Petites Entreprises
UNESCO : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*)
VHU : Véhicules Hors d'Usage

GLOSSAIRE

Acteur : Il peut être une personne physique ou morale, il est défini selon le contexte de l'étude: un particulier, un groupe d'individus, un collectif, une association, une école ou un centre de recherche, une entreprise (microentreprises, Petites et Moyennes Entreprises, artisanat et/ou industrie, grands groupes), une collectivité territoriale.

Concepteur : ce terme est utilisé de manière générique pour évoquer l'ensemble des professions ayant recours à l'activité de conception. L'artiste, le designer, l'architecte, l'ingénieur, l'artisan, l'ouvrier ou l'utilisateur peuvent être impliqués et actifs à différents niveaux du processus de conception.

Déchet : *toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* ; (Code de l'environnement, article L541-1-1).

Effort : le nombre d'actions élémentaires qui entrent en jeu dans un système. Ils sont éventuellement pondérés en leur attribuant un coefficient selon la nature des actions. L'intensité de l'effort est exprimé sous la forme d'un score.

Forme : résultat d'un processus de mise en forme en deux ou trois dimensions à des échelles différentes. Cela peut être des objets, des produits, des matériaux ou des structures. Nous considérons que la forme est le résultat d'un procédé, d'une opération de fabrication ou d'un processus d'origine naturelle comme l'érosion, la corrosion, l'usure, la sédimentation, la décomposition, la croissance des êtres vivants. Sous le terme de forme nous considérons les produits simples (un produit mono matériau, une pièce, une chute), les produits issus d'assemblages complexes (un textile, un composant, une machine, un bâtiment, un véhicule), ou le résultat d'un processus naturel (des matériaux d'origine animale ou végétale, des cristaux, etc.). La forme peut également provenir d'une combinaison de mises en forme successives ou simultanées, par exemple dans le cas d'un matériau architecturé, de matériaux composites ou de matériaux naturels. Le terme forme permet donc d'aborder dans un même ensemble plusieurs catégories que sont : les matières, les pièces, les semi-produits, les matériaux, les produits simples ou complexes, les bâtiments, les infrastructures ou les réseaux.

Matière première équivalente : est une matière première qui, si elle remplace L'OBJET dans le scénario, donne un produit équivalent en passant par les mêmes actions élémentaires.

OBJET : il s'agit du déchet après identification comme pouvant être supercyclé. L'objet est défini dans un contexte, il est évalué, possède propriétés, des qualités et des valeurs. Il n'a pas encore le statut de produit, et peut rester, tout ou partie, au statut de déchet.

Objet : « *I. – [Dans une visée concrète] A. – Tout ce qui, animé ou inanimé, affecte les sens, principalement la vue. B. – Chose solide, maniable, généralement fabriquée, une et indépendante, ayant une identité propre, qui relève de la perception extérieure, appartient à l'expérience courante et répond à une certaine destination. C. – Tout élément ayant une identité propre, produit par un art ou une technique et considéré dans ses rapports avec cet art ou cette technique.* » (CNRTL, consulté le 02/06/2022)

PRODUIT : il s'agit du produit sortant du système étudié, résultat de la transformation de L'OBJET par les actions élémentaires décrites dans le scénario.

Produit de référence équivalent : est un produit qui fournit le même service que le produit considéré.

Supercyclage : le supercyclage vise à augmenter la ou les valeurs d'un objet tombé en désuétude, soit en conservant sa fonction initiale, soit en lui attribuant de nouvelles fonctions, avec ou sans transformation. Ainsi le supercyclage recouvre deux dimensions fonctionnelles, la « *fonction contrainte* » et la « *fonction flexible* » [ALI, 2017]. Le supercyclage se distingue du recyclage valorisant car il prévoit de fabriquer, à partir d'objets, de matériaux, de produits ou de matières de récupération, des œuvres, des objets, des produits, des semi-produits et jusqu'à des matières de création, en cherchant à préserver les valeurs des objets d'origine, sans perdre l'ambition de les augmenter. Ainsi le supercyclage favorisera les options qui préservent la mise en forme d'un objet, donc ses propriétés, ses qualités et ses valeurs, sur les options qui auront pour effet de réduire prématurément l'objet à l'état de matière en vue d'augmenter son unique valeur économique.

Valeur : la mise en forme des objets, produits et matériaux contient de l'information. Révéler ces informations permet d'identifier des caractéristiques propres à l'objet, qui lui permettent de circuler. Ces caractéristiques peuvent être classées sous forme de critères qui dépendent autant des propriétés mécaniques et physiques (mesurables de manière absolue par la science des matériaux), que des qualités (mesurables de manière relative par un processus qui permet de déterminer une valeur (ISO 9001)) qu'il s'agit d'expertiser, de qualifier, d'évaluer et de caractériser. De ce fait les valeurs sont autant associées à la matière, qu'à sa mise en forme. L'information associée au couple forme / matière, une fois caractérisée, peut être transposée dans de nombreuses valeurs : valeurs historiques, valeurs de savoir-faire, valeurs d'auteur, valeurs d'unicité, valeurs fonctionnelles, etc.

Fonction initiale : la fonction initiale correspond aux conditions d'usage pour lesquelles le produit avait été conçu ; elle limite le potentiel fonctionnel, c'est à dire les usages associés à la mise en forme.

Territoire de référence : nous définissons le territoire de référence par ses limites administratives et sa superficie.

1 Introduction générale

Différents modèles d'utilisation de la matière ont vu le jour au cours du temps. Ces modèles ont profondément modelé les relations entre l'être humain et son environnement, façonné l'histoire des matériaux et des techniques. Tout acte de construction s'établit dans une relation à la matière qui implique une transformation plus ou moins étendue de l'environnement naturel et de l'environnement construit [MONTO et al. 2005]. Les séquences de transformation et d'usage de la matière caractérisent ces différents modèles. Aussi, nous sommes passés d'un modèle artisanal, relativement intégré et local, à un modèle mondial, séquencé et dissocié de son milieu naturel. Ce travail traverse l'histoire des régimes techniques et matériels pour tenter de donner un éclairage sur les problématiques actuelles de gestion des matériaux. L'objectif est d'identifier les leviers d'action pour une restructuration des processus de conception et de fabrication, afin de permettre un usage territorialisé et prolongé des objets et matériaux dans de multiples cycles de vie.

Dans un premier temps, les principaux modèles de circulation de la matière sont décrits et discutés en définissant le rôle et la place de la conception dans chacun des modèles existants. La conception joue un rôle central dans la circulation de la matière, d'abord par la sélection des matières et des matériaux, ensuite par la nature des opérations de transformation que l'on projette sur ces derniers en vue de leur donner un usage et une fonction déterminée. Cependant, les valeurs créées par les multiples opérations de mises en forme, sont souvent prématurément détruites par les processus de valorisation ou d'élimination lorsque les objets arrivent en fin de vie.

Dans un second temps, une clarification du vocabulaire est proposée afin de mieux comprendre les enjeux soulevés par la valorisation du couple forme-matière. Basé sur ce travail de définition, deux outils en approche créative sont développés. Ils ont pour objectif d'explorer le potentiel formel et fonctionnel des objets en fin de vie, de manière à identifier un vaste panel de stratégies de valorisation destinées à préserver les propriétés, les qualités et les valeurs associées à leur mise en forme. Au cours de ce processus d'exploration, de nombreux scénarios territorialisés sont mis au jour.

Enfin, pour guider la prise de décision face à l'étendue et à la complexité des choix possibles, un pré-modèle de circulation des matériaux est proposé. Par le séquençage et la description fine des processus en jeu, ce pré-modèle permet la caractérisation des scénarios à l'échelle du système étudié. Des indicateurs spécifiquement développés pour les besoins de ce travail sont utilisés pour évaluer les risques et les bénéfices associés à chaque stratégie. Les résultats obtenus sont discutés et mis en perspective dans la dernière partie de ce manuscrit.

Problématique : Face à la raréfaction des matières premières et de l'énergie, de nouvelles stratégies se mettent en place. Interroger le potentiel fonctionnel des objets en circulation constitue-t-il une voie d'avenir pour la recherche d'alternatives aux modèles classiques de valorisation des déchets ? Dans quelle mesure, le design peut-il apporter une réponse à cette problématique ?

2 Les modèles de circulation de la matière.

2.1 Évolution des systèmes de production de l'artisanat à l'industrialisation.

2.1.1 Du matériau de rencontre à l'artisanat.

Les premiers modèles de circulation de la matière reposaient sur un usage direct des forces disponibles à proximité : les forces naturelles (eau, vent, feu), animales et humaines. L'énergie était utilisée directement, sans conversion ni stockage, mais captée et utilisée là où elle se trouvait. Les matériaux de construction suivaient une logique similaire en raison des modes de vie rudimentaires qui reposaient principalement sur la nécessité et la subsistance. Dans un tel contexte, les moyens techniques de transport, de conservation ou de transformation, étaient limités, poussant les civilisations traditionnelles à faire un usage optimal des ressources naturelles à leur disposition. Les artefacts anciens témoignent de ce souci d'économie, comme le silex ou les ossements, dont les chutes étaient conservées puis utilisées pour fabriquer d'autres objets plus petits, utiles aux besoins de la communauté. Il fallait alors s'adapter au milieu et développer des savoir-faire permettant aux communautés de survivre face à un environnement considéré comme hostile. La nature était vécue comme une entité extérieure qu'il fallait maîtriser et exploiter. Dans ce cadre, le progrès consistait à s'affranchir des dangers que représentait la nature pour s'en protéger. La technique était alors perçue comme un moyen d'émancipation et de domination de la nature.

C'est d'abord avec les matériaux trouvés dans leur environnement proche, que les différentes civilisations ont conçu, façonné et développé leurs outils, leurs objets et leurs modes de vie. L'espace de vie d'une communauté (*living environment*) comprend l'environnement naturel (*natural environment*) et l'environnement construit (*Built environment*) [MONTTO et al. 2005] ; la somme des deux représente l'environnement physique (*physical environment*) [Camagni, et al. 1998]. Depuis la préhistoire, toutes les implantations humaines ont dû s'adapter aux contraintes environnementales (le climat, la faune, la flore, etc.) et matérielles des territoires sur lesquelles elles se sont établies, provoquant « *la rencontre* » entre les matériaux et les usagers. C'est ce rapport ténu aux matériaux qu'Yves Bréchet (2013) qualifie de « *matériaux de rencontre* » [BRECHET, 2013]. En effet, le choix des matériaux était principalement déterminé par la proximité des ressources disponibles, réduisant ainsi le spectre de sélection des matériaux et des techniques. Les constructions traditionnelles, en sont l'expression. Leur construction utilise des matériaux d'origine naturelle ayant subi peu de transformations.

Par ailleurs, les objets et bâtiments étaient souvent considérés comme des réserves de matériaux prêts à servir d'autres usages et disponibles pour la construction. Le transport était encore lent et fastidieux et les infrastructures peu développées. De ce fait tous les matériaux disponibles à proximité étaient utilisés pour une question de praticité, de bon sens et d'économie. L'emblématique monument de Stonehenge au Royaume-Uni, aurait été construit avec des pierres découpées des centaines d'années plus tôt et ayant probablement déjà servi pour d'autres usages [PEARSON et al. 2015]. Ainsi de nombreux niveaux de valorisation (réusage, réemploi, recyclage) ont toujours coexisté à travers les âges [DEVLEGER et al. 2018]. Dans la fin de l'empire Romain, plusieurs documents légaux attestent que le réemploi était une pratique courante. Les édifices étaient alors entretenus et préservés, puis s'ils ne

pouvaient continuer à être utilisés en cas de dommages irréparables, ils devaient être soigneusement démontés en vue de préserver les matériaux qu'ils contenaient. Tous les éléments issus des bâtiments publics étaient considérés comme faisant partie du patrimoine relevant de l'investissement collectif, et à ce titre, il fallait les préserver [ALCHERMES, 1994]. De nombreux auteurs témoignent que la réutilisation des objets, des matériaux ou des chutes, principalement sur site, est resté une pratique courante, de la préhistoire jusqu'au début du XXème siècle. Ainsi de nombreux corps de métiers et de savoir-faire spécifique au démontage, à la récupération ou à la valorisation des matériaux se sont développés de par le monde [BARLES, 2005]. Ces pratiques, loin d'être anecdotiques se sont parfois déployées sur de grandes échelles au cours de l'histoire. D'après Joseph Alchermes, dans l'Antiquité, le terme *Spolia* était utilisé pour désigner le fait de modifier intégralement l'usage d'un bâtiment ou pour désigner le réusage des matériaux de construction à d'autres fins, dans de nouvelles structures. Cette pratique, fut très largement répandue dans les villes Romaines et dans les stratégies urbanistiques [ALCHERMES, 1994].

Ces savoir-faire, ces connaissances et ces modes de vies, étaient, d'une certaine manière, liés à des contraintes matérielles et constructives locales, produisant de ce fait une « *culture matérielle* » [JULIEN, ROSSELIN, 2005] propre à chaque lieu : « *Hache, poterie, épée sont des exemples de ce que les spécialistes appellent « culture matérielle », une expression qui saisit à la perfection la théorie selon laquelle la fabrication est l'union de choses fournies par la nature avec les représentations conceptuelles d'une tradition culturelle donnée. « La culture matérielle », comme Julian Thomas l'explique, « représente tout à la fois des idées qui sont devenues matérielles, et une substance naturelle qui a été rendue culturelle [THOMAS, 2007] » ».*

[INGOLD, 2013]. Les différentes cultures sont dans une certaine mesure, l'expression du socle physique et territorial sur lequel elles reposent. Fernand Braudel (1993) développe la notion de « *civilisation matérielle* » pour exprimer ce lien étroit qui unit la culture et la matière, mais utilise le terme « *civilisation* » afin de souligner les aspects techniques et économiques liés à l'usage des matériaux.

Les matériaux étaient si étroitement liés aux différents âges de l'humanité que les historiens ont eu coutume de les nommer par le nom des régimes matériels et énergétiques qui les ont dominés : l'âge de pierre, l'âge du cuivre, du Bronze, puis au XIX l'âge de l'acier, et enfin au XXème siècle, l'âge des polymères et du silicium [BRECHET, 2013]. D'après André Leroi-Gourhan (1943) ce sont les contraintes de la matière qui ont poussé les hommes à évoluer [LEROI-GOURHAN, 1943].

Lewis Mumford, (1934) analyse l'histoire sous l'angle de l'évolution technologique et séquence les phases d'évolution de la « *civilisation machinique* » [MUMFORD, 1934]. Dans son ouvrage, *La sociologie et les sciences de la société*, Jean Cazeneuve (1975) présente cette approche partagée par différents auteurs : « *Ils ([MUMFORD, 1934] ; [JANNE et al. 1963]) prennent tout particulièrement en considération l'invention et l'utilisation d'outils, de machines, d'énergies et de matériaux, les conditions de travail subséquentes, ainsi que les rapports des groupes de production qui en résultent, pour distinguer : l'ère lithotechnique, avec usage du bois, d'os, du silex ; l'ère anthropotechnique, caractérisée par l'emploi des métaux et de l'esclavage ; l'ère éotechnique, du Xe au XVIIe, durant laquelle sont utilisés l'eau, le vent, les animaux, et inventées l'imprimerie et l'horloge ; l'ère paléotechnique, c'est-à-dire celle de la révolution industrielle ; et l'ère néotechnique, engendrée au début du XXe siècle par*

l'apparition de nouvelles sources énergétiques (électricité, gaz, atome) et de nouveaux produits de synthèse. » [CAZENEUVE, AKOUN, 1975]

Gottfried Semper (1860), architecte allemand, propose une approche philosophique, historique et technique sur l'influence du textile envers les autres artisanats. Même s'il n'évoque pas le textile comme une période historique, « *l'ère du textile* » ou « *l'âge du textile* », il considère néanmoins l'art textile comme une « *pratique techno-culturelle* » [LABRUSSE, 2016], une « *technique artistique* » originelle [SEMPER, 1860]. Dans son ouvrage « *Der Stil* », il analyse l'influence première du textile sur les autres disciplines telle que la céramique, la taille de la pierre, la forge ou la menuiserie. Peut-être en raison de sa capacité à agencer différentes matières ou à appareiller des matériaux dans un ensemble complexe qui dépasse le textile lui-même. C'est pourquoi le textile est perçu comme une posture (*le textilisme*) ou comme une technique, transposable à d'autres domaines (*la textilisation*) : « *l'art textile est à prendre comme un univers, tantôt défini par le matériau – des fibres souples et résistantes – ou par les techniques de mise en œuvre – nouage, tressage, tissage – indépendamment de la finalité des objets produits ; tantôt par les motifs d'entrecroisement, réels ou imités ; tantôt enfin par la fonction, et par exemple l'utilisation pour tapisser un mur ou cloisonner l'espace* » [BASSEREAU, 2020 (b)].

2.1.2 De l'artisan à l'artisanat : savoir-faire adapté à la matière et à l'outil.

La notion de savoir-faire, exprime ce « *rapport de force* » entre l'artisan et son environnement matériel [INGOLD, 2013]. L'artisan s'empare d'un matériau pour le transformer par l'intermédiaire de son savoir et ses outils ; mais en retour il se trouve lui-même transformé par le matériau, qui exprime son potentiel, ses contraintes et ses limites. Tim Ingold (2013) développe l'idée que l'artisan « *mêle ses forces à celles des matériaux* » [INGOLD, 2013] car le matériau constitue à la fois une contrainte à laquelle il faut s'accommoder et une opportunité qu'il faut savoir saisir. Son savoir-faire dépend autant de ses connaissances que de son expérience avec les matériaux. Cette idée est également développée par Suzana Lindberg, qui évoque « *un refus de se laisser saisir qui conditionne pourtant toute saisie* » [LINDBERG, 2016]. C'est dans cet interstice que se construit le savoir-faire qui résulte d'une interaction entre l'Homme, la matière disponible et le contexte culturel. Le savoir-faire est défini par le Centre National de Ressources Textuelles et Linguistique (CNRTL) comme l'alliance d'une connaissance et d'une pratique manuelle, acquise par l'expérience : « *pratique aisée d'un art, d'une discipline, d'une profession, d'une activité suivie; habileté manuelle et/ou intellectuelle acquise par l'expérience, par l'apprentissage, dans un domaine déterminé* ». La notion de *savoir-faire* proposée par le CNRTL, souligne le fait que la connaissance ou l'expérience s'acquiert dans un domaine déterminé. La notion d'expérience, ici mise en relation directe avec l'apprentissage, montre le caractère hybride du savoir-faire. C'est une double connaissance de la matière : d'abord, entendue comme une connaissance abstraite de ses propriétés, ensuite comme une connaissance sensible et empirique qui naît de la rencontre entre celui qui fabrique et le matériau. Dans le processus de transformation, l'un et l'autre dialoguent en permanence.

Nous avons vu précédemment que les premiers modes d'utilisation de la matière étaient alors profondément ancrés dans les territoires. Les constructions, les objets, ou les bâtiments, étaient le fruit d'une longue adaptation au milieu, née de l'interaction entre la technique et

les matériaux disponibles localement. L'habitat et les pratiques constructives étaient le fruit d'une forte intégration territoriale. C'est la raison pour laquelle le bois était privilégié dans les régions nordiques, alors que la terre crue était abondamment utilisée dans les régions désertiques. Cette affirmation peut néanmoins être relativisée, car de nombreuses civilisations ont utilisé des matériaux d'origine lointaine comme signe de prestige. Il existe des cas d'œuvres aux matériaux d'origines différentes, ce qui prouve l'existence d'un commerce international très ancien. Le Centre de recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), laboratoire de recherche situé sous le Louvre, a étudié une statuette provenant d'Asie datée d'environ cinq mille ans avant Jésus Christ. Suite aux études qui ont été menées, il fut démontré que les yeux en minéraux étaient originaires d'Afrique. Malgré l'existence d'un commerce international ancien, les savoir-faire demeuraient principalement ancrés dans les territoires en raison des modes de transport et des infrastructures encore peu développées, forçant les Hommes à faire preuve d'une grande ingéniosité avec ce qui était disponible localement.

La définition de l'artisanat adoptée par l'UNESCO, met en exergue l'importance donnée à la main dans le processus de fabrication du produit fini : « *on entend par produits artisanaux les produits fabriqués par des artisans, soit entièrement à la main, soit à l'aide d'outils à main ou même de moyens mécaniques, pourvu que la contribution manuelle directe de l'artisan demeure la composante la plus importante du produit fini. La nature spéciale des produits artisanaux se fonde sur leurs caractères distinctifs, lesquels peuvent être utilitaires, esthétiques, artistiques, créatifs, culturels, décoratifs, fonctionnels, traditionnels, symboliques et importants d'un point de vue religieux ou social* » [UNESCO/CCI, 1997]. Par leur « *nature spéciale* » et leur « *caractère distinctif* », les objets artisanaux incarnent les attributs d'une culture productive spécifique liées aux territoires sur lesquels ils sont produits. L'artisan apprend de la communauté à laquelle il appartient et nourrit en retour, par ses productions, un art de construire, lié au lieu dans lequel il travaille ; c'est-à-dire une connaissance des matériaux, des procédés et des savoir-faire permettant la fabrication des objets. En effet, l'artisan maîtrise un panel de matériaux, d'outils et de techniques spécifiques, liés à son corps de métier et au territoire sur lequel il travaille. Limité par sa force de travail et des techniques peu mécanisées, il maîtrise toutes les étapes de transformation depuis la création jusqu'à la distribution des objets qu'il fabrique.

L'introduction de la mécanisation des outils de travail, ainsi que la standardisation des produits et matériaux, modifie durablement le rapport de force entre l'artisanat et l'industrie. Les « *énergies naturelles réparties* » [RIFKIN, 2012], alors indispensables à la production, sont progressivement supplantées par des modèles énergétiques centralisés, souvent d'origine fossile. Matériaux, usages et savoir-faire, alors profondément ancrés dans des logiques territoriales, vont peu à peu se dissocier des contraintes exercées par le milieu naturel. Les savoir-faire vont alors évoluer.

Deux logiques complémentaires d'évolutions s'observent :

Avec la création des manufactures, les produits dépassent en nombre ce qu'un artisan seul peut fabriquer, mais ils sont encore fabriqués à la main par des ouvriers qualifiés. Cela concerne certains secteurs d'activité comme l'horlogerie, la tapisserie, la teinturerie, l'armement ou la céramique. Les manufactures vont utiliser des semi-produits, matériaux ou composants qui proviennent des quatre coins du monde. Dans les Manufactures Royales les

objets fabriqués visent la performance et l'exception, misant sur un modèle de conservation de l'objet, apparenté à une œuvre. Ce statut leur confère un caractère unique et des valeurs propres aux objets manufacturés (authenticité, préciosité, unicité, etc.).

Dans d'autres secteurs d'activités, un modèle de production de masse s'installe. La technique évolue rapidement. La production ne se fait plus à la main par des ouvriers qualifiés, mais par des ouvriers spécialisés sur un segment précis de la production. La centralisation, la mécanisation et la standardisation s'intensifient. À la fin du XIX^{ème} siècle, cette installation progressive d'un modèle de production de masse va désolidariser la ville de ses *liens matériels* avec l'agriculture et l'industrie ; ce qui aura pour effet d'engendrer divers problèmes d'ordre écologiques [BARLES, 2005]. Dans le même temps, de nombreux facteurs jouent en défaveur des pratiques de réemploi qui étaient encore relativement bien intégrées au paysage constructif. Les chiffonniers et autres récupérateurs, qui jouaient encore une part importante dans les activités sanitaires et productives de la ville en valorisant les déchets sous forme de semi-produits ou de produits, indispensables au fonctionnement urbain.

2.1.3 De l'artisanat à l'organisation industrielle.

2.1.3.1 *Une accélération progressive et un découpage rationnel des séquences de fabrication.*

L'artisanat utilise depuis longtemps des marchandises venues d'autres pays, voire d'autres continents, comme en témoignent les routes de l'encens, de la soie, des épices... Mais dès la fin du XVIII^{ème} siècle, l'arrivée de la mécanisation va progressivement modifier l'organisation des structures productives. L'artisan maîtrisait une grande partie du cycle de vie de l'objet : création, fabrication, vente (Figure 1). En raison de leur proximité avec les fournisseurs, ou les clients, ils prenaient éventuellement en charge la gestion des approvisionnements, la réparation, la maintenance et la vente. Dans la nouvelle organisation industrielle, les concepteurs se chargent du dessin, les ouvriers spécialisés se concentrent sur la fabrication, et les vendeurs s'occupent de la distribution. Chacun, se concentre sur une tâche spécifique, dans la chaîne de valeur (Figure 1). Cette représentation est schématique, car il arrive que les concepteurs et les ouvriers dialoguent afin de faciliter les opérations de conception ou de fabrication. Ainsi, les rôles ne sont pas complètement étanches, mais cette nouvelle organisation, hautement séquencée va modifier la répartition des rôles. La géographie des processus de production en sera grandement modifiée, pour céder la place à un nouveau découpage spatial des modes de production, qui repose sur la performance économique. Avec l'augmentation des distances de transport et le changement de régime énergétique, le lien historique qui unissait l'environnement construit à l'environnement naturel va progressivement se fracturer. L'industrialisation est un processus non linéaire dans lequel intervient des changements successifs qui ont transformé en profondeur l'organisation des systèmes de production ainsi que le rapport au milieu physique.

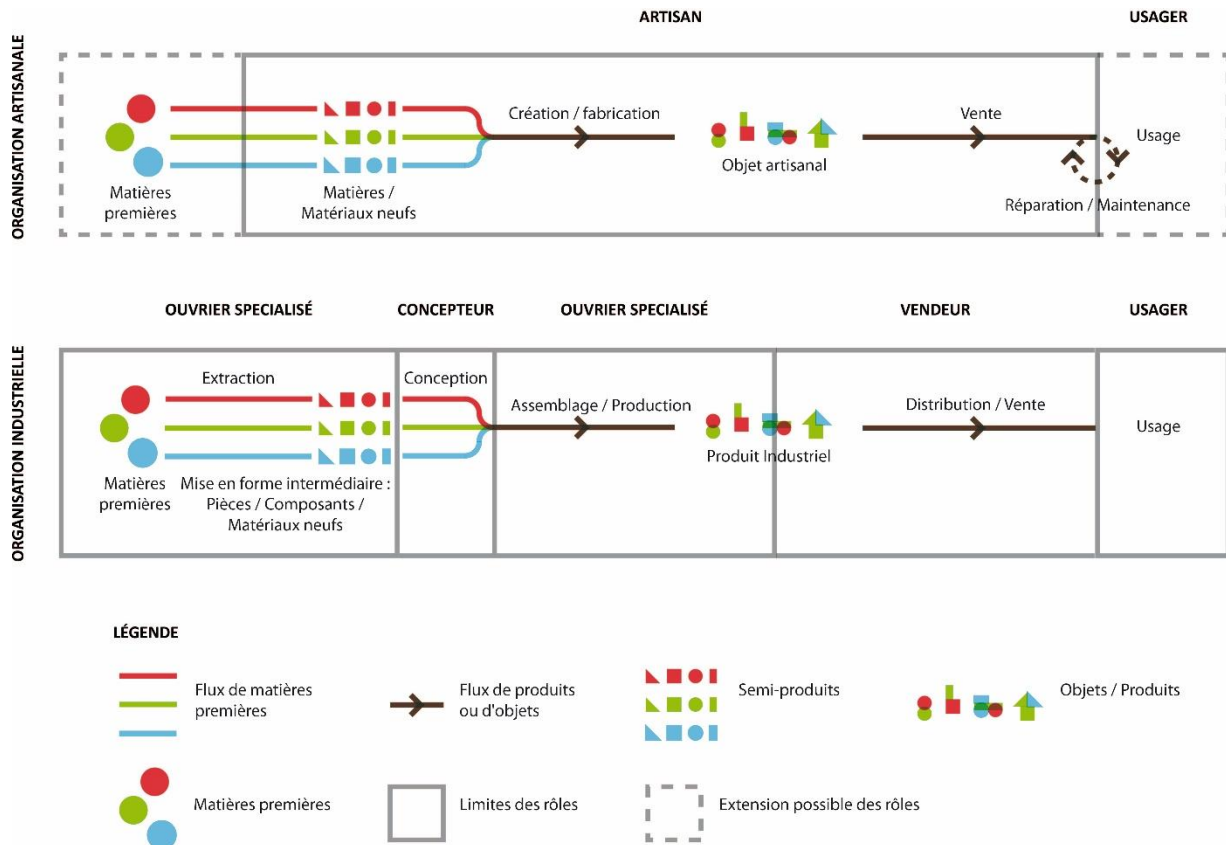


Figure 1 : Organisation artisanale et organisation industrielle : distribution des rôles dans la chaîne de valeur.

Plusieurs facteurs caractérisent le bouleversement productif des premières révolutions industrielles : l'augmentation sans précédent de la productivité avec l'arrivée de la mécanisation, l'accès à de nouvelles sources d'énergie abondantes et peu chères (charbon, pétrole, électricité), l'augmentation des distances de transport et l'arrivée de nouvelles technologies (diffusion de la connaissance et communication). Cependant, le passage des modes de production traditionnels à une société industrielle ne s'est pas fait immédiatement, ni dans le temps, ni dans l'espace. L'industrie va d'abord émerger en Europe puis se déployer progressivement dans le reste du monde en fonction des contextes sociaux, économiques, culturels ou naturels [MUMFORD, 1934].

Le passage d'un modèle artisanal intégré vers un nouveau modèle dit industriel, va considérablement intensifier la centralisation des besoins en matière première et son corollaire, la nécessité de distribuer les produits sur une plus grande échelle. Cette configuration inédite, transforme notre rapport aux matériaux. La chaîne de production des objets du quotidien s'allonge et se découpe progressivement : la matière extraite est préparée pour satisfaire aux exigences de l'évolution de l'outil de production ; puis, elle est calibrée pour faciliter le passage dans toutes les étapes des chaînes de marchandisation [TSING, 2004]. Celle longue chaîne de transformations implique une série de mises en forme intermédiaires qui permettent le passage de la matière au matériau. D'abord pour garantir ses propriétés et assurer la confiance entre les acteurs ; ensuite pour correspondre aux procédés de fabrication, aux moyens de transport et de stockage qui permettent leur acheminement jusqu'aux lieux de consommation.

Pour faire face à la complexité croissante du système et des objets techniques, une nouvelle organisation se dessine. Le cœur de l'action humaine n'est plus lié à la maîtrise des processus de transformation de la matière, mais à la structuration d'un processus plus large : « *Le concept de complexité est donc essentiel à la civilisation technologique, puisque l'Homo Faber a déplacé peu à peu son rôle depuis la fabrication d'objets unitaires, travaillés à la main : l'outil, l'ustensile, etc., vers l'idée d'agencement ou de combinatoire de parties simples, d'éléments, dont les propriétés transcendent celles de ces éléments : le tout est plus grand que la somme de ses parties.* » [MOLES, 1969] De nouvelles tâches font leur apparition, pour permettre aux matériaux de circuler dans le système. L'extraction, la conception, la production et la distribution deviennent des étapes séparées dans le temps et dans l'espace. La phase de conception va elle aussi suivre cette trajectoire. En sélectionnant les matériaux issus des processus de transformation industriels, le concepteur se mue en prescripteur, ce qui l'éloigne petit à petit de l'origine, de la mise en œuvre ou de l'usage des matériaux qu'il sélectionne. Cette structuration résulte d'un découpage rationnel des activités, l'organisation scientifique du travail, en vue d'accroître la productivité et les performances du système (Fordisme, Taylorisme, Toyotisme, etc.). Cette complexité est rendue possible, entre autres, par l'apparition de la précision mécanique, la généralisation des référentiels normalisés et par la métrologie. Il devient alors possible de dissocier les différentes phases de production de l'objet et de les rendre compatibles : « *Ce déplacement est devenu manifeste depuis la découverte de la précision mécanique, c'est-à-dire d'un système de normes métriques universelles, traduit par des cotes au millième de millimètre près par exemple, autorisant l'assemblage de pièces disparates fabriquées par des individus complètement indépendants, s'ignorant les uns les autres et ne considérant que le cahier des charges ou le dessin industriel remis à l'atelier d'exécution à Hambourg, à Chicago ou à Pékin, pour se trouver ensuite assemblés dans un processus de chaînes de montage, situé en un lieu géographique opportun* » [MOLES, 1969].

L'activité de conception devient une spécialité dissociée des étapes de fabrication, éloignant de fait celui qui crée et celui qui fait. Même si le *design* naît dans une certaine proximité avec l'artisanat, il va s'en dissocier [GUIDOT, 2004]. Le mouvement *Arts and Craft*, développe une perception idéalisée de l'organisation productive en réaction au modèle industriel¹, perçu comme aliénant, qui est en train de se dessiner à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle en Grande Bretagne. De ce fait, une place importante est donnée aux savoir-faire traditionnels, à l'innovation technique et artistique et à la qualité de vie des travailleurs, dans l'espoir de proposer un système plus vertueux. Cependant, la rationalisation des processus de production fondés sur la performance économique va gagner du terrain et se singulariser par un découpage de plus en plus affirmé des séquences de production. La relation étroite qui liait le milieu, le fabricant et la production se distingue puis se distend. Le développement toujours croissant de matériaux et procédés permettant la production par moulage (acier, béton, verre, polymères...) participe à alimenter la croyance que le registre des formes est sans réelle dépendance avec le matériau. Cette croyance est connue dans la littérature sous le nom d'hylémorphisme [INGOLD, 2013]. Le matériau, réduit à l'état de matière, peut alors prendre

¹ Les personnages les plus représentatifs de ce mouvement sont William Morris et John Ruskin, tous deux défenseurs de la classe ouvrière et contestataires du mouvement industriel en train d'émerger [GUIDOT, 2004]. Pour faire face à l'arrivée massive de produits standardisés de moindre qualité ainsi qu'aux conditions de travail difficile des ouvriers, le mouvement *Arts and Craft* revendique une place prédominante de l'art et de l'artisanat dans la fabrication et dans la conception des objets du quotidien.

toutes les formes imposées. L'extraction, la préparation, la conception, la fabrication et la distribution deviennent des étapes distinctes sur le plan géographique et temporel. Il devient techniquement faisable de penser la production en amont, de manière relativement autonome du référentiel territorial. La matière est extraite en un lieu différent de la fabrication, quant au produit, il est pensé de manière abstraite, souvent loin des lieux d'extraction, de fabrication et de distribution [MOLES, 1969]. La production mécanisée, par sa nature, suppose une certaine distance entre le concepteur, l'outil de fabrication et les matériaux. Le rapport à la main se fait plus discret, réservé aux espaces dont la mécanisation s'avère trop complexe ou peu rentable. De ce fait, l'artisanat se cantonne dans des niches difficilement atteignables par les objets industriels produits en série. Il se crée alors une relation nouvelle à la matière : entre le matériau et l'Homme apparaît une tierce entité, la machine. Cette dernière permet une précision inégalée ainsi qu'une régularité inaccessible à la main humaine. En contrepartie, elle exige des matériaux calibrés (les semi-produits) et fournit des pièces et composants standardisés qui peuvent être assemblés avec des taux de complexité variables dans des ensembles techniques hétérogènes [MOLES, 1969]. Entre le matériau et le produit sériel, se dessine le processus de conception. Lorsque les matériaux et les procédés changent, le processus de conception joue un rôle d'articulation de la production, avec d'une part des stocks virtuellement infinis et d'autre part, des produits reproductibles à volonté. L'avènement de l'industrie du moulage avec l'apparition de la bakélite, du béton puis des polymères artificiels, facilite considérablement la reproductibilité technique des produits et renforce cette tendance : *« L'avènement récent des industries de moulage et de matière plastique dans lesquelles la précision est rapportée à l'idée du moule et liée techniquement et économiquement à celle de multiplicité des éléments, a été le second caractère essentiel de cette tendance de la civilisation technologique à dériver de l'objet simple vers l'organisme, l'assemblage à caractère combinatoire. En effet, il semble que la grande nouveauté de la technologie moderne soit l'apparition, de plus en plus insistante, de systèmes combinatoires dans lesquels un même répertoire de pièces peut se trouver assemblé de plusieurs façons distinctes avec des taux de complexité structurelle voisins pour satisfaire à des buts différents »* [MOLES, 1969]. Comme l'existence des semi-produits, celle des composants et leurs combinatoires posent la question de leurs démontabilités afin de prolonger leur utilisation. Leur niveau d'atteinte lors d'un démontage doit respecter un ordre d'usure estimé [LE COQ, 2007], au risque d'augmenter les heures de main d'œuvre et de rendre plus onéreuse la réparation que le changement. Or le modèle industriel finit par se baser sur un renouvellement rapide des produits.

D'après Abraham Moles (1969), le concepteur opère dans un système à caractère combinatoire. Son rôle est de dessiner des produits en sélectionnant sur catalogue des semi-produits ou des composants déjà mis en forme, prêts à être intégrés dans un ensemble plus ou moins complexe. Le processus de conception est un agencement de d'éléments préfabriqués (pièces, composants, semi-produits), modifiée par un processus de production en vue de répondre à une fonction prédéterminée par la conception. Selon Bruno Latour, *« Le produit est le résultat d'une somme, celle des additions des fonctions, liée aux méthodes de conception »* [LATOUR, WOOLGAR, 1979].

2.1.3.2 Le produit, l'objet, l'œuvre.

Avec l'arrivée de l'organisation industrielle, les objets artisanaux commencent à se distinguer de ceux qui sont fabriqués industriellement. Le terme de produit fait son apparition. L'objet, porte désormais une nouvelle identité : n'étant plus façonné par la main, il véhicule l'esthétique que lui procure les différentes étapes de transformation mécanisées. D'abord parce que les semi-produits sont standardisés, ensuite parce que les processus de transformation sont développés à des fins de reproductibilité technique des objets. Le rôle du créateur industriel est double : il consiste à solutionner des problèmes techniques de manière rationnelle et à faire preuve de créativité en tenant compte des facteurs culturels liés à l'usage des objets produits industriellement. C'est notamment pour cette raison que de nombreux produits industriels, pourtant réalisés avec des procédés nouveaux, étaient conçus et pensés comme des copies d'objets anciens afin de correspondre aux goûts et aux usages de l'époque. Une première distinction peut se dessiner, entre le produit, l'objet et l'œuvre même s'il existe tout de même des exceptions (des œuvres reproductibles à l'infini (par exemple Marcel Duchamp, Andy Warhol), des objets de design devenus œuvres (par exemple, des produits d'époque devenus iconiques). Dans son travail de doctorat, Anne Béranger (2011) dresse une distinction subtile entre ces notions pour les mettre en relation avec leurs usages et leurs modalités de représentation : « *Pour résumer, les activités de conception, de design et de création ont en commun une finalité matérielle : le produit, l'objet, l'œuvre.* » [BERANGER, 2011]. Toutes les professions qui font usage de la matière à des fins créatives (artistes, artisans, architectes, ingénieurs, designers, etc.) ont recours à des démarches de conception plus ou moins méthodiques [PERRIN et al. 1995], qui varient selon les acteurs ou les domaines d'action : les matériaux, les produits, les bâtiments ou les infrastructures.

La conception est un processus séquencé et planifié qui a recours à des moyens industriels en vue de développer des produits standardisés, fabriqués en série. Le produit, circule sous différentes formes, d'abord des semi-produits standardisés, façonnés par la machine avant de devenir des produits-finis. Le design dans sa signification francophone, repose davantage sur une démarche, qui oscille entre conception et création, il utilise des moyens industriels ou artisanaux. Anne Béranger le qualifie comme « *un trait d'union* » entre conception et création. Enfin, viennent les démarches personnelles (ou potentiellement collectives), dans lesquelles on trouve l'artisan, l'artiste ou le créateur qui réalisent des objets en petite série ou des œuvres à caractère unique. Contrairement aux objets ou aux ustensiles, dont la création est essentiellement centrée sur l'usage, les œuvres ont une forte valeur symbolique et donnent une place importante à l'auteur. Elles sont souvent produites en exemplaire unique, façonnées à la main par l'artiste. À ce stade il est possible d'opérer une distinction entre outil et machine. Là aussi la distinction n'est pas définitive, certaines machines, plus flexibles, sont qualifiées de machine-outil. L'outil a un caractère habile, adapté à la pièce unique, à la main ou au « *matériau de rencontre* » ; alors que la machine se destine à la production mécanisée. Elle utilise des semi-produits, des « *matériaux sur-mesure* » [BRECHET, 2013], compatibles avec la production standardisée.

L'objet, le produit et l'œuvre font appel à des notions d'usage et d'utilité qui diffèrent [BERANGER, 2011]. L'objet artisanal, fabriqué en petites série est en relative adéquation avec la demande locale, on le fabrique car il y a un besoin exprimé. L'artisan va rarement s'encombrer de stocks superflus si la demande n'existe pas, d'ailleurs une grande partie de la

fabrication artisanale se fait sur demande, voir sur-mesure. Le produit, quant à lui, repose sur une anticipation des besoins : il est fabriqué en grande quantité dans des lieux de production centralisés, souvent dissociés des foyers de consommation. La logique n'est donc pas la même, il ne répond pas forcément à un besoin exprimé localement, mais appuyé par le *marketing* et la publicité, il est susceptible de chercher à créer le besoin dans l'objectif d'écouler les stocks. La conception du produit, va chercher à optimiser les coûts, elle repose sur des études de marché qui parient sur la capacité du produit à se vendre. Il cherche donc à séduire l'utilisateur potentiel par une esthétique souvent renouvelée ou un prix d'achat très attractif. Le produit et l'objet ont un caractère utilitaire et répondent à une fonction. L'œuvre, plus autonome, se distingue entre autres par son originalité, sa valeur esthétique, son unicité, sa valeur d'auteur. Elle possède une forte valeur symbolique, culturelle, historique, un pouvoir subversif, critique ou innovant qui lui donne sa valeur en tant qu'objet d'art. Certains objets (ou produits) conservent parfois un usage en dépit de la perte de leurs fonctions d'origine. Lorsque la notion de propriété est très prégnante, il y a patrimonialisation et désir de transmission en héritage. C'est le cas de certains objets anciens, qui sont soigneusement conservés. Transmis d'une génération à l'autre ils acquièrent de nouvelles valeurs : des valeurs de remémoration, des valeurs patrimoniales, des valeurs historiques, des valeurs d'ancienneté [RIEGL, 1903].

2.1.3.3 La forme et la fonction des produits

Avant la seconde guerre mondiale, de nombreux espoirs accompagnent le développement technologique, synonyme de progrès. Le fonctionnalisme et le modernisme en sont les expressions et prônent un renouveau de l'esthétique et des modes de production. Résolument tourné vers l'avenir, l'idéologie du modernisme instaure une rupture avec l'histoire, qu'il s'agit de dépasser en réaction « aux formes du passé ». Les formes courbes et complexes de l'art nouveau qui puisent leur inspiration dans la nature ne résisteront pas face à l'efficacité des lignes rationnelles, épurées², stylisées et tendues du modernisme³.

Cette approche à la fois rigoureuse et rationnelle, permet de réduire les coûts, et de démocratiser les produits fabriqués en série. Elle repose sur une perception techno-centrée de la conception, et suppose que le produit soit réductible à la somme de ses fonctions [LATOUR, WOOLGAR, 1979]. À cette époque, différents processus de production cohabitent, l'artisanat n'a pas disparu, mais devient minoritaire. La célèbre maxime de Louis Sullivan « *Form follows function* » (la forme suit la fonction) exprime parfaitement le changement de modèle productif qui est à l'œuvre entre la fin du XIX^{ème} et le début du XX^{ème} siècle [Sullivan, 1896]. Dans la perspective fonctionnaliste, la rationalisation de la production se double d'une rationalisation des produits à une époque où la définition du design industriel se dessine.

« *Form follows function* » par cette assertion, Louis Sullivan (1896) suppose la préexistence de la fonction sur la mise en forme et transpose le principe productif Fordiste dans l'espace

² Le courant puriste, en quête de perfection, estime que seule les formes « pures » pensées pour le fonctionnement optimal de la machine produisent une « beauté » authentique [OZENFANT, JEANNERET, 1918]. Plus adaptées aux exigences des procédés industriels, les formes épurées permettent d'accélérer les cadences de production et de démocratiser les biens de consommation.

³ La célèbre expression popularisée par Mies Van Der Rohe, « *Less is more* » (Moins c'est plus) témoigne de cette volonté de dépouillement et de rigueur : il faut aller à l'essentiel.

urbain. Le rôle du concepteur est de dessiner la forme la plus simple, la plus performante et la moins chère pour répondre à une ou plusieurs fonctions exprimées par le cahier des charges. La forme et le procédé de fabrication ne font plus qu'un. La matière est supposée « *passive, disponible pour une prise de forme* » [DEBAISE, 2004]. En quelque sorte la matière va « *se liquéfier* », ou se « *fluidifier* » afin d'alimenter le flux incessant de la production, pour se répandre ensuite dans les canaux des chaînes de transformation et de distribution [BAUMAN, 2006]. Il y a comme une injonction contradictoire : la matière se standardise pour mieux changer de forme. L'histoire et l'ornement sont évacués, pour que l'objet soit l'expression d'un renouveau à l'image du monde moderne qui se dessine. Epuré du fardeau de la décoration, la mise en forme devient l'expression de la fonction elle-même, une forme au service de l'usage anticipé lors du processus de conception [LOOS, 1908]. La matière est domestiquée sous les traits d'une esquisse destinée à lui conférer une fonction déterminée. Le produit est dessiné en vue de répondre à une fonction souhaitée, et c'est précisément cette fonction qui le rend utile. Celui-ci est irréprochable car il est « *pensé pour* », dessiné à dessein. L'usage et la vie de l'objet sont donc programmés. Aussi longtemps que la forme remplit la fonction pour laquelle elle a été pensée, conçue, dessinée, fabriquée, elle est perçue comme une forme utile. Mais lorsque la forme perd son usage initial, son statut de produit se retrouve menacé d'un glissement vers le statut de déchet. La fonction assure en quelque sorte le ciment qui lie la mise en forme à son usage ; dès que la fonction n'est plus remplie, la forme devient obsolète. Il existe cependant quelques rares exceptions où l'objet perdure malgré la perte de ses fonctions. Par exemple, lorsque ce dernier est doté d'une charge émotionnelle ou symbolique forte, lui permettant d'être utile comme objet porteur de mémoire, comme objet décoratif ou comme objet de collection. Il est alors « *sauvé* » par la représentation qu'il engendre dans la perception des usagers.

La notion de forme reste cependant versatile, et doit être abordée dans une perspective temporelle. La forme n'est pas figée, elle s'inscrit en creux dans un processus « *la matière se donne toujours déjà formée, ou elle se donne comme son propre processus de formation (physique, chimique, biologique, technologique, etc.).* » [LINDBERG, 2016]. Il faut la percevoir comme une expression temporaire, dont le potentiel fonctionnel et formel évolue avec le temps et le contexte. Dans le travail de la forme il y a toujours un avant et un après, au centre, c'est la forme en mouvement, celle qui de manière indépendante (usure et évolution des propriétés) et dans son rapport à l'individu (les dimensions culturelles de l'usage), dessine des « *lignes évolutives temporelles* » [SIMONDON, 1968]. Les différentes fonctions possibles au cours du temps sont comme un enchevêtrement de périodes plus ou moins longues, relatives aux degrés d'usure de cette forme et aux usages successifs et potentiels. Dans cette perception, ce n'est pas un cycle qui succède à un autre (ce qui revient, d'une certaine manière à une perception linéaire), mais plutôt un enchevêtrement complexe et continu de plusieurs cycles non synchronisés « *La forme devient et s'invente, non pas ex nihilo, mais depuis un fond constitué par d'autres processus de formation.* » [LINDBERG, 2016].

C'est dans ce cadre que se posent les fondements de ce qui deviendra plus tard la création industrielle et le design.

2.1.3.4 Conception et design

Le design commence peu à peu à construire son identité autour des problématiques de la création et de l'esthétique industrielle. Des designers comme Raymond Loewy qui publie son ouvrage « *La laideur se vend mal* » (1953), Roger Talon ou Jaques Viénot qui édite « *les lois de l'esthétique industrielle* » (1952) [LE BŒUF, 2006], pour ne citer qu'eux, sont représentatifs de ce courant centré sur l'émergence de la création industrielle. Le design n'aura cependant pas tout à fait la même signification selon les pays. « *En français, le terme [Design] n'a cependant pas tout à fait le même sens qu'en anglais, où, sans autre précision, il concerne un certain état d'esprit, une manière d'aborder la « conception » d'un objet nouveau. Ainsi les Anglo-Saxons l'utilisent-ils aussi bien pour désigner les produits de l'artisanat que pour ceux de série, fabriqués en usine [...]. Pour préciser le secteur auquel le terme se réfère, les Anglo-Saxons lui adjoignent, de toute manière, un adjectif, et parlent alors de « product design », de « graphic design », de « shelter design », etc.* » [GUIDOT, 2004]. Le terme « design » recouvre plusieurs approches de conception, et le terme « création industrielle » en France se distingue de « *l'engineering design* » en Angleterre. Deux grands courants semblent se dessiner dans les champs du design, l'un poussé par la rationalité technique (*engineering design* et design industriel) et l'autre par la démarche d'auteur : la création Industrielle. D'une manière générale les champs du design sont très larges et définis par leur transversalité ; ils touchent à tout ce qui concerne la création d'un produit nouveau.

La première définition officielle du design se focalise sur la vocation industrielle du design. Elle est proposée par le Conseil International des Sociétés de Design Industriel (ICSID) : « *Le design industriel est une activité créatrice dont le but est de déterminer les propriétés formelles des objets produits industriellement. Par propriétés formelles, on ne doit pas entendre seulement les caractéristiques extérieures, mais surtout les relations fonctionnelles et structurelles qui font d'un objet ou d'un système d'objet une unité cohérente, tant du point de vue du producteur que du consommateur* » [MALDONADO, 1969]. Selon cette définition, le rôle du designer est tourné vers l'industrie et donne une importance considérable aux questions de mise en forme. L'objet technique est donc pensé comme une finalité. Il est mis en forme pour répondre aux fonctions qui ont été figées lors de sa conception. Dans un entretien daté de 1968, Gilbert Simondon critique déjà cette approche séquentielle de la vie de l'objet technique « *L'objet technique, au point de départ, est un objet qui, d'abord, n'est pas fait pour se survivre dans l'une de ses parties. [...] Si on traite l'objet, au moment où il devient dichotomique, comme un objet où tout s'use en même temps et doit être jeté, on commet une erreur culturelle fondamentale.* » [SIMONDON, 1968] Il préconise une approche qui tienne compte des « *lignes évolutives temporelles* » qui modèlent les séquences de vie d'un objet technique.

Simondon (1968) met en lumière la nécessité de penser la dimension kaléidoscopique de l'objet technique et la nécessité de faire coïncider différentes attitudes pour apprivoiser l'évolution des objets dans le temps : « *Voilà, je crois, ce qu'il faudrait remettre en place, une saine connaissance du fait qu'il ne s'agit pas de dire seulement « objet technique » globalement ; « objet technique », c'est soit un objet technique commençant, soit un objet technique à l'étape dichotomique, comme la Ford « T », où il essaie de s'adapter à tout, soit, enfin, un objet de réseau. Et ce n'est pas avec les mêmes attitudes, ce n'est pas en demandant la même utilisation, que l'on doit aborder chacune de ces trois étapes. Replacer historiquement l'objet technique, apprendre aux utilisateurs (et aussi aux producteurs qui, quelquefois,*

l'ignorent), qu'il faut être complètement dans le présent historique, ce serait la tâche culturelle la plus importante à laquelle je voudrais arriver. » [SIMONDON, 1968]

Pour le concepteur, les contraintes de conception s'expriment dans le cahier des charges. Ces contraintes fonctionnelles et économiques peuvent être contradictoires et nécessiter un arbitrage, de manière à faire émerger les meilleurs compromis possibles. La réduction des coûts de production sur l'ensemble de la chaîne de valeur est alors une préoccupation fondamentale. Les aspects environnementaux sont encore peu présents dans l'imaginaire collectif et passent au second plan : la valeur du service rendu par le produit va s'affirmer comme une priorité.

2.2 Description du système industriel linéaire.

L'arrivée progressive de nouvelles technologies, accompagnée d'un changement de régime énergétique, a peu à peu transformé les structures productives. La reconfiguration des modèles de production fondés sur la centralisation des activités d'extraction, de fabrication et de distribution entraîne un séquençage de la chaîne de valeurs. Les objets qui circulent se retrouvent durablement modifiés et conçus selon de nouvelles logiques. Nous allons explorer dans ce chapitre en quoi cette nouvelle organisation de la production se détache des modèles matériels antérieurs et quels en sont les avantages et les limites.

2.2.1 La place des matériaux dans le système industriel linéaire.

La notion de matériau se distingue de la matière par sa mise en forme intermédiaire ou son conditionnement en vue d'un usage identifié. En effet, la mécanisation ayant entraîné une segmentation du processus de transformation des matériaux, les formes se sont standardisées pour devenir des sous-produits. Le matériau est calibré pour correspondre aux exigences du processus de fabrication : mise en forme intermédiaire, assemblage et logistique. La définition donnée par le CNRTL, montre que le matériau est l'aboutissement du processus de fabrication : « *Type de matière qui entre dans la construction d'un objet fabriqué* ». La matière étant définie comme « *Substance dont sont faits les corps perçus par les sens et dont les caractéristiques fondamentales sont l'étendue et la masse* » (CNRTL, le 02/05/2020). Le processus de fabrication, représente la somme des opérations de transformation en vue d'obtenir un résultat : le semi-produit ou le produit fini. À ce stade, un éclairage sur la notion de conception est nécessaire, car le produit est le résultat d'un ensemble de décisions de conception qui cherche à rassembler différents points de vue : d'usage, de maintenance, de marché, et d'environnement. La fabrication quant à elle, se met au service des décisions prises au cours de la phase de conception. Par conception, on entend ici, toute la chaîne de décision technique et créative, qui influence le processus de fabrication en vue de rendre tangible et constructible les produits finis ou semi-finis (appelés aussi semi-produit).

Plusieurs échelles complémentaires cohabitent lors de la sélection d'un matériau : de la forme à l'échelle microscopique, c'est-à-dire la microstructure de la matière, à la forme à l'échelle macroscopique, issue du ou des procédés de fabrication. La sélection des matériaux est donc très liée à un processus de sélection des formes ou des contraintes de mises en forme. Dans son ouvrage, *material selection in mechanical design*, Michael F. Ashby (1992) positionne la forme comme étant à l'intermédiaire entre le matériau, le procédé, et la fonction [ASHBY,

JOHNSON, 1992]. La notion de forme, dans ce cadre, est donc principalement centrée sur le résultat d'un processus de fabrication répondant aux exigences des contraintes fonctionnelles exprimées dans le cahier des charges. Cela rejoint les propos d'Yves Bréchet (2013) dans son cours inaugural au Collège de France, où il définit trois stratégies d'étude des matériaux : l'étude des microstructures, des architectures (entendu sous le sens de matériaux architecturés), et des combinaisons. Du plus simple au plus complexe, il propose quatre catégories de matériaux impliquant des modes de transformation différents [BRECHET, 2013]:

- les « *matériaux de rencontre* »,
- les « *matériaux optimisés* » sont des « matériaux de rencontre » améliorés en particulier grâce à des approches de modélisations multi-échelles de l'atome au composant,
- les « *matériaux en compétition* » issus d'une sélection ou d'un compromis,
- les « *matériaux sur mesure* » élaborés en fonction d'un cahier des charges, il cite en particulier les matériaux architecturés multifonctionnels et les matériaux bio-inspirés.

Dans certains cas, la recherche accrue de nouvelles performances soulève des enjeux paradoxaux (Robuste et léger, isolant et conducteur, etc.). De ce fait, les contraintes fonctionnelles peuvent s'avérer contradictoires et ne peuvent être solutionnées uniquement par le matériau : « *face à une demande accrue pour les solutions multifonctionnelles, la stratégie classique des métallurgistes pour améliorer les propriétés, par un perfectionnement des microstructures, atteint ses limites : très souvent les fonctions ne sont pas données uniquement par les propriétés, mais par un entrelacs entre la forme, les propriétés et les associations possibles de matériaux⁴* » [BOUAZIZ et al. 2008]. Afin de répondre à ces injonctions contradictoires, la stratégie consiste à combiner différentes échelles, différentes formes et différents matériaux.

Dans la logique des « matériaux de rencontre », on peut admettre deux attitudes :

Dans la première c'est l'information existante (entendue comme le résultat d'un processus de mise en forme ou de formation) qui guide le processus de conception vers la fonction souhaitée (ce que Tim Ingold (2013) qualifie de rapport de force).

Dans la seconde, c'est le projet qui crée la rencontre de manière opportuniste, car il s'adapte à ce qui est déjà-là.

Par la rationalisation des mises en forme, le modernisme instaure une rupture profonde avec cette habitude, il y a un véritable renversement du processus de conception. Cette attitude envers la matière écarte de fait, toute possibilité d'usage des *matériaux de rencontre*, pourtant ancrés historiquement dans les habitudes constructives. Les matériaux de rencontres étaient des entités avec lesquelles on devait instaurer un dialogue, faire un compromis constructif au sein d'un projet. Ceci exige « *une attitude de négociation* » avec l'environnement matériel, une posture créative pour trouver un sens et un usage aux matériaux qui se donnent « *déjà informés* » [LINDBERG, 2016].

⁴ « *Facing increasing demands for multifunctional solutions, the classical strategy of the metallurgist to improve properties, using microstructural refinement, reaches its limits: very often the function is not provided by the property only, but by the interplay between the shape, the properties, and possible association of materials.* » [BOUAZIZ et al. 2008] traduction personnelle.

Poussé par une importante croissance économique, matériaux et produits se développent à grande vitesse. En particulier, le monde des matériaux va considérablement se diversifier, ces « *matériaux en compétition* » rendent la sélection plus délicate et placent le concepteur face à « *un hyper-choix des matériaux* » [BRECHET, 2013]. L'extrême diversité des références disponibles impose une évolution des modalités de sélection. Le concepteur sélectionne désormais des matériaux dont les références sont disponibles sur catalogue.

En particulier, de nouveaux matériaux font leur apparition avec le développement de la chimie de synthèse. Les polymères artificiels issus de la pétrochimie se développent rapidement. Ils sont rapidement adoptés par les concepteurs car ils laissent une grande marge de liberté dans le dessin des produits par leur capacité à être mis en forme facilement. Leurs propriétés permettent de nouvelles applications dans des domaines variés, mais les matériaux vont désormais se développer indépendamment de leurs usages en raison du nombre de mises en forme intermédiaires. De ce fait, l'écart va progressivement se creuser entre les matériaux présents dans la nature et les matériaux mis en forme par la technique humaine, alors transformés loin des lieux dans lesquels ils sont extraits. Leur production va s'intensifier. Les impératifs techniques et économiques de l'industrie guident la conception de produits. Ils induisent des modalités de mises en forme qui contraignent les matériaux à se standardiser pour être compatibles avec les moyens de production industriels : les produits modernes se doivent d'être fonctionnels, esthétiques, reproductibles et peu cher. L'organisation scientifique du travail et la capacité des matériaux à revêtir des formes standardisées sont des leviers qui permettent d'atteindre ces objectifs. Ainsi, les « *matériaux sur mesure* », sont mis en forme pour des besoins anticipés et souvent détachés du projet de produit (parfois inexistant à cet instant). C'est le processus de mise en forme qui produit *l'information* recherchée (la fonction du matériau) et passe avant « *la rencontre* » fortuite d'un matériau *déjà informé*. De ce fait, il y a peu d'adaptation à l'existant : on met d'abord en forme, puis la conception s'approprie ce matériau mis en forme dans le but de le modifier. À titre d'exemple, les matériaux architecturés sont classés dans la catégorie des « *matériaux sur mesure* » [BRECHET, 2013], car leur mise en forme leur confère une fonction et des performances mécaniques particulière recherchées lors de la conception du matériau. Les performances des matériaux sont donc étroitement liées à la mise en forme initiale. Dans cette même catégorie de matériaux, on trouve par exemple les panneaux alvéolaires, les profilés en « U », en « T », en « I », en « H », etc.

Parallèlement à l'arrivée de nouveaux matériaux, émerge un nouveau régime énergétique. Les quantités extraites augmentent de manière vertigineuse pour répondre aux besoins d'une industrie en mutation. Des procédés innovants font leur apparition et permettent d'importants gains de productivité, ce qui contribue à modeler le paysage productif. Les produits fabriqués en série acquièrent une précision inégalée et la capacité de mise en forme se diversifie au même rythme que les applications. Matériaux, procédés et mise en forme, sont les facettes complémentaires qui permettent d'agir sur le monde matériel. Ainsi, deux grands systèmes se mettent à cohabiter avec d'une part le monde des produits et matériaux industriels qui alimentent le rêve de la consommation de masse et de l'objet unique pour tous ; et d'autre part, le monde des objets artisanaux, des œuvres ou de l'artisanat d'art qui perdurent dans des marchés de niche, là où les produits industriels ne se sont pas encore imposés. De son côté, la conception va s'adapter à cette longue évolution historique pour répondre aux exigences d'un système technique en pleine évolution.

2.2.2 Les étapes du système industriel linéaire

À partir du XVIII^{ème} siècle le développement industriel s'est d'abord concentré dans les pays Européens avec l'exploitation du charbon et l'arrivée de la machine à vapeur. L'énergie d'origine fossile va devenir moins chère et plus accessible. Parallèlement les moyens de production vont se développer rapidement et s'automatiser ; entraînant une concentration de la population et des ressources matérielles. Cette conjonction entre le changement de régime énergétique et le développement des machines va permettre l'essor des premiers foyers industriels, puis s'étendre progressivement à travers le monde. L'industrie va alors se supplanter aux schémas productifs traditionnels jusqu'alors, entraînant dans son sillage une centralisation des moyens de production et un changement radical de modèle productif. Dans le même temps, le développement des moyens de communication et du chemin de fer va permettre une exploitation intense des ressources ainsi qu'une réduction significative des coûts et des temps de transport. Ainsi, la géographie des moyens de production va évoluer de pair, se traduisant par une augmentation significative des distances entre les lieux d'extraction, de transformation et de consommation des matériaux. Cette structuration permettra une baisse des coûts de production, notamment grâce à l'extraction intensive et déterritorialisée de la matière et de l'énergie. C'est dans ce contexte que le modèle industriel linéaire va prendre son envol.

D'après le code de l'environnement (article L.110-1-1) le modèle linéaire repose sur les séquences suivantes : extraire, transformer, consommer, jeter (Figure 2). L'extraction se fait dans le milieu naturel, là où se trouve la ressource. La transformation peut être proche ou lointaine du lieu d'extraction. Cette opération a pour but de transformer la ressource naturelle en semi-produit ou en un produit standardisé, compatible avec les moyens de transport et de logistique qui permettront aux industries et aux concepteurs de l'utiliser dans les processus de mises en forme et de conditionnement qui alimentent les processus de fabrication. La consommation, quant à elle, est très souvent dissociée des lieux de conception et de fabrication. C'est l'étape d'usage du produit, en tant qu'objet de consommation, qui finira sa vie dans les filières de gestion des déchets, une fois qu'il sera considéré comme obsolète ou qu'il ne remplira plus la fonction pour laquelle il a été conçu. En fin de vie, le produit est jeté sur le lieu de consommation et ira rejoindre les filières de gestion des déchets. Ces filières sont également centralisées et dimensionnées de manière à absorber un flux de déchets important qui provient des activités d'extraction, de transformation et de consommation. Ce modèle a accompagné les deux premières révolutions industrielles et permis l'essor économique d'après-guerre. En dépassant les premières intentions de reconstruction, l'industrie s'appuie sur le modèle linéaire dans l'objectif de croître sans limites, promettant le plein emploi et la croissance économique.

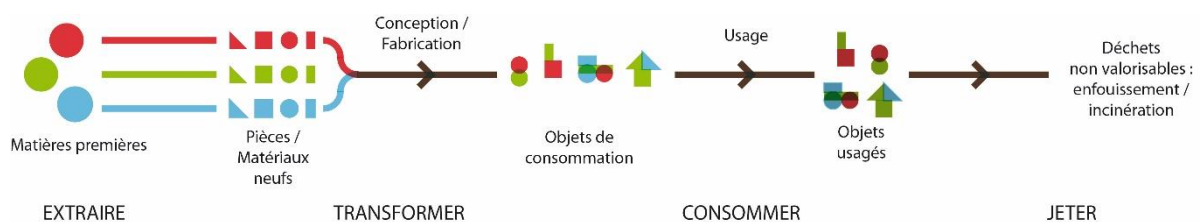


Figure 2 : Schéma du système industriel linéaire défini par le code de l'environnement (article L.110-1-1)

Ce modèle linéaire du système industriel pousse et encourage un modèle linéaire de traitement du produit en fin de vie, du déchet.

2.2.3 Concevoir dans un système industriel linéaire.

En 1984, Danielle Quarante dans son ouvrage « Éléments de design industriel » décrit un projet de design industriel en deux phases : une phase de conception et une phase de réalisation. Chaque phase se termine par des choix et des décisions. Ces décisions deviennent les données entrantes pour les phases suivantes. À la fin de chaque phase, des résultats sont communiqués sous diverses formes. Ainsi la démarche de conception d'un produit est une démarche itérative. Danielle Quarante, rassemble et organise différentes terminologies relevées dans des ouvrages traitant de conception de produit et de gestion de projet⁵.

Dans cette description du projet de design industriel, l'action se concentre sur la conception et la réalisation du produit ; sa distribution et sa fin de vie ne sont pas abordées. Les éléments de décision (Tableau 1, colonne « Réalisation-Exécution ») reposent sur les aspects de coûts et de production. En 2000, une description plus complète est proposée par Nigel Croos [CROSS, 2000]. Il décrit le processus de développement de produit en 4 phases (Figure 3). Les deux premières phases « Motivation Need » et « Creation » se retrouve dans les 2 phases « Conception » et « Réalisation », précédemment décrites par Danielle Quarante. Nigel Croos (2000) ajoute 2 autres phases : une phase « Operation » liée à la distribution et l'usage du produit et une phase « disposal » liée à la fin de vie du produit. Cette évolution montre une prise en compte des différentes étapes du cycle de vie d'un produit dans le processus de conception actuel. Comme Danielle Quarante, les étapes se nourrissent les unes des autres, au travers d'objets intermédiaires de conception (cahier des charges, prototype, maquettes, rapport...). Ces objets intermédiaires de conception ont des caractéristiques différentes en fonction de l'étape de conception [BASSEREAU et al. 2015].

Tableau 1: Terminologies couramment rencontrées pour décrire les différentes phases d'un projet de design industriel [QUARANTE, 1984].

CONCEPTION		RÉALISATION		
Faisabilité	Études préliminaires	Études détaillées	Réalisation-Exécution	Évaluation
Planning stratégique Formulation des principes Recherche préliminaire Information Analyse Analyse conceptuelle Formulation du problème Analyse du problème Définition du problème Étude de marché Exploration Identification et choix des objectifs Praticabilité Pré études	Conception Recherche Propositions d'alternatives Définition Études préliminaires Approches schématiques Exploration Études de solutions de principes Génération de solutions	Mise au point Études détaillées Développement prototypes Spécification Études et développement de programmes Chiffrage et mise au point	Réalisation-Fabrication Planning de production Industrialisation Prix de revient estimatif Prévisions Choix des moyens de fabrication Essais en cours d'exécution Pré-série Série Commercialisation Support après-vente	Vérification Tests Modifications et améliorations Suivi de développement Essais Expérimentations Évaluation Validation

Du déclenchement de l'idée à l'étude de faisabilité, les principales contraintes du projet sont énoncées dans le cahier des charges. Ce dernier se traduit par des contraintes de conception (*design brief*) avec lesquelles le designer devra travailler (nombre d'unités, fonctions remplies par le produit, coûts, éventuellement des contraintes esthétiques ou formelles, etc.). Dans la

⁵ La gestion de projet fait référence aux méthodes de management de projet.

séquence de conception de la Figure 3, le design apparaît tardivement, il est lié aux étapes de création, lorsque la fonction et les besoins sont déjà circonscrits par le commanditaire. Avec ces contraintes en tête, le designer sera relativement libre dans les premières phases d'esquisses. Il commence par élaborer différentes propositions formelles sans véritables contraintes matérielles. Il dessine les premiers volumes, fait des recherches sur la forme, les influences stylistiques, l'univers de la marque, la clientèle cible et se renseigne sur les produits concurrents. Une fois que le produit est plus clairement défini, il passe en phase de développement. La conception s'affine progressivement afin de passer de la première esquisse à un produit qui tient compte des différentes contraintes de coût, d'usage ou de fabrication. La sélection des matériaux entre en scène en vue de répondre aux différents compromis de conception entre le coût et la qualité du produit. À ce niveau une extrême diversité de matériaux et de procédés sont disponibles pour le concepteur. Petit à petit le champ des matériaux va se rétrécir lorsque les différentes contraintes de projet vont se préciser avec l'avancement des étapes de conception [RAMALHETE et al. 2010].

Lorsque la conception est suffisamment détaillée, le produit se concrétise par une phase éventuelle de prototypage ou par d'autres objets intermédiaires de conception (dessins, croquis coté, maquettes, échantillons, etc.). Il est à noter, que le prototype n'intègre pas forcément les matériaux définitifs, mais sert à valider différents aspects des premières étapes de conception : les dimensions, l'ergonomie, l'assemblage éventuel, l'esthétique du produit, le confort, etc. Une fois que les premières phases de recherche et de validation du produit sont réalisées, la question des matériaux et des procédés se précise. Ils seront sélectionnés pour correspondre aux contraintes fixées dans le cahier des charges et permettre la fabrication du produit. Différentes gammes de matériaux sont disponibles et influencent les choix de conception en vue de planifier les étapes de fabrication. Lorsque le produit est finalisé, il passe par des étapes de test et de contrôle qualité pour s'assurer qu'il correspond aux normes imposées par la réglementation. S'il passe avec succès les phases de tests, le produit pourra être mis en fabrication.

En phase de fabrication, les matériaux ont été présélectionnés. Ils seront livrés au rythme des phases de fabrication en fonction des volumes requis ou du nombre d'unités planifiées. Livrés en quantité et en temps voulus, les matériaux arrivent sous la forme de semi-produits prêts à être transformés. Selon l'envergure de la fabrication et la complexité du produit, les lieux de mise en forme et d'assemblage peuvent être particulièrement éloignés les uns des autres. Le concepteur n'interviendra que très peu dans ces différentes phases qui ont été planifiées en amont. Lorsque le produit est fabriqué, il intègre les canaux de distribution pour être vendu à un utilisateur (*Distribution and Operation*). Après une étape d'usage plus ou moins longue, le produit devient obsolète lorsqu'il ne correspond plus à l'usage pour lequel il avait été conçu (ou par différents phénomènes d'obsolescence), il est alors remis aux organismes compétents en matière de gestion des déchets (*Disposal*). Certains éléments pourront éventuellement être récupérés ou recyclés en fonction du contexte dans lequel l'objet évolue en fin de vie.

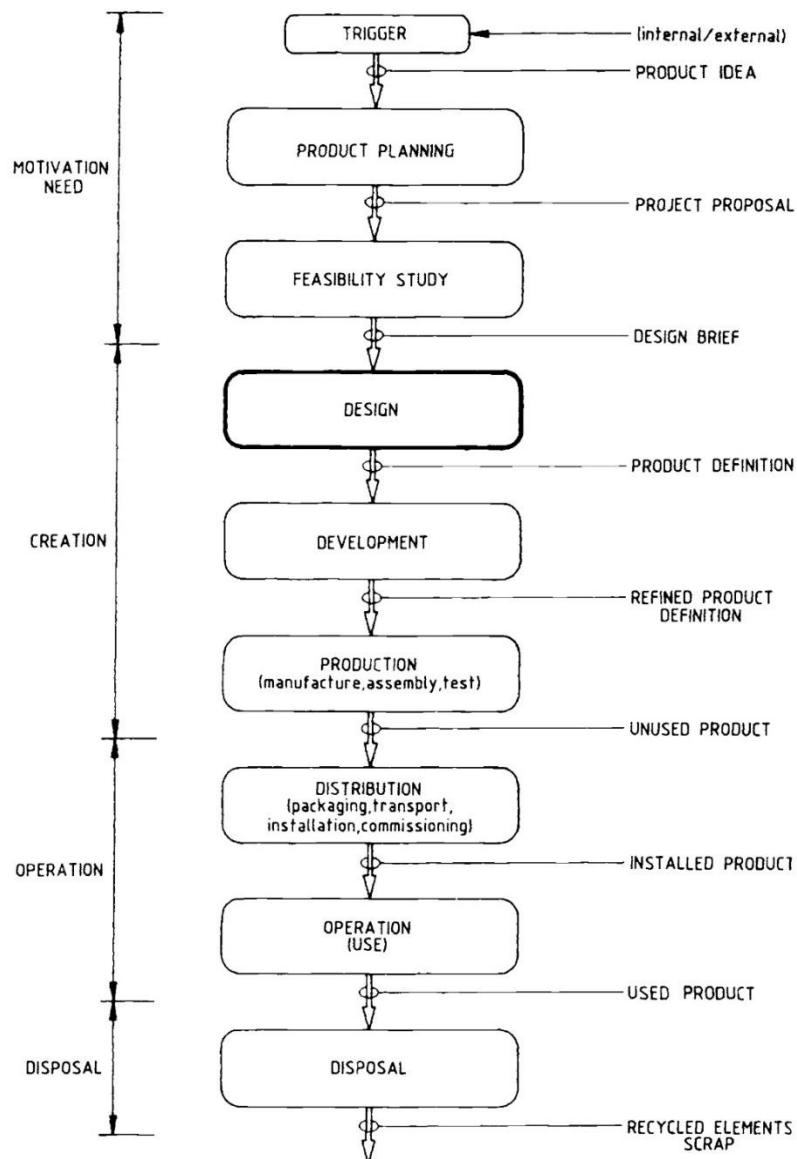


Figure 3 : The product development Process according to British Standard (BS 7000). [CROSS, 2000].

Dans ce cadre, le concepteur opère en amont et s'adapte aux outils, aux matériaux, aux procédés et aux savoir-faire qui sont adaptés au séquençage de l'organisation industrielle linéaire. L'industrie de l'extraction et de la transformation, extrait les matières dans le milieu naturel, puis effectue une première série de transformations pour conditionner et préparer la matière sous forme de semi-produits. Ces semi-produits sont compatibles avec les procédés de transformation industriels et sont disponibles sur catalogue. Les semi-produits sont standardisés et calibrés, ce qui permet un dialogue fluide avec les industries de fabrication et de montage qui cherchent à produire en série pour réduire les coûts. Le concepteur, familiarisé à cet environnement, sélectionne les matériaux et les procédés de transformation de ces semi-produits sur un rapport coûts/performances ou fonction/forme [RAMALHETE et al. 2010]. D'autres critères sont également intégrés concernant les aspects esthétiques, symboliques ou sensoriels des matériaux, mais ce choix arrive généralement au second plan, lorsque la recherche s'affine [BASSEREAU et al. 2015]. Le concepteur peut prescrire ces matériaux, car ils sont prévisibles dans le temps et disponibles à tout moment. Il est alors facile d'anticiper les commandes de matériaux nécessaires en fonction des besoins

de production. Enfin, ces matériaux disposent des garanties juridiques qui servent de socle de confiance à l'ensemble de la chaîne de valeur. Leurs propriétés et leurs qualités sont stables, connues et contrôlées. Ceci rassure le concepteur, l'industriel et le consommateur final. Les matériaux peuvent alors circuler librement dans les canaux de distribution pour être disponibles sur le marché. Après une étape de consommation, l'utilisateur final se séparera du produit pour des raisons d'obsolescence qui peuvent être techniques, culturelles ou technologiques. Les matériaux finiront leur vie dans les filières de gestion industrielle des déchets, en charge du traitement des matériaux en fin de vie (Figure 3).

2.2.4 Produire pour alimenter la croissance et la consommation.

Suite au crash économique de 1929, le chômage explose, la consommation tourne au ralenti et les usines produisent des biens qui ont déjà en grande partie saturé le marché. Même si des systèmes de sobriété sont expérimentés pendant la seconde guerre mondiale pour faire face aux manques d'approvisionnement et aux pénuries, l'optique est à la relance économique. La consommation de produit induit une situation évaluée comme étant vertueuse, mais la machine est en panne. L'extraction, la transformation et la consommation sont des cercles qui s'alimentent en générant croissance et emploi. La production de masse favorise la baisse des prix et permet la démocratisation des biens de consommation. Or, si le produit dure trop longtemps, le marché arrivera à maturité et la demande risquerait de s'effondrer. Dans ces circonstances, réduire volontairement la durée de vie du produit semble être une solution efficace pour alimenter la production et soutenir l'emploi. Si la durée de vie est courte et les produits jetables, la demande reste élevée et continue. Il faut donc induire « un désir permanent » chez le consommateur, en proposant des produits sans cesse renouvelés [LONDON, 1932]. Et sur ce point, l'industrie mise sur la reconception des produits avec pour objectif de réduire volontairement leur durée de vie.

Développer et encourager la consommation de biens durables a toujours existé, en misant sur les critères de qualité, d'hygiène ou de sécurité. Pour encourager la consommation, de nombreux leviers sont possibles, notamment en misant sur des systèmes de valeurs ou de patrimonialisation permettant à plusieurs générations de se transmettre des biens reconnus, en raison de la fiabilité ou de la qualité des objets. Cependant, avec l'introduction de l'obsolescence programmée, l'industrie de masse va négliger ces ressorts pour orchestrer sa propre survie. Ceci se traduira par une stratégie qui vise à augmenter la quantité tout en réduisant la qualité, ce qui permet un renouvellement permanent de biens à courte durée de vie. Selon ses défenseurs, les objectifs économiques et sociaux de l'obsolescence programmée visent le plein emploi, grâce à une production qui tourne à plein régime. Or, la perspective d'accumulation d'objets peu qualitatifs basée sur une utilisation intensive des ressources, va se confronter à ses propres limites : que ce soit pour l'extraction, le transport ou la fin de vie des matériaux. La vitesse de circulation des produits et des matériaux atteint alors son paroxysme pendant les trente glorieuses. L'euphorie économique s'empare des pays occidentaux, mais laisse dans son sillage de nombreuses catastrophes environnementales et une division sociale exacerbée par un découpage du monde entre pays riches et consommateur d'une part, et pays pauvres et producteurs d'autre part.

2.2.5 Les enjeux du système industriel linéaire face aux limites de la planète

À partir des années 1970, le système linéaire commence à se trouver confronté à ses propres limites [MEADOWS et al. 1972]. L'euphorie économique et la croissance vertigineuse des trente glorieuses s'essoufflent et laissent entrevoir les limites sociales, économiques et environnementales d'un système qui ne fonctionne plus. Le chômage bondit, et les premiers aspects d'une crise écologique se profile au niveau mondial. En 1968, le club de Rome dans son rapport « halte à la croissance » met en garde sur les limites de l'environnement à soutenir une croissance économique non contrôlée. En 1974, le premier choc pétrolier annonce la dépendance des pays dit « développés » aux énergies fossiles. Face à la menace d'une activité économique ralentie et des signes d'une potentielle catastrophe écologique, des voix s'élèvent parmi les institutions. Différents mouvements contestataires en faveur de la préservation de l'environnement commencent à voir le jour. Le système linéaire est pointé du doigt pour son incapacité à perdurer, remettant en cause la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins. Les premiers grands forums internationaux sur l'environnement font leur apparition. En 1972, la publication du rapport Meadows, « *Les limites à la croissance (dans un monde fini)* », interroge ce modèle de développement linéaire et pose les bases du « développement durable » [MEADOWS et al. 1972]. Le concept de développement durable, qui repose sur trois piliers postule une interdépendance des facteurs économiques, sociaux et environnementaux. La première définition officielle sera donnée en 1987 lors du rapport de Brundtland : « *Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir* ». Les trois piliers du développement durable seront traduits par *triple bottom line (people - planet - profit)*. Ces piliers introduisent une nouvelle idée du développement au sein des entreprises qui vont commencer à intégrer des critères de développement sociaux et environnementaux en plus du traditionnel critère de performance économique [ELKINGTON, 1998]. Apparaissent alors les notions de *Strong and weak sustainability* (soutenabilité forte ou faible) et le principe de substituabilité entre capitaux [TURNER, PEARCE, 1993]. La soutenabilité faible, postule que les capitaux économiques, sociaux et environnementaux sont intégralement interchangeable. Le principe de substituabilité est basé sur l'hypothèse que le capital environnemental est un stock que les forces économiques sont capables de réguler. Ainsi, les ressources naturelles peuvent être utilisées aussi longtemps qu'elles sont convertibles en biens manufacturiers d'une valeur égale. Le principe de substituabilité présente l'avantage d'être facilement opérationnel en traduisant tout impact environnemental en une valeur économique mais conduit à un épuisement des ressources environnementales s'il est sans cesse utilisé. À l'inverse, la soutenabilité forte repose en partie sur une non-substituabilité des capitaux et postule que l'environnement remplit un certain nombre de fonctions qui ne peuvent être remplacées par d'autres formes de capital. Ce principe de non-substituabilité repose sur l'hypothèse que la raréfaction des ressources environnementales mettrait en péril la survie de l'humanité. La solution réside donc, dans la préservation de l'environnement pour qu'il puisse à son tour soutenir les besoins de l'humanité [MONTO et al. 2005]. La question principale que soulève ces 2 principes réside dans l'élaboration de schéma de production et de consommation qui permettront aux

générations futures de répondre à leurs besoins. Ceci interroge en profondeur la manière dont la science, l'industrie ou la politique élaborent ou instrumentalisent des systèmes de mesure de la soutenabilité, pour tenter de comprendre ou de communiquer sur les impacts des systèmes de production sur l'environnement, et enfin, mettre en œuvre des solutions adaptées (ou pas) aux enjeux du développement durable [BELL, MORSE, 1999].

2.2.6 Évaluer les performances d'un système industriel.

La croissance économique, mesurée de manière quantitative à l'aide d'indicateurs économiques tels que le Produit Intérieur brut (PIB⁶), peine à rendre compte de la dimension multifactorielle du progrès. Par exemple, l'extraction de ressources naturelles dans un monde fini entre en compétition avec le milieu dont il dépend même si celui-ci a une certaine capacité à se régénérer. De nombreux auteurs mettent en évidence que lorsque la croissance économique est recherchée pour elle-même, de nombreux équilibres sont à risque [MEADOWS et al. 1972] [GEORGESCU-ROEGEN, 1979]. Par exemple, les premières réflexions liées à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) datent de la fin des années 1960 [HUNT, FRANKLIN, 1996]. La conceptualisation de la démarche a commencé dans les années 60 par la communauté scientifique. L'invention de cette méthodologie analytique est, elle, attribuée à H. Teasley, responsable du packaging dans l'entreprise Coca Cola en 1969. Cette approche est maintenant communément utilisée et actuellement normée (NF EN ISO 14040 et NF EN ISO 14044). Par ailleurs, outre les aspects économiques et environnementaux, de nombreux aspects pourtant essentiels au progrès humain ne sont pas pris en compte tels que l'éducation, la santé, l'accès aux ressources de base, les inégalités... Ainsi, d'autres indicateurs peuvent être proposés pour prendre en compte ces aspects. Par exemple, en 2015, France Stratégie et le Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE) proposent un jeu d'indicateurs complémentaires au PIB pour évaluer et accroître l'efficacité des politiques publiques au service du développement économique, social et environnemental de la société [AUSSILOUX et al. 2015]. Ces quelques exemples d'indicateurs montrent que leur usage peut se faire de manière très locale au sein d'une entreprise, à l'aide de méthodologies propres, tout comme de manière globale par des gouvernements selon des méthodologies normées. La démarche est cohérente avec un besoin de développer des outils d'aide à la décision capables d'évaluer les aspects qualitatifs du progrès humain dans une démarche globale : « *Le besoin se fait sentir de faire évoluer les mesures du progrès humain au-delà des perceptions économiques, et d'y intégrer le bien être humain et écologique d'une manière globale* » [MONTTO et al. 2005].

Ces nouvelles méthodes de comptabilité des impacts se mettant en place, un objectif de réduire les rejets dans l'environnement est identifié. Sous l'impulsion des politiques environnementales, la filière du recyclage se structure et s'industrialise vers la fin des années 1980, afin d'absorber les volumes de déchets qu'il faut désormais valoriser.

Une tendance va se développer dans le domaine de l'Ecologie Industrielle (EI). Par l'application des principes de métabolisme territorial, il s'agit de réaliser une comptabilité et analyse des flux de matières dans un système défini [AFNOR, 2012], et de s'inspirer du fonctionnement des écosystèmes en cherchant à « *rendre étanches les flux de matières* »

⁶ Inventé en 1934, cet indicateur est toujours utilisé aujourd'hui pour mesurer la croissance.

[FROSH, GALLOPOULOS, 1989] ; [ERKMAN, 1998] ; [ADOUE, 2007]. L'objectif est de faire circuler en boucle fermée des flux de manière à ce que les déchets soient systématiquement valorisés comme des ressources [ALLENBY, 1994]. Ainsi, un parc industriel ou un territoire est assimilé à un corps dont il faut comprendre le métabolisme pour que ce dernier reste « en bonne santé ». À l'image d'un système naturel, les déchets de l'un sont assimilés par d'autres sous la forme de synergies en poursuivant l'objectif idéal de supprimer les déchets et de limiter les besoins en énergie [ALLENBY, 1994]. Bien que cette méthode soit prometteuse, l'écologie industrielle limite son potentiel d'action en faisant perdurer le paradigme industriel classique et son modèle économique [MAILLEFERT, ROBERT, 2017] : en considérant les flux et les stocks comme des variables purement quantitatives destinées à réintroduire les objets dans le système étudié sous forme de matière, elle évacue les aspects qualitatifs qui permettent à ces derniers de circuler. Même si l'écologie industrielle intègre progressivement une approche plus qualitative et territoriale [MAILLEFERT, SRENCI, 2016], [MAILLEFERT, ROBERT, 2017], la question de la durabilité est questionnée comme le souligne Cyril Decouzon et Muriel Maillfert : « *le croisement entre l'approche technique de l'écologie industrielle et celle du développement durable n'était pas très développé.* » [DECOUZON, MAILLEFERT, 2012]. Suren Erkman (1998), insiste sur la dimension antagoniste du terme « *Écologie industrielle* » qu'il perçoit comme un oxymore. D'une certaine manière l'EIT permet de territorialiser les stratégies de recyclage, cependant cette approche peine à valoriser les objets en fin de vie qui ne peuvent être réduits à leurs simples propriétés et considérés comme un flux de matière.

Dans le sillage de cette évolution, de nouvelles méthodes de conception cherchent à réduire les impacts associés à chaque séquence de fabrication. Pour s'adapter à ces changements et proposer des solutions compatibles avec les problématiques environnementales, de nouvelles stratégies de conception respectueuses de l'environnement font leur apparition telle que le *Design for Environment* (DfE). La notion d'économie circulaire va doucement apparaître comme une brique du développement durable en proposant un nouveau modèle de gestion des matières.

2.2.7 Hiérarchiser les modes de traitements des déchets

Les stratégies de gestion des déchets en Europe sont définies dans la directive cadre du 19 novembre 2008 (Directive 2008/98/EC). Elles ont été transposées en droit Français dans le Code de l'environnement, au chapitre prévention et gestion des déchets (Article L541-1-1 Créé par Ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010 - art. 2). La hiérarchie des modes de traitements suggère, une hiérarchie des modes de transformation : du plus souhaitable (moins d'impacts) en haut de la pyramide inversée, au plus néfaste, dans la pointe basse de la pyramide (Figure 4). La stratégie repose sur une hiérarchie des modes de traitements en cinq niveaux, avec pour objectif principal de réduire les tonnages de déchets à traiter. Afin de mieux appréhender les différents termes relatifs aux modes de traitement des déchets, cette partie présente les définitions apportées par la directive européenne retranscrite dans le code de l'environnement.

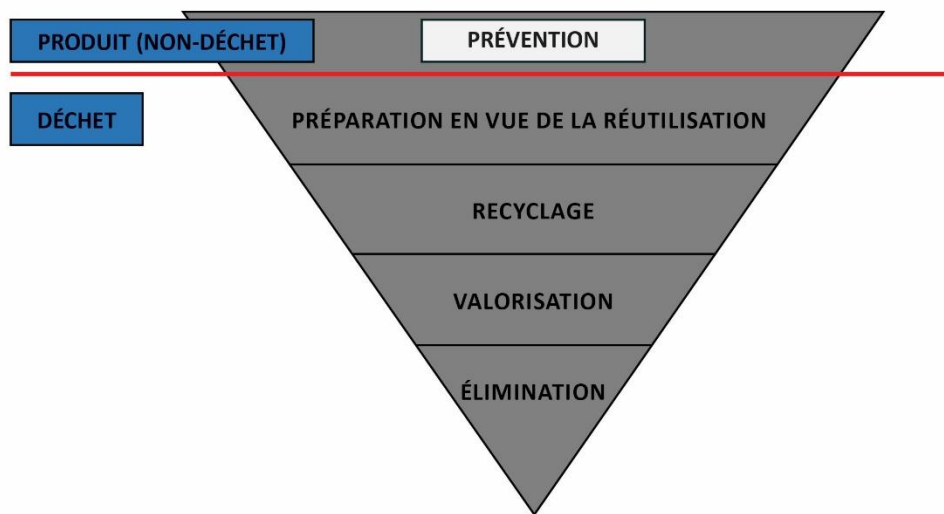


Figure 4 : hiérarchie des modes de traitement. Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.

Si une hiérarchie de traitement des déchets a été nécessaire, c'est bien parce que la valorisation des déchets regroupe une diversité de termes et de niveaux de transformations qu'il nous faut cerner et définir.

2.2.7.1 Définition du déchet.

Déchet : « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (Code de l'environnement, article L541-1-1).

La création du déchet est le fruit d'une décision, intentionnelle ou obligatoire du détenteur. Il décide alors de se défaire d'un objet ou d'une substance dont la fonction ou les propriétés intrinsèques et potentielles existent toujours, mais qui perd l'usage qui en était fait par le détenteur. La notion de déchet se retrouve donc étroitement liée à l'usage qui en est fait par le détenteur, faisant de la création du déchet, un acte culturel : le déchet peut dépendre du cadre d'interprétation dans lequel il se retrouve, selon les pays ou les filières existantes, ou les politiques en matière de gestion des déchets, la notion ou les stratégies associées sont susceptibles de varier. Le détenteur n'est alors pas seul responsable de la création du déchet, faisant apparaître des paramètres d'ordre systémique : le détenteur pourrait être dans l'obligation de se séparer d'objets potentiellement utiles faute d'autres solutions adaptées, « d'où le paradoxe sur lequel repose le concept de déchet : n'est tel ou ne devient tel, que la matière utile ou censée l'être qui ne l'est plus ou ne peut l'être » [YOUNES, 2010].

La notion de déchet fait référence à la limite entre ce qui est jugé utile et ce qui est en train de perdre son usage ou la confiance mise dans l'accomplissement lié à cet usage. Ainsi ce qui est « utile » existe dans une dimension relative entre l'utilisateur et l'objet : en permettant la revente et le changement de propriétaire, le marché de l'occasion permet à des objets devenus inutiles pour un individu de retrouver un usage auprès d'un nouvel individu qui pourra l'utiliser dans sa fonction initiale ou lui donner un nouvel usage. Même en cas de perte

des fonctions initiales d'un objet, les matières, matériaux, pièces ou composants qui le constituent restent potentiellement utilisables dans d'autres systèmes techniques. Précisons que dans un objet complexe ou dans un système technique, les différentes parties ne s'usent pas à la même vitesse, mais lorsqu'une des parties est défaillante, il arrive souvent que l'ensemble du système soit considéré comme obsolète [SIMONDON, 1968]. Par ailleurs, les durées d'usages, sont également relatives. Un même objet aura une durée de vie différente s'il est soigneusement entretenu ou s'il est utilisé sans précaution, et ainsi ne peut satisfaire un besoin sur la même durée. Dans une relation objet-usager, la part d'usage diminue jusqu'à disparaître, précipitant plus ou moins rapidement l'objet ou le système technique, vers une destination finale de non-usage, faisant de lui un potentiel déchet.

2.2.7.2 Définition des termes relatifs à la valorisation des matériaux.

Les définitions suivantes sont extraites du code de l'environnement Article L541-1-1 Créé par Ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010 - art. 2. Ces définitions sont classées ici en fonction du niveau de transformation que l'on fait subir à un objet, occasionnant ou non une modification de l'usage initial. Cette classification, reprend l'ordre de la hiérarchie des modes de traitements. Cette classification sera précisée et élargie au chapitre 2.

Définitions issues de la hiérarchie des modes de traitement :

Usage initial : Réduction – Maintenance – Réparation.

« *Prévention (prevention) : toutes mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet, lorsque ces mesures concourent à la réduction d'au moins un des items suivants :*

- *la quantité de déchets générés, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée d'usage des substances, matières ou produits ;*
- *les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine ;*
- *la teneur en substances nocives pour l'environnement et la santé humaine dans les substances, matières ou produits ; »*

Même usage : Réemploi – Réutilisation.

« *Réemploi (reuse) : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus ;*

Préparation en vue de la réutilisation (preparing for re-use) : toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement ;

Réutilisation : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau ; »

Nouvel usage avec transformation partielle ou totale.

« *Valorisation matière : toute opération de valorisation autre que la valorisation énergétique et le retraitement en matières destinées à servir de combustible ou d'autre moyen de produire de l'énergie. Elle comprend notamment la préparation en vue de la réutilisation, le recyclage, le remblayage et d'autres formes de valorisation matière telles que le retraitement des déchets*

en matières premières secondaires à des fins d'ingénierie dans les travaux de construction de routes et d'autres infrastructures. »

Nouvel usage avec transformation totale.

« Recyclage (recycling) : toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage ;

Valorisation (recovery) : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets ; »

Perte d'usage.

« Élimination (Disposal) : toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits ou d'énergie. »

Ces définitions supposent en creux, une « hiérarchie des modes de transformation ». Celle-ci s'échelonne d'une absence de transformation, ce qui engendre peu de perte de valeurs et de propriétés, à une transformation totale des objets, qui implique une forte dépense énergétique, une perte d'usage et une potentielle dégradation des propriétés des matières. Ces modes de transformation ou de traitement, classés graduellement suggèrent des outils, des procédés et des approches très différentes. Par exemple, la réparation ou la maintenance repose sur une approche minutieuse, attentive à la préservation des fonctions de l'objet : ce sont des approches non destructives. Au contraire, le recyclage ou la valorisation, postulent que les objets, devenus des déchets, ont perdu leurs usages. D'après l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), 345 millions de tonnes de déchets ont été produits en France en 2012 [ADEME, 2016]. Les filières de traitement des déchets font appel à des procédés permettant d'absorber ces volumes conséquents : broyage, déchiquetage, fonte, incinération, etc. Ce sont des approches destructives qui nient les valeurs et les fonctions incarnées dans les objets tout en occasionnant souvent une dégradation des propriétés des matières. Nous pouvons constater que la hiérarchie des modes de traitement précise que le « réemploi » désigne des pratiques permettant de maintenir l'usage initial. Ainsi un espace d'interprétation des usages et des pratiques existe entre « recyclage » et « réemploi » ainsi défini. Ainsi, faute de terme adapté, le flou s'installe et des pratiques intermédiaires intervenant avant la transformation totale des objets et/ou liées à des modifications d'usages existent, parfois catégorisées sous l'appellation « recyclage » et parfois sous l'appellation « réemploi ».

2.3 Le modèle circulaire.

2.3.1 Description du modèle circulaire.

La nécessité de réduire les prélèvements de matières premières et de limiter l'accumulation de déchets ont conduit à une prise de conscience progressive des limites du modèle linéaire

[MEADOW et al. 1972]. Pour faire face à ces problèmes majeurs, plusieurs actions sont menées sur l'ensemble du cycle de vie des produits afin de réduire les impacts à chaque niveau. Conformément à la hiérarchie des modes de traitements, deux approches coexistent. D'une part, l'approche préventive consiste à favoriser une approche culturelle de manière à initier un changement de comportement. L'objectif visé est de privilégier les cycles les plus courts et d'éviter la création des déchets lorsque cela est possible [ALLWOOD et al. 2010 (a)]. D'autre part, l'approche curative, dont l'objectif consiste à trouver les solutions les moins pires quand le déchet est déjà produit. Ainsi, le principe d'économie circulaire se définit en opposition au modèle linéaire (Extraire, fabriquer (transformer), jeter), afin de limiter les conséquences négatives liées à une consommation excessive et non renouvelable des ressources naturelles [MACARTHUR, 2013]. Le concept repose sur la valorisation systématique des déchets comme ressources, afin de découpler la croissance économique de la consommation de matières. Dans un rapport intitulé *vers une économie circulaire : arguments économiques pour une transition accélérée* (2013), la fondation Ellen Macarthur propose une définition de l'économie circulaire : « *une économie circulaire est restaurative et régénérative par nature et tend à préserver la valeur et la qualité intrinsèque des produits, des composants et des matériaux à chaque étape de leur utilisation. Le concept distingue les cycles biologiques et techniques. Ce nouveau modèle économique a pour objectif de dé-corréler le développement économique mondial de la consommation de ressources limitées.* » [MACARTHUR, 2013].

Le modèle circulaire englobe et s'inspire du fonctionnement des écosystèmes : les « nutriments » qui traversent le système doivent être assimilables par le milieu sans risque de nuire à son équilibre. Pour cela, l'économie circulaire distingue deux grandes catégories de matériaux : les « *nutriments biologiques* » qui sont par nature dégradables et compostables et les « *nutriments technologiques* ». Ces derniers sont caractérisés par leur absence de biodégradabilité et doivent être réintroduits dans le système au même titre que les « *nutriments biologiques* ». Or, l'augmentation considérable de la durée de vie des matériaux, combinée à une durée de vie limitée des produits, soulève un problème majeur en matière de gestion des déchets. D'une part, les ressources naturelles sont prélevées à un rythme supérieur à leur capacité de régénération et d'autre part, les déchets s'accumulant, leur gestion devient de plus en plus problématique. Dans le modèle circulaire, différentes actions permettant d'augmenter la durée de vie du produit comme la maintenance, la réparation, le réemploi sont développées de manière à permettre aux produits techniques de circuler le plus longtemps possible avant d'être réintroduits dans les flux de matière (recyclage) qui alimentent le système. Différents leviers incitatifs sont mis en place pour encourager les acteurs à passer d'un fonctionnement linéaire à un fonctionnement circulaire : des leviers économiques, juridiques et normatifs, les bénéfices sociaux ou environnementaux attachés, les performances accrues permettant d'augmenter la durée de vie et la fiabilité du produit, les valeurs transmises par un objet, les qualités sanitaires des matériaux employés, etc.

2.3.2 Concevoir dans un système circulaire.

« Concevoir dans un système circulaire » se retrouve dans les termes génériques d'*écoconception* ou de *conception pour l'environnement* (DfE) qui sont utilisés pour désigner le mode de conception cherchant à réduire les impacts du produit sur l'ensemble de son cycle de vie. L'écoconception est définie par l'AFNOR de la manière suivante : « *Intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception et le développement de*

produits (biens et services, systèmes) avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie à service rendu équivalent ou supérieur. Cette approche dès l'amont d'un processus de conception vise à trouver le meilleur équilibre entre les exigences, environnementales, sociales, techniques et économiques dans la conception et le développement de produits » (Norme NF X 30-264 Management environnemental – aide à la mise en place d'une démarche d'écoconception, février 2013). Les pratiques d'écoconception sont encadrées et définies dans des normes telles que ISO 14001 (Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation), ISO 14006 (Systèmes de management environnemental – Lignes directrices pour intégrer l'écoconception), ISO 14040 (management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre), ISO 14020 (Etiquettes et déclarations environnementales – Principes généraux). En particulier, la norme NF X 30-264 propose un mode d'emploi pour intégrer les aspects environnementaux et l'écoconception de manière systématique dès la conception et le développement du produit. Dans ce cadre, la conception prend en compte tout ce qui permet au produit de durer plus longtemps et d'être réintroduit en fin de vie dans le cycle des matières. L'écoconception est un terme générique, pouvant s'appliquer à des services, à des produits ou à des systèmes.

La notion de circularité peut se déployer à des échelles variées allant du produit au territoire. Ces différentes échelles sont abordées dans le cadre de la conception circulaire. Cela dépend du prisme d'étude, des contraintes du projet de conception, ou du segment de cycle de vie sur lequel on met l'accent. Quelle que soit l'échelle concernée, il existe des passerelles d'une échelle à l'autre, qu'il s'agit d'identifier afin de ne pas entraver la circulation des objets dans le système. La stratégie *Cradle to Cradle* (C2C) développée par les architectes et ingénieurs américains William Mc Donough et Michael Braungart (2002) propose une vision qui puisse réconcilier la plus large échelle de cycles possible et fonctionner de manière régénérative. En misant sur l'intégration de matériaux biosourcés et biodégradables, chaque produit peut retourner sans dommage à l'environnement pour enfin réintégrer les cycles naturels [BRAUNGART, MC DONOUGH, 2002]. Cependant, en se focalisant quasi-exclusivement sur l'usage de matériaux naturels ou sur la fin de vie des produits, cette approche reste lacunaire [LLORACH-MASSANA et al. 2015].

Il existe différentes manières de penser les cycles de la matière [BOCKEN et al. 2016]. Actuellement, c'est le recyclage qui s'est imposé comme une solution dominante pour réintroduire les objets en fin de vie dans le système productif. Les techniques de recyclage sont matures au niveau industriel, cela permet de réintroduire des quantités de matières importantes en fin de cycle. La matière recyclée ainsi produite industriellement devient une matière première permettant de penser le recyclage dès la phase de conception du produit, afin de réduire les impacts à différents niveaux. En 2014, cela représente 17 millions de tonnes de matériaux recyclés utilisés (hors bois et granulé) et 14.4 millions de tonnes de déchets incinérés avec valorisation énergétique. Il reste cependant 18 millions de tonnes de déchets envoyés dans les installations de stockage des déchets⁷ en 2014 [ADEME, 2016].

⁷ « Le stockage est le dernier maillon dans la chaîne de gestion des déchets. Il concerne la fraction des déchets qui ne peut être valorisée sous forme de matière ou d'énergie dans les conditions techniques et économiques du moment. » Source : <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-l'action/dossier/stockage/installation-stockage-dechets-non-dangereux> (Consulté le 24/05/2022)

Afin d'élargir les types de circularité au-delà du seul recyclage, la conception, toujours placée en amont (Figure 5), peut s'adapter, afin de tenir compte des différentes étapes qui peuvent jaloner le cycle de vie du produit (maintenance, réparation, remanufacturing, recyclage). Il est possible de penser plusieurs cycles à un endroit donné de la vie d'un produit, ou combiner tous les niveaux de cycles. Nous allons introduire trois niveaux de conception circulaire. Le premier est centré sur la conception des produits, puis nous élargirons au couple produit/service qui constitue le second niveau. Enfin, nous aborderons le troisième niveau en deux points : la conception des systèmes et les stratégies Produits-Services-Système (PSS).

2.3.2.1 *L'approche produit.*

Le premier niveau de conception circulaire consiste à limiter les impacts sur l'environnement en les intégrant dès la phase de conception du produit. Ainsi, les approvisionnements, la fabrication, l'usage et la fin de vie du produit sont prises en compte. De ce fait, le concepteur recherche des solutions durables compatibles avec le cahier des charges, et tente de mettre en œuvre des solutions pour que le produit puisse être réparé, recyclé, ou valorisé dans des conditions optimales (Figure 5). Le concepteur va dessiner le produit de manière à ne pas compromettre le recyclage de l'objet en fin de vie. Ce type d'approche se concentre sur le produit lui-même et non sur l'intégralité du système : on considère que c'est une *approche produit*. Il existe plusieurs options qu'il s'agit de faire cohabiter dans la mesure du possible : on peut se concentrer sur l'assemblage et/ou le désassemblage (mono-matériaux, réversibilité, réparation aisée, etc.), le choix des matériaux (recyclables, biosourcés, non toxiques, etc.), les procédés (réduction des chutes, procédés plus durables, etc.), l'optimisation des formes (optimisation du stockage ou du transport, ergonomie, réduction du poids, etc.), la phase d'usage (réduction des consommations énergétiques, sensibilisation à des usages plus respectueux de l'environnement, maintenance facilitée, etc.) ou la fin de vie (réemploi, recyclage, etc.).

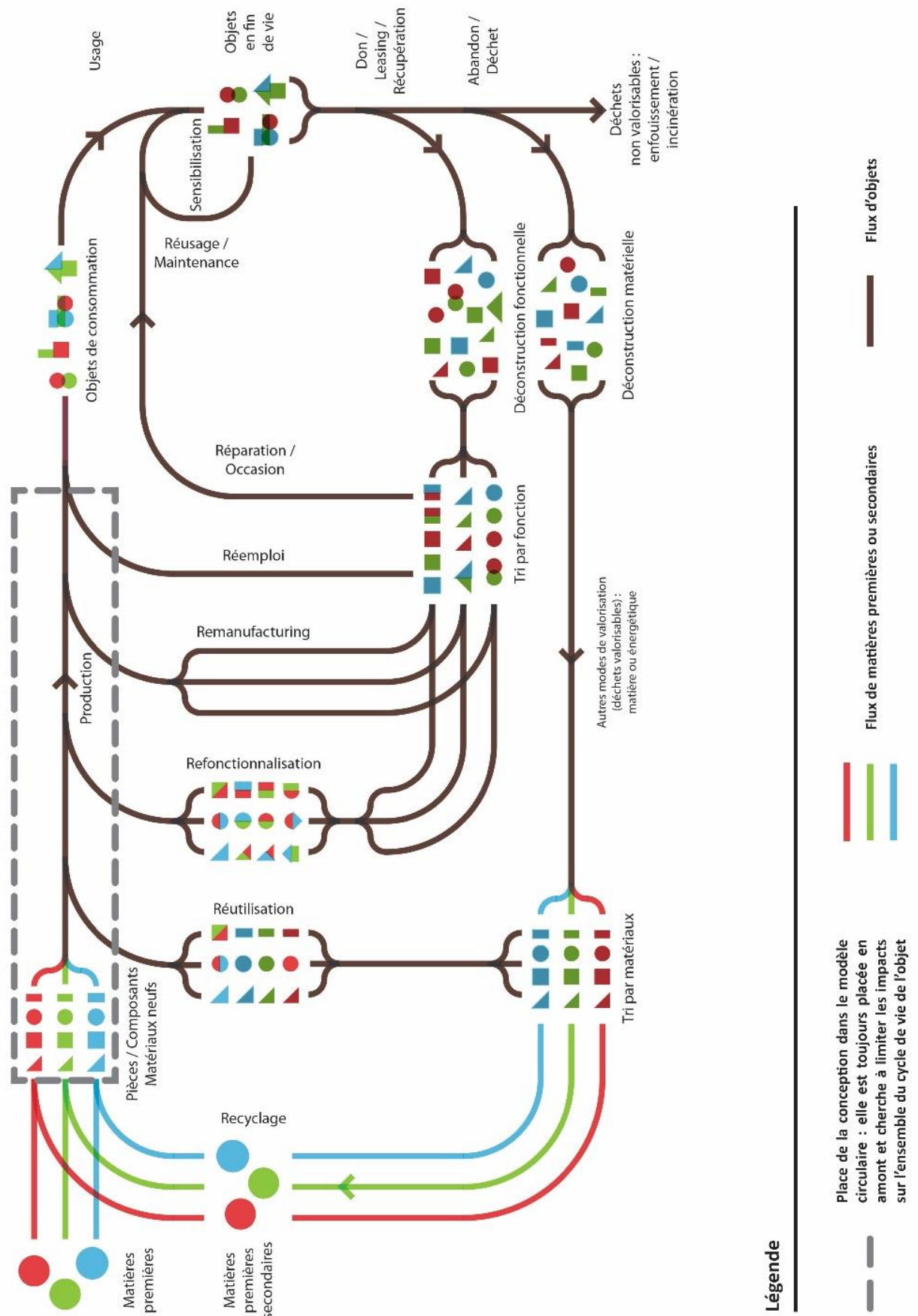


Figure 5 : place de la conception dans un modèle circulaire.

À ce niveau, le concepteur a également la possibilité d'améliorer les procédés de fabrication en choisissant les *Meilleures Techniques Disponibles* (MTD) [LAFOREST, 2020]. L'autre option concerne la sélection des matériaux qui se fera la plupart du temps sur catalogue. Le concepteur peut opter pour des matériaux à moindre impact environnemental, en privilégiant lorsque cela est possible, des matériaux recyclables ou biodégradables. De cette manière le produit peut éventuellement être composté ou recyclé. Il arrive très souvent que ces matériaux n'aient que très peu de lien avec le territoire, voire pas du tout car les filières de recyclage sont intégrées à des flux de matières mondialisés. Dans le cadre d'une conception de produits, de nombreuses approches sont référencées dans la littérature. Ces approches proposent différents prismes de conception, non exclusifs et potentiellement compatibles. Nous citerons plusieurs approches ci-dessous, sans être complètement exhaustif sur ces démarches : la conception pour le recyclage (*Design for Recycling* (DfR)) [GUPTA, VEERAKAMOLMAL, 1996] ; la conception pour le démontage, le désassemblage ou la déconstruction (*Design for Dismantling / Disassembly / Deconstruction* (DfD)) [BRADLEY, SHELL, 2002] ; la conception de composants (*Component design*) ; la conception pour l'adaptabilité (*Design for Adaptability* (DfA)) [LOMMEE, 2010] ; la conception pour le remanufacturing (DfRem) [ISMAIL, 2016] ; la conception pour le changement (*Design for Change* (DfC)) [DEBACKER et al. 2015] [PADUART, 2017] ou la conception pour la modularité (*Modular Design*) [WANG et al. 2016].

2.3.2.2 L'approche service et le couple produit-service.

Tableau 2 : critères de conception de produit relativement aux principales étapes de remanufacturing [SUNDIN, BRASS, 2005].

Remanufacturing step \ Product property	Inspection	Cleaning	Disassembly	Storage	Reprocess	Reassembly	Testing
Ease of identification	x		x	x			x
Ease of verification	x						
Ease of access	x	x	x		x		x
Ease of handling			x	x	x	x	
Ease of separation			x		x		
Ease of securing						x	
Ease of alignment						x	
Ease of stacking				x			
Wear resistance		x	x		x	x	

Le second niveau de conception circulaire consiste à penser le produit et les services qui lui sont associés. Ces deux approches sont soit centrées sur le service lui-même, soit sur le couple produit-services conçus comme un ensemble indissociable. Cette stratégie s'inscrit dans le domaine de *l'économie de la fonctionnalité* ou du *design de services*. L'économie de la fonctionnalité met la fonction du produit au cœur de la création de valeur. Ainsi, on vend le service associé à la fonction du produit, plutôt que le produit lui-même. À titre d'exemple, ce sont les stratégies adoptées par les entreprises Xerox® ou Michelin®. Xerox® vend le service

« photocopie », alors que Michelin® vend « le kilomètre parcouru » à la place des pneus. Les Vélib® sont également un bon exemple, car on n'achète pas le vélo, mais le service associé au déplacement. Dans cette perspective, l'entreprise reste propriétaire du produit qu'elle loue aux utilisateurs. Les usagers quant à eux, n'achètent que l'usage ; le produit est censé durer et être entretenu par l'entreprise. Pour réussir, Erik Sundin et Bert Brass (2005) identifient un certain nombre de critères que le produit doit respecter (*product property*) relativement aux principales étapes de remanufacturing (*remanufacturing step*) (Tableau 2). À chaque étape (inspection, nettoyage, désassemblage, stockage, refabrication (*reprocess*), réassemblage et tests), le produit doit pouvoir répondre à différents critères destinés à faciliter : l'identification, la vérification, l'accès, la manipulation, la séparation, la sécurisation, l'alignement, l'emboîtement et la résistance à l'usure [SUNDIN, 2009]. Cette stratégie, également appelée *stratégie de leasing*, permet d'importants gains de matière dans la mesure où il est dans l'intérêt de l'entreprise de faire durer le produit le plus longtemps possible afin d'assurer la qualité du service rendu aux usagers et la viabilité du service. Ainsi le produit n'est pas jeté, il est maintenu en état d'utilisation, et même parfois amélioré (*upgrade*) pour rester au même niveau que les produits / services proposés par la concurrence. Étant donné que la création de richesses est découplée de la production de matière, cette approche est souvent qualifiée de stratégie de *dématérialisation économique*. Ainsi, c'est grâce aux valeurs qui se déploient dans le produit qu'il y a une charge symbolique. Présentes dans l'œuvre, elles sont latentes dans le produit mais plus faciles à se déployer dans l'objet.

2.3.2.3 L'approche système et l'approche Produit-Service-Système (PSS).

Le troisième niveau est fortement lié aux deux niveaux précédents, mais cette fois-ci, il s'agit de porter l'effort de conception sur le système lui-même. On parle alors de *design système* ou *d'approche système*. À ce niveau, on trouve les stratégies d'EIT, les stratégies système, ou les stratégies *Produit-Service-Système* (PSS). L'EIT, se concentre sur la récupération des matières et sur les logiques de bouclage des flux de matières. Cette approche est principalement quantitative, elle repose sur l'analyse des flux de matières et d'énergie qui structurent l'activité économique d'un territoire : le métabolisme territorial. Le *remanufacturing*, quant à lui, se concentre principalement sur la récupération des composants ou des produits en vue de leur redonner leur fonction d'origine ou de les améliorer (*upgrade*) [PIALOT et al. 2012]. En dépit de la dimension holistique d'une telle approche, la conception n'en demeure pas moins focalisée sur les fonctions initiales des produits en cherchant à les faire durer le plus longtemps possible. Il s'agit en quelque sorte d'un fonctionnalisme poussé à l'extrême, occasionnant également divers effets indésirables. Afin de réduire significativement les déchets et de contribuer à la dématérialisation économique, il convient de s'attacher à la hiérarchie des modes de traitements en cherchant à favoriser la prévention avant de considérer le réemploi, le recyclage, la valorisation énergétique ou l'enfouissement [CORVELLEC, STÅL. 2017]. Le *remanufacturing*, offre différentes pistes de design produit (DfD, DfRem, DfR, etc.) afin de garantir le succès global de la stratégie de l'entreprise [LOPEZ-ONTIVEROS et al. 2003] ; [ISMAIL, 2016]. Les services associés au produit sont pris en compte (maintenance, réparation, etc.). Enfin, une stratégie sur l'ensemble du système est mise en œuvre de manière à permettre la récupération des produits (chaines de logistique inverse) et le bon fonctionnement des services associés. Ce type d'approche fait partie des stratégies dites *Produit-Service-Système* (PSS) dans laquelle le produit est lié à l'élaboration d'une stratégie globale. En se focalisant sur l'usage du bien plutôt que sur sa possession, l'économie de la

fonctionnalité privilégie les cycles d'entretien, de maintenance et de réparation avant d'envisager un bouclage par la fin qui risquerait de détruire la valeur ajoutée contenue dans le produit : « *ainsi, en gardant la forme des pièces et en conséquence la valeur ajoutée du produit, on peut diminuer l'extraction des matières premières* » [LOPEZ-ONTIVEROS et al. 2003]. En dépit de l'existence de chaînes de logistique inverse relativement complexes (*Reverse Supply Chain (RSC)*), dans les faits, peu d'intérêt est porté sur la conception des fonctions potentielles (chutes, déchets, pièces et composants), après l'usage initial.

2.3.2.4 La dimension environnementale dans la conception

L'intégration des dimensions environnementales dans la conception est reconnue comme étant l'écoconception [GRAEDEL et al. 2005] ; [GARCIA et al. 2013] ; [VALLET et al. 2013]. Dans chacun des trois niveaux de conception décrits ci-dessus, on cherche à limiter les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie sans questionner en profondeur le fonctionnement de l'appareil productif et la vitesse de circulation des matériaux dans le système. Même si l'écoconception s'applique à plusieurs échelles, elle se concentre sur la conception initiale en vue d'améliorer les produits, les procédés, les matériaux, les services ou le système (Figure 5). La conception se concentre principalement sur l'élaboration de produits neufs, en laissant de côté les objets qui arrivent en fin de vie. De ce fait, malgré l'arrivée du recyclage ou de l'écologie industrielle, les pratiques de conception, même si elles ont évolué, restent sensiblement les mêmes que dans un système linéaire. La conception se fait encore dans un référentiel de bouclages rapides, adaptés aux rythmes de la production industrielle : le concepteur conçoit dans une perspective de reproductibilité technique potentiellement infinie, avec des matériaux toujours disponibles et cherche à réduire les coûts sur l'ensemble de la chaîne de valeur. De son côté, le consommateur final achète des produits recyclables qu'il finira par remettre aux filières de traitement des déchets, faute d'alternatives solides sur les territoires. Les objets en fin de vie seront alors dirigés vers les filières de l'occasion ou seront destinés à entrer dans les systèmes de gestion des déchets. Dans ce domaine, à part quelques initiatives pionnières ou différentes initiatives artisanales, la conception centrée sur les objets en fin de vie semble pratiquement absente du paysage de la conception.

En se basant sur les travaux de plusieurs chercheurs, Tom Waas et al. (2014) définissent l'évaluation environnementale de la manière suivante : « *l'évaluation environnementale est un processus qui a pour but : de contribuer à une meilleure compréhension de la durabilité et de son contexte d'interprétation (challenge d'interprétation) ; d'intégrer les problématiques de durabilité dans la prise de décision en identifiant et en évaluant (challenge de structuration de l'information) ; d'anticiper les objectifs de durabilité (challenge d'influence).* » [WAAS et al. 2014] De ce fait, l'évaluation environnementale a pour but de fournir des informations permettant une analyse méthodique d'un système afin d'identifier et de mieux comprendre les causes de problématiques environnementales. Elle permet de fournir un cadre d'analyse afin de faciliter une prise de décisions destinées à agir sur les causes des désordres environnementaux.

Dans ce cadre, les impacts environnementaux peuvent être anticipés [HAUSCHILD et al. 2005] pour orienter le concepteur vers des solutions améliorées par le biais d'approches qualitatives ou quantitatives tels que des guides de bonnes pratiques [WIMMER, ZÜST, 2001] ou des outils d'analyse de cycle de vie [TCHERTCHIAN et al. 2012] [GARCIA et al. 2013].

Les outils d'évaluation des performances d'un système et ses impacts sur l'environnement reposent sur des indicateurs environnementaux qualitatifs, quantitatifs, absolus, relatifs, agrégés ou non. Ils ont pour but de fournir des outils d'aide à la décision pour les décideurs mais aussi, de permettre une meilleure information pour le grand public.

Un indicateur est « *une donnée quantitative qui permet de caractériser une situation évolutive, une action ou les conséquences d'une action, de façon à les évaluer et à les comparer à leur état à différentes dates* » [Observatoire sur la responsabilité sociétale des entreprises, 2003]. Pour être valable, un indicateur se doit d'être représentatif et facilement mesurable afin de permettre d'obtenir une visibilité précise sur ce que l'on cherche à mesurer. Bauraing et al. (2000) décrivent un « bon » indicateur, comme devant être fiable et représentatif, pertinent et cohérent, facile à comprendre, facile à construire et en nombre limité. Dans son rapport « *indicateurs clés de l'environnement* », l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) définit dix grands corpus d'indicateurs qui ont pour objectif de mesurer l'état de santé du milieu : le changement climatique, la couche d'ozone, la qualité de l'air, la production de déchets, la qualité de l'eau douce, les ressources en eau douce, les ressources forestières, les ressources halieutiques, les ressources énergétiques et la biodiversité [OCDE, 2004]. La sélection d'un indicateur se fait à la fois par rapport au cadre d'analyse mais aussi par rapport aux aspects pratiques de l'indicateur : *la « sélection [de ces indicateurs] s'est fondée sur : leur pertinence politique, eu égard aux grands défis à relever au cours de cette décennie, notamment en matière de pollution et de ressources et de patrimoine naturels, leur justesse d'analyse, et leur mesurabilité.* » [OCDE, 2004]. Un indicateur mesure un champ particulier, il repose sur différentes hypothèses issues du système étudié.

En France, le ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat propose une série de dix indicateurs clés pour le suivi de l'économie circulaire [MAGNIER et al. 2017]. Ces indicateurs sont la consommation de matière par habitant ; la productivité des matières ; le nombre de titulaires d'écolabels ; le nombre de projets d'écologie industrielle et territoriale ; la fréquence du covoiturage ; le gaspillage alimentaire ; les dépenses des ménages consacrées à la réparation des produits ; l'évolution des tonnages de déchets mis en décharge ; l'incorporation des matières premières de recyclage dans les processus de production ; Les emplois de l'économie circulaire.

2.3.3 Critique et limites du modèle circulaire.

Comme nous avons pu le voir, deux modèles de conception coexistent aujourd'hui. Dans le modèle linéaire, comme dans le modèle circulaire, la conception se focalise sur le début du cycle de vie des produits, au moment de la mise en forme, du choix des matériaux et de la définition des fonctions initiales. Le modèle linéaire ne se préoccupe pas de la fin de vie, alors que la conception circulaire, tient compte de la fin de vie des produits qui sont conçus pour être réintégrés dans les cycles de matière lorsque les produits ont perdu les fonctions pour lesquelles ils avaient été conçus. La Figure 6 présente la place de la conception dans ces différents modèles :

1 – La conception est pensée au début : la fin de vie n'est que très peu considérée en phase de conception [MAGNON, QUARANTE, 1996] ; [CROSS, 2000].

2 – La conception pour la logique circulaire : les facteurs environnementaux sont pris en compte dès la conception [PIALOT et al. 2012], de manière à réduire les impacts liés à la

production, à l'usage ou à la fin de vie. Cependant, il s'agit plutôt d'une conception tournée vers la mise en forme et les performances de l'usage. La conception ne s'applique pas sur l'objet en fin de vie, c'est-à-dire sur les objets déjà conçus ayant perdu leur(s) fonction(s). [BRAUNGART, MC DONOUGH, 2002] ; [BRODHAG, 2014] ; [LLORACH-MASSANA et al. 2015] ; [RICHET et al. 2019].

3 – La conception est intégrée à toutes les étapes de vie(s) des objets de manière à préserver autant que possible la forme (les propriétés, les qualités et les valeurs). La conception tient compte des spécificités des objets en fin de vie, ce qui implique de revisiter les processus de conception et les stratégies de fabrication : [GORGOLEWSKI, MORETTIN, 2009] ; [PONGIGLIONE, CALDERINI, 2014] ; [BRÜTTING, 2019] ; [ALI et al. 2013] ; [ALI, 2013]. Ici, la conception, l'écoconception et les stratégies d'écologie industrielle et territoriale s'emparent de la gestion des objets en fin de vie. Cette approche nécessite néanmoins d'instaurer un dialogue avec la conception circulaire, car elle n'exclue pas totalement les principes de mise en forme nouvelle ou le retour potentiel à l'état de matière, mais cherche à les limiter pour tirer profit des avantages de la mise en forme initiale [LOPEZ-ONTIVEROS et al. 2003].

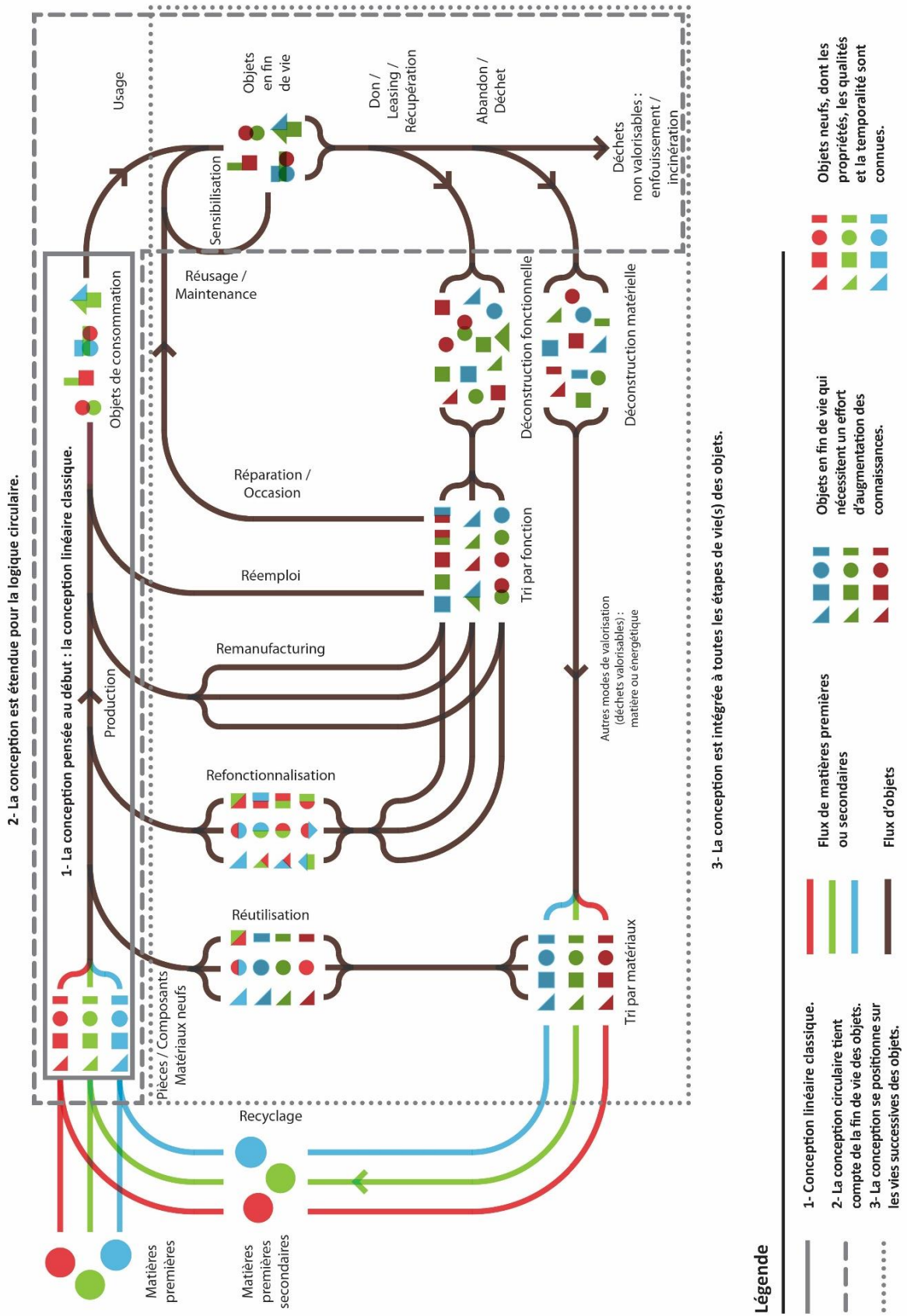


Figure 6 : Schéma de circulation des matériaux : la place de la conception dans les cycles de vies des objets.

Cette recherche, interroge, la place de la conception dans le système de manière à décaler progressivement la conception pour qu'elle accompagne les objets au-delà de leur cycle de vie initial [MENU, 2010 (a)] ; [MENU, 2010 (b)]. Ainsi, la conception génère de la valeur et cherche à répondre aux besoins en tenant compte de l'intégrité formelle des objets en circulation. L'objectif est de retarder la perte de fonction (et d'usage), avant la perte de mise en forme en s'appuyant sur l'identification des fonctions existantes et potentielles en vue de régénérer les valeurs et les usages des objets ou des produits avant qu'ils ne deviennent des déchets.

Les objectifs poursuivis par le système circulaire restent sensiblement les mêmes que dans le modèle linéaire en faisant perdurer le mythe hylémorphique ; c'est-à-dire que la forme est imposée par le concepteur à un matériau, soit disant « passif ». En effet, il s'agit de concevoir, produire et faire circuler des objets en quantité (issus de matériaux, produits ou semi-produits qui respectent les critères de circulation des matériaux neufs), mais fabriqués avec des matières ayant un impact réduit sur l'environnement tel que les matières bio-sourcées ou issues des processus de recyclage (anthropo sourcé). En pensant que les matériaux peuvent être réintégrés indéfiniment, de façon plus ou moins rapide, aux processus de fabrication sous forme de matière à réinformer (via la dégradation naturelle ou le recyclage) ; ce modèle nie en partie les ingrédients essentiels qui permettent aux objets de circuler : les valeurs attachées aux matériaux / objets mis en forme et la préservation des propriétés des matériaux sur le long terme. Cette approche théorique, relativise trop rapidement la vitesse de circulation des matériaux dans le système, les aspects territoriaux des matériaux qu'elle utilise ou les conséquences sociales de cette stratégie [CULLEN, 2017] [O'ROURKE et al. 1996]. Dans ces circonstances, la configuration de l'appareil productif n'est pas fondamentalement questionnée. Il s'agit de produire vite des objets à bas coût, qui finiront par perdre la fonction pour laquelle ils ont été conçus, et qui seront dès lors considérés comme des déchets qu'il va falloir valoriser sous forme de matière ou d'énergie pour les réintroduire dans un nouveau cycle.

Même si la prise de conscience de la destruction des écosystèmes et de la nécessité de préserver l'environnement sont relativement lointaines [JEGOU, 2007], l'accélération considérable de la production engendrée par l'industrialisation et la consommation de masse au cours du XXème siècle, ont occasionné des destructions environnementales sans précédent. Ces destructions ont provoqué une prise de conscience plus globale au tournant des années 1970. Ce virage s'accompagne d'une remise en question progressive des modes de production et de fabrication, qui se traduisent par l'élaboration de nouveaux modèles de circulation des matériaux et des modalités de conception. La nécessité de limiter les prélèvements et les rejets dans l'environnement s'accompagne de mesures législatives au niveau local, national et international qui poussent les acteurs à modifier leurs pratiques en vue de tenir compte d'une situation toujours plus alarmante sur le plan environnemental. La montée en puissance du recyclage à partir de la fin des années 1980, l'arrivée de l'écologie industrielle dans les années 1990, de l'écoconception, puis de l'économie circulaire dans les années 2010, ouvrent la voie vers un nouveau paradigme de gestion de la matière : le modèle circulaire.

Il apparaît comme très utile de réduire la mise en forme à l'état de matière. Le recyclage a donc différentes vertus : il diminue le temps et la complexité du tri ; l'usage de matières

recyclées permet de limiter les prélèvements dans la biosphère et de limiter les rejets toxiques dans l'environnement ; la centralisation des matières et des unités de recyclage permet la massification des modes de traitement et ouvre in-fine à la possibilité de créer de nouvelles formes qui suivent les tendances et les besoins d'innovation. Cependant cette vision se heurte à plusieurs limites lorsque l'on revient trop vite à l'état de matière. Le recyclage participe souvent à dégrader les propriétés des matériaux lorsque le tri n'est pas suffisamment fin ou que les procédés ne permettent pas de conserver les qualités des matériaux d'un cycle à l'autre. Le recyclage ne tient pas compte de la vitesse de circulation des matériaux qu'il peut paradoxalement participer à accélérer. Il évacue les valeurs qui permettent aux objets de circuler en les réduisant à l'état de matière. Le recyclage n'intègre que très peu les spécificités productives et culturelles des territoires en vendant la matière recyclée au niveau international ; et enfin, il repose sur une forte consommation énergétique, sans tirer parti de l'énergie dépensée au moment de la mise en forme initiale [LOPEZ-ONTIVEROS, 2003] ; [ALI, 2017] ; [COOPER, ALLWOOD, 2012] ; [ALLWOOD et al. 2010 (a)] ; [ALLWOOD et al. 2010 (b)].

2.4 Vers un nouveau modèle de gestion des matériaux ?

2.4.1 Le réemploi : alternative ou hypothèse d'avenir ?

Depuis le milieu des années 2000, la question du réemploi sort progressivement de l'ombre. Longtemps identifié comme une alternative précaire, le réemploi au sens large, dans l'industrie comme dans l'artisanat, reste relativement mal compris et souffre encore de nombreux préjugés. Cependant, divers projets pilotes émergent dans lesquels le réemploi retrouve ses lettres de noblesse, dépassant largement les idées préconçues qui lui sont généralement attribuées. De la chaussure de sport grand public, en passant par des objets techniques plus complexes comme des montres haut de gamme et allant même jusqu'à certains composants destinés à l'aviation, la valorisation d'objets de seconde vie offre des pistes prometteuses. Un champ de recherche et d'expérimentation se développe tout particulièrement dans le domaine de l'architecture, retrouvant une pratique ancienne de réemploi. En effet, les activités de construction et de démolition sont la principale source de déchets dans le monde ; par exemple, cela représente quarante-pour-cent des déchets produits chaque année aux Etats-Unis [ALI et al. 2013] [ALI, 2013]. En France, cinquante-pour-cent de la consommation intérieure apparente de matières est destinée aux matériaux de construction, ce qui représente trois cent quatre-vingt-onze millions de tonnes sur l'année 2013 [ADEME, 2016]. De nombreuses études scientifiques commencent à voir le jour, faisant du réemploi un axe de plus en plus crédible pour répondre aux problématiques d'épuisement des ressources, d'économie d'énergie, de réduction des déchets et d'innovation territoriale. Malgré cet engouement récent pour le secteur du réemploi, de nombreux défis restent à relever [LACOVIDOU, PURNELL, 2016]. Cela concerne des domaines très divers : techniques, juridiques, éthiques, sanitaires, économiques, politiques, etc. Par conséquent, il faudra avancer par petits pas, pour envisager l'hypothèse de massifier la filière dans un premier temps [MOLES, 2019], et dans un second temps, pour faire accepter largement le réemploi dans les pratiques de conception, qui devront alors évoluer pour tenir compte des contraintes spécifiques attribuées à cette pratique. Il est nécessaire de préciser que si la massification se fait dans un nouveau modèle, elle devra s'accompagner d'un changement de paradigme industriel en vue de réconcilier les différentes échelles et de les faire dialoguer. Ceci, afin de

ne pas retomber dans les mêmes travers de massification et de centralisation sur lesquels se sont bâtis les filières de gestion des déchets et les modèles précédents, nous conduisant à la situation actuelle de surproduction et d'épuisement des ressources planétaires. Ainsi, plusieurs perspectives seront abordées de manière à s'adapter au mieux à la diversité d'acteurs, de savoir-faire et de flux de matériaux qui structurent l'activité des territoires : du bas vers le haut (*bottom-up*) et inversement (*top-down*). Nous aborderons donc la massification sous le prisme d'une multitude d'hypothèses décentralisées et complémentaires, permettant de répartir le volume par options, en offrant de ce fait de nombreux scénarios territorialisés de régénération de la valeur par le design.

2.4.2 Précisions sémantiques sur la notion de réemploi.

Lorsque l'on se penche sur la question du réemploi des matériaux, on constate d'emblée une confusion générale dans l'utilisation du vocabulaire destiné à qualifier les degrés de transformation de la matière. Au même titre que pour les notions de produit, d'objet ou d'œuvre, il règne un trouble sémantique qui alimente un flou ne permettant pas à l'ensemble des acteurs de se comprendre. Il apparaît qu'entre les praticiens, les experts, le grand public et le législateur, personne ne semble parler le même langage. Un travail de précision, de représentation et de clarification des champs sémantiques serait nécessaire pour mieux cerner les enjeux que sous-tendent ces notions [SEYS, 2017]. La construction d'un univers sémantique commun et l'élaboration d'un socle de référence, serait une première étape en vue de constituer une culture des modes de transformation qui puisse aider le secteur à se constituer autour de références partagées par tous.

Le droit français fait une distinction entre Réemploi et Réutilisation : le réemploi puise dans des gisements qui n'ont pas encore acquis le statut de déchet, alors que la réutilisation permet de sortir du statut de déchet. La définition de la réutilisation donnée par le code de l'environnement précise cette distinction : « *Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau* » (Code de l'environnement, article L541-1-1). Concernant la réutilisation, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) donne une définition plus développée : « *Il s'agit d'une opération en plusieurs étapes qui s'amorce lorsque le propriétaire d'un bien usagé s'en défait sans le remettre directement à une structure dont l'objet est le réemploi (dans une borne d'apport volontaire par exemple, dans les déchèteries ou à un particulier) : il prend alors un statut de déchet. Il subit ensuite une opération de traitement des déchets appelée « préparation en vue de la réutilisation » lui permettant de retrouver son statut de produit. Il peut alors bénéficier à un détenteur qui lui donnera une seconde vie* » [ADEME, 2016].

La définition juridique du « réemploi », si elle fait consensus, manque encore de clarté. Le terme est souvent utilisé de manière contradictoire ; selon les sources il couvrira des registres très différents. Il est utilisé pour désigner un usage identique ou pour désigner un sens plus large qui comprend la possibilité d'emploi pour un usage différent avec ou sans transformation. Le sens donné par le code de l'environnement est le suivant : « *Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus* » (Code de l'environnement, article L541-1-1). Tout d'abord, le réemploi n'est pas un mode de traitement des déchets, il s'adresse à des objets ou à des produits dont on souhaite prolonger la durée de vie. La notion de réemploi sert à évoquer

des situations qui n'impliquent pas de transformations significatives du produit ou de son usage. Cependant, si l'on se penche sur les nombreuses définitions proposées dans la littérature, la signification donnée au mot va plus loin que le sens donné par la définition officielle. À titre d'exemple, dans le document de travail « *Objectif réemploi. Pistes d'action pour développer le secteur du réemploi des éléments de construction en Région de Bruxelles-Capitale.* » Il est clair que sous le terme de « réemploi », on envisage également la possibilité d'interpréter sa fonction originale, voire de modifier l'objet : « *Réemploi des matériaux de construction : procédé consistant à utiliser à nouveau des matériaux ou éléments de construction qui ont déjà servi dans une première application, et ce via des opérations légères sur le matériau (telles que nettoyage, réparation, mise à dimension). Le matériau est soit utilisé au même usage (ex : une porte réemployée comme une porte), soit pour un usage différent (ex : une porte transformée en plan de travail). Par extension, l'utilisation de matériaux qui sont en passe de devenir des déchets (ex : chutes, excédents de stocks) sont aussi considérés comme du réemploi.* » [GHYOOT, 2017]

2.4.3 Des ouvertures sur la notion de réemploi ?

L'idée de *refonctionnalisation* peut-être mise en parallèle avec la notion de « *recyclage valorisant* » telle qu'elle est définie dans le Journal Officiel du 8 septembre 2013 : « *fabrication, à partir d'objets ou de matériaux de récupération, de produits de plus haute valeur que les objets ou matériaux d'origine.*⁸ ». Cependant, la notion de *refonctionnalisation* s'applique à des objets auxquels on donne une nouvelle fonction en leur faisant subir une transformation partielle ; c'est donc une étape intermédiaire, entre la préservation totale de l'objet (réemploi ou détournement) et sa transformation totale (recyclage), qui recouvre une moins grande étendue que les notions de *supercyclage* ou de *recyclage valorisant*. En dépit de son existence dans le JO, le terme de *recyclage valorisant* demeure inutilisé par les experts du domaine du réemploi ; peut-être en raison de sa parenté avec la notion de *recyclage* et la volonté des auteurs de se différencier de cette pratique. Il existe deux synonymes à la notion de *recyclage valorisant* qui ne sont cependant pas inscrits au journal officiel dans la liste des termes adoptés : le *surcyclage* et l'*upcyclage*. Ces deux termes sont des adaptations en français de la notion d'*upcycling* [PILZ, 1994].

Certains auteurs ont proposé une définition du réemploi plus large qui inclut la possibilité d'un usage différent de celui initial du produit [HUYGEN, 2008] ; [ALLWOOD et al. 2010] ; [GHYOOT, 2014] ; [ALI, 2017]. Cependant aucune piste précise ne se dégage concernant la possibilité d'utiliser un produit en le transformant dans le but de lui donner un nouvel usage. Ce manque de repères partagés oblige toujours les auteurs à se positionner sur les limites de ce qu'ils entendent par « réemploi », comme en témoigne une publication récente de l'ADEME : « *Le réemploi d'éléments et de composants de construction en architecture est dès aujourd'hui possible en France. Nous l'entendons dans son sens large, c'est-à-dire en embrassant à la fois la notion de réemploi au sens strict (second usage identique à l'usage initial) et la notion de réutilisation (détournement d'usage)* » [ADEME, 2018]. Il faut également relever dans cet exemple que l'ADEME élargit le champ de la définition du réemploi et utilise également le

⁸ (Légifrance) JORF n°0209 du 8 septembre 2013, page 15187, texte n° 53, Vocabulaire de l'environnement (liste de termes, expressions et définitions adoptés) NOR : CTNX1321050K

terme « réutilisation » dans un sens différent que de celui donné par le code de l'environnement.

2.4.4 Positionnement et caractérisation du « modèle réemploi ».

Bien que placé en seconde position dans la hiérarchie des modes de traitements, le réemploi demeure encore globalement au stade d'alternative sans être vraiment pris au sérieux. Les filières de recyclage plus matures et conçues pour absorber des tonnages conséquents sont mieux armées pour faire face aux problématiques industrielles de gestion des déchets, puisqu'elles ne changent pas le paradigme du modèle industriel. Cependant, divers projets émergent à des échelles variées et complémentaires : de l'action ultra locale, qui limite les échanges à quelques partenaires, jusqu'à l'inventaire global des stocks de matériaux disponibles à l'échelle d'une ville, d'une région voire de l'Europe [GEERTS et al. 2020]. Ils mêlent différents niveaux de réflexions sur le cycle de vie et impliquent de nombreux partenaires issus de corps de métier très différents. Geerts et al. (2020) montrent à travers des cas d'études pilotes la diversité, l'étendue et la complexité des pratiques de réemploi tout en appuyant sur la nécessité d'y allouer des moyens pour renforcer et crédibiliser ces filières auprès d'un large éventail d'acteurs publics ou privés Tableau 3 encore réticents à l'application.

Tableau 3 : les acteurs du réemploi et de la réutilisation (Source : ADEME⁹) :

Acteurs du réemploi et de la réutilisation	Caractéristiques
Les acteurs de l'Economie Sociale et Solidaire (ESS)	Recycleries, associations caritatives.
Les acteurs de l'économie conventionnelle	dépôts-ventes, revendeurs et brocanteurs ; intermédiaires et reconditionneurs ; sites internet
Les acteurs en possession de biens encore en état souhaitent s'en séparer et ceux qui souhaitent acquérir des biens de seconde main	ménages, entreprises, agents de collectivités...
Les autres acteurs pouvant soutenir les activités de réemploi et réutilisation	collectivités ; les relais et associations (ex : chambres des métiers, associations environnementales, associations locales...) ; les éco-organismes

Le réemploi et la préservation des matériaux repose sur différents types d'activités, de structures ou d'organisations. Une typologie non-exhaustive peut être proposée, reposant des cadres d'action différents dans le domaine de la valorisation des objets de seconde vie : le cadre associatif ou expérimental, le cadre public, le cadre public / privé et le cadre privé lié à l'entrepreneuriat. Cette typologie a pour but de donner un aperçu de la diversité des initiatives de gestion des matériaux de seconde vie dont la l'échelle d'action (états, régions, entreprises, associations, etc.), les objectifs et le fonctionnement varient fortement. Les échelles d'actions sont multiples et complémentaires, cela dépend du contexte culturel et des politiques de gestion des déchets.

⁹ <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-l'action/eviter-production-dechets/reemploi-reutilisation> (Consulté le 19/06/2020)

2.4.4.1 Le cadre associatif / expérimental.

De nombreuses associations et collectifs déploient des espaces de valorisation des matériaux de seconde vie dans l'objectif d'expérimenter des pratiques nouvelles (Open Sources¹⁰, Bellastock¹¹, Material for the arts, Open Source Ecology¹², Rural Studio¹³). Ces dernières ne sont pas prestataires de collecte pour une collectivité, et ne sont pas soumises à une obligation de collecte. Les recycleries peuvent se spécialiser dans des domaines ou dans des activités spécifiques. La collecte préservante, la valorisation, la revente, et la sensibilisation font partie de ses missions, mais l'organisation et l'étendue des champs d'action des recycleries dépendent des compétences intégrées à l'association. Ainsi les matériaux sont valorisés dans de très nombreux domaines : spectacle vivant, scénographie, design produit, artisanat, microarchitecture, paysage, aménagements publics, etc. L'ADEME définit le terme de Recyclerie en précisant son caractère générique : « le terme « recyclerie » est employé de façon générique. La recyclerie est un centre qui a pour vocation de récupérer, valoriser et / ou réparer, en vue de la revente au grand public, des produits d'occasion ou des produits usagés (ayant le statut de déchets). Ils feront l'objet d'une opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation (préparation en vue de la réutilisation) afin de retrouver leur statut de produits »¹⁴. Les associations à caractère spécifique, liées à la recherche ou à l'expérimentation par la pratique, développent de nombreux contacts académiques, publics ou privés. Ainsi, l'Asbl Rotor, Bellastock ou Open Sources ont développé des compétences transversales à l'ensemble de la chaîne de valeur en proposant une expertise dans le diagnostic des bâtiments, la déconstruction, la collecte, la valorisation, l'analyse historique, la conception de produits, la caractérisation de certains matériaux, le conditionnement, le transport ou la vente d'objets de seconde vie.

Le cadre pédagogique est axé sur la diffusion et la circulation des connaissances, mais il est aussi un outil de sensibilisation du public à l'usage de matériaux de seconde vie. Bien que la documentation théorique soit de plus en plus étayée, il repose principalement sur des exemples approuvés de manière expérimentale qui se traduisent par de nouvelles pratiques. Ceci implique deux niveaux : l'expérimentation de méthodes de gestion et d'organisation du stock de matériaux au sein d'espaces recevant du public ; et l'apprentissage des contraintes d'utilisation des matériaux de seconde vie dans la conception ou dans la fabrication de nouveaux objets.

Les recycleries à caractère pédagogique (récupérathèques¹, maisons des matières¹, Re-Use-In¹), sont des espaces d'expérimentation collectives autour de la collecte, du stockage et de la valorisation des matériaux de seconde vie. Ces recycleries peuvent être gérées par différentes entités telle qu'une association, une école, un collectif d'étudiants, des particuliers. La collecte est préservante et sélective. Le stock est soumis à des critères plus ou moins précis selon les besoins pédagogiques (taille, forme, couleur, matière, etc.), la valorisation est étroitement liée au stock et la circulation des matériaux, repose sur le don,

¹⁰ <http://www.echo-system.fr/ecodesign/open-sources/>

¹¹ <https://www.bellastock.com/>

¹² <https://www.opensourceecology.org/>

¹³ <http://ruralstudio.org/about/>

¹⁴ <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-l'action/eviter-production-dechets/reemploi-reutilisation> (Consulté le 19/06/2020)

l'échange voire la vente d'objets. L'échelle de ces expérimentations restent centrée sur les écoles ou sur des publics cibles. Le terme de *déchethèque* est également utilisé pour de nombreuses recycleries. Elles proposent une classification plus ou moins élaborée des matériaux, sous forme d'échantillons ou d'objets de récupération à destination des créateurs/concepteurs. Des déclinaisons plus spécialisées sont également explorées, tel que des « *chutothèques* », ou des « *gravathèques* » [SAINT-PIERRE, 2022].

Les matériauthèques, quant à elles, sont un peu différentes. Contrairement aux exemples précédents, elles proposent bien souvent des matériaux neufs ou des matières, disponibles sur catalogue ou soigneusement présentées afin de servir d'inspiration aux concepteurs. De manière générale, elles recensent des matériaux sous forme d'échantillons physiques et / ou de bases de données accessibles aux adhérents. De ce fait, les matériauthèques sont pour l'immense majorité, peu ou pas concernées par les questions de collecte ou de valorisation des objets de récupération. Cependant, en axant la sensibilisation sur les formes / procédés / savoir-faire, une ouverture sur les matériaux de seconde vie serait tout à fait envisageable.

2.4.4.2 *Le cadre public.*

Les structures territoriales de gestion des déchets et des encombrants participent également à la valorisation à différents degrés des matériaux de seconde vie. Les déchetteries sont des points de collecte importants. Leur objectif principal reste la collecte de déchets mais leur fonctionnement a évolué pour laisser une place plus importante à la réduction et au réemploi des déchets. La déchetterie de Vayres en Gironde est souvent citée en exemple pour la mise en place d'un parcours expérimental permettant d'abord l'encadrement du dépôt des matériaux, ensuite un espace permettant le retrait de matériaux de récupération pour les usagers ; ce qui est d'ordinaire interdit dans de nombreuses déchetteries [SMICVAL, 2017]. Toutes les séquences de dépôt, stockage, classement des matériaux ont été repensées en vue de proposer un nouveau service plus qualitatif aux usagers. Cette approche a un double avantage, car en plus de sensibiliser les usagers à l'usage de matériaux de récupération, elle a le bénéfice de réduire les coûts de gestion ainsi que les tonnages des déchets à traiter par les collectivités territoriales [SMICVAL, 2017].

2.4.4.3 *Le cadre public / privé.*

Ce modèle, fait référence aux structures dont l'activité est codifiée et qui dépendent en partie du soutien de l'État. On trouve dans cette rubrique, les Ressourceries®, les filières de Responsabilité Elargie du producteur (REP), ainsi que les structures spécialisées tels que Recyclivre¹⁵, Le Relais¹⁶ ou Emmaüs¹⁷.

D'après l'ADEME, une Ressourcerie® se caractérise ainsi : « *Le terme « Ressourcerie® » est une marque déposée. La Ressourcerie® met en œuvre des modes de collecte des déchets (encombrants, déchet industriel banal [DIB]...), qui préservent leur état en vue de les valoriser*

¹⁵ <https://www.recyclivre.com/>

¹⁶ <http://lerelais.org/>

¹⁷ <https://emmaus-france.org/>

prioritairement par réemploi / réutilisation, puis recyclage. » [ADEME, 2020¹⁸] L'activité des Ressourceries[®] est définie par la charte du Réseau National des Ressourceries[®]. Leur activité est reconnue d'utilité publique, elles sont inscrites dans les *Plans et programmes locaux de prévention des déchets* ainsi que dans le *schéma de gestion des déchets du territoire*. Les Ressourceries[®] tissent un réseau d'acteurs locaux et privilégie les services apportés à la population. Ces structures revendent de nombreux objets d'occasion (mobilier, vaisselle, luminaires, vêtements, etc.), réparent et rénovent des objets tombés en désuétude ou fabriquent parfois de nouveaux objets confectionnés avec des matériaux de récupération. De plus, les Ressourceries[®] jouent un rôle social important par leur implication dans la sensibilisation à la réduction des déchets, par le recrutement de personnes en insertion professionnelle, ou par l'élaboration de nombreux programmes d'aide et de formation que ces structures proposent à des publics variés. Le fonctionnement de la Ressourcerie[®] repose sur quatre piliers : La collecte, la valorisation, la vente et la sensibilisation. Leur mise en place est encadrée par un cahier des charges et par la *Charte du Réseau National des Ressourceries* [RESEAU DES RESSOURCERIES, 2017].

Les éco-organismes sont des structures de droit privé encadrées par le dispositif REP. Ce dispositif qui existe depuis 1975 correspond au principe de pollueur-payeur. Il est codifié dans l'article L541-10 du code de l'environnement¹⁹. L'article L541-10 a été modifié et impose désormais aux filières REP d'agir sur l'ensemble du cycle de vie. Désormais, il ne s'agit plus seulement de traiter des déchets, mais également de les prévenir²⁰.

D'après l'ADEME, la REP répond à trois objectifs principaux :

« Développer le recyclage de certains déchets et augmenter la performance de recyclage de ces déchets ;

Décharger les collectivités territoriales de tout ou partie des coûts de gestion des déchets et transférer le financement du contribuable vers le consommateur ;

Internaliser dans le prix de vente du produit neuf les coûts de gestion de ce produit une fois usagé afin d'inciter les fabricants à s'engager dans une démarche d'écoconception. »

Ainsi, le dispositif REP repose sur les éco-organismes, dont le financement est assuré par les entreprises, les consommateurs (via l'éco-participation) et par les collectivités territoriales. Il existe aujourd'hui de nombreuses filières dont les premières datent de 1992 avec la collecte et le tri séparé des emballages. Avec le temps, ces filières se sont diversifiées pour répondre aux problématiques complexes de la gestion des déchets, dont la nature et la quantité varie fortement d'une filière à l'autre. De ce fait, les REP se sont déployées dans des domaines très variés : les équipements électriques et électroniques (DEEE), l'automobile (les véhicules hors d'usage (VHU)), les éléments d'ameublement (Valdélia et Eco-mobilier), les textiles d'habillement linge de maison et chaussures (Eco TLC), etc. Leur objectif est de permettre un meilleur tri et une valorisation optimale des déchets engendrés par l'activité économique de ces différentes filières. Il faut noter, que la collecte séparée des différents produits, a permis

¹⁸ <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-l'action/eviter-production-dechets/reemploi-reutilisation> (Consulté le 19/06/2020)

¹⁹ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000041599099/ (Consulté le 25/09/2020)

²⁰ <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/elements-contexte/filieres-a-responsabilite-elargie-producteurs-rep> (Consulté le 25/09/2020)

de massifier et d'optimiser par secteur, le démantèlement, le traitement et le recyclage des différents produits en fin de vie.

2.4.4.4 *Le cadre privé*

Le modèle entrepreneurial est d'une grande diversité. Même si certains acteurs émergents dans ce domaine sont des PME spécialisées de plus de cinquante salariés, de nombreux acteurs indépendants (artisans, designers, associations à but lucratif, etc.) centre leur modèle économique sur la valorisation des objets de récupération. Certaines entreprises de plus grande taille, explorent également avec la plus grande attention la récupération et le réemploi à des degrés divers comme le montre les expériences menées à la SNCF²¹. Leurs domaines d'action, d'une grande diversité, se concentrent pour la grande majorité des cas, sur des objets peu techniques ou peu dangereux (mobilier, bijoux, luminaires, textiles, ferraille, etc.). Ainsi, de nombreuses activités innovantes et ancrées localement (collecte sélective et préservante, maintenance et réparation, revente et distribution locale), reposent sur des investissements relativement modestes. En dépit de leurs efforts et de leur nombre, ces structures ne valorisent qu'un spectre infime des quantités de déchets produites sur les territoires. Cependant, ces entreprises ouvrent des voies vers des applications prometteuses, à différents stades du cycle de vie, dont les valeurs ajoutées sont nettement supérieures au recyclage et souvent moins préjudiciables pour l'environnement.

Afin d'avoir une meilleure visibilité sur ces acteurs, un recensement (répertoriés et cartographiés) à l'échelle de l'Europe est en cours [FCRBE, 2019]. Ce recensement se concentre principalement sur les revendeurs de matières de seconde vie qui ont des activités et tailles fortement variables. Certains fondent leur modèle économique sur la vente d'objets spécifiques : objets d'art et d'histoire (Urban archeology (New York)), briques anciennes, ferronneries, etc. Alors que d'autres sont spécialisés par secteur d'activité : bâtiment (Rotor DC (Bruxelles)) ; (Rebuilding center (Portland)), matériel paramédical (envie autonomie (Saint-Étienne)), matériaux pour la création (La réserve des Arts (Paris) ; Frich'Market (Lyon) ; Atelier Connex (région AURA)), etc.

2.4.5 *Faire circuler les objets de deuxième vie.*

2.4.5.1 *Identifier les critères de circulation des matériaux.*

Michael Ghyoot (2014), s'est intéressé aux critères permettant la circulation des matériaux et à la responsabilité du concepteur dans ses travaux de thèse en architecture. Il a identifié cinq principaux critères, qui selon lui, rendent possible la circulation des matériaux neufs : la disponibilité, la prévisibilité, la capacité à être décrit avec précision, l'appréciation esthétique et les garanties juridiques. En identifiant les critères qui permettent aux matériaux de circuler dans les canaux officiels de l'économie, il identifie différentes pistes pour permettre aux matériaux de réemploi de continuer à circuler, au même titre que les matériaux neufs. Cependant, pour acquérir le droit de circuler et d'être éventuellement prescrits par les concepteurs, de nombreux écueils restent à surmonter. En effet, les matériaux de deuxième

²¹ <https://www.sncf-reseau.com/fr/entreprise/newsroom/sujet/materiaux-voie-ressource-durable-valoriser> (Consulté le 24/05/2022).

vie, sont des matériaux atypiques dans la mesure où leur identification, leur prélèvement, leur mise en œuvre, leur conditionnement ou leur usage, vont répondre à des problématiques différentes de celles des matériaux neufs. L'élaboration et la mise en forme de ces derniers reposent sur la circulation de matières premières (extraction) ou secondaires (recyclage) ; les matériaux de récupération, quant à eux, proviennent de gisements disséminés, avaient une fonction initiale et portent souvent les traces d'un premier usage. Même si le coût des matériaux de récupération est souvent inférieur aux matériaux neufs, de nombreux auteurs s'accordent sur le fait que cette baisse de prix peut s'accompagner d'une augmentation significative du temps de travail pour les remettre en circulation [GORGOLEWSKI, MORETTIN, 2009]. De ce fait la circulation des matériaux de réemploi soulève des problèmes complexes ; leur capacité à circuler dépend de la nature du gisement et de son contexte.

2.4.5.2 Évaluer la réemployabilité d'un gisement.

La valorisation des matériaux de deuxième vie implique de porter un regard nouveau sur l'analyse du métabolisme urbain. Les critères de quantités, ou l'ordinaire séparation des matières en fonction de leurs propriétés, comme c'est le cas dans le recyclage, ne suffisent plus pour comprendre la nature d'un gisement [GOBBO, 2015(a)]. Ce nouveau regard, suppose des connaissances et une formation afin de percevoir les informations, les mesurer, les évaluer et les qualifier en vue de les projeter dans un devenir [BOURSIER et al. 2019]. Dans ses travaux sur *l'Analyse du bilan métabolique (matières) des opérations de rénovation énergétique en Région de Bruxelles-Capitale*, Émilie Gobbo (2015 (b)), met en lumière la nécessité de tenir compte des aspects volumiques des matériaux en circulation : « *Notons que l'unité de poids est l'unité de référence utilisée dans le secteur du traitement des déchets, sauf dans le cas de l'évacuation des déchets sur chantier où les containers sont généralement enlevés et payés au mètre cube. [...] Il serait à présent intéressant de noter si des différences importantes apparaissent lorsque l'unité de volume est considérée* » [GOBBO, 2015(b)].

l'ADEME et le CSTB, en collaboration avec Le collectif Bellastock, proposent un *diagnostic ressource*, outil principalement centré sur l'évaluation du potentiel des matériaux issus du secteur de la construction et du bâtiment. Ce dernier est défini par l'ADEME de la manière suivante « *Évolution – ou complément – du diagnostic déchet, le diagnostic ressource vérifie les performances d'un produit de seconde vie et leur corrélation avec des domaines de réemploi possibles. Il fiabilise ensuite la filière à déployer et le débouché, c'est-à-dire le projet récepteur apte à accueillir ce produit. Il prépare enfin le cadre administratif et assurantiel qui permettra d'intégrer effectivement un réemploi dans la construction cible.* » [ADEME, 2018]. Les deux diagnostics précédemment cités concernent le secteur du bâtiment. L'obligation de faire un diagnostic déchet est entrée en vigueur le 31 mai 2012 suite à l'application de l'article 190 de la loi Grenelle 2. Cette obligation concerne actuellement les bâtiments au-delà de 1000 mètres carrés de planchers démolis. Le *diagnostic ressource* est développé comme un complément au *diagnostic déchet*²² rendu obligatoire depuis 2012. Il permet d'envisager le recensement des matériaux de deuxième vie sous le prisme d'une ressource à préserver plutôt qu'un déchet à valoriser. Le *diagnostic ressource* se donne les objectifs suivants :

²² Le diagnostic déchet est rendu obligatoire pour toute démolition dépassant les 1000m² de plancher démolis. Son contenu est détaillé dans l'Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments. NOR: DEVL1134503A, Version consolidée au 05 août 2020.

« • *Caractériser un ou plusieurs gisements (reconnaissance in situ, investigations documentaires, analyse des expertises complémentaires à mener) ;*

- *Indiquer ou définir de nouveaux domaines d'emploi (ce pour quoi le gisement peut être réemployé ou réutilisé) ;*
- *Identifier les ouvrages du projet qui peuvent être réalisés avec des matériaux de réemploi ;*
- *Énumérer les préconisations pour la dépose, la préparation et la mise en œuvre des matériaux ;*
- *Vérifier la faisabilité des propositions par une étude d'impact, qui peut être économique, logistique, environnementale. » [ADEME, 2018]*

Heisel et Rau-Oberhuber (2019) proposent quant à eux, une série d'indicateurs destinés à évaluer le potentiel de circularité d'un bâtiment [HEISEL, RAU-OBERHUBER, 2019]. À l'instar d'une mine que l'on pourrait exploiter, le bâtiment est considéré comme un dépôt (*material depot*), ou identifié à une « banque » (*material Bank*) qu'il s'agit de documenter et de cataloguer au moment de la construction. Cela permet l'obtention d'une image relativement précise de la nature, de la quantité, de la qualité et de la disponibilité du stock que contient l'environnement construit (*built environment*). Le projet *Building as material Bank* [EPEA Netherland BV, 2017], explore cette potentialité et se propose de délivrer des « passeports » (*material passeport*) gérés par une plateforme interactive (*Material passeport platform*). L'objectif est de permettre la traçabilité des matériaux dans le temps, afin de faciliter le réemploi ou le recyclage potentiel de ces matériaux dans l'avenir. Cette approche repose notamment sur le développement des outils de modélisation et de documentation BIM (*Building Information Modeling*). La limite de ce projet est qu'il explore peu la problématique de la valorisation des matériaux de récupération dans la construction, mais mise sur une hypothétique réemployabilité des matériaux neufs qui sont mis en œuvre. Bien que le réemploi ou la refonctionnalisation des matériaux repose sur le bon vouloir des futurs décideurs, ce projet a cependant le mérite de favoriser la maintenance, la réversibilité, l'adaptabilité, la documentation ou l'usage de matériaux économes en énergie. Cependant il est nécessaire de noter que les pratiques de valorisation des matériaux de deuxième vie (réemploi, réutilisation, détournement, refonctionnalisation) possèdent également de nombreux impacts potentiels qu'il est nécessaire de comprendre, d'anticiper et de réduire [COOPER, GUTOWSKI, 2015].

2.5 Conclusion de la partie Bibliographique.

L'état de l'art a montré que les matériaux de récupération ont toujours été utilisés mais ont peu à peu disparu des pratiques constructives avec l'arrivée de l'industrialisation. Cette disparition a entraîné son corollaire, c'est-à-dire un abandon progressif des matériaux de deuxième vie dans les processus de conception qui se sont principalement focalisés sur l'usage de matériaux neufs standardisés, compatibles avec les procédés industriels. De nos jours, une mise en lumière de l'intérêt de ces pratiques refait surface, au regard des grands défis de notre époque en matière d'économie d'énergie, de raréfaction des matières premières et de gestion des déchets. La redécouverte progressive des matériaux de récupération induit une pensée nouvelle sur l'élaboration de modèles de gestion des matériaux, plus ancrés dans les territoires et plus sobres en énergie. Cette redécouverte s'accompagne d'une modification des processus de conception [GORGOLEWSKI, MORETTIN, 2009] [PONGIGLIONE, CALDERINI, 2014] [BRÜTTING, 2019] en vue de pouvoir intégrer des matériaux déjà mis en forme et ayant potentiellement traversé une ou plusieurs phases d'usage.

La mise en circulation de matériaux de deuxième vie sur un territoire vient en concurrence avec des matériaux issus de matières premières vierges. Ainsi cette thèse propose de repenser les filières de recirculation des matières de deuxième vie par une démarche de création divergente dès les premières étapes de conception, proposant ainsi à un territoire une diversité de cycles de circulation de matières complémentaires œuvrant en synergie.

La démonstration de l'intérêt de ces nouvelles voies de production à l'échelle territoriale demande de mettre en œuvre des outils et méthodes de créativité et de conception en vue de comparer les différentes options. Pour cela, la contribution de cette thèse se positionne sur trois points :

- Une clarification sémantique : Sur la base de la hiérarchie des modes de traitement, les termes seront clarifiés et de nouveaux termes seront introduits.
- La mise en place de deux outils d'aide à la conception à usage pédagogique ou professionnel permettant de développer des scénarios de valorisation des matériaux de deuxième vie.
- L'élaboration d'un pré-modèle de circulation des matériaux et d'indicateurs destinés à évaluer les scénarios de valorisation des matériaux de deuxième vie.

3 Explorer le potentiel de nouvelles filières.

En cherchant à se débarrasser des objets en fin de vie, le modèle d'économie circulaire quant à lui, même s'il met en avant la réparation ou le réemploi, repose sur l'idée que les objets en fin de vie peuvent être intégrés indéfiniment dans le système pour en récupérer la matière ou l'énergie [CULLEN, 2017]. Avec la généralisation du recyclage, de nombreux objets sont réduits à l'état de matière de façon prématurée. Cette stratégie se concentre sur les propriétés des matériaux, en essayant de les conserver d'un cycle à l'autre. Or les propriétés des matériaux se dégradent peu à peu (recyclage descendant) et des valeurs sont perdues au moment du recyclage : par exemple la connaissance sur les spécificités des objets en circulation est perdue. Dans cette perspective, la production tourne à plein régime avec une matière entrante vierge et recyclée et les filières de gestion des déchets doivent s'organiser pour absorber de grandes quantités qui, au lieu de diminuer, ne cessent d'augmenter.

Pour apporter une réponse à cette problématique et proposer des alternatives, l'hypothèse serait de se concentrer sur ce qui permet aux matériaux de circuler sans revenir trop vite à l'état de matière. Cette stratégie permettrait de réduire les prélèvements dans le milieu naturel tout en répondant aux objectifs de réduction des déchets. En effet, en cherchant à limiter la vitesse de transformation des objets qui circulent déjà, les propriétés et les qualités des objets, des matériaux et des matières qui constituent notre environnement construit sont préservées. La mise en forme, contient de l'information (énergie, valeurs et propriétés des matériaux), qu'il s'agit de conserver pour permettre aux concepteurs de l'utiliser dans de nouveaux projets. Il s'agit donc d'identifier et de comprendre les mécanismes qui permettent de limiter la vitesse de transformation des matériaux en vue de préserver les propriétés et les qualités qu'ils contiennent le plus longtemps possible ; et ceci dans l'objectif de préserver les valeurs ou d'en développer de nouvelles. Nous avons vu que les matériaux, les procédés et les savoir-faire sont les trois faces complémentaires de notre rapport à la matière. Ainsi, l'information disponible sur le territoire, est fondamentale pour permettre le développement d'un nouveau modèle de circulation des matériaux.

3.1 L'état des lieux : documenter la nature des gisements

3.1.1 Différents types de déchets

Dans ce travail nous distinguons deux types de déchets : les déchets issus des activités de fabrication et les déchets issus des activités de consommation. Ces deux grandes catégories de déchets sont analysées sous l'angle de quatre facteurs : la disponibilité, la prévisibilité, la capacité à être décrites avec précision (propriétés mécaniques et physico-chimiques ; effets, qualités et valeurs) et enfin la capacité à être validées par des instances de contrôle, de certification ou de normalisation (Association Française de Normalisation (AFNOR), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Agence qualité de la construction (AQC), etc.), ce qui leur procure des garanties juridiques essentielles à l'établissement d'une chaîne de confiance entre les différents acteurs [GHYOOT, 2014].

Nous commencerons par examiner les déchets de fabrication sans phase d'usage. Nous aborderons ensuite les déchets post-consommation, plus complexes en raison de leur dissémination et de leur ancrage culturel. Enfin, nous distinguerons les déchets de fabrication

avec usage, qui constituent une catégorie intermédiaire. Ces critères sont résumés dans la Tableau 4 en fonction des différentes catégories de déchets.

Tableau 4 : tableau récapitulatif du potentiel de circulation des matériaux en fonction de la catégorie de déchet : les critères de circulation des déchets et matériaux de deuxième vie.

		Critères permettant la circulation des matériaux			
		Disponibilité	Prévisibilité	Capacité à être décrit avec précision	Garanties Juridiques
Type de déchet	Déchets de fabrication / Sans usage (Intra-entreprise)	Lié au métabolisme territorial	Planification, saisonnalité. Lié aux modes de production	Génie des matériaux, traçabilité	Données entreprise, caractérisation, certification
	Déchets de fabrication / Avec usage, usure, défauts (Intra-entreprise et multi-entreprise)	Lié au métabolisme territorial	Lié aux usages, aux modes de production	Incertitudes, traçabilité possible	Incertitudes, garanties limitées
	Déchets post-consommation (Déchetteries, centres de tri)	Ultra Local, grande diversité	Incertitudes dans le temps et dans l'espace. Lié aux modes de consommation	Cas par cas, manque de traçabilité	Absence de garanties

3.1.1.1 Les déchets de fabrication sans usage.

Les déchets de fabrication sans usage sont directement issus des opérations de fabrication. Nous y trouvons par exemple des chutes et rebuts issus des opérations de découpe ou d'enlèvement de matière, les tests de production, les invendus, les échantillons, etc. Chutes et rebuts sont différenciés : la chute est le négatif de la matière-mère, partageant les mêmes attributs propriétés et qualités. Le rebut est une partie de la matière-mère altérée dans au moins un de ces attributs. Nous plaçons dans la catégorie des déchets de fabrication sans usage, les matériaux dont les propriétés sont connues, stables et assimilables à un matériau neuf. De ce fait, le fabricant peut se procurer aisément de nombreuses informations sur le matériau : que ce soit sur les aspects environnementaux et sanitaires, avec les Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES), les propriétés mécaniques, les qualités, souvent certifiés par un organisme de contrôle (NF pour la conformité aux normes Françaises, CE pour la conformité aux normes Européennes, etc.).

A noter que dans le cadre des chutes, différents contre-exemples peuvent être mentionnés, dans l'hypothèse où les opérations de fabrication ou de découpe modifieraient les propriétés, les qualités ou les effets des chutes et rebuts. Par exemple, les opérations de sciage, transforment le bois en sciure dont la densité varie selon les coupes ; le travail du cuir distingue des parties nobles et d'autres de moindre qualité ; le travail d'usinage des métaux produit des copeaux différents selon les pièces fabriquées et l'outil utilisé, etc.

Ces matériaux sont le plus souvent disponibles, sous réserve de les identifier, de les trier, de les documenter et de les conditionner. Le tri peut-être relativement aisé, dans la mesure où ce type de déchet n'est pas encore mélangé à d'autres gisements. Là encore des limites peuvent-être mentionnées, lorsque certaines opérations de fabrication ont pour effet de mélanger des matériaux ou des produits, donnant lieu à un déchet ou à un nouvel objet (un composite), dont les propriétés et les qualités doivent être caractérisés. Sur le plan temporel, il est envisageable d'anticiper les quantités produites dans le temps et dans l'espace car la production de ce type de déchet est liée aux opérations de fabrication, dont les ressorts sont déjà bien étudiés par les fabricants. De cette manière, il est possible de planifier d'éventuelles

opérations de conservation, de conditionnement ou de stockage comme s'il s'agissait de la production d'un coproduit. Les déchets de fabrication sans usages ont donc de nombreux atouts pour être intégrés sans trop de difficultés dans de nouvelles opérations de fabrication ou de supercyclage. De plus, si l'on considère qu'ils sont produits au sein d'une entreprise, la traçabilité reste possible. De ce fait, les déchets de fabrication sans usage répondent à la majeure partie des critères essentiels à la mise en place d'une chaîne de confiance entre le fabricant et les futurs usagers.

Dans le cadre de cette thèse, Nous avons contacté l'entreprise LINDER pour une visite d'une de leurs usines et une collecte de leurs déchets de production. L'entreprise LINDER a été créée en 1904. Actuellement, le groupe LINDER maîtrise une gamme complète de savoir-faire couvrant de nombreux domaines dans la confection et la fabrication de textiles d'ameublement : tisseur et croiseur de fil, développement de matières premières, créations textiles et sur-mesure, ennoblissement, teinture, assemblage et confection. LINDER dispose également d'un pôle innovation, recherche et développement pour travailler sur de nouveaux matériaux et semi-produits à destination de l'industrie textile. La production est répartie sur trois sites éloignés d'une dizaine de kilomètres entre les communes de Violay (tissage, création, assemblage et confection) et de Tarare (teinture, ennoblissement).

Cet état des lieux des déchets de fabrication sans usage de l'usine LINDER a permis d'identifier différents types de déchets :

- Certains déchets de fabrication sans usage, par exemple les lisières qui proviennent de la découpe des parties latérales d'une pièce de textile en cours de tissage. Cette découpe permet d'éviter que les fils de chaîne ne ressortent de la pièce textile. Ces lisières sont issues de la fabrication de textiles d'ameublement produits par LINDER.
- D'autres déchets, par exemple des bobines de fils en plastique ou en carton, des chutes provenant de la machine à araser, ou encore de la poussière de textile collectée par les aspirateurs automatiques de l'usine.

Lors de cette visite d'usine, nous avons plus particulièrement collecté des données (type de lisière, largeur, couleurs, matériaux, procédés, etc.) et des échantillons liés au gisement de lisières afin de construire des expérimentations de conception avec ces déchets textiles. Ces expérimentations sont détaillées dans la partie (3.5.5) et servent à la formalisation de certains outils d'aide à la conception proposés dans ce travail de thèse.

3.1.1.2 Les déchets post-consommation.

Les déchets post-consommation constituent la catégorie la plus délicate et la plus incertaine, mais aussi la catégorie la plus large. Ils intègrent les déchets municipaux, les encombrants, divers déchets issus des secteurs de la construction, ainsi que de nombreux déchets collectés par des filières à responsabilité élargie du producteur (Véhicules Hors d'Usage (VHU), Déchets d'Équipement Électrique et Électronique (DEEE), Déchets d'Élément d'Ameublement (DEA), Textile, Linge de maison, Chaussures (TLC), etc.).

Du fait de l'étape de consommation dont ils sont issus, ces déchets sont disponibles de manière très locale, ils sont associés aux habitudes socio-culturelles de consommation et d'usage. Par conséquent cette catégorie de déchets est la plus imprévisible dans le temps et

dans l'espace. Les décrire avec précision reste un exercice particulièrement délicat en raison du manque de connaissances sur les conditions d'usage qui ont précédé leur arrivée dans les filières de traitement et par manque de traçabilité. Les propriétés et les qualités sont dans l'immense majorité incertaines, et parfois vérifiables au cas par cas. Une caractérisation précise pourrait se révéler particulièrement onéreuse. Bien souvent la collecte des déchets post-consommation est pensée pour faire face aux quantités en circulation, elle répond aux exigences du modèle de traitement des déchets qui fonctionne principalement sur des critères de poids ou de distinction entre les matières. En effet, même lorsque la collecte est séparée, elle se fait dans le meilleur des cas, sur des critères permettant le recyclage, c'est-à-dire en effectuant de vagues distinctions entre les matières : c'est pour cette raison que l'on trouve dans une benne triée par matière (par exemple le bois) une grande diversité d'essences et de matériaux comme des panneaux, des poutres, des planches, des portes, etc. Si les critères de tri reposaient sur les matériaux au lieu de reposer uniquement sur les matières, une distinction serait faite sur des critères associant la forme et la matière : par exemple, dans la terre (matière) il y a les matériaux en tant que briques (de toutes formes), tuiles (de toutes formes), carreaux, etc. De nombreux centres de tri récupèrent les déchets recyclables en mélange (verre, carton, métaux, etc.), puis différentes techniques de tri permettent d'affiner la séparation entre les déchets recyclables collectés de manière à obtenir des flux de matières relativement purs (tri optique, tri manuel, flottaison, criblage, etc.).

Les déchetteries ont le mérite d'affiner un peu plus le tri, en proposant un service plus étayé, même si celui-ci repose quasi exclusivement sur un tri par matière. Le service reste malgré tout très lacunaire du point de vue du réemploi. Cependant il peut être optimisé, à l'image des initiatives développées par la déchetterie-recyclerie de Vayres en Gironde, qui a réussi à réduire de 65 % la part des déchets enfouis [SMICVAL, 2017]. Par ailleurs, l'étude SMICVAL précise que 50 % des objets et matières entrants sont repris et 85 % des « déchets restants » sont recyclés. De ce fait, à l'exception du travail méticuleux des ressourceries ou de certains organismes qui effectuent une collecte « préservante²³ » [AMORCE, ADEME, 2015], la grande majorité des collectes de déchets post-consommation est destructive.

La temporalité de production des déchets post-consommation, reste liée aux circonstances de l'usage. Dans certains cas, il est possible d'anticiper une variation des tonnages collectés en raison des aspects saisonniers de certains gisements, mais cela reste souvent assez complexe ce qui rend la prévisibilité de ces déchets extrêmement difficile. Utiliser les déchets post-consommation dans un processus de conception ou de fabrication nécessite un effort de tri, de déconstruction ou de documentation potentiellement très conséquent. Ainsi, concevoir avec des déchets post-consommation implique un facteur d'incertitude élevé. En effet, les propriétés, les qualités et la temporalité des gisements étant très aléatoire, il est difficile d'anticiper leur disponibilité dans le temps et dans l'espace. Le manque de prévisibilité et d'information sur ce type de gisement rend très difficile une potentielle appropriation par les concepteurs qui doivent s'adapter à des matériaux fluctuants aux propriétés difficilement identifiables. La dimension versatile de certains déchets post-consommation peut néanmoins être apprivoisée pour certains types de projets ou d'usages, moyennant un effort de tri et de

²³ « La collecte « préservante » est un modèle de collecte qui permet d'exploiter et d'augmenter le potentiel de réemploi et réutilisation des biens collectés. Grâce à un tel dispositif qui optimise les conditions de collecte (ex : mise en place de conteneurs de réemploi en déchèterie, collectes en porte à porte sans recours aux bennes compactantes, locaux associatifs pour stocker les objets réemployables...), les objets collectés conservent leur état depuis leur prise en charge chez l'utilisateur, pendant leur transport et jusqu'à leur entrée au point de tri, de réparation ou de vente. » [AMORCE, ADEME, 2015]

documentation plus conséquent, ainsi qu'une forte adaptabilité pour le concepteur. De ce fait, les stratégies reposant sur les petites séries, le sur-mesure ou sur les objets uniques sont plus adaptées à la variabilité des déchets post-consommation. Déployer des logiques qui misent sur la centralisation de grandes quantités de déchets en se reposant sur des critères de distinction associés aux matières, implique presque toujours un niveau de transformation très élevé, détruisant au passage, presque toute l'énergie consommée lors du processus de production initial, les valeurs et les qualités encore incorporées dans la mise en forme des objets post-consommation en fin de vie.

Au cours de cette thèse, comme pour les déchets de production, des expérimentations ont été menées avec des déchets post-consommation pour formaliser certains outils d'aide à la conception. En particulier, nous avons proposé des expérimentations avec 2 gisements identifiés :

- Des déchets d'ameublement collectés auprès de la Ressourcerie Chrysalide. Ces expérimentations sont abordées dans la partie (3.5).
- Des livres d'occasion collectés par Recyclivre. Ces expérimentations sont abordées dans le chapitre 3.

3.1.1.3 Les déchets de fabrication avec usage.

Nous plaçons dans cette catégorie, les déchets dont les propriétés, les qualités et les effets, sont relativement stables et liés aux activités d'une ou plusieurs entreprise(s) tels que les déchets de conditionnement, les déchets de logistique, les "ratés" de fabrication, les stocks endommagés, les invendus, les stocks dormant, etc. Les déchets de fabrication avec usage sont une catégorie intermédiaire. Plus complexes que les déchets de fabrication sans usage, mais souvent plus stables et plus faciles à appréhender que les déchets post-consommation. Ce sont des déchets liés aux activités des entreprises : ils sont donc disponibles et accessibles. Leur prévisibilité reste néanmoins plus délicate car leur production dépend de facteurs aléatoires tels que la variation des commandes et des volumes de productions, la réalisation d'une série qui présente des défauts, etc. Il est possible d'obtenir des informations auprès des entreprises sur les conditions de production et d'utilisation de cette catégorie de déchets, ce qui est susceptible de faciliter la traçabilité du gisement. De plus, ce type de déchet peut éventuellement être anticipé, connu avec une certaine précision ou faire l'objet de garanties. Contrairement aux chutes, ces matériaux ont été manipulés et ont pu être contactés avec des substances, matériaux ou produits inconnus. Ils peuvent également avoir été altérés lors du processus de fabrication, ou par leur usage, introduisant des aspects aléatoires qui rendent leur identification ou leur évaluation plus délicate. Par exemple, des objets consignés, comme les palettes Europe, sont prévus dès la conception pour être intégrés plusieurs fois dans des boucles d'usage. Ce modèle de palette peut être maintenu et réparé, mais ne sert que dans le périmètre de sa fonction initiale. Il est possible d'obtenir des informations sur la nature des matériaux transportés, sur les conditions d'utilisation, les quantités disponibles ou sur la fréquence d'usage. Malgré leur potentiel de réusage, de nombreux déchets de conditionnement ne servent souvent qu'une seule fois. Au-delà de la fonction initiale, aucune garantie ne permet aux concepteurs de les utiliser pour un nouvel usage. Même si de nombreux exemples pertinents démontrent le potentiel d'utilisation des déchets de conditionnement ou de logistique, cela reste dans l'immense majorité des cas, des

applications cantonnées au domaine informel. Ainsi, les déchets de fabrication avec usage ne garantissent pas systématiquement les critères de contrôles et de traçabilité.

Il est possible de distinguer les déchets de fabrication avec usage qui restent dans le périmètre de contrôle d'un acteur et ceux qui en sortent. Dans le premier cas, la traçabilité est plus facile car l'acteur en question est susceptible d'identifier aisément les conditions d'usage. Dans le second cas, lorsqu'il s'agit d'une configuration multi-acteurs, la traçabilité est plus délicate car elle engage une responsabilité partagée susceptible d'impliquer de nombreux acteurs. Les déchets de fabrication avec usage, ne dépendent pas directement du cycle de production d'un acteur déterminé, sans en être complètement détaché. Étant liés aux activités de production et de logistique, ces déchets ont une certaine régularité dans le temps et dans l'espace. Cependant, cette catégorie est plus difficilement prévisible et mesurable que les déchets de fabrication sans usage, mais elle possède un potentiel qui peut être mis en perspective dans des conditions d'usage et de sécurité adaptés.

Il convient donc de chercher des applications qui soient conformes au degré d'information dont dispose le concepteur pour pouvoir utiliser pleinement le potentiel des matériaux à chaque étape de leur cycle de vie. Dans son ouvrage, « *La poubelle et l'architecte* » Jean-Marc Huygen (2008), préconise de réutiliser les matériaux en suivant « *le principe de subsidiarité* ». Ce principe consiste à réutiliser un objet à son niveau de complexité existant afin de lui trouver l'usage le plus « *efficace* » possible. L'objet étant en quelque sorte l'aboutissement d'une « *sédimentation* » de dépenses énergétiques qui ont permis sa mise en forme, cette « *efficacité* » repose sur la capacité d'interprétation du potentiel du matériau à son niveau de complexité existant de manière à limiter les dépenses énergétiques supplémentaires qui seraient alors nécessaires pour que l'objet trouve un nouvel usage. Cette capacité d'interprétation est la créativité ou la « *matière grise* » [CHOPPIN et al. 2014]. L'architecte Jean-Marc Huygen (2008), dont la réflexion porte sur les matériaux pour l'architecture, s'appuie sur deux principes pour développer « *le principe de subsidiarité* » dans le champ des matériaux de réemploi :

- « *Le principe de complexité : par un apport d'énergie, la matière devient plus stable et porteuse de mémoire. Il est irréversible : pour désorganiser la matière et revenir à un niveau de complexité moindre, il faut une nouvelle dépense d'énergie* ».
- « *Le principe de réemploi : en conservant au maximum la matière (ou le matériau ou l'objet) on conserve au maximum sa mémoire (forme et histoire) sans dépenser d'énergie. C'est une conservation maximale et non totale car il y a vie, donc usure inévitable et changement d'usage* ».

Il définit alors le dernier principe qui consiste à valoriser l'énergie déjà dépensée (« *l'énergie grise* » ou « *énergie embarquée* »), en faisant usage de créativité (de « *matière grise* ») : « *Le principe de subsidiarité : la matière (ou matériau ou objet), à son niveau de complexité existant, est utilisée à l'échelon de subsidiarité le plus bas, où la perte de rentabilité est la plus faible compte-tenu de ses potentialités, où elle apporte le plus d'efficacité d'usage. Ce principe est réversible : la matière peut monter ou descendre d'échelon, toujours sans changer de niveau de complexité, être utilisée autrement pour être plus efficace dans un autre usage, par une simple dépense de matière grise.* » [HUYGEN, 2008].

Les déchets de fabrication avec usage sont donc de potentiels candidats en vue du supercyclage, mais il faut rester prudent et veiller à ce que l'ensemble des critères soient bien respectés, pour que le niveau d'incertitude et de connaissance, soit adapté aux usages envisagés. De cette manière, l'objet ou le matériau, peut remplir des critères de performances, de standardisation ou de mise en œuvre adaptés aux nouveaux usages envisagés.

3.1.2 Réaliser un état des lieux en vue du diagnostic : collecter des données sur les gisements de déchets.

Dans le cadre de notre étude, l'état des lieux est une collecte de données quantitatives et qualitatives d'un gisement de déchet. L'état des lieux permet de déterminer les données accessibles qui serviront à l'élaboration du diagnostic. Il permet d'augmenter les connaissances sur le gisement en vue de déterminer ses valeurs et son potentiel de valorisation. L'état des lieux peut revêtir différents niveaux de détail selon la nature du système étudié, de l'accessibilité des données et des besoins liés à l'utilisation future des données collectées. Le niveau d'exigence est susceptible de varier en fonction de différents facteurs : la nature du projet, la phase de projet (pré-diagnostic en amont et diagnostic détaillé plus en aval), la complexité du gisement, le temps disponible, les moyens alloués, la disponibilité des données, etc. L'état des lieux peut être enrichi par des documents complémentaires selon les exigences et l'étendue du projet, comme des plans, des photos, des FDES, des cartographies, etc.

Une fois l'état des lieux réalisé, les données recueillies peuvent être analysées dans l'objectif de construire de nouveaux scénarios de circulation de matière : il s'agit de l'étape de diagnostic.

Dans cette étape, il s'agit de :

- Trouver des scénarios de circulation de matière non envisagés jusqu'à lors.
- Mettre en évidence les points de vigilance qui limitent certains scénarios de circulation de matière.
- Identifier les paramètres qui favorisent certains scénarios de circulation de matière.

Dans le cadre de cette thèse, un état des lieux et un diagnostic de l'usine de tissage de l'entreprise LINDER ont été réalisés.

Pour l'état des lieux, des « fiches déchet » (Tableau 1, ANNEXE) ont été construites. Celles-ci ont été complétées lors de visites et sur la base des échantillons identifiés sur site. Ces fiches permettent de documenter chaque déchet identifié. Une « fiche déchet » se compose de cinq grands domaines déclinés en sous-parties :

Les informations sur le matériau et les procédés de fabrication : nature et référence du produit dont il est issu, description matérielle (mono matériau, multi matériau, composite, type d'armure pour le textile, de structure, etc.), propriétés mécaniques (caractérisation), performances environnementales et sanitaires (FDES), état (solide, liquide, gazeux, granulaire), assemblages éventuels et procédés de fabrication.

Les informations quantitatives : données mesurables des caractéristiques du déchet telles que les dimensions, le volume, la masse, le prix, le coût...

Les informations qualitatives : données non mesurables instrumentalement des caractéristiques du déchet telles que les qualités (aspect, finition, état), les valeurs, les informations géométriques et constructives en deux ou trois dimensions (plans, croquis, photos, détails techniques, etc.)

Les informations temporelles : mode de traitement actuel (valorisation, don, revente, recyclage, incinération, enfouissement), temporalité (durées), saisonnalité (périodicité et cycles).

Les informations territoriales : données géographiques et organisationnelles (lieu de production du déchet, lieu de stockage et distances, caractéristiques de l'entreprise), données logistiques (nature du tri, nature du conditionnement, possibilité de démontage, de pliage, conditions spécifiques de stockage, précautions éventuelles).

3.1.2.1 *Les informations sur le matériau et les procédés de fabrication.*

Dans le contexte des matériaux neufs, ce sont les connaissances de la matière, de sa mise en forme, et de sa mise en œuvre qui permettent d'obtenir des garanties juridiques sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Par exemple, les matériaux de construction doivent répondre « *aux exigences du code de la construction et de l'habitat par des évaluations et des documents techniques permettant de garantir un niveau de qualité aux ouvrages et de sécuriser toute la chaîne d'acteurs impliqués dans l'acte de construire*²⁴ ». Pour qu'un matériau puisse circuler dans une zone géographique déterminée il doit faire l'objet d'études et de certifications : « *la certification atteste que les caractéristiques d'une offre sont conformes à celles décrites dans un référentiel, établi avec l'ensemble des parties prenantes. Ce signe de qualité vise à donner confiance aux utilisateurs dans les atouts d'une offre, en lien avec des attentes ciblées du marché*²⁵ ». Ces connaissances sur les matériaux sont principalement détenues par les entreprises qui fabriquent et mettent un matériau, un produit ou un service sur le marché. Les matériaux font l'objet de caractérisations et d'évaluations pour en connaître les performances. Des classements permettent « *d'identifier des niveaux de performance de caractéristiques qui correspondent à des sollicitations identifiées pour des usages*²⁶ ». En effet, pour pouvoir circuler, les matériaux doivent remplir des critères de performances relatives à un ou des usage(s) spécifique(s). Par ailleurs ils sont tenus d'afficher leurs performances environnementales, notamment pour mieux informer les futurs usagers (norme NF EN 15804+A1). Il existe de nombreux labels, normes et certifications permettant d'attester les performances des matériaux, des produits ou des édifices. Une part de cette expertise est détenue par les laboratoires et les centres de recherche dédiés à l'étude et à la validation des performances des matériaux (ex : CSTB, AQC, etc.). Le contrôle de la matière et de la mise en forme permet d'en assurer les performances. Les matériaux neufs et recyclés offrent donc de précieux atouts pour limiter la prise de risque.

²⁴ <<https://www.ecologie.gouv.fr/materiaux-construction-biosources-et-geosources>>, consulté le 26/07/2021.

²⁵ <<https://evaluation.cstb.fr/fr/certifications/>>, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), consulté le 26/07/2021

²⁶ <<https://evaluation.cstb.fr/fr/certifications/>>, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), consulté le 26/07/2021

Dans notre cas, trois catégories de gisements ont été identifiés : les déchets de fabrication sans usage, les déchets post-consommation et les déchets de fabrication avec usage. Selon la nature du gisement et les applications envisagées, l'obtention de garanties peut s'avérer plus ou moins complexe. Nous avons vu précédemment que la collecte d'information est plus aisée sur les gisements de déchets post-fabrication sans usage, alors que les déchets post-consommation sont plus complexes à aborder en raison du manque d'informations sur la phase d'usage. Avoir une traçabilité stricte de l'objet en phase d'usage permettrait d'obtenir des informations sur ses conditions d'utilisation. Ces derniers peuvent néanmoins acquérir des valeurs attribuées aux circonstances de l'usage comme des valeurs d'ancienneté, d'auteur, d'esthétique, etc. Le travail de documentation de l'existant permet d'augmenter les connaissances sur les gisements identifiés afin de réduire les risques et de renseigner les concepteurs sur de possibles usages. Cela permet notamment d'obtenir des données en vue de référencer les matériaux. Celles-ci seront ensuite exploitées en phase de conception en vue de définir de nouveaux usages qui seront alors relatifs au niveau d'information dont dispose le concepteur sur les gisements. Il sera alors possible de définir les moyens envisagés pour les rendre disponibles (référencement, conditionnement, stockage), et enfin, pour les valoriser (procédés, outils, méthodes).

L'approche normative offre également divers leviers sur lesquels peuvent se reposer les concepteurs pour atteindre des critères de performances mesurables ou pour définir des méthodes de travail adaptées au gisement étudié et aux nouveaux usages auxquels il se destine. Selon l'organisation internationale de normalisation, la norme permet de garantir « *un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné* » [ISO, 2004]. Elle repose donc sur un ensemble de règles, de lignes directrices ou de caractéristiques qui sont autant de leviers de conception pour atteindre les performances requises en vue de répondre « *à des usages communs et répétés* » [ISO, 2004]. L'obtention de garanties étendues nécessite donc d'aborder le problème à plusieurs échelles : d'abord celle du contrôle et de la connaissance des propriétés de la matière, ensuite celle des matériaux, des procédés et de la mise en œuvre, et enfin celle qui est relative à la conception d'un produit de manière à atteindre des performances optimales dans un contexte donné.

3.1.2.2 Les informations quantitatives.

Afin de décrire un gisement, il est essentiel de pouvoir obtenir des données mesurables qui permettent de le quantifier. Ces données pourront être exploitées par les fabricants et les concepteurs afin d'évaluer la situation de référence et de la comparer aux scénarios envisagés. L'approche quantitative est la plus répandue dans le domaine de la gestion des déchets avec une large prédominance pour le poids : « *notons que l'unité de poids est l'unité de référence utilisée dans le secteur du traitement des déchets, sauf dans le cas de l'évacuation des déchets sur chantier où les containers sont généralement enlevés et payés au m³* » [GOBBO, 2015 (b)]. La notion de masse est également largement répandue dans le domaine de l'analyse du métabolisme territorial pour la comptabilité des flux de matière en Écologie Industrielle et Territoriale (EIT).

Cependant, le poids et la masse peinent à rendre compte des spécificités d'un gisement si l'on souhaite l'utiliser en conception. De ce fait d'autres critères de mesure sont introduits tels que le volume, ou le prix de la matière en euros par kilos. À titre d'exemple, une tonne de textile

ne donnera que très peu d'information sur la mise en forme des matériaux considérés : s'agit-il de vêtements, de lisières, de chutes rectangulaires ? La notion de volume, ou de masse volumique apporte une information supplémentaire, notamment pour anticiper les questions de conditionnement, de stockage ou de transport par exemple. Enfin, le nombre d'unités (pièces, composants, produits), de mètres linéaires, de surface, d'épaisseur peuvent considérablement enrichir la perception du concepteur sur les matériaux identifiés et lui transmettre des informations essentielles s'il souhaite intégrer ces éléments dans un processus de conception. Les données recueillies dans cette catégorie concernent également les unités monétaires associés aux coûts de gestion des déchets ou à la valeur économique des matières en vue de la revente. L'ensemble de ces données permettront de positionner les stratégies de valorisation envisagées afin de comparer les différents scénarios de circulation de matière.

3.1.2.3 *Les informations qualitatives.*

Au-delà des aspects quantitatifs, la prise en compte des aspects qualitatifs révèle de nombreuses spécificités attachées aux matériaux. Ces informations sont essentielles dans un processus de conception, d'où la nécessité de les intégrer à l'état des lieux. Il s'agit de tenir compte de l'ensemble des valeurs qui caractérisent les objets concernés par l'étude. On entre alors dans une dimension qui est plus difficilement appréhendable par la métrologie instrumentale, par exemple, l'évaluation des aspects sensoriels ou des effets perçus [BASSEREAU et al. 2009]. On peut mentionner à titre d'exemple, la douceur, la brillance, le goût ou l'odeur d'un matériau ; ou encore, les aspects de surfaces, comme la texture, la couleur, les éléments visuels comme les motifs ou les traces d'usure, etc. Ces caractéristiques jouent un rôle très important dans les choix des concepteurs ou des utilisateurs envers un objet. De ce fait, les informations qualitatives d'un gisement procurent des pistes précieuses au concepteur en charge de la sélection des matériaux, car son travail s'adresse à des usagers sensibles et directement concernés par ces questions. Au-delà des aspects sensoriels ou des effets perçus, tout un corpus de valeurs accompagne les matériaux et participe à leur appréciation. Dans son ouvrage, *le culte moderne des monuments* (1903) Aloïs Riegl identifie différentes valeurs qui exercent une influence sur les décisions d'entretenir, de restaurer ou de démolir un bâtiment. Il distingue différentes valeurs qui accompagnent l'édifice au cours de sa vie, telle que la valeur historique, la valeur d'ancienneté, la valeur de remémoration, de contemporanéité, d'usage, de nouveauté, etc. [RIEGL, 1903]

3.1.2.4 *Les informations temporelles.*

Lorsque les informations quantitatives et qualitatives ont été recueillies, on va chercher à estimer la temporalité de production d'un gisement. Dans le monde des déchets, la notion de saisonnalité est récurrente, car il arrive que certains déchets soient produits avec davantage d'intensité sur certaines périodes de l'année. C'est le cas par exemple des livres scolaires, qui sont jetés en grande quantité au moment de la rentrée des classes, car de nombreux élèves se débarrassent des anciens livres pour en acquérir de nouveaux.

Pour un concepteur, la notion de prévisibilité est essentielle pour planifier le nombre d'unités à fabriquer, pour respecter les critères énoncés dans le cahier des charges ou pour honorer une commande en temps voulu. Ainsi, dans une approche de conception linéaire ou circulaire,

il est nécessaire de s'assurer que les matériaux soient disponibles, en quantité et en qualité suffisante, au moment souhaité, de manière à répondre aux différentes contraintes de fabrication. Travailler avec des matériaux de récupération peut avoir une influence sur le transport et la gestion du stock en fonction du lieu et du moment où le déchet est produit. Dans ce cas de figure, le concepteur doit tenir compte de la temporalité de production du déchet avec lequel il travaille, c'est pourquoi, il est essentiel pour lui d'obtenir des informations lui permettant de maîtriser la temporalité du projet. L'état des lieux intègre également des informations sur la fin de vie des produits en détaillant les modes de traitement actuels ainsi que les éventuelles alternatives aux modes de traitement conventionnels (recyclage / enfouissement).

Identifier les séquences temporelles des déchets de fabrication est plus aisé que d'identifier celles des déchets post-consommation. Pour les déchets de fabrication, il est possible de se reposer sur le nombre d'unités estimées ou sur les effets de collections (automne, hiver, etc.) qui vont impacter les quantités produites. De ce fait il devient envisageable d'anticiper la durée de production de certains déchets, mais aussi de prévoir ses propriétés et ses qualités en fonction de ce qui est planifié. En revanche, pour les déchets post-consommation, cela dépend de l'attitude des consommateurs, ce qui augmente le degré d'incertitude. Même si une fenêtre de collecte peut être anticipée en fonction de la durée de vie estimée des produits, la planification reste beaucoup plus délicate et aléatoire, dans le temps comme dans l'espace.

3.1.2.5 *Les informations territoriales.*

La partie territoriale de l'état des lieux se concentre sur les paramètres géographiques et organisationnels de la gestion des déchets sur le territoire d'étude [DECOUZON *et al.*, 2012]. Il s'agit ici de collecter des données sur les modalités de gestion des déchets en se focalisant sur les pratiques de tri, de conditionnement et de stockage existantes. Ces données ont pour objectif de caractériser la situation de référence, de manière à anticiper la nature des efforts de tri, de stockage, de conditionnement, ou de transport nécessaires à l'élaboration de scénario de circulation de matière. Des données complémentaires liées aux pratiques de production de l'entreprise sont aussi collectées (production actuelle, parc machines, partenariats existants, répartition spatiale des stocks et des outils...). L'ensemble de ces données permettent de visualiser le contexte du déchet afin d'ouvrir la voie à de nouveaux scénarios de circulation de matière.

3.2 **Le diagnostic : Envisager des options alternatives.**

L'état des lieux a pour objectif de collecter des données permettant la caractérisation du gisement étudié. Une fois l'état des lieux réalisé, vient une phase d'analyse et d'interprétation des données obtenues durant laquelle nous cherchons à aborder de manière créative le potentiel de valorisation d'un gisement. Pour construire cet outil de soutien créatif à la conception, le point de départ est un dialogue entre méthodes du concepteur et méthodes du créateur.

3.2.1 **Design, entre méthodes de conception et méthodes de création.**

Le travail du concepteur, représenté par l'ingénieur ou le technicien spécialisé, se tourne vers l'industrie pour y concevoir des produits dont les performances fonctionnelles sont mesurables [QUARANTE, 1984]. Le produit est le fruit d'une activité de conception, il est souvent développé en grand nombre en raison de sa nature industrielle : « *la conception de produit est une activité appartenant au domaine du génie industriel* » [BERANGER, 2011]. Selon la norme NF L00-007 (AFNOR, 1992) « *la conception d'un produit est l'activité créatrice qui, partant des besoins exprimés, des moyens existants et des possibilités technologiques, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable.* » D'après cette définition le concepteur est contraint par un cahier des charges en vue de répondre à un besoin traduit en termes d'exigences techniques soumises à des critères de contrôles : « *Selon NF L00-007 La Spécification Technique de Besoin (STB) est un Document à caractère contractuel établi par le demandeur d'un produit, à l'intention du concepteur, et par lequel il exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en termes d'exigences techniques. La Spécification Technique du Besoin fixe également les conditions de vérification du respect de ces exigences.* » Même si l'expression du besoin et des critères de contrôles sont clairement définis, il est spécifié que le concepteur dispose « *de moyens existants et de possibilités technologiques.* » La combinaison des moyens et des possibilités ouvre un vaste champ d'exploration dans lequel le concepteur doit faire des choix. Les choix du concepteur sont guidés par une démarche et des connaissances scientifiques, et le processus de conception suit des séquences préétablies [AOUSSAT, 1990] [CROSS, 2000]. Même si le concepteur doit faire preuve de créativité et de sens critique, il se concentre principalement sur la résolution de problèmes techniques. Une certaine liberté lui est accordée dans la mesure où ce dernier respecte le cahier des charges qui lui a été transmis. Ce document est essentiel, car il délimite le cadre d'action et les libertés dont dispose le concepteur pour que le besoin initial exprimé par le cahier des charges soit traduit en opérations de fabrications et de mise en forme. Le concepteur est donc en quelque sorte « un traducteur » chargé de donner une expression technique et fonctionnelle aux besoins exprimés par le cahier des charges : « *Selon la norme NF X 50-151 (expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel), le cahier des charges fonctionnel est le document par lequel un demandeur exprime ses besoins (ou ceux qu'il est chargé de traduire) en termes de fonctions de service et de contraintes de réalisation. Pour chaque fonction sont définis des critères d'appréciation, ainsi que leurs niveaux ; chacun d'eux est assorti d'un certain degré de flexibilité.* ». L'activité de conception et les sciences qui en résultent se concentrent principalement sur la technique pour répondre au besoin, même si de nombreux efforts ont été faits pour élargir les champs d'études à d'autres disciplines de manière à y intégrer des facteurs humains et relatifs tels que la sociologie, l'ergonomie, la psychologie, le sensoriel, ou l'esthétique.

Le travail de création est une activité plus libre « *qui désigne l'acte de créer* » [PROST et al. 1995], incarnée par l'artiste, l'artisan ou le créateur. Le résultat du travail de création n'est pas forcément soumis à un impératif de reproductibilité technique et de standardisation qui caractérise la production industrielle. Il faut distinguer ici le travail de l'artisan de celui de l'artiste dans le processus d'idéation et de fabrication. L'artisan développe et fabrique des objets en petites séries qui sont contraint par un cadre fonctionnel. Il hérite d'un savoir-faire souvent lié au travail d'une matière (le bois, la porcelaine, la pierre, etc.) et ses activités sont encadrées par un groupe professionnel. L'artiste peut s'affranchir des contraintes fonctionnelles pour se focaliser sur une démarche personnelle libérée des contraintes d'un

cahier des charges. L'œuvre est souvent unique et liée à un auteur ce qui lui confère un caractère original. Bien que potentiellement reproductible l'œuvre se caractérise par la démarche de l'artiste « *Œuvre où la mise en forme des matériaux, l'utilisation de la technique tendent à communiquer la vision personnelle de l'artiste en suscitant une émotion esthétique.* » (CNRTL, consulté le 01/04/2021). La création est définie de la manière suivante par le CNRTL : « **II.- P. méton.** Objet, chose créé(e). [...] **B.-** [En parlant de ce qui résulte de l'exercice du pouvoir qu'a l'homme de produire qqc. de nouveau, d'original, au terme d'un acte créateur] [...] **1.** Acte qui consiste à produire quelque chose de nouveau, d'original, à partir de données préexistantes. **α)** Domaine des *B.-A.-* *Au sing.* Produit issu de l'activité d'un artiste et portant la marque de celui-ci. Selon le contexte, création désigne : [...] ♦ *En partic.* Œuvre littéraire, musicale, architecturale, etc., portant la marque originale de l'artiste. » (CNRTL, consulté le 01/04/2021). Selon cette définition, la création évoque à la fois l'action (activité cognitive qui consiste à créer quelque chose) et le résultat (la chose créée au terme d'un processus de fabrication donnant lieu à une forme matérialisée) [BERANGER, 2011].

Lorsqu'un designer dessine un produit, il se positionne sur l'ampleur des transformations qu'impliquent le *dessin* et le *dessein*. Les formes résultent de choix techniques qui sont eux-mêmes le résultat d'un éventail de contraintes relatives à l'objet et au contexte dans lequel il est fabriqué : ce sont les contraintes écologiques, sociales, économiques ou politiques. Les choix techniques sont nécessaires pour garantir la faisabilité d'un objet, mais ils ne sont pas les seuls critères d'appréciation de la mise en forme. Des choix sensibles, esthétiques, éthiques et culturels peuvent aussi orienter les choix de conception. Les « *formes techniques* » répondent à une recherche de performances pour une fonction souhaitée : « *La notion de forme est indispensable au travail artistique comme à la réflexion esthétique. Produire une œuvre d'art, c'est donner une forme à une matière. Mais il ne s'agit pas ici de n'importe quel type de forme : tout objet technique peut aussi être décrit comme une forme imposée à une matière, une forme commandée à la fois par les possibilités du matériau (sa résistance à la déformation et à l'usure, sa plasticité) et par les finalités techniques recherchées [...] Mais la forme artistique ne se ramène pas à la forme technique.* » [SEVE, 2017] Dans son travail de thèse « *Favoriser la création de nouveaux objets par les matériaux et les procédés au sein d'une maison traditionnelle à forte identité : le cas d'Hermès* » Anne Béranger (2011), docteure en génie industriel, propose une synthèse des notions de conception, design et création. La créativité est transversale et nécessaire à l'ingénieur, au designer ou à l'artiste pour produire de la nouveauté. Néanmoins, le produit est conçu généralement en suivant un « *processus modélisés* », alors que l'œuvre est créée de manière plus libre en suivant la « *démarche personnelle* » de l'artiste, de l'artisan ou du créateur (Figure 7). Dans son mémoire Anne Béranger précise qu'il est nécessaire de distinguer la création (en tant que discipline) de la créativité qui résulte d'un processus cognitif propre à chaque individu : « **A.-** Capacité, pouvoir qu'a un individu de créer, c'est-à-dire d'imaginer et de réaliser quelque chose de nouveau. » (CNRTL, consulté le 01/04/2021).

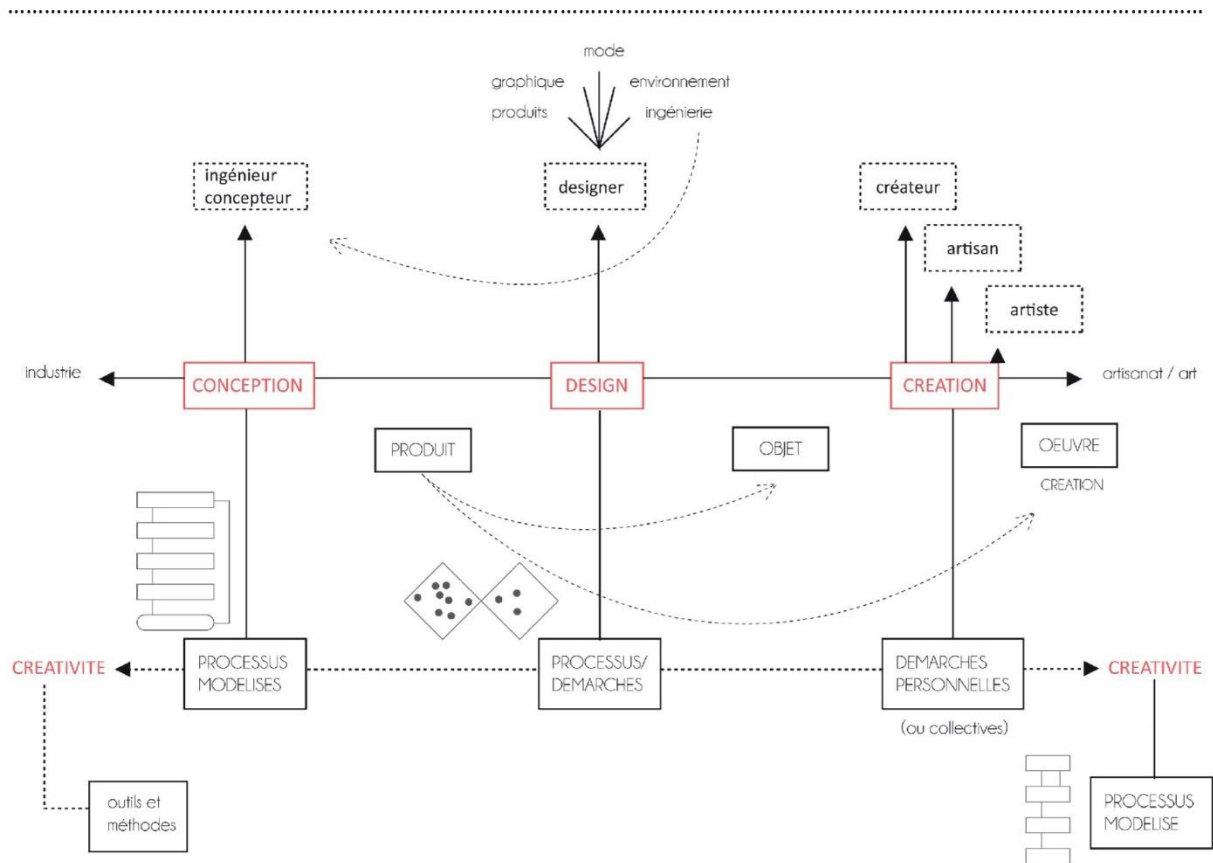


Figure 7: Synthèse des notions de conception, design et création [BERANGER, 2011].

Les métiers de la conception, du design et de la création ont comme point commun de faire appel à la créativité, un processus acceptant l'incertitude, qui consiste à produire quelque chose de nouveau et d'original en s'appuyant sur les matériaux et leur mise en forme. Cela commence par un effort d'imagination et un travail de représentation qui se concrétise par un acte de fabrication [BERANGER, 2011] [PROST et al. 1995]. Quelle que soit la nature et l'intensité de transformation des matériaux, l'objectif de la fabrication est de traduire une idée ou un besoin initial en contraintes matérielles. La mise en forme et l'esthétique, qui résultent des processus de fabrication, sont le fruit d'une succession de choix (techniques, esthétiques, culturels, etc.) qui varient selon la nature des objets fabriqués (matériau, produit, objet, œuvre). De nombreux auteurs abordent la question de la forme sous le prisme de différentes disciplines (psychologie, philosophie, mathématique, etc.). La forme est un terme polysémique, qui selon les usages, recouvre une grande variété de significations.

3.2.2 Circulation de la matière : mise en forme, forme et transformation.

En art et en design la question de la forme est un sujet central qui regroupe tantôt des problématiques techniques, esthétiques, philosophiques ou/et culturelles. La notion de « forme » est convoquée dans presque toutes les définitions du design et son sens dépasse de loin les uniques aspects décoratifs perçus par l'utilisateur : « *Le design industriel est une activité créatrice dont le but est de déterminer les propriétés formelles des objets produits industriellement. Par propriétés formelles, on ne doit pas entendre seulement les caractéristiques extérieures, mais surtout les relations fonctionnelles et structurelles qui font*

d'un objet ou d'un système d'objet une unité cohérente, tant du point de vue du producteur que du consommateur » [MALDONADO, 1969]. Dans sa conférence sur « *la notion de forme dans les arts* » Bernard Sève propose de distinguer la « *forme technique* » de la « *la forme artistique* », qualifiée de « *plus libre, moins dépendante de l'utilité* » [SEVE, 2017]. En art on utilise le terme de plasticité des formes pour désigner la capacité de la forme à créer du sens. Tout ce qui compose une forme perçue (la matérialité, la géométrie, la couleur, la texture, les techniques constructives, etc.) devient un élément de langage, un support d'expression pour le créateur. Bernard Sève évoque le terme de « *forme plastique* » [SEVE, 2017] car la forme n'est pas réductible à la fonction, elle est également porteuse de sens, elle est un élément de construction du discours. En tant que discipline créative et technique, le design se positionne comme un trait d'union entre l'art et l'ingénierie sans se substituer à ces disciplines comme le précise la définition proposée par L'Alliance Française des Designers (AFD) « *Un designer est un praticien du design. C'est un professionnel qui possède un haut degré de formation artistique et technique, voire scientifique, ainsi qu'une éthique professionnelle. Il dessine à dessein avec une capacité d'analyse et de conseil auprès de ses commanditaires. Il est capable d'empathie, d'approche sensible, intuitive et créative pour aborder les sujets. Il a le sens de l'esthétique, des formes et des signes, des couleurs et de la lumière, des sons, des matières et des matériaux, de l'ergonomie et de la lisibilité, et de leur interaction. Bien qu'il n'ait pas à résoudre des problèmes techniques purs, ce qui est l'affaire de l'ingénieur, le designer suit le bon déroulement technique et la fabrication d'un projet.*²⁷ » La définition donnée par l'AFD souligne que le designer a « *le sens de l'esthétique, des formes et des signes* » mais que son domaine d'intervention n'est pas dédié uniquement « *à résoudre des problèmes techniques purs* » même s'il « *suit le bon déroulement technique et la fabrication d'un projet* ». Pour se faire, le design doit se positionner sur les questions formelles et sur les implications du processus de mise en forme à chaque étape du cycle de vie des objets, tant pour les producteurs que pour les utilisateurs finaux. La définition proposée par l'Encyclopédie Universalis (1990) citée dans l'ouvrage de Lucien Magnon et Danielle Quarante « *Design Industriel* » souligne la dimension organisationnelle du design. En évoquant « *la disposition de la forme des organes dans l'espace et dans le temps* » cette définition met en exergue le rôle du design dans le processus d'agencement, qui permet aux formes de circuler et de trouver leur place dans divers ensembles techniques : « *« Le design signifie dessein et dessin. Dessein indique le propre de l'objet industriel qui est que tout s'y décide au départ, au moment du projet, tandis que, dans l'objet ancien fait à la main, le projet se différencie en cours d'exécution. Dessin précise que, dans le projet, le designer ne se substitue pas à l'ingénieur, mais œuvre à la disposition de la forme des organes dans l'espace et dans le temps, c'est-à-dire la configuration* ». *Le design industriel est précisément entre ces deux domaines, les sciences de l'ingénieur et les sciences de l'homme.* » [MAGNON, QUARANTE, 1996]. En donnant une importance significative à la configuration, cette définition permet d'introduire la responsabilité du design dans la capacité des objets à être réversibles, c'est-à-dire à être pensés de manière à permettre la reconfiguration des formes dans le temps. Ceci implique de considérer le lien étroit qui unit la forme et le processus de mise en forme permettant son appropriation. Or, en positionnant le design « *au départ* », c'est-à-dire en le mettant dans une perspective linéaire, cette définition limite la capacité du design à répondre efficacement aux problématiques d'évolutions de la forme dans le temps, notamment pour les formes ayant perdu la fonction pour laquelle elles avaient été conçues. En complétant cette définition, Lucien

²⁷ <<http://www.alliance-francaise-des-designers.org/definition-du-design.html>> AFD consulté le 12/04/2021.

Magnon et Danielle Quarante (1996) positionnent le design industriel à l'interface entre « *les sciences de l'ingénieur et les sciences de l'homme* » [MAGNON, QUARANTE, 1996], supposant que le dessin qui sous-tend la création de formes est un exercice culturel et technique qui s'opère dans un contexte social déterminé. La forme incarne donc ces deux dimensions, elle est le fruit d'une rencontre entre la culture et la technique. En 1989 l'Union Française des Designers industriels (UFDI) propose une définition. L'UFDI insiste sur le rôle du design dans la création de formes, ce qui suppose que le design soit également placé en amont du processus de mise en forme : « [le design] *a pour vocation, après analyse technologique, économique et esthétique exhaustive, de créer les formes, matières, couleurs, structures permettant d'améliorer tous les aspects de l'environnement humain conditionné par la production industrielle, qu'il s'agisse de création (ou design) de produits, de création (ou design) graphique, de création d'environnement ou d'ambiance visuelle.* » [MAGNON, QUARANTE, 1996]

Au regard de ces différentes définitions, le travail de la forme apparaît comme un élément central et constitutif de la pratique du design. Dans le design, la forme de l'objet ou du produit répond à différentes injonctions : elle doit être utile, fonctionnelle, esthétique. La conception est souvent placée en amont, faisant du designer un « créateur de formes ». Or, le designer opère dans un contexte de formes préexistantes, que sont les matières, matériaux et semi-produits, souvent standardisées et disponibles sur catalogue, avec lesquelles il doit faire des compromis. Il est amené à se situer dans une longue chaîne de transformation de la forme, le forçant déjà à se positionner sur la nature et l'intensité des transformations qui permettent d'aboutir à la réalisation d'un projet. Le design semble posséder de nombreux atouts pour répondre aux problématiques d'appropriation, d'agencement et de circulation des formes en vue de les préserver et d'augmenter leurs valeurs intrinsèques. Que ce soit pour les formes déjà construites qui constituent le paysage des objets en circulation (les matériaux, les produits, les œuvres, les objets en fin de vie) et qui ont une incidence sur la mode, l'époque et les modes de vie ; ou pour les formes en devenir, qui sont au cœur du processus de conception et d'innovation. Ces nouvelles formes en circulation influenceront les pratiques constructives et les usages à venir pourvu que la place du design soit repensée sans être cantonnée « *au départ* ».

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous entendons sous le terme forme, le résultat d'un processus de mise en forme en deux ou trois dimensions à des échelles différentes. Cela peut être des objets, des produits, des matériaux ou des structures. Nous considérons que la forme est le résultat d'un procédé, d'une opération de fabrication ou d'un processus d'origine naturelle comme l'érosion, la corrosion, l'usure, la sédimentation, la décomposition, la croissance des êtres vivants. Sous le terme de forme nous considérons les produits simples (un produit mono matériau, une pièce, une chute), les produits issus d'assemblages complexes (un textile, un composant, une machine, un bâtiment, un véhicule), ou le résultat d'un processus naturel (des matériaux d'origine animale ou végétale, des cristaux, etc.). La forme peut également provenir d'une combinaison de mises en forme successives ou simultanées, par exemple dans le cas d'un matériau architecturé, de matériaux composites ou de matériaux naturels. Notons que la préservation ou la transformation de la forme est relative à l'échelle du système étudié (la microstructure, la pièce, le composant, le produit, le bâtiment, la ville, le territoire) et à la perspective temporelle dans laquelle on se positionne (à court, moyen ou long terme). Lorsque Gilbert Simondon parle des « *objets techniques* »

[SIMONDON, 1968], il insiste sur la nécessité de les appréhender selon « *leurs lignes évolutives temporelles* », c'est-à-dire de « *changer d'attitude* », sans demander « *la même utilisation* » à chaque étape de la vie d'un « *objet* ». Ce changement d'attitude et d'utilisation implique divers efforts que nous essayons d'analyser, de mesurer et de comprendre de manière à établir des scénarios adaptés à la nature et à la diversité des formes ainsi qu'à leur contexte d'utilisation.

Les produits, du plus simple au plus complexe, sont le résultat d'une série de transformations qui nécessitent le passage par des étapes plus ou moins nombreuses de mises en forme intermédiaire. La question de la forme interroge toutes les étapes de transformation qui permettent d'aboutir à un résultat : les matières extraites dans l'environnement sont triées, calibrées, modifiées, conditionnées, transportées, stockées, etc. Cette première série de transformation permet de les rendre compatibles avec des procédés de fabrication et prescriptibles par les concepteurs qui pourront se les approprier pour les transformer de nouveau, selon les besoins du projet, en vue de les rendre utilisables sous forme de matériaux, d'objets, de produits ou d'œuvres par un utilisateur final ou intermédiaire. Ces multiples mises en forme influencent de nombreux paramètres tels que le coût, les aspects perçus, les propriétés, etc. Ces mises en forme successives sont nécessaires pour permettre aux objets de voyager dans les canaux des chaînes de marchandisation afin de satisfaire des demandes variées [TSING, 2004].

En questionnant ainsi les formes, les mises en forme et les transformations, au regard des méthodes de conception et de création, des méthodes de design émergent, permettant une analyse et une interprétation des données collectées pendant l'état des lieux. Dans cette phase d'analyse, nous cherchons à aborder, de manière créative, le potentiel de valorisation d'un gisement. Pour ce faire, nous proposons d'explicitier des variations de complexité et de subsidiarité d'un objet en proposant une visualisation des étapes de transformation ou de préservation de la mise en forme. Il s'agit d'un outil de diagnostic ayant pour objectif d'informer et d'aiguiller les concepteurs sur les actions à prendre en fonction de la nature du gisement étudié. Le point de départ est une visualisation reposant sur une déconstruction des formes mettant en évidence les potentialités : c'est à partir des formes que des usages sont imaginés sans changer de niveau de complexité, c'est-à-dire en limitant la nature et l'intensité des opérations de transformation pour atteindre les performances souhaitées pour l'usage. Ces outils développés dans le cadre de cette thèse sont explicités ci-après.

3.2.3 From Product to dust : visualisation des transformations.

En raison de la profusion des termes et de leurs multiples interprétations, les notions associées à la hiérarchie des modes de traitements sont souvent mal comprises. En plus des termes présents dans le code de l'environnement, s'ajoutent d'autres notions qui ont de profondes répercussions sur le nombre, la nature et l'intensité des transformations faites sur les matériaux : Réusage / Détournement / Remanufacturing / Rénovation / Réhabilitation / Refonctionnalisation / Recyclage valorisant (*upcycling*) / Surcyclage / Upcyclage, etc. Ainsi, le réemploi est souvent confondu avec d'autres notions ou mis au même niveau que le recyclage. Pourtant les opérations de transformation associées à ces termes ont des implications et une finalité très différentes. L'étendue des transformations qui se cache derrière le sens de ces mots se chevauche, ou se superpose ; rendant les nuances de vocabulaire et la distinction

entre les termes encore plus difficiles. Pour ces différentes raisons, il nous a semblé essentiel d'y apporter des précisions en vue de clarifier la place et l'étendue des transformations qu'impliquent chacun des termes liés aux modalités de transformation ou de préservation des objets, des produits ou des déchets. Nous avons donc commencé par un travail lexical et d'identification des termes relatifs aux modes de transformations. Dans le Tableau 5, ces termes ont été classés selon le niveau de transformation des matériaux : « aucune transformation », « transformation partielle (faible ou forte) » et « transformation totale ». Ce classement a ensuite été affiné en y introduisant des notions de fonction et d'usage. En effet, la fonction est définie au moment de la conception, alors que l'usage peut s'en écarter laissant entrevoir un certain nombre de fonctions potentielles. La fonction initiale correspond aux conditions d'usage pour lesquelles le produit avait été conçu ; elle limite le potentiel fonctionnel, c'est à dire les usages associés à la mise en forme. Lorsqu'aucune transformation n'est appliquée aux produits, certains termes décrivent des démarches qui préservent la fonction initiale (dans ce cas l'usage délimité par la fonction (il reste le même), la mise en forme est préservée (Usage, réusage, réemploi, réutilisation)). D'autres termes introduisent un changement de fonction ou d'usage avec préservation de la mise en forme associée au produit (détournement). Lorsqu'une transformation faible ou forte est appliquée aux produits ou aux déchets, les termes impliquent un nouvel usage et une nouvelle fonction, entraînant souvent une modification significative de la mise en forme (refonctionnalisation, recyclage valorisant, recyclage, valorisation). Lorsqu'une transformation totale est appliquée aux déchets (enfouissement, élimination), les termes relatifs se rapportent à la perte d'usage et de fonction, menant à l'abandon et à la destruction de la mise en forme.

Nous distinguons, ici, le changement de fonction qui se fait à dessein en phase de conception, et le changement d'usage qui dépend de l'utilisateur. La fonction est délimitée par le concepteur et se doit d'atteindre des performances pour des usages identifiés [ISO, 2004]. Même si un produit est fabriqué, dessiné, ou conçu pour une fonction précise, l'usage qu'en fait le possesseur peut s'avérer différente : astucieuse, adéquate, inappropriée ou potentiellement dangereuse. Mais cela ne dépend pas du cadre fonctionnel dans lequel a été pensé le produit, qui répond à un cahier des charges fonctionnel (norme NF X 50-151) en vue de correspondre à un ou des usages précis « *et répétés* » [ISO, 2004] qui déterminent la ou les fonctions d'un produit. Cet aspect, protège le fabricant ou le concepteur d'un usage abusif qui n'aurait pas été envisagé dans le cadre fonctionnel.

Tableau 5 : classification des termes liés à la préservation ou à la transformation des objets et des déchets.

Terme de circulation de matière	Niveau de transformation				Changement de fonction	Changement d'usage	Statut
	Aucune	Faible	Forte	Totale			
Usage					NON	NON	PRODUIT
Réusage					NON	NON	PRODUIT
Maintenance					NON	NON	PRODUIT
Réparation					NON	NON	PRODUIT
Réemploi					NON	NON	PRODUIT
Réutilisation					NON	NON	DECHET
Détournement					NON	OUI	PRODUIT
Refonctionnalisation					OUI	OUI	PRODUIT
Recyclage valorisant (upcycling)					OUI	OUI	DECHET
Recyclage					OUI	OUI	DECHET
Valorisation					OUI	OUI	DECHET
Incinération					Perte de fonction	Perte d'usage	DECHET
Élimination					Perte de fonction	Perte d'usage	DECHET

Ainsi, il est possible d'entrer dans cette classification de scénarios de circulation de matière non plus au travers des niveaux de transformation mais plutôt en analysant les aspects liés aux changements d'usages ou de fonctions.

Scénario de circulation de matière sans transformation.

Dans ces scénarios, aucune transformation n'est appliquée. De manière générale, la première catégorie de termes ne change pas la fonction initiale (l'usage pour lequel l'objet avait été conçu) : usage, réusage, maintenance, réparation, réemploi, réutilisation. À ce niveau il est possible de considérer que l'on travaille avec des objets dont la fonction est « *contrainte* » [ALI, 2017]. Notons que certains objets n'ont pas de fonctions prédéfinies (chutes, rebuts), mais cela ne les empêche pas d'avoir des usages ou des fonctions potentielles.

Si le produit ne peut plus être utilisé dans sa fonction initiale, il est toujours envisageable de le conserver intégralement en s'autorisant à étendre le potentiel fonctionnel du produit en identifiant de nouvelles fonctions (fonction « flexible » [ALI, 2017]). Dans certains cas il est possible que l'utilisateur s'approprie un produit sans le modifier en lui trouvant un nouvel usage (détournement). Ainsi, son usage évolue glisse vers un nouveau référentiel qui dépasse le cadre de la fonction initiale.

Le produit peut acquérir une fonction autonome s'il fonctionne seul, ou une fonction partielle si son fonctionnement dépend d'un objet complexe ou d'un système d'objets. Par exemple, une « bouteille » devient un « bougeoir » : fonction autonome car l'objet fonctionne seul. Un « pied de lampe » : fonction partielle liée à un produit plus complexe. Une « brique » : fonction partielle dans le cas d'un système constructif. Ces exemples n'affectent pas la mise en forme du produit (dans les cas où l'intégrité formelle est préservée), mais interrogent sa fonction. Dès lors, forme et fonction peuvent dialoguer dans un registre plus large, plus ouvert et plus libre dépassant largement la fonction « initiale ». Ce niveau est principalement culturel et conceptuel, car il n'implique pas d'action de transformation sur l'objet lui-même, mais il implique un changement dans notre relation à la mise en forme.

Scénario de circulation de matière avec transformation (faible, forte, totale).

Cette catégorie de scénarios se scindent en 2 sous catégories :

- Avec transformation totale.

Cette catégorie concerne les options ultimes. Il s'agit du moment où la perte de mise en forme est totale, le produit perd sa fonction et son usage occasionnant un déchet qualifié « *d'ultime* » qu'il faut alors éliminer. La seule solution dans ce cas reste le l'enfouissement ou l'élimination. Selon l'article L541-1-1 du Code de l'Environnement, le déchet ultime est défini comme « *un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.* »

- Avec transformation partielle (faible, forte).

Cette catégorie est la plus subtile car de nombreux termes viennent la jalonner (refonctionnalisation, recyclage valorisant (*upcycling*), recyclage, valorisation). Dans la pratique, cette catégorie recouvre des actions allant d'une transformation infime à une transformation quasi-totale de l'objet (Refonctionnalisation, recyclage valorisant (*upcycling*)). L'idée de « *fonction flexible* » [ALI, 2017], recouvre deux modalités de transformation (Figure 1, ANNEXE). Elle chevauche la perspective d'un nouvel usage sans transformation et la perspective d'un nouvel usage avec transformation partielle. En effet, chaque objet contient plus de fonctions possibles que celle(s) qui lui étai(en)t initialement donnée(s). De ce fait, la somme des fonctions initiales de l'objet et des fonctions possibles donne une série de fonctions potentielles (autonomes ou partielles) qu'il s'agit d'identifier, de révéler et de mettre en œuvre lorsque cela est possible. Lorsque le changement de fonction est défini au moment de la conception, et que ce changement implique une transformation partielle, nous parlerons de *processus de refonctionnalisation*²⁸ (Figure 1, ANNEXE). Le but est de changer la fonction initiale du produit en agissant sur celui-ci par des opérations de reconception / fabrication.

Nous venons de présenter 2 classifications possibles des termes décrivant des scénarios de circulation de matière :

- Classification 1 : en analysant le niveau de transformation de la matière
- Classification 2 : en analysant le niveau de transformation de la fonction ou de l'usage

Dans ce travail de thèse, nous abordons une 3^e classification réalisée, elle, en analysant les niveaux de transformation des valeurs au cours de ces scénarios. Dans ce cas, nous définissons les valeurs ou les qualités de la manière suivante : la mise en forme des objets, produits et matériaux contient de l'information²⁹. Révéler ces informations permet d'identifier des caractéristiques propres à l'objet, qui lui permettent de circuler. Ces caractéristiques peuvent être classées sous forme de critères qui dépendent autant des propriétés mécaniques et physiques (mesurables de manière absolue par la science des matériaux), que des qualités

²⁸ Dans son ouvrage « Rikimbili », le designer cubain, Ernesto Oroza (2009), propose une définition du terme refonctionnalisation : « *la refonctionnalisation est le processus qui permet de profiter des qualités (matière, forme et fonction) d'un objet déconstruit pour le faire fonctionner à nouveau dans son contexte ou dans un autre. [...] La refonctionnalisation pourrait aussi s'étendre aux parties de l'objet et aux fonctions que ces parties remplissent dans l'objet.* »

²⁹ L'étude des valeurs est également connue sous le terme d'axiologie : « *Science des valeurs philosophiques, esthétiques ou morales visant à expliquer et à classer les valeurs* » (CNRTL consulté le 02/06/2022)

(mesurables de manière relative par un processus qui permet de déterminer une valeur (ISO 9001)) qu'il s'agit d'expertiser, de qualifier, d'évaluer et de caractériser. De ce fait les valeurs sont autant associés à la matière, qu'à sa mise en forme. L'information associée au couple forme / matière [MENU et al. 2018], une fois caractérisée, peut être transposée dans de nombreuses valeurs : valeurs historiques, valeurs de savoir-faire, valeurs d'auteur, valeurs d'unicité, valeurs fonctionnelles, etc. Muriel Maillefert et Isabelle Robert (2017) insistent sur les modalités de répartition de la valeur entre les parties prenantes (« *l'architecture de valeur* »). Par l'étude des « *Business model soutenables* », les auteurs expliquent que ces approches prennent le contrepied des logiques productives antérieures, et que « *leur support n'est ni l'acteur public, ni l'acteur privé mais le territoire* ». La création de valeur, est « *essentiellement immatérielle* », elle repose sur une « *chaîne de valeur* » profit de plusieurs acteurs : « *les parties prenantes internes et externes* ». Muriel Maillefert et Isabelle Robert montrent que l'enjeu est de comprendre le processus de création de la « *valeur territoriale* » et son « *lien avec un projet de développement propre au territoire.* » [MAILLEFERT, ROBERT, 2017].

Nous définissons alors le supercyclage comme étant un scénario de circulation de matière soulignant les valeurs de l'objet. Le supercyclage recouvre alors une gamme étendue de fonctions potentielles et aussi une gamme étendue de niveaux transformations. Le supercyclage vise à augmenter les valeurs d'un objet tombé en désuétude, soit en conservant sa fonction initiale, soit en lui attribuant de nouvelles fonctions, avec ou sans transformation. Ainsi le supercyclage recouvre deux dimensions fonctionnelles, la « *fonction contrainte* » et la « *fonction flexible* » (Figure 1, ANNEXE). Le supercyclage se distingue du recyclage valorisant (upcyclage) car il prévoit de reconcevoir / fabriquer, à partir d'objets, de matériaux, de produits ou de matières de récupération, des œuvres, des objets, des produits, des semi-produits et jusqu'à des matières de création, en cherchant à préserver les valeurs des objets d'origine, sans perdre l'ambition de les augmenter. Ainsi le supercyclage favorisera les options qui préservent la mise en forme d'un objet, donc ses propriétés, ses qualités et ses valeurs, sur les options qui auront pour effet de réduire prématurément l'objet à l'état de matière en vue d'augmenter son unique valeur économique.

En prenant en compte ces 3 types de classifications des scénarios de circulation de matières, un premier outil de visualisation a été développé (Figure 1, ANNEXE). Il permet de mettre en parallèle les niveaux de transformations du produit étudié et les changements de fonction et d'usage et permet ainsi de visualiser les pistes potentielles de supercyclages. Après avoir augmenté les connaissances sur les gisements et les objets qui le constitue, le déploiement des valeurs s'affirme comme une étape préparatoire, d'état des lieux et d'organisation des formes existantes. Ce travail de classification par niveau de transformation permet de hiérarchiser les pistes de travail qui seront explorées au cours du processus de création, de design ou de conception. Nous avons appelé cet outil de visualisation des transformations sous forme de frise « *product to dust* » [MENU et al. 2019]. En outre, cet exercice permet de s'approprier le vocabulaire tout en explorant des pistes de travail susceptibles d'inspirer les acteurs en phase de conception. Tous les objets présents dans les frises sont soigneusement documentés. Ainsi chaque image est numérotée et référencée dans un document annexe de manière à enrichir l'information disponible sur les objets présents dans la frise. Le document annexe détaille chaque image, avec le nom de l'auteur, de la marque ou du projet cité, le lien internet vers l'objet choisi, ainsi qu'une description des procédés ou des opérations

nécessaires pour réaliser les objets choisis. Dans cette mise en perspective d'un objet, la contrainte que nous nous sommes imposés, était de veiller à rendre chaque case compatible avec les cases adjacentes. Ainsi, un objet en amont, plus gros, contient un ou plusieurs objet(s) en aval, plus petits. Une option choisie ne devait pas compromettre la possibilité d'aller à l'étape suivante de manière à déployer le plus grand nombre d'options possibles. Chaque frise débute par l'objet dans sa fonction initiale. Plus on avance et plus les transformations subies par l'objet sont importantes. Cette mise en perspective nous amène jusqu'à l'étape de transformation totale de l'objet impliquant une perte totale de la mise en forme. La frise se termine par les filières qui se chargent du traitement des déchets allant parfois jusqu'à une perte totale de l'usage.

3.2.4 From Product to dust : test opérationnel de l'outil

Afin de clarifier les notions liées à la préservation ou à la transformation des matériaux, un canevas vierge contenant l'ensemble de ces notions mises en perspective dans une frise, a été développé (Figure 2, ANNEXE). L'objectif de ce canevas est de décortiquer le vocabulaire lié aux modes de transformation des objets, de manière à explorer le potentiel fonctionnel d'un objet donné. De cette manière, l'outil permet de réaliser un état de l'art des pratiques et objets existants dont la réalisation découle de l'objet initialement sélectionné.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons réalisé 2 types de test de l'outil « *product to dust* » : le premier dans le cadre d'un cours d'écoconception avec des étudiants de Master Prospective Design et le deuxième dans le cadre d'une temporalité plus longue, lors de deux stages DNMADE de deux mois (frises sur les livres et sur les lisières).

Test 1 : Étudiants en Master Prospective Design.

Ce canevas a été donné aux étudiants dans le cadre des cours d'écoconception du Master Prospective Design. Afin de rendre ce travail abordable et réalisable dans le cadre d'une expérimentation pédagogique (soit environ deux à trois semaines par groupe), nous avons orienté nos choix sur des objets mono matériaux ou des objets peu complexes. Ceci, afin d'éviter que la mise en perspective de l'objet ne devienne trop difficile à explorer³⁰, en raison du nombre de pièces, de composants, de matériaux ou de filières.

Dans les faits, si des cases ne s'avéraient pas compatibles, cela peut supposer un nouveau départ, c'est-à-dire un nouvel objet qui commence par être préservé, puis que l'on met en perspective : de la transformation la plus minimale à la transformation la plus totale avec perte de forme ou d'usage. Dans le cadre du cours d'écoconception, l'intention était de mettre un objet en perspective en suggérant que le passage d'une case à l'autre reste possible ; exemple du liège (Figure 3, ANNEXE). De ce fait, nous avons fait le choix d'éviter les assemblages ou les mélanges de matières qui pourraient compromettre la réversibilité des options présentes dans la frise. En effet, s'il est impossible de séparer les matériaux cela peut compromettre les

³⁰ Un produit complexe aurait dérivé sur de nombreuses arborescences qui déclinent le potentiel fonctionnel des différentes parties et sous parties des produits étudiés. Le parti-pris de rendre chaque case compatible entre elles, provient de l'intention pédagogique. Il s'agissait de faire réfléchir les étudiants sur les notions de démontage et de réversibilité permettant de récupérer ou de se séparer le produit sans le détériorer ou le détruire.

étapes suivantes (le potentiel fonctionnel de l'objet), ou même, le recyclage de l'objet. Dans l'absolu, chaque case possède sa propre indépendance et peut être perçue comme une option parmi d'autres ; laissant le champ ouvert à différentes opérations de remise en forme (*d'information*) ou de cohabitation avec d'autres objets dans l'hypothèse où ils se retrouvent intégrés à des ensembles plus complexes (multi matériaux, systèmes, objets complexes, etc.). La figure 4 de l'ANNEXE présente l'exemple d'un objet simple, le pneu (Figure 4, ANNEXE). Cet objet commence par une séquence linéaire, mais la fin de la frise se sépare en plusieurs branches qui possèdent chacune leurs propres options. Ces branches correspondent aux différentes voies empruntées par les matières au moment du recyclage de l'objet. En effet, le pneu contient des métaux, du textile ou de la gomme. Après une étape de broyage, ces matières sont triées et traitées dans des filières distinctes faisant appel à des techniques, des procédés et des mises en forme intermédiaires différentes. C'est pourquoi la frise se ramifie en plusieurs branches afin de refléter ces distinctions lors du processus de recyclage des déchets.

Cet outil permet donc aux concepteurs d'explorer de nombreuses options de fabrication en partant d'un objet identifié. Ainsi, le potentiel fonctionnel des objets techniques se déploie, d'abord grâce à un état de l'art, ensuite par la possibilité d'enrichir la frise par différentes propositions formelles, esthétiques ou fonctionnelles. Le concepteur peut ainsi compléter la frise par des dessins, des croquis, des plans ou tout autre méthode de représentation. La mise en perspective des options dans la frise peut être quantifiée, définissant ainsi les contours de potentielles stratégies de fabrication qui exploitent au mieux la mise en forme d'un objet initial. Si les premières options conservent la mise en forme, les options plus lointaines offrent des perspectives complémentaires aux premières options ; ce qui permettraient de valoriser les chutes de plus en plus petites, jusqu'à donner des perspectives pour l'usage de la poussière produite au moment des phases de fabrication. De ce fait, l'outil donne une vision d'ensemble des options qui se présentent au concepteur pour tenter d'épuiser un ou plusieurs gisements d'objets. Cet outil peut aussi aider les concepteurs à identifier des usages, des procédés, des savoir-faire ainsi que des filières existantes ou potentielles ; leur permettant de déployer des scénarios allant du plus simple au plus complexe, c'est-à-dire partant de la perspective d'un objet simple ou du croisement de multiples frises pour déployer des scénarios plus ambitieux à l'échelle d'un territoire.

Test 2 : Étudiants en stage (DNMADE)

La frise de valeurs « *product to dust* » a pour objectif principal d'aider les concepteurs à explorer la structuration des filières en déployant leur potentiel. Cependant, elle vise également à interroger les mécanismes d'écoconception ou à mieux discerner ce qu'implique chaque décision de transformation des objets. La frise peut se déployer comme une arborescence avec différents points d'entrée et de sortie. Laisant la liberté aux concepteurs de penser des croisements entre différents objets à des stades de dégradation plus ou moins avancés. Par exemple, de la poussière de brique peut venir teinter un objet en argile ou être projeté sur une planche en bois pour donner un effet de surface [SAINT-PIERRE et al. 2019]. Cette dichotomie des différentes branches se retrouve également dans les frises exploratoires des livres. La figure 5 de l'annexe présente une frise plus complète qui explore davantage de possibilités (Figure 5, ANNEXE). L'état de l'art est plus étendu et offre une vision beaucoup plus détaillée de ce qui se fait dans le domaine de la transformation des livres, puis de la

couverture, des pages et enfin du papier. En effet, plus on avance, plus la mise en forme se dissipe vers un retour à l'état de matière pour finalement céder la place à d'autres formes.

3.2.4.1 *Exploration des transformations de la matière : « from dust to product ».*

Cette section explore le potentiel de conservation sous l'angle de mise la mise en forme, c'est-à-dire la possibilité de prendre une ou plusieurs parties (une pièce, un morceau, ou de la poussière) pour développer un nouvel objet plus complexe. Cette approche est complémentaire à celle développée dans la frise « *product to dust* ». Par ailleurs, nous n'excluons pas la possibilité de combinatoire offerte par la mise en perspective de différents objets à des stades de transformation divers. En quelque sorte, nous explorons ici la frise de valeurs à contre-courant, non pas sous le prisme d'une conservation de la forme initiale, mais sous l'angle d'une nouvelle mise en forme par l'assemblage de parties préservées ou issues des opérations de transformation précédentes, comme par exemple la valorisation de chutes ou de poussière.

De l'objet simple à l'objet complexe, la question de la mise en forme se pose à différentes échelles et dans un environnement où les objets ne « voyagent » pas seuls. Ils sont en relation avec de potentiels ensembles plus larges, issus de la combinaison entre différentes catégories de pièces, objets, composants, produits, semi-produits, matériaux ou substances. Ils forment des matériaux architecturés, des structures, des objets complexes, des réseaux. La question de la conservation des formes se fait également dans cette perspective car la préservation ou la transformation concerne tout ou partie d'un objet. En effet nous pouvons envisager qu'un produit complexe soit constitué de parties dont la nature et l'intensité des opérations de transformation diffèrent. Une pièce neuve peut cohabiter avec des pièces recyclées et des objets intégralement préservés. De ce fait, nous envisageons des transformations plus ou moins étendues selon les parties concernées afin que divers niveaux de transformation puissent cohabiter dans des ensembles plus complexes [NILAKANTAN, NUTT, 2015]. Pour explorer cette articulation entre préservation de l'objet et mise en forme il faut pouvoir aborder l'interrelation entre plusieurs échelles de la plus simple à la plus complexe : celle de la matière, du matériau, de l'objet ou du bâtiment. Par exemple, l'élaboration d'une matière mise en forme devient une pièce ou un semi-produit, qui sera lui-même intégré dans un matériau, qui sera ensuite intégré dans un ensemble plus large comme un dispositif scénographique, un objet complexe ou un bâtiment. Afin de préserver le caractère réversible des assemblages, il faut souligner le besoin de développer des substances (ex : liants hydrauliques, colles) des produits (ex : assemblages mécaniques, quincaillerie, etc.) ou des procédés (ex : liaisons thermiques) qui permettent l'assemblage, l'entretien ou la réparation des parties sans compromettre la déconstruction.



Figure 8 : gauche : prototype de matériau alvéolaire en bandes de pages. HERBERT Clara. Droite : Prototype de panneau aggloméré en bandelettes de pages de livre. LAMARQUE Nicolas.

Pour illustrer le passage du produit à la poussière et de la poussière au produit, nous prenons le cas des panneaux alvéolaires en livres. Ce cas d'étude nous permet d'illustrer le potentiel de valorisation des semi-produits issus de la valorisation d'un objet dans un modèle plus ouvert. Le cas des panneaux alvéolaires, est un exemple de matériau architecturé conçu avec différentes parties de livres. Pour se faire nous avons d'abord déployé le potentiel du livre et nous explorons ici le potentiel de deux semi-produits issus de ce travail : les bandes de pages (des pages découpées) et les lamelles de pages compactées (Figure 8). Ainsi, le panneau livre est à la charnière entre une tentative de préservation de l'objet initial et l'élaboration d'un nouvel objet par la mise en forme de ses parties dans le but de développer un matériau architecturé. Il est composé de deux panneaux fabriqués à partir de lamelles de pages compressées et d'alvéoles réalisées à partir de bandelettes de pages assemblées. Ceci permet de faire cohabiter dans un même ensemble (le panneau alvéolaire en pages de livre) deux niveaux de transformation (les lamelles compressées et les bandelettes assemblées) d'un même objet (la page de livre). Nous avons également cherché des liants hydrauliques compatibles avec les processus de recyclage pour l'assemblage des différentes parties du panneau de manière à ne pas compromettre sa fin de vie dans les filières existantes. De ce point de vue, la mise en perspective du potentiel fonctionnel d'un objet sous l'angle de la conservation, est compatible avec la mise en perspective des possibilités de remise en forme des objets sous forme de semi-produits (Figure 9).

Ceci, permet d'ouvrir encore davantage le champ des possibles pour la valorisation d'un objet, en l'associant à d'autres parties d'objets, à des matières issues du recyclage ou à des matériaux neufs.

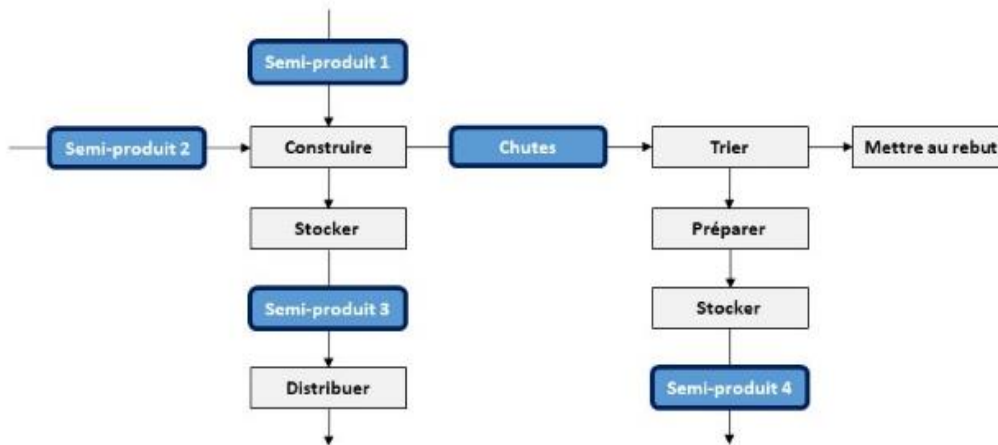


Figure 9 : modèle ouvert d'assemblage et de combinaison de semi-produits en matériaux et objets de création.

Pour ouvrir sur le potentiel de combinaisons entre plusieurs objets, il faut imaginer plusieurs frises qui se réfèrent à différents objets et envisager des passerelles de l'une à l'autre (Figure 6, ANNEXE). La complémentarité des objets et des niveaux de transformation élargissent la perspective d'une frise à de nouveaux ensembles techniques, plus complexes. Cette approche permet notamment d'envisager des applications qui dépassent le potentiel d'un objet en cherchant à faire coïncider plusieurs frises de valeurs entre elles. En science des matériaux et en particulier pour la sélection des matériaux et des procédés, les bases de données sont organisées en arborescences de complexité croissantes qui permettent d'envisager des passerelles en termes de coûts humains, environnementaux ou financiers.

Illustration d'imbrication de frises (Figure 6, ANNEXE).

- Des briques de récupération nouvellement appareillées (de manière réversible) peuvent former un pavage ou un muret. La découpe éventuelle de ces briques produira de la poussière pouvant servir à produire des encres [SAINT-PIERRE et al. 2019], qui une fois appliquées sur un nouveau support, en feront partie.
- De la mousse de papier peut être utilisée en combinaison avec des panneaux livre de différentes épaisseurs pour former un matériau sandwich plus léger. [BASSEREAU et al. 2018 (b)].

Illustration de mises en forme par préservation des formes.

- Des fibres ou des cheveux, peuvent se tisser en conservant leur intégrité formelle et permettre l'élaboration de matières textiles pour la création [MONGIN, et al. 2018] [BASSEREAU et al.2018 (a)].
- Des lisières tressées permettent de fabriquer des cordes.

La répartition des fractions massiques issues des frises permet d'envisager un objet plus complexe (Figure 6, ANNEXE). Cette répartition donne lieu à un produit qui contient de multiples niveaux de transformation. Le résultat de ce croisement abouti à un objet autonome, simple ou complexe, que l'on peut décliner de nouveau, jusqu'à la poussière, en partie, ou dans son intégralité. La complémentarité des frises peut également concerner les chutes et rebuts issus des opérations de supercyclage, si l'on cherche à absorber la totalité d'un gisement. Il s'agit de faire cohabiter différents niveaux de mise en forme au sein d'un produit (déformation, transformation, composition, assemblages), en cherchant à préserver

une certaine autonomie des parties notamment pour faciliter la maintenance, réparation, ou la déconstruction. Ceci afin de rester dans le cadre d'un processus réversible (limiter les pollutions et les mélanges), pour ne pas compromettre de nouveaux usages ou limiter les impacts sur l'environnement et la santé humaine.

3.2.4.2 Identifier des options prometteuses.

Au-delà d'un usage pédagogique, l'outil de frise de valeurs « *product to dust* » peut être utilisé par des professionnels afin d'identifier des pistes de valorisation permettant d'absorber la totalité d'un gisement. Or, soit les flux d'objets sont stables, soit ils sont susceptibles de varier dans le temps et dans l'espace. Ces variations peuvent être quantitatives, ou qualitatives. De ce fait, contrairement au modèle linéaire qui épuise un gisement de déchet en misant sur un exutoire unique qui absorbe toute la quantité disponible, ou au modèle circulaire qui diversifie, mais continue à miser sur une approche quantitative et massifiée des flux de matières, le modèle proposé ici, qui repose sur le supercyclage des objets, tente de multiplier les pistes d'exploitation sur tous les fronts possibles. Dans le cadre de ce modèle, c'est la diversité des options qui permet d'absorber la totalité d'un gisement et de s'adapter aux spécificités culturelles et productives des territoires. Cela demande une plus grande agilité et une certaine capacité d'adaptation. Cependant, nous avons montré précédemment, qu'il est possible de prévoir ou d'anticiper les variations, avec des degrés de précision divers selon la nature des gisements identifiés. Ainsi, il est possible de faire varier l'intensité des différentes options, c'est-à-dire faire varier la quantité d'objets qui entrent ou qui sortent des options de fabrication de manière à assurer, en complément de la prévisibilité, une plus grande adaptabilité du système.

En phase de diagnostic, un gisement contenant divers objets a été identifié. La description de ces objets permet d'obtenir une première base d'informations (3.1.2). Ensuite, les objets peuvent être mis en perspective, déployés dans des scénarios territoriaux présentant de nombreuses options de fabrication qui évoluent au cours du temps, en fonction de la nature des objets utilisés. Afin de sélectionner les options les plus prometteuses, et de déployer des hypothèses de fabrication territorialisées, d'autres étapes sont nécessaires pour valider la pertinence des scénarios envisagés. Le contrôle qualité, la viabilité économique, la pertinence sociale et environnementale des scénarios est étudiée de manière à limiter le risque d'effets indésirables, occasionnant peut-être des pollutions supplémentaires, des conditions de travail peu souhaitables, ou des conditions d'hygiène et de sécurité mal maîtrisées. C'est pourquoi nous aborderons dans la suite du manuscrit le travail sur l'aide à la décision et sur les indicateurs. Le processus de décision et d'évaluation est séquencé par étapes : avant (le diagnostic et la mise en perspective des objets), pendant (le choix des options et la modélisation), après (caractérisation, la certification). Enfin, nous mettrons ces éléments en perspective dans le cadre d'une approche plus globale et transversale liée à l'élaboration de nouveaux modèles de gestion des matériaux.

3.3 Intégrer l'évolution temporelle et la variabilité des objets, produits et matériaux comme moteur d'innovation.

3.3.1 Repenser la notion de filière : vers des logiques multi-filières décentralisées ?

Les outils « *product to dust* » et « *dust to product* » mettent en évidence que pour un même gisement de déchet, plusieurs niveaux de développement de nouveaux objets, produits ou matériaux peuvent coexister. Pour faire naître ces différents scénarios de circulation de matières, il est alors possible d'intervenir sur les procédés, les savoir-faire ou les matériaux dans la perspective d'y intégrer des éléments déjà mis en forme. Cette approche se heurte à la structuration actuelle des filières industrielles qui sont un héritage des paradigmes qui nous ont précédé (2.1). D'abord, la structuration linéaire s'est reposée sur la centralisation des matières, des sites de production et des installations de traitement des déchets. L'extraction, supposée infinie, a favorisé l'essor de la production de masse. En fin de vie, les matériaux devenus des déchets ultimes sont centralisés dans des sites d'enfouissement ou d'incinération ne faisant aucune distinction entre les matières. Conjointement à l'évolution exponentielle des capacités d'extraction, les filières de transformation des semi-produits et des produits se sont progressivement dissociées des spécificités territoriales pour produire des biens en grande quantité destinés à être exportés dans le monde entier. En fin de vie, ces biens se retrouvent dans les filières de gestion de déchets dont les méthodes de traitement se sont massifiées pour faire face à l'augmentation des quantités de biens de consommation qui arrivent en fin de vie. Face à ces problématiques, les filières de gestion des déchets se sont diversifiées pour apporter une réponse plus adaptée à la valorisation des matières dans un contexte industriel. Cette restructuration naît d'une première prise de conscience des risques de pénurie de certaines matières et des conséquences environnementales de la structuration linéaire, auxquelles les entreprises doivent s'adapter [MILLET, 2003]. Une gestion différenciée s'est progressivement instaurée de manière à tenir compte des propriétés des matériaux dans les stratégies de valorisation. Les efforts de diversification des filières se sont principalement portés sur la fin de vie des produits pour permettre la séparation et la valorisation par flux de matière. Là aussi, les filières sont dimensionnées de manière à pouvoir absorber les flux de matières issus des processus industriels. Une fois transformées, ces matières pourront se substituer aux matières premières venant à manquer. Plutôt que de revoir sa stratégie globale de fonctionnement, l'industrie a misé sur la possibilité de réintroduire les matières dans les systèmes de production, comme en témoigne les objectifs fixés par les industries du recyclage : « *D'ici à 2137, l'ensemble des ressources naturelles permettant la fabrication des métaux et des plastiques dans le monde aura disparu. Le recyclage sert à la fois à limiter leur prélèvement et donc prolonger la durée des gisements, mais aussi à préparer une société et des industries capables de fonctionner exclusivement avec des matières déjà utilisées.* » [SITA RECYCLAGE, SUEZ, 200?]. En 1993, la première filière dite à Responsabilité Élargie du Producteur (REP) est mise en place. Ce dispositif voulu par l'Etat français repose sur le principe de responsabilité élargie du producteur, selon lequel les producteurs, c'est-à-dire les personnes responsables de la mise sur le marché de certains produits, peuvent être rendus responsables de financer ou d'organiser la prévention et la gestion des déchets issus de ces produits en fin de vie. Les producteurs choisissent généralement de s'organiser collectivement pour assurer ces obligations dans le cadre d'éco-organismes à but non lucratif, agréés par les pouvoirs publics.

Depuis 1993, la REP s'est progressivement appliquée à de plus en plus de produits en fin de vie. Afin de comparer les différents niveaux de mise en œuvre, en 2017, l'ADEME a réalisé un panorama chronologique des filières françaises, européennes et volontaires (Figure 10) [ADEME, 2017].

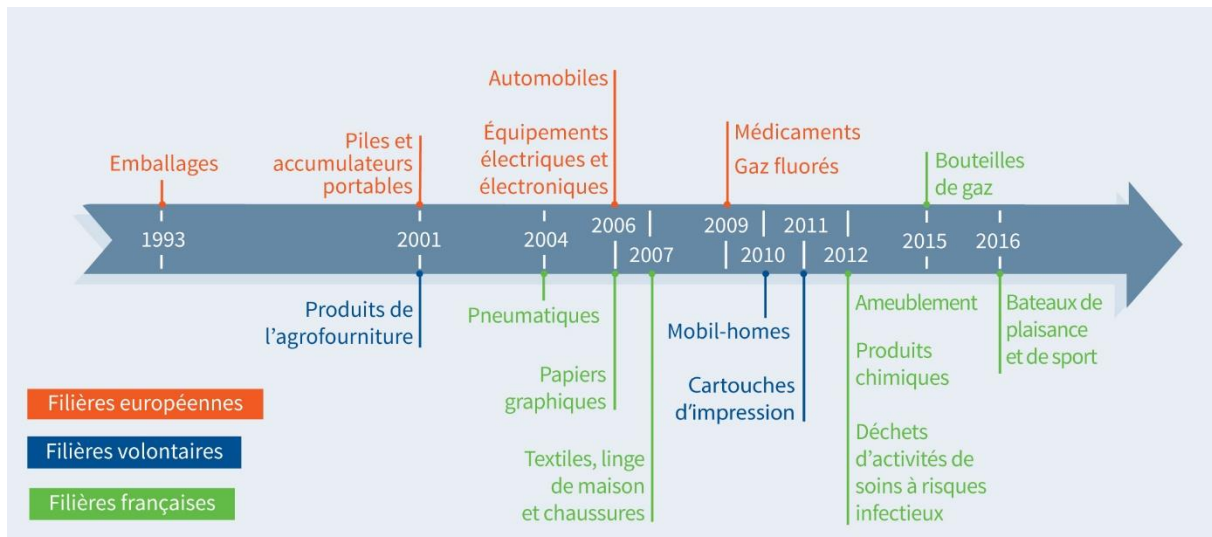


Figure 10 : chronologie des mises en œuvre opérationnelles des filières REP*. [ADEME, 2017]. (* Date du premier agrément ou date de fonctionnement opérationnel de l'organisation ou date de prise en charge des produits usagés).

La loi Anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC) de 2020 a prévu de créer sur la période de 2021 à 2025, 11 filières supplémentaires qui concernent :

- les emballages professionnels (2025), y compris pour les emballages utilisés par les professionnels de la restauration (2023),
- les produits ou matériaux de construction du secteur du bâtiment (2022),
- les jouets (2022),
- les articles de sport et de loisirs (2022),
- les articles de bricolage et de jardin (2022),
- les huiles minérales ou synthétiques (2022),
- les produits du tabac (2021),
- les gommes à mâcher (2024),
- les textiles sanitaires à usage unique (2024),
- les engins de pêche contenant du plastique (2025)
- les aides techniques médicales (possibilité).

Bien que les filières REP nourrissent des études sur le démantèlement des produits ou permettent parfois la récupération et la revente d'objets d'occasion, elles restent majoritairement axées sur la récupération spécialisée des matières en vue d'en optimiser le recyclage.

En misant sur la circulation des produits réduits à l'état de matière, le recyclage ne remet pas en question les fondements du paradigme industriel linéaire axé sur la massification et la vitesse de circulation des biens dans le système. Ceci malgré de nombreuses tentatives d'améliorations des produits, des performances ou de l'organisation du système pour que les

matières soient toujours mieux valorisées. À l'échelle locale, le recyclage a permis d'intensifier les efforts de tri, mais il participe à donner l'illusion que la matière peut circuler rapidement, sans limite de transformation, pour répondre à des besoins en matières qui ne cessent d'augmenter faisant de l'économie circulaire « *une machine à mouvement perpétuel* » [CULLEN, 2017]. La gestion internationalisée des matières recyclées poursuit la dynamique initiée par le paradigme linéaire : centraliser les matières et stabiliser leurs propriétés pour les rendre compatibles avec des besoins industriels mondialisés. Or, pour limiter la dégradation des matériaux et réduire les besoins énergétiques associés aux procédés de recyclage, il faut aller au-delà des stratégies fondées exclusivement sur la perspective d'un retour à l'état de matière. Car même en triant par matière, le tri n'est pas suffisamment fin pour éviter les mélanges et permettre de conserver indéfiniment les propriétés des matériaux [O'ROURKE et al. 1996], [ALLWOOD et al. 2010 (a)], [BIHOUIX, GUILLEBON, 2010]. De plus, pour obtenir des matières recyclées ayant les mêmes propriétés que les matières premières, il faudrait que les procédés soient en mesure de ne pas détériorer les matériaux au moment du recyclage. Or le recyclage de nombreux matériaux occasionne une détérioration progressive des propriétés. Même quand une préservation des propriétés est possible, le recyclage contribue à une transformation avancée ou à une perte totale de la mise en forme, et donc à une perte de valeur.

Afin de répondre à ces différentes problématiques, nous soulevons l'hypothèse qu'il serait bénéfique de poursuivre la dynamique de diversification et de territorialisation des filières en tenant compte des propriétés et des qualités des objets en circulation. Ceci implique de dépasser les modèles précédents en misant sur les atouts des filières existantes et en approfondissant considérablement le niveau de tri et de séparation des objets en vue de trouver des alternatives au recyclage des matériaux. Ces alternatives doivent néanmoins être capables de faire face aux quantités de déchets en circulation, sans tomber dans le piège de rendre légitime la surconsommation de biens sous prétexte qu'une solution existe pour les valoriser. Rappelons qu'il est essentiel de commencer à chercher des solutions pour allonger la durée de vie des produits existants, avant de chercher les moyens de les valoriser. C'est ce que préconise la hiérarchie des modes de traitements en mettant l'accent sur les pratiques qui permettent de limiter le niveau de transformation des objets. Or, regarder les filières sous le prisme des objets en circulation, au lieu de les voir sous l'angle des matières, augmente de manière considérable le nombre de filières et suppose de questionner leur organisation. Nous faisons également l'hypothèse, que c'est précisément l'augmentation du nombre de filières et leur diversité qui permettraient de faire face aux quantités en circulation, de manière à ce qu'il n'y ait plus qu'une voie unique, mais une constellation de possibilités permettant de répartir les quantités en fonction des besoins et de la demande. L'augmentation du nombre de filières permet par ailleurs de s'adapter à la diversité des objets en fin de vie, ainsi qu'à la variété des besoins et / ou des capacités productives d'un territoire.

Repenser la structuration des filières de gestion des déchets sous le prisme des objets ouvre des questionnements globaux ayant de nombreuses implications sur l'ensemble du cycle de vie des objets. Cette approche questionne non seulement la structuration des approvisionnements en matières qui seraient alors collectées de manière décentralisée et territorialisée, mais aussi l'ensemble du système de production et de gestion des déchets. Sans exclure complètement le retour à l'état de matière, à la fois très pratique et nécessaire. Cela permettrait de limiter les prélèvements de matières premières, et donc à prolonger la

durée des gisements, mais aussi à préparer une société et des industries capables de fonctionner exclusivement avec des objets déjà utilisés.

Nous avons évoqué à plusieurs reprises l'hypothèse d'un modèle décentralisé. Quelques précisions s'imposent sur la nécessité de décentralisation. Tout d'abord, les objets, à l'origine fabriqués avec des matières premières, ont été disséminés sur les territoires et intégrés à différents ensembles techniques que sont les infrastructures, les bâtiments, les produits complexes et les objets du quotidien. Ces ensembles techniques ne peuvent être traités à la même échelle en raison du degré de complexité qu'engendre le démontage ou la valorisation de ces objets. Le territoire est avant tout un système ouvert intégré dans un réseau d'échange mondialisé. De ce fait, la décentralisation est à la fois multi-pôle et multi-échelle. Cependant le caractère décentralisé des objets de deuxième vie, implique des modalités « d'extraction » et de collecte indissociables des territoires de référence. Les objets collectés sont donc étroitement liés à leur contexte de mise en œuvre et d'usage. Le premier niveau de la hiérarchie des modes de traitements préconise d'entretenir et de réparer les objets, ce qui implique d'intervenir au plus proche des lieux d'utilisation des objets. Ensuite, si une transformation se révèle utile ou nécessaire, il faut évaluer les conditions qui permettent de le faire dans un cadre économique acceptable. Les coûts associés au démantèlement, au conditionnement, au transport, et au stockage doivent trouver un équilibre pour que les matériaux de deuxième vie restent compétitifs avec les matériaux neufs. Réduire les distances entre les lieux de collecte et de mise en œuvre s'avère donc un levier intéressant pour limiter ces coûts, tout en réduisant l'empreinte environnementale associée au transport ou au stockage. L'extrême diversité qu'engendre un décentrement de la logique matière vers des logiques fondées sur les spécificités formelles des objets suppose de pouvoir s'appuyer sur un vaste champ de compétences, de connaissances, de savoir-faire et d'outils de fabrication au plus proche des lieux de collecte. Cette spécificité des objets de deuxième vie ne cantonne pas les modèles de valorisation à l'unique perception de facteurs économiques. En effet, de nombreux facteurs culturels (la langue, les savoir-faire, les traditions, les usages, les modes de vie, etc.) ou naturels (le climat, les matériaux, la topologie, les réseaux hydriques, la biodiversité, etc.) permettent de définir plus précisément les contours de nouvelles stratégies de valorisation des objets. L'approche culturelle permet de valoriser les matériaux sur des critères d'origine, des critères d'auteur, ou sur des critères esthétiques pour n'en citer que quelques-uns. Un diagnostic approfondi des gisements locaux permettrait notamment d'identifier et de préserver les éléments ayant une valeur historique ou les éléments à caractère patrimonial, contribuant de ce fait, à renforcer l'identité et l'attractivité d'un territoire. La réduction des distances parcourues par les objets, permet notamment de faciliter la traçabilité et le contrôle, en renforçant les liens de confiance qui unissent « le producteur » et l'utilisateur. Enfin, pour garantir l'équilibre des dynamiques matérielles associées à la circulation des formes au sein des systèmes environnementaux, il faut se doter d'outil de mesure et d'évaluation appropriés. C'est ce que préconise Alberto Magnaghi (2003) dans son ouvrage « *Le projet local* » au sujet du « *développement local auto-soutenable* ». Il se réclame « *des approches normatives qui considèrent la valorisation des ressources territoriales et des identités locales comme l'acte fondateur des modèles de développement alternatifs. Ces approches, comme on le sait, ont profondément modifié les critères d'évaluation et les indicateurs de développement.* » Et il ajoute « *j'ai mis l'accent sur la nécessité d'élaborer des règles d'établissement (environnementales, urbanistiques, productrices, économiques, etc.) capables d'assurer un équilibre durable entre établissement humain et systèmes*

environnementaux » [MAGNAGHI, 2003]. La question de la circulation des formes est étroitement liée aux dynamiques d'extraction et de production. Ce qui est en jeu dans ce travail de thèse, c'est de chercher à évaluer le niveau de transformation des matériaux ainsi que les dynamiques qui en résultent. L'élaboration éventuelle d'un modèle décentralisé qui tienne compte de ces paramètres comme modèle de développement, nécessite d'élaborer des outils de mesure et d'évaluation, ainsi qu'un cadre normatif qui puissent préserver les équilibres entre les nécessités de transformations qui permettent de garantir la pérennité des activités humaines et des modes de vie, sans compromettre la capacité du milieu naturel à supporter le niveau et la vitesse de transformation engendrés par les besoins humains. Le niveau de transformation des objets, peut se traduire par des indicateurs qui mesurent les degrés de pression sur les systèmes environnementaux (capacité à absorber et stocker du carbone, production de biomasse, empreinte écologique, etc.). Comme le souligne Monto Mani (2005) dans son ouvrage « *Sustainability and Human Settlement* » dont l'objectif est d'élaborer un modèle d'intégration des activités humaines dans son milieu naturel, « *l'environnement construit* » (*Built environment*) est au centre d'une dynamique complexe qui est le fruit d'une étroite relation entre la dynamique culturelle (*communities lifestyle and attitude*) et le milieu naturel dont il dépend. Nous développons dans ce travail une approche qui part de l'existant (de la diversité des objets et des techniques de transformation), c'est-à-dire des spécificités locales (à l'échelle du territoire) voire ultra-locales (à l'échelle du site), pour remonter vers un modèle plus générique de circulation des matériaux de deuxième vie.

3.3.2 Concevoir et fabriquer des produits et matériaux qui s'adaptent aux évolutions des gisements : l'outil « arborescence produit »

Afin de pouvoir concevoir avec des ressources changeantes, il est essentiel pour le concepteur de pouvoir anticiper la nature et le niveau de variation souhaité. Ceci de manière à intégrer ces variables le plus tôt possible dans le processus de conception. Pour ce faire, nous avons développé une arborescence produit inspiré des méthodes de classification du vivant. Cet outil, complémentaire aux frises, a pour objectif d'identifier différents niveaux de variation pour un produit donné. Cet outil permet aux concepteurs d'explorer l'univers d'un produit en identifiant les variations possibles classées par niveaux. Nous commençons par la morphologie globale du produit, puis nous explorons des variations de plus en plus subtiles allant jusqu'au registre des couleurs, des motifs ou/et des textures. L'arborescence produit, mise en relation avec l'outil « *product to dust* », est pensée comme un outil d'exploration d'un produit : d'abord sur l'état de l'art, ensuite comme une aide à la reconception. En effet, son objectif principal est d'identifier les niveaux de transformation qui permettent d'intégrer des matériaux et objets en substitution à ceux qui sont déjà présents dans le produit. L'objectif est de proposer dès la conception différents scénarios de fabrication qui feront évoluer les aspects morphologiques, fonctionnels, matériels ou esthétiques du produit étudié.

Le développement de cet outil s'est inspiré des méthodes de classification du vivant. L'arborescence permet de décrire, de nommer et de classer les produits de manière à identifier de potentielles évolutions de ces derniers. La dénomination utilisée ici pour l'arborescence produit, fait référence à la taxonomie : « *Science des lois et des principes de la classification des organismes vivants ; p. ext., science de la classification.* » (CNRTL, Consulté le 16/12/2020). Le terme d'arborescence est justifié car il s'agit bien de regrouper des catégories de produits en fonctions de leur degré de ressemblance, mais la finalité n'est pas

la même que pour la classification du vivant, car l'outil est conçu pour explorer le potentiel de diversification d'un produit en phase de conception. L'organisation de l'arborescence a pour objectif de classer des produits par catégories, de manière à interroger le principe de série et / ou de standardisation. Cet outil permet d'identifier des leviers de différenciation des produits pour mieux s'adapter à des sources de matériaux changeantes ou à un modèle de production décentralisé et agile. Pour se faire une classification est proposée qui se décline en 6 catégories (Figure 7, ANNEXE). Ces catégories regroupent les produits par grands ensembles d'appartenance du plus vaste au plus précis. La chienne est déployée par rang taxonomiques : « Ordre », « famille », « genre », « espèce », « sous-espèce » et « variété ». Nous nous sommes concentrés principalement sur les quatre derniers rangs de manière à explorer la diversité de produits existants dans une famille particulière. Cette recherche a permis de développer des hypothèses de conception allant de la modification la plus totale (structure et séquences de pliages) qui entraînent une modification significative des lignes du produit, aux modifications les plus superficielles (couleurs, motifs, aspects de surface). Ce travail commence par un état de l'art de manière à identifier les produits existants dont la forme et l'usage sont similaires (une famille de produits). Pour illustrer ceci, l'exemple de classification des chennes a été choisi en partant de « l'ordre » jusqu'à « la variété ». Dans « l'ordre » des chaises pliantes se trouve « la famille » des chennes. Cette « famille » peut se décliner encore en identifiant « le genre », qui regroupe les différentes chennes en fonction de leurs « déclinaisons morphologiques ». Ces déclinaisons correspondent aux multiples typologies de structures que nous avons identifiées et qui engendrent des pliages / dépliages singuliers (Figure 8, ANNEXE). En approfondissant davantage, ces morphologies possèdent des attributs fonctionnels spécifiques, que nous appelons « déclinaisons fonctionnelles » et qui sont regroupées dans le niveau « espèce ». Au cours de nos recherches, il nous est apparu que les modèles disponibles sont dotés de variables fonctionnelles alors que les structures restaient relativement inchangées. En effet, la séquence de pliages et les structures restent similaires en ayant quelques extensions fonctionnelles que nous regroupons dans le rang « espèce » : ce sont par exemple les ombrelles, appuie-têtes, porte gobelets, repose-pied, accoudoirs, etc. En allant plus loin, ces produits peuvent se décliner en fonction des matériaux utilisés, car un même produit peut être fabriqué de différentes manières par une variation des matériaux et / ou des procédés. Cette catégorie appelée « déclinaisons matérielles » correspond à la « sous-espèce ». Alors que les séquences de pliage et les fonctions principales sont conservées, le produit est proposé en différents matériaux : hêtre, chêne, bambou, aluminium, acier, etc. Bien que les matériaux aient une incidence sur le dimensionnement des structures, ils n'ont que très peu d'influence sur la physionomie globale du produit et sur sa cinématique (le « genre »). En dernier lieu viennent les « déclinaisons esthétiques », ce qui correspond à la classification que nous nommons « variété ». En effet, des produits très similaires, (chaises pliantes, ayant des séquences de pliage particulières, avec des fonctions identifiées, fabriquées dans un matériau) sont proposés avec différents traitements de surface faisant varier les aspects perçus du produit, tel que la couleur ou les motifs imprimés. Ces déclinaisons engendrent des modifications mineures sur le produit comme la teinte du bois, les coloris ou les motifs imprimés sur la toile de l'assise.

Plus les déclinaisons de cette arborescence sont verrouillées prématurément, plus on se rapproche d'une logique de standardisation en réduisant l'amplitude des variations possibles. Inversement, si aucun niveau n'est verrouillé, toutes les options restent envisageables, ouvrant la voie vers des produits spécifiques, très agiles et / ou personnalisés. Ce verrouillage

par niveau permet au concepteur ou au décideur de prédire et d'anticiper l'amplitude des variations espérées de manière à ouvrir ou limiter les options de fabrication envisageables. Initialement cet outil est pensé pour permettre une certaine agilité du processus de conception et de fabrication afin de s'adapter aux fluctuations quantitatives, qualitatives ou temporelles des approvisionnements en objets de deuxième vie. Pour rester dans l'exemple de la chilienne, si des pièces de bois en structure venaient à manquer, il est possible de les substituer par des pièces métalliques. La variation se fait alors sur des déclinaisons matérielles dans le niveau « sous-espèce ». Cette variation entraîne cependant une stratégie différente ayant des répercussions notables sur le dessin ou sur les techniques de fabrication du produit, ce qui a pour effet de modifier la configuration productive initiale. Sans aller aussi loin dans la fluctuation du produit, il est possible de tolérer un niveau de variation inférieur, par exemple en mettant en œuvre des bâches de camion en assise ayant toutes des motifs singuliers ou en acceptant une diversité de couleurs des éléments de structure en bois. Les variations esthétiques du produit interviendront alors dans le niveau « variété », occasionnant des déclinaisons esthétiques sans modifier en profondeur le dessin du produit ou les techniques de fabrication initialement envisagées.

Outre l'usage en cours de conception, cet outil « arborescence produit » fournit aussi une vision globale des produits possibles et apporte des éléments d'aide à la décision pour la répartition quantitative et / ou qualitative des gisements dans différents scénarios de production. Ceci permet d'élaborer des stratégies territorialisées en fonction de la nature des gisements d'objets utilisés, des échelles de production (petite ou grande séries), de la diversité des acteurs impliqués dans la fabrication (artisanat et/ou industrie), ou de la complexité des produits et/ou matériaux développés (nombre de pièces, composants et technicité du produit). Par ailleurs, cela permet d'identifier des filières sur des marchés test, où l'adaptation à la clientèle et le sur-mesure restent possibles.

Ainsi utilisé, cet outil « arborescence produit » permet d'ouvrir de nombreuses perspectives pour s'adapter à la versatilité des gisements de matériaux de deuxième vie : que ce soit en phase de conception pour prévoir, anticiper et maîtriser la diversité des résultats attendus, ou en phase de fabrication pour s'adapter à la production de produits susceptibles d'évoluer dans le temps et dans l'espace (différents sites de collecte, de stockage et de production). Les facteurs de disponibilité et de prévisibilité peuvent être anticipés et intégrés en phase de conception pour développer des séries à caractère variable et adaptatif (design agile).

À titre d'exemple et de manière schématique, considérons que le concepteur prévoit de fabriquer 1000 unités d'un produit (ici l'assise à lattes d'une chilienne). Pour être confortable, chaque assise compte 20 lattes, ce qui engendre un besoin de 20 000 lattes.

Dans une logique de conception classique, les 20 000 lattes peuvent être commandées pour produire une série de 1000 produits. Des variations sont possibles, mais elles sont choisies et anticipées au moment de la conception : cela se traduira alors par une variation dans les pièces commandées.

Dans une logique de conception avec des matériaux de deuxième vie, le concepteur prévoit aussi de fabriquer 1000 assises de chilienne en lattes. Mais, en raison de la diversité des références de deuxième vie disponibles en stock, il ne dispose pas de 20 000 lattes identiques mais de 3 types de lattes comptant au total les 20 000 pièces requises (5000 lattes de type A,

5000 lattes de type B et 10000 lattes de type C). Pour s'adapter à cette contrainte, le concepteur peut développer différents scénarios de fabrication lui permettant de développer les 1000 produits, par exemple :

Scénario 1 : il conçoit 3 références de produits différents : 250 assises avec les 5000 lattes de type A, 250 assises avec les 5000 lattes de type B et 500 assises avec les lattes de type C.

Scénario 2 : il conçoit 2 références de produits différents : 500 assises en mélangeant les lattes A et B et 500 assises avec les lattes de type C.

Scénario 3 : il conçoit 1 référence de produit : 1000 assises en mélangeant les lattes A, B et C.

Cet exemple est donné avec un stock déterminé, mais si l'on suppose que le stock évolue dans le temps en raison de la variabilité des lattes qui le compose, le concepteur peut en tenir compte et intégrer ces variables dès les premières phases de conception du produit, puis poursuivre dans cette logique d'adaptation. Cela entraînera de nouvelles options de fabrication qui feront à leur tour évoluer la stratégie de fabrication et l'aspect visuel des produits avec le temps et les références disponibles sans modification fondamentale des aspects morphologiques ou fonctionnels du produit. Cet exemple repose sur les variables matérielles et esthétiques du produit (matériaux des lattes et aspects visuels, comme la couleur et la texture). Il est possible de pousser ces variations beaucoup plus loin en s'appuyant sur l'outil d'arborescence produit décrit précédemment en déclinant la structure (variables morphologiques) et certaines fonctions du produit (variables fonctionnelles).

3.3.3 Adapter les processus de conception : vers un design agile ?

Dans ce travail de thèse, nous questionnons la place des matériaux dans le processus créatif de manière à limiter le nombre et l'intensité des étapes de transformation nécessaires pour leur circulation. Nous cherchons à multiplier les points d'entrée des matériaux dans le processus créatif, et notamment à les intégrer le plus tôt possible comme une contrainte de conception pour tirer profit des avantages de la mise en forme initiale. Dans cette perspective, le travail du designer change de nature, puisqu'il se consacre à agencer des éléments déjà fabriqués, plutôt que de chercher à les transformer à tout prix.

Afin de permettre le bon déroulement des opérations de conception et le respect de la chaîne de confiance entre les acteurs il est nécessaire de se référer aux critères mentionnés précédemment : la disponibilité des matériaux (dans le temps et dans l'espace), la prévisibilité (anticiper les quantités ou les volumes disponibles) et la capacité à être décrit avec précision (les propriétés et les qualités des matériaux). Cette chaîne de confiance rassure l'ensemble des acteurs, d'abord le fournisseur qui vend une matière ou un matériau pour un usage spécifique et avec des propriétés connues. Ensuite, le prescripteur, qui à son tour, peut s'appuyer sur ces informations en vue de garantir que les matériaux utilisés sont conformes aux prescriptions techniques, dans la mesure où la mise en œuvre est également bien faite. En dernier lieu, cela rassure l'utilisateur final dont la sécurité est garantie par cette chaîne de confiance.

Nous avons vu plus avant que le designer, en tant que professionnel de la forme, travaille avec de nombreuses disciplines et que son métier se situe à l'interface des problématiques techniques et artistiques. Dans le cas où le designer travaille en équipe pluridisciplinaire, il n'est pas le seul garant des connaissances sur les matériaux ; il peut les partager avec des

spécialistes de nombreux domaines, des techniciens spécialisés, des juristes, des créateurs, des artisans, des chercheurs, etc. Cela dépend également de l'échelle à laquelle s'opèrent les opérations de fabrication de caractérisation et de contrôle : les microstructures, les matériaux, les procédés, les produits, les structures, ou les infrastructures. Dans le cas de projets complexes, les responsabilités sont partagées : le fournisseur de matériaux est garant des propriétés du matériau qu'il fabrique et qu'il commercialise, le concepteur est le garant du bon fonctionnement d'un produit qu'il conçoit, le technicien et l'ouvrier sont les garants de la mise en œuvre des matériaux et procédés qu'ils utilisent, etc. Le designer quant à lui, pourrait être le garant de l'appropriation de l'objet et de l'augmentation naturelle de ses qualités et de ses valeurs liées à son utilisation. Il est donc essentiel pour lui, d'obtenir des données fiables sur les matériaux et les procédés qu'il utilise de manière à les intégrer le plus tôt possible dans sa réflexion. Ainsi, la chaîne de connaissances et de responsabilité se retrouve partagée et séquencée dans la chaîne de production de valeurs.

Nous avons vu précédemment que dans le modèle linéaire et dans le modèle circulaire, la question des matériaux arrive relativement tardivement dans le processus de conception car le concepteur suppose qu'ils sont toujours disponibles et transformables à volonté. Nous qualifions cette approche, d'approche « tirée par le produit », car ce sont les décisions liées au cahier des charge du produit qui « tirent » les matériaux vers les nécessités du projet et non la disponibilité de ces derniers qui « poussent » ou induisent les décisions de conception qui sont alors majoritairement infléchies ou déterminées par des références limitées et spécifiques contenues dans un stock (Figure 11). Une approche « tirée par la conception » implique des choix et des compromis, car la diversité des matériaux est telle que choisir les bons peut devenir une véritable contrainte. Pour aider le concepteur à choisir les matériaux adéquats parmi des milliers de références disponibles (50 000 à 80 000 matériaux disponibles pour l'ingénieur, 3000 procédés de fabrication et de mise en œuvre [BRECHET, 2013]), il existe de nombreuses bases de données, matériauthèques ou des outils de sélection des matériaux et des procédés. Par exemple, le logiciel CES [GRANTA, 2022], permet aux concepteurs de nombreuses possibilités de sélection, de comparaisons ou de substitution des matériaux. Ce logiciel propose également des outils d'éco-audit, permettant de comparer les performances environnementales des matériaux utilisés. Plus la sélection s'affine, plus le choix des matériaux s'amenuise pour ne garder que les références les plus pertinentes. Ces bases de données se concentrent principalement sur les propriétés des matériaux et des matières. On y trouve les grandes familles de matières (métaux ferreux, métaux non ferreux, céramiques, verres, élastomères, thermoplastiques, thermodurcissables, mousses polymères et composites), ainsi que des options de sélection des procédés associés aux matériaux. Ces procédés sont classés par familles (mise en forme (*shaping*), assemblage (*joining*) et finition (*finishing*)) elles-mêmes subdivisées par classes et par membres qui auront des attributs [ASHBY, JOHNSON, 2004].

Pour un concepteur, la sélection de matériaux de deuxième vie soulève de nouvelles contraintes dans la mesure où il ne s'agit plus juste de choisir des matériaux dans un catalogue et des procédés pour les transformer. Rappelons les degrés d'incertitude des matériaux de récupération ; ils dépendent de la nature du déchet considéré (Post-fabrication sans usage, post-fabrication avec usage ou post-consommation), de la variation de facteurs temporels, quantitatifs et géographiques, ainsi que de la connaissance approfondie des propriétés des matériaux utilisés et notamment leur comportement dans une durée en conditions plus ou

moins extrêmes qui permettent de garantir la chaîne de confiance entre les acteurs. Les défis techniques, technologiques et culturels sont donc conséquents, car en plus des propriétés parfois incertaines de la matière, les matériaux de récupération possèdent des qualités et des valeurs embarquées au cours de la première vie qui contribuent à leur identité. Enfin, à ces multiples contraintes s’ajoutent des facteurs de mises en forme plus ou moins aléatoires selon les gisements. Or, le couple matière / mise en forme est aussi responsable de modifications importantes des propriétés du matériau et ceci à plusieurs échelles, de la microstructure à la structure. Le prolongement de ce couple matière / mise en forme dans le cadre d’un projet de deuxième vie questionne le dimensionnement [BRÜTTING et al. 2019], l’optimisation des formes [RUSSO, RIZZI, 2014], le surdimensionnement, la réserve d’épaisseur de matière destinée à l’usure, la patine... La contrainte formelle est conséquente et implique des répercussions sur l’ensemble du processus de conception. De ce fait, le travail du concepteur se modifie pour maîtriser les différents facteurs d’incertitude. Cette approche dite « poussée par les matériaux » semble nécessaire pour les matériaux de deuxième vie mais peut être applicable aux matériaux neufs. Dans le cas d’une approche « poussée par les matériaux de deuxième vie », de nombreuses boucles de rétroaction sont susceptibles de se dessiner entre la conception et la fabrication. La sélection des matériaux s’étend alors sur l’ensemble du processus de conception et de fabrication avec de multiples points d’entrée en fonction des scénarios (Figure 12). Une extension de la phase de conception est envisagée (CONCEPTION / FABRICATION), afin de pouvoir s’adapter à la variation éventuelle du ou des gisement(s) en phase de fabrication.

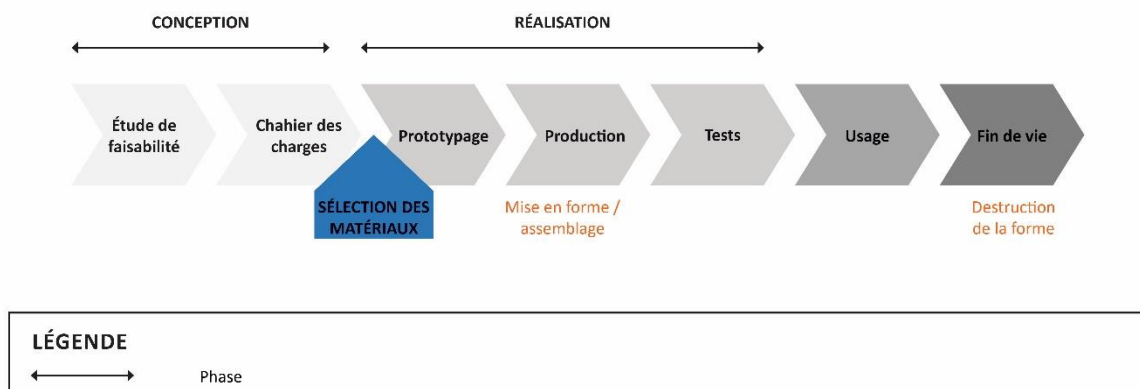


Figure 11 : Place du matériau dans une séquence de conception de produit tirée par la conception. Inspiré du séquençage proposé par Danielle Quarante [QUARANTE, 1984].

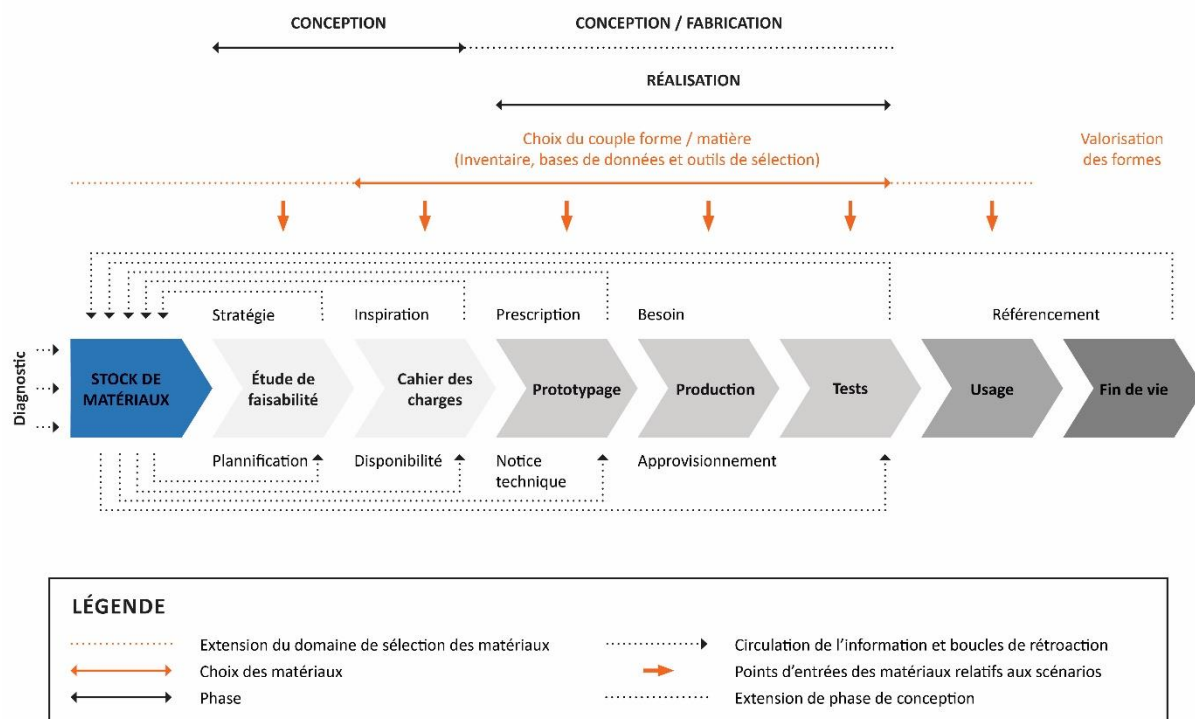


Figure 12 : Place du matériau dans une séquence de conception de produit poussée par le matériau.

Dans certains cas, la sélection peut même se prolonger jusqu'en phase d'usage si l'utilisateur final est invité à fabriquer et / ou modifier certaines parties, voire la totalité du produit [MARI, 1974]. Deux approches peuvent être distinguées : partir de l'objet pour concevoir avec ses parties (ex : approche matériaux avec le livre ou les lisières) ou partir des parties pour développer des objets (ex : approche produit avec la chilienne). Entre ces deux extrêmes, de nombreuses hybridations sont susceptibles de se côtoyer dans la chronologie d'un projet, en fonction de sa complexité. Nous déploierons ces deux approches en détail dans la suite du manuscrit pour présenter les cas d'études que nous avons développés.

Dès les premières esquisses, les matériaux de deuxième vie, déjà mis en forme, peuvent influencer le travail du concepteur selon deux attitudes :

- Le concepteur dessine de manière libre et recherche ensuite des matériaux qui peuvent correspondre à son dessin, quitte à le modifier.
- Le concepteur s'inspire directement des matériaux disponibles en stock pour penser ce qu'il dessine.

Après l'esquisse et éventuellement les premiers prototypes, la conception sera également déterminée par des propriétés potentiellement changeantes ainsi que par les nombreuses qualités attachées aux matériaux. Le niveau de détail et de précision augmente. À ce stade, le concepteur a besoin d'informations plus précises sur les matériaux afin d'anticiper les contraintes de fabrication. Ainsi, au-delà des aspects quantitatifs et de la disponibilité des matériaux, le concepteur doit tenir compte des aspects qualitatifs. Nous pouvons évoquer différents niveaux de variables qui peuvent être intégrés dans les plans de manière à s'adapter à un stock changeant : une subtile évolution des dimensions (par exemple sur l'épaisseur, la longueur ou la largeur de certaines pièces lorsque cela est possible), des agencements qui

évoluent (patchwork, dallages, objets divers), des aspects visuels ou de surface (variations des motifs, des couleurs, des textures, etc.), un travail sur les parties visibles et invisibles (rembourrages, différentes options structurelles, isolation, etc.). Ces stratégies peuvent avoir des effets sur les performances des produits, de ce fait, l'évaluation des différentes options offre aux concepteurs la possibilité de proposer des gammes de différentes qualités ou de travailler dans une perspective de sur-mesure en choisissant les options les plus adaptées à chaque cas de figure. Plus tardivement dans le projet, en phase de fabrication, les modalités de mise en œuvre, de mise en forme ou de préservation des objets entrent en ligne de compte. Les différents objets intermédiaires de conception deviennent des outils privilégiés pour dialoguer avec les artisans, ouvriers, artistes, créateurs et techniciens en charge de la fabrication. Les différentes variables étudiées pendant la conception, peuvent servir de base, flexible ou rigide, pour guider les opérations de fabrication.

3.4 Produits, objets et matériaux : repenser les liens avec le territoire.

3.4.1 Supercyclage : Circulation de matière, valeurs et territoire

Une collection de photographies présente de multiples appropriations d'une structure de chaise en tubes acier par des artisans en Inde (Figure 13). Cette collection présente un exemple d'articulation entre l'artisanat et l'industrie faisant intervenir une grande diversité de savoir-faire et de matériaux dans la fabrication d'un produit. Dans ce cas précis, la structure en tubes acier est produite industriellement. Cette dernière a souvent une durée de vie plus longue que l'assise. C'est pourquoi la structure est réemployée, alors que les assises sont fabriquées sur mesure en fonction des matériaux disponibles et savoir-faire des artisans qui se sont appropriés le produit. Il arrive cependant que la structure soit également modifiée lorsque les artisans ont des compétences ou des outils pour la transformer : les mécaniciens ont par exemple ajouté des tiges métalliques et des ressorts permettant de maîtriser la flexibilité de la structure souvent jugée trop souple. Chaque image est prise face à un atelier, elles montrent la relation entre les savoir-faire de cet atelier et la stratégie d'appropriation de la partie qui avait été réalisée par l'industrie. Cet exemple se focalise sur l'appropriation de produits industriels par des artisans, en Inde, pour illustrer les degrés de variations qui permettent de penser des produits selon les ressources disponibles (savoir-faire, matériaux ou procédés).



Figure 13 : réemploi de structures de chaises en tubes acier. Images, Baptiste Menu, artisans inconnus, Inde, 2011.

Ces observations en Inde font écho à ce que le designer Cubain Ernesto Oroza appelle « *le système industriel vernaculaire* » [OROZA, 2009]. Mis en place de manière spontanée pour reconquérir une autonomie perdue et pour faire face aux pénuries répétées à Cuba, ce système repose sur un artisanat et une création ancrée dans son territoire. Le designer documente ainsi innovations, créations et artisanats cubains qui traversent tous les domaines de la vie courante : transports, communication, logement, habillement, électroménager, alimentation. Ernesto Oroza met en lumière l'incroyable potentiel de ce système : l'adaptation des machines, la gestion des matières, la réinvention des chaînes logistiques, le développement de nouvelles techniques, etc. Il met en évidence la complémentarité des rôles et des échelles, entre l'instauration d'un système de production vernaculaire déployé à l'échelle domestique et le rôle de l'état ou des entreprises. Il insiste sur les perspectives d'innovation à l'échelle mondiale pour l'industrie et le design : « *C'est parce que l'usage et l'usager deviennent essentiels dans la nouvelle perspective d'emploi raisonnable des ressources et de la réduction de la consommation à l'échelle planétaire que l'expérience cubaine de production industrielle vernaculaire peut montrer au design et au secteur industriel, comment les individus – sous la contrainte – ont su oser cette alternative.* ». Même si ce système propose une alternative qui peut être transposée ailleurs, il est essentiel de rappeler que cette expérience est avant tout poussée par la nécessité, le manque de moyens et les pénuries. Ernesto Oroza reste très lucide, il met en évidence les limites de ce système et pointe du doigt le manque d'aide du gouvernement ainsi que l'absence d'encadrement et d'information envers la population. Cette situation aboutit à l'émergence d'une économie informelle et à des conditions de travail précaires, voire dangereuses : usage de substances toxiques, improvisation, manque de formation, etc. L'absence de contrôle et d'organisation, engendre également des effets indésirables sur l'environnement : « *Nous pouvons tirer des enseignements de cette production. Cette approche de « réutilisation », de « réparation » ... Mais dire que de telles pratiques aident l'écologie de Cuba n'est pas vrai. C'est le contraire*³¹. »

³¹ Extrait de l'entretien « Design et désobéissance technologique. Les réflexions d'Ernesto Oroza sur son expérience de vie à Cuba nous éclairent sur son approche politique du design. » Consulté le 05/04/2022. https://www.citedudesign.com/fr/a/design-et-desobeissance-technologique--2051?fbclid=IwAR1FGjvXoP661KVgOC2uOx0lOIFQCSSkVQhcxQWoInzCOTN_TFRKhNj_56ws

La préservation des matériaux ouvre donc des perspectives, qu'il faut pouvoir évaluer afin d'en mesurer les effets sur l'environnement, le travail, la santé ou l'économie.

La circulation de la matière a une profonde influence sur les territoires et sur les modes de vie. Historiquement, la matière circulait majoritairement à l'échelle locale ayant une influence considérable sur la structuration productive et économique des territoires. Ce faisant, la matière et l'identité des territoires étaient intimement liées. Avec le développement des réseaux de transports, l'augmentation des capacités de production et la massification du traitement des déchets, le dialogue historique entre la matière et les territoires s'est progressivement effrité. Il est aujourd'hui complexe de renouer les liens qui unissent « *l'environnement construit* » à « *l'environnement naturel* ». Pourtant, les éléments qui constituent « *l'environnement construit* » [MONTO et al. 2005], représentent aujourd'hui une source d'approvisionnement et d'inspiration non négligeable au regard des quantités déjà extraites et de l'instabilité croissante des approvisionnements. Les outils présentés jusqu'à présent (état des lieux, diagnostic, « *product to dust* », « *dust to product* » et « *l'arborescence produit* ») peuvent être utilisés en complémentarité pour imaginer des scénarios de supercyclage permettant d'évaluer les potentiels de valorisation de déchets au regard des procédés et des savoir-faire. L'objectif est de multiplier les passerelles qui permettent le passage du déchet au produit, au matériau, et enfin à la matière, en essayant de ne pas compromettre la réversibilité de ce qui est construit dont un levier repose sur le tissu productif local constitué d'acteurs de natures différentes (fournisseurs, prestataires, clients, usagers, partenaires...).

Ainsi, une piste de supercyclage identifiée à l'aide des outils « *dust to product* » ou « *arborescence produit* » se cristallise dans un scénario de supercyclage en trouvant son ancrage territorial. Pour ce faire, une connaissance des facteurs géographiques et / ou territoriaux, à des échelles très diverses, est un facteur clé. Dans une démarche de supercyclage, des échelles locales de territoire seront préférées (ville, région). Les aspects territoriaux peuvent être liés au tissu socio-économique mais aussi au folklore, aux traditions, aux usages, aux coutumes, ou à de nombreuses pratiques culturelles dont l'origine a son importance. Ces aspects territoriaux peuvent alors révéler les savoir-faire ou les procédés du territoire de référence. Cela consiste à donner une visibilité sur les capacités de valorisation potentielles d'un acteur ou d'un réseau d'acteurs. Ces informations ne concernent pas directement les matériaux mais plutôt les outils et compétences qui caractérisent le tissu productif territorial. Par exemple, pour le gisement de lisières ayant fait l'objet d'un travail de diagnostic, nous avons identifié des entreprises de tressage ou de fabrication de cordages. Le procédé de tressage a cette particularité de pouvoir pleinement exploiter le potentiel des lisières (de longues bandes de tissus) pour en faire d'autres semi-produits comme des rubans, des cordes, des lacets, des filets ou du macramé (tressages), sans avoir à modifier le niveau de complexité de l'objet initial et en ne faisant pratiquement aucune chute (Figure 14). Ceci nécessite de conditionner les lisières en bobines pour qu'elles puissent être compatibles avec les procédés de fabrication envisagés. L'objectif est d'identifier des acteurs qui peuvent transformer les objets pour des clients ou usager identifiés (ici des entreprises de tressage ou tissage). Ces acteurs peuvent définir le niveau de complexité avec lequel ils souhaitent travailler et envisager si un échelon de subsidiarité est intéressant ou pas (par exemple travailler avec des effilocheurs).



Figure 14 : exemples d'expérimentations avec les lisères. De gauche à droite : cordes, tressages, macramé.

Ainsi, dans un scénario de supercyclage, les acteurs susceptibles de participer à la valorisation d'un gisement sont identifiés. Il peut s'agir de pratiques existantes ou de savoir-faire innovants liés à des besoins émergents et permettant l'identification, le démontage, la déconstruction, la préservation, le transport ou la valorisation de matériaux par de nouvelles pratiques constructives plus à même de préserver les valeurs. À l'instar des savoir-faire et des matériaux ; les procédés, les outils ou les techniques sont susceptibles d'évoluer ou d'être interprétés pour répondre à ces besoins émergents. Nous distinguons deux approches complémentaires, celle centrée sur la connaissance des outils, des procédés et des techniques et celle décrite précédemment centrée sur la description des matériaux et objets en circulation. Cette double approche (matériaux / outils) procure une perception plus fine des possibilités de maillage inter-acteurs sur un territoire. D'une part il y a les gisements et d'autre part il y a les outils pour les valoriser.

Les savoir-faire quant à eux, font l'interface entre les matériaux et outils. Ils reposent sur une expérience transversale alliant le geste et la connaissance complète des matériaux. « *La maîtrise de gestes souvent multiséculaires ne doit pas occulter une dimension importante des métiers d'art, qui est d'être des laboratoires d'innovation – de recherche et développement, pourrait-on dire pour reprendre une terminologie propre au secteur industriel. Innovation pour leur propre compte, bien entendu, mais également, et très régulièrement, innovation dans le cadre de commandes passées par de grandes entreprises clientes. Ainsi, les grandes entreprises du luxe, par exemple, font régulièrement appel aux ateliers d'art pour développer de nouveaux produits, de nouvelles techniques, sur la double base à la fois de leur créativité et de leur connaissance aiguë de la matière* » [ATELIERS D'ART DE FRANCE, 2018]. Plus largement, les métiers de la création sont susceptibles d'activer des leviers d'innovation qui

dépassent la maîtrise des matériaux et des techniques. Cela nécessite d'apprendre à se positionner dans un environnement complexe et changeant pour proposer des solutions innovantes. « *Être professionnel des métiers d'art, ce n'est pas seulement maîtriser des techniques. C'est aussi savoir diriger une entreprise, comprendre son marché, s'y adapter, le développer, construire son offre commerciale et valoriser sa singularité. C'est, outre le savoir-faire long et complexe à acquérir, faire preuve de créativité, investir un matériau à partir duquel innover et auquel on imprime l'identité de l'atelier. La formation aux métiers d'art ne peut ainsi être réduite au seul apprentissage de gestes, mais doit au contraire être étendue au triptyque créativité / réalisation / commercialisation, sans qu'aucune de ces trois composantes ne fasse défaut.* » [ATELIERS D'ART DE FRANCE, 2018].

L'enjeu est de mieux comprendre les spécificités et le potentiel du métabolisme territorial de manière à identifier des « *synergies de mutualisation* » ou des « *synergies de substitution* » activables dans des scénarios [ADOUE, 2007]. Le développement de scénarios complémentaires de supercyclage vise à valoriser la plus large part possible de matériaux identifiés en phase de diagnostic en concertation avec les acteurs territoriaux.

3.4.2 Organisation des connaissances liées aux aspect territoriaux

Les connaissances liées aux aspects territoriaux peuvent prendre différentes formes. Durant les dix dernières années, de nombreuses plateformes ont fait leur apparition sur internet. Leur nombre s'est accentué au cours du temps, témoignant d'un intérêt croissant pour les problématiques liées au réemploi et à la valorisation des matériaux. Leurs objectifs sont variés et dépendent des plateformes. Certaines sont plus généralistes : elles proposent de recenser et de cartographier les fournisseurs de matériaux de récupération (opalis.be, oogstkaart.nl), ou se positionnent comme des places de marché pour la revente de matériaux de deuxième vie (urbanmineplatform.eu, urbanminingexchange.com, boursomat.fr, cycle-up.fr, planetreuse.com, readymader.com, werflink.com). D'autres se spécialisent dans des domaines d'application spécifiques, à l'image de SolDating.fr (Hesus) pour les échanges de terres non polluées, Organix.fr (Suez) conçue comme une place de marché destinée aux échanges de matières organiques, materialflow.net qui permet d'accéder à des visualisations de données de circulation des flux de matières sur plus de 200 pays ou encore Nona Source (nona-source.com) pour la valorisation d'inventaires issus des maisons de haute couture Françaises.

Notons que les approches de recherche et de classification sont nombreuses pour le référencement des stocks. Nona Source propose une classification par matériaux (type de fibres : coton, polymère, soie, laine, autres fibres, etc.), par poids (en grammes par mètre carré), ou par type de matériau en fonction des techniques de fabrication (tissé laine, tissé coton, doublure, cuir et simili, tricot, etc.). Ces critères sont relatifs aux différentes plateformes en fonction de leurs spécificités. Ainsi, Opalis.be propose des critères géographiques pour trouver les revendeurs par ville, des critères alphabétiques pour retrouver les revendeurs par noms, des critères par type de matériau (carrelages, briques, parquets et planchers, Portes châssis de fenêtre, etc.), ou encore des critères associés aux catégories professionnelles (démolition, conception, transport, démantèlement, mise en œuvre). Les plateformes qui s'orientent sur la revente de matériaux proposent également des critères de prix, de quantité ou de qualité. Contrairement à une approche centrée sur les

déchets qu'il s'agit de faire disparaître, la diversité d'approches proposée par ces plateformes met en lumière la nécessité de référencer, de rendre visible et lisible l'offre de matériaux, pour qu'ils puissent être prescrits et mis en œuvre. De ce fait, les critères dépassent de loin une approche par matière qui se révélerait insuffisante pour trouver des références spécifiques convenant aux besoins d'un projet. Par ailleurs, le foisonnement de secteurs, d'acteurs et de compétences répertoriées, montre l'émergence d'un modèle en voie de structuration qui tient compte d'une approche territoriale de la circulation des matériaux. L'usage quasi systématique des outils cartographiques, montre l'importance des critères géographiques et territoriaux dans la valorisation des matériaux de deuxième vie.

Dans ce travail, nous avons choisi d'organiser les connaissances liées aux aspects territoriaux sous forme de cartographies qui recensent les gisements et les acteurs susceptibles de les valoriser. Ces cartographies précisent la répartition des procédés et des outils sur le territoire de manière à estimer les distances à parcourir selon les scénarios mais aussi à mettre en valeur les différentes stratégies de valorisation. Elles peuvent également contenir des données géographiques et des précisions sur les éventuels partenaires impliqués dans un scénario. Ces partenaires peuvent être : des acteurs de la recherche, des laboratoires de caractérisation ou d'essais mécaniques, des universités et des écoles, des acteurs habilités à certifier des matériaux ou des produits, de potentiels lieux de collecte, des artisans, des bureaux d'étude, des agences de design ou d'architecture, des entreprises, etc. La collecte de ces données permet d'élargir les perspectives de valorisation tout en stimulant l'innovation et le tissu productif local. Cette documentation s'utilise principalement en phase de conception et de planification lorsque des stratégies de supercyclage ont été identifiées au préalable. Il sert donc à positionner différents scénarios en vue de les faire converger avec les ressources matérielles ou immatérielle qui jalonnent le territoire de référence.

3.5 Expérimenter un processus de conception dans une démarche de supercyclage

Dans le modèle linéaire, nous avons vu que la logique reposait sur la rationalisation du processus de production et sur la standardisation des produits. Cette logique s'est poursuivie avec le modèle circulaire, qui, en utilisant des matériaux standardisés issus des filières de recyclage continue à produire en grande quantité des produits identiques. Il arrive parfois, dans le modèle circulaire que les produits soient amenés à varier légèrement. C'est l'exemple de certains produits en plastique moulé avec des granules de couleurs différentes faisant évoluer la texture en fonction des mélanges injectés dans le moule. Ici la logique de production reste fondée sur l'usage de semi-produits standardisés ce qui engendre presque toujours des produits rigoureusement identiques.

Dans les années 1970, le designer Italien Gaetano Pesce explore une voie de traverse en réaction à l'uniformisation des objets industriels. Ce dernier réalise différentes expérimentations sur le caractère aléatoire de la production d'objets standardisés qu'il appelle « séries différenciées ». Il développe des produits en série qui se ressemblent sans être identiques, en faisant varier certains paramètres du processus de fabrication [GUIDOT, 2004]. Cette approche est susceptible d'ouvrir des perspectives sur le développement d'objets sériels non standardisés de manière à exploiter les différences, mais

aussi les points de ressemblances, entre les objets de deuxième vie. Ces variations peuvent également provenir des procédés et des semi-produits sélectionnés par les concepteurs.

Lorsque l'on conçoit un produit à base de matériaux de récupération, le concepteur doit s'adapter aux aléas du gisement utilisé (les propriétés, les quantités, les valeurs, les qualités, la temporalité et la saisonnalité). Dans ce cadre, la description du processus d'innovation par le British Design Council (2005) est intéressant à considérer (Figure 15). Il fait intervenir un processus itératif alternant étape divergente permettant d'imaginer une diversité de pistes possibles, suivie d'une étape de décision convergente permettant de sélectionner la piste à conserver. Puis, une seconde étape divergente permet d'évaluer les options opérables pour enfin finaliser la réalisation dans une dernière étape convergente. Cette description, appelée « *double diamond design process model* », est volontairement très générique et s'adapte ainsi facilement à différentes dynamiques de projet d'innovation. Il nous est ainsi possible de commenter les quatre étapes selon le point de vue de la place des matériaux dans le processus (Figure 15) :

(1) La première étape consiste à élargir le champ des possibles dans une phase exploratoire. C'est pendant cette première phase d'augmentation des connaissances que se font les premières esquisses. Cette phase repose sur l'observation et l'état de l'art, de manière à élargir les options de conception sur la base d'une première collecte d'informations (références, études, normes, éléments d'inspiration, etc.). Dans cette étape, les outils « état des lieux », « *product to dust* », « *dust to product* » peuvent permettre d'organiser les informations collectées.

(2) Dans la seconde phase, le projet est en cours de définition. Une première sélection des idées prometteuses est réalisée. Le projet s'affine, notamment sous la forme d'objets intermédiaires de conception tels que des plans, des visuels 3D, des détails techniques ou des maquettes.

(3) La troisième étape est une phase de développement et de prototypage, c'est souvent à ce niveau que la question des matériaux se précise sans être totalement verrouillée. Dans cette étape, l'outil « arborescence produit » peut permettre d'organiser les pistes envisagées et d'identifier les complémentarités éventuelles.

(4) La dernière phase est le livrable. C'est à ce moment que la sélection des matériaux devient définitive entraînant une fermeture des possibles vers un produit qui sera fabriqué conformément aux plans réalisés en amont.

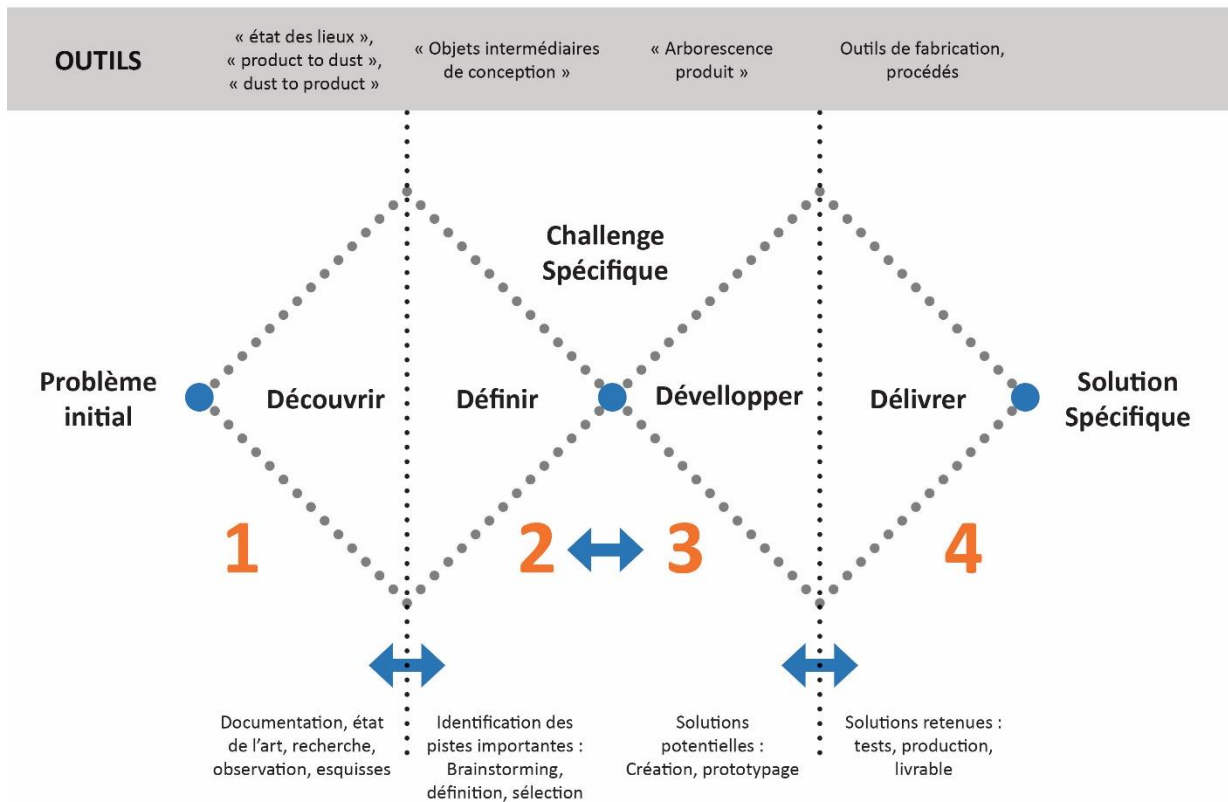


Figure 15 : le processus créatif sous la forme du double diamant. (Inspiré de : British Design Council, 2005)

Dans une démarche de conception à partir de matériaux de deuxième vie, la versatilité du gisement peut être contrôlée ou au contraire laissée plus ouverte et relativement incertaine. Plus on cherche à contrôler le gisement, plus on augmente les dépenses temporelles et cognitives associées à l'effort de tri. Une sélection très exigeante aura également pour effet de réduire le nombre de pièces identiques disponibles. Adopter ces stratégies, entraîne des variations sur les paramètres précédemment cités (morphologiques, fonctionnels, matériels ou esthétiques) (Figure 7, ANNEXE). Il est donc possible d'exploiter ces variations en les intégrant au processus de conception en vue d'en faire une force qui exploite la diversité des produits comme vecteur de différenciation et de personnalisation. Ce sont par exemple les stratégies adoptées par les entreprises Freitag® ou Sailbag®, qui proposent de différencier leurs produits (parfois à la demande) en fonction des particularités des stocks disponibles, en l'occurrence la variation esthétique des bâches de camion ou des voiles utilisées dans la confection de sacs. Pour faciliter cette étape, Freitag® a développé une application permettant à ses clients de positionner eux-mêmes le patron des pièces sur les bâches de camion (Figure 16).

DESSINE TON PROPRE SAC FREITAG

Utilise notre outil F-Cut afin de dessiner ton propre sac messenger FREITAG. Ici et maintenant.

Nous mettons à la disposition de ton esprit créatif nos belles bâches de camion. Avec la souris, tu peux placer les pochoirs sur la bâche de camion et ainsi choisir et combiner les découpes de ton propre sac FREITAG. Mais attention : tu es complètement responsable du design de ton sac courrier, qu'il soit top ou flop.

Remarque : chaque sac F-Cut envoyé hors de Suisse devra supporter des frais de port et de douanes. Ces taxes seront prélevées lors de la réception. Si tu souhaites acheter d'autres produits FREITAG, il faut que tu fasses une commande séparée en ligne.

L'outil FREITAG F-Cut a été créé par Severin Klaus, [Betabong](#).

Figure 16 : capture d'écran de l'outil de personnalisation des sacs en fonction des bâches disponibles. Freitag, Betabong, 2011.

La stratégie de conception peut reposer sur le verrouillage de certains paramètres et sur l'ouverture d'autres paramètres. Par exemple, il est possible de verrouiller la morphologie et les fonctions, tout en laissant une ouverture possible sur la variation des matériaux de certaines pièces et de leurs aspects esthétiques (couleurs, aspects de surface, motifs, etc.).

Afin de montrer l'influence du couple forme / matière sur le processus de conception et de fabrication, nous présentons le résultat de deux expérimentations réalisées en 2019 avec les étudiants du Master Prospective Design à l'École des Mines de Saint-Étienne. Dans ces deux expérimentations, le processus de conception se situe plutôt sur le 2^e diamant de la Figure 15. Le challenge spécifique a été identifié : il s'agit de la reconception d'une assise pliable de type « chilienne » à partir d'un gisement de matériaux de deuxième vie. Ces deux expérimentations mettent l'accent sur une logique produit, c'est-à-dire que le produit et ses fonctions sont déjà identifiés comme une contrainte au moment de la conception.

3.5.1 Expérimentation 1 : logique produit : Reconcevoir une chilienne poussée par le matériau.

La première expérimentation consiste à concevoir des chiliennes inspirées de produits existants disponibles sur le marché. Cette expérimentation s'est déroulée entre le 25 octobre et le 14 décembre 2018 dans les locaux de l'association Open Sources. Une présentation des prototypes sous la forme d'une petite exposition est venue clôturer cette expérience le 14 décembre à l'École des Mines de Saint-Étienne.

Dans un premier temps, différentes références de chiliennes sont sélectionnées et documentées par les étudiants avec l'objectif de réinterpréter ces produits en faisant usage de matériaux de deuxième vie collectés localement (dans un rayon de 50 km maximum). Bien que l'association Open sources possède des stocks de quincaillerie d'occasion triés, nous avons fait le choix de fournir une partie des éléments de quincaillerie en neuf, en raison de certaines références spécifiques requises pour la fabrication. Une première visite d'inspiration fut organisée en atelier le 7 novembre pour que les étudiants puissent réaliser des relevés de matériaux, faire des esquisses et prendre des photos. Le but de cette première visite en atelier était de permettre aux étudiants de recueillir des informations précises sur la nature et la disponibilité des stocks de matériaux de deuxième vie afin de s'en inspirer pour développer leurs prototypes. Dans un second temps, trois cours intermédiaires ont permis aux étudiants d'approfondir la conception et de finaliser leurs projets de manière à anticiper la semaine dédiée à la fabrication des prototypes. Enfin, les prototypes ont été fabriqués dans la semaine du 4 au 7 décembre dans les locaux de l'association Open Sources.

L'objectif de cette reconception est d'atteindre une qualité égale ou supérieure aux produits de référence, tout en permettant la reproductibilité technique du produit dessiné. En plus des stocks à leur disposition, nous avons encouragé les étudiants à identifier d'autres gisements de matériaux de deuxième vie de manière à positionner leurs propositions sur le territoire à l'échelle de la ville de Saint-Étienne. Les étudiants étaient libres de choisir l'ensemble des variations de conception en s'appuyant sur l'outil d'arborescence produit. Cependant il était demandé aux étudiants d'identifier l'étendue des variables qu'ils envisageaient en fonction des matériaux sélectionnés et des contraintes de fabrication relatives à leurs projets. Les variables morphologiques, fonctionnelles, matérielles ou esthétiques devaient être explicitées dans les dossiers sous forme de plans, d'esquisses, de scénarios, ou de cartographies. Certains groupes d'étudiants ont proposé des plans détaillés des prototypes avec des cotations fixes et variables. Ceci, pour clarifier la nature et l'étendue des fluctuations qui affectent les dimensions du produit en fonction de la sélection des matériaux collectés (Figure 18). D'autres groupes, ont cartographié leurs propositions de manière à illustrer les différentes configurations productives engendrées par leurs choix de conception. Figure 9 en annexe présente les variations des scénarios de collecte de la « chilienne Tipi », sous forme de cartographie des gisements de matériaux de deuxième vie relatifs à la fabrication d'un produit : la « chilienne Tipi » (Figure 9, ANNEXE). Chaque sélection de matériaux déclenche une configuration productive différente, faisant évoluer les lieux de collecte et de fabrication des objets selon les matériaux utilisés. Dans ce travail, les étudiants ont identifié des lieux de collecte susceptibles de répondre aux besoins qu'ils avaient identifiés. Ces lieux sont des clubs d'escalade pour la récupération de cordages utilisables en assise, des entreprises travaillant dans le BTP pour la collecte d'anciennes pièces d'échafaudages utilisables dans la structure de

la chilienne, des supermarchés pour la collecte de bâches publicitaires pouvant se substituer au textile utilisé, ou des entreprises textiles pour la collecte de lisières, de chutes ou de fin de bobines de fils. De nombreux scénarios de fabrication peuvent alors être développés selon les quantités et les qualités disponibles dans les gisements identifiés. Ce travail de cartographie permet d'estimer le nombre et la nature des liens avec les acteurs du territoire de référence pour chaque étape du cycle de vie de l'objet (collecte, tri, transformation, stockage, conditionnement, distribution, recherche et développement, etc.). L'objectif est d'évaluer l'incidence des différents scénarios sur la dynamique territoriale et sur la conception du produit. Notons que la figure 9 en annexe illustre uniquement les scénarios de collecte, c'est-à-dire les liens qui concernent de potentiels approvisionnements. Ainsi, elle ne met pas en exergue les lieux de transformation de matériaux en semi-produits ou de fabrication du produit définitif. Quelques lieux de distribution ont été cartographiés, de manière à identifier des circuits courts de collecte et de distribution des produits. Les trois « chiliennes Tipi » présentées sous chaque carte, sont des illustrations montrant l'incidence des scénarios de collecte sur les variables de conception et de fabrication du produit.

La Figure 17 présente quatre prototypes issus de cette première expérimentation. L'ensemble de ces chiliennes est le fruit d'un travail de reconception (ou re design) inspiré de produits existants. Le travail de redesign à partir d'objets de deuxième vie a permis d'interroger le design des versions conçues avec des matériaux neufs. Cela a permis de régler des bugs de perception (pliage et dépliage), d'améliorer les performances de confort (par exemple pour la chilienne « Chilienne abbé Chill » (D) (E) (Figure 17)), ou de faciliter l'usage y compris dans des contextes exigeants aux contraintes contradictoires (par exemple, la « Chilienne Hivernale » (A) (B) (Figure 17)).

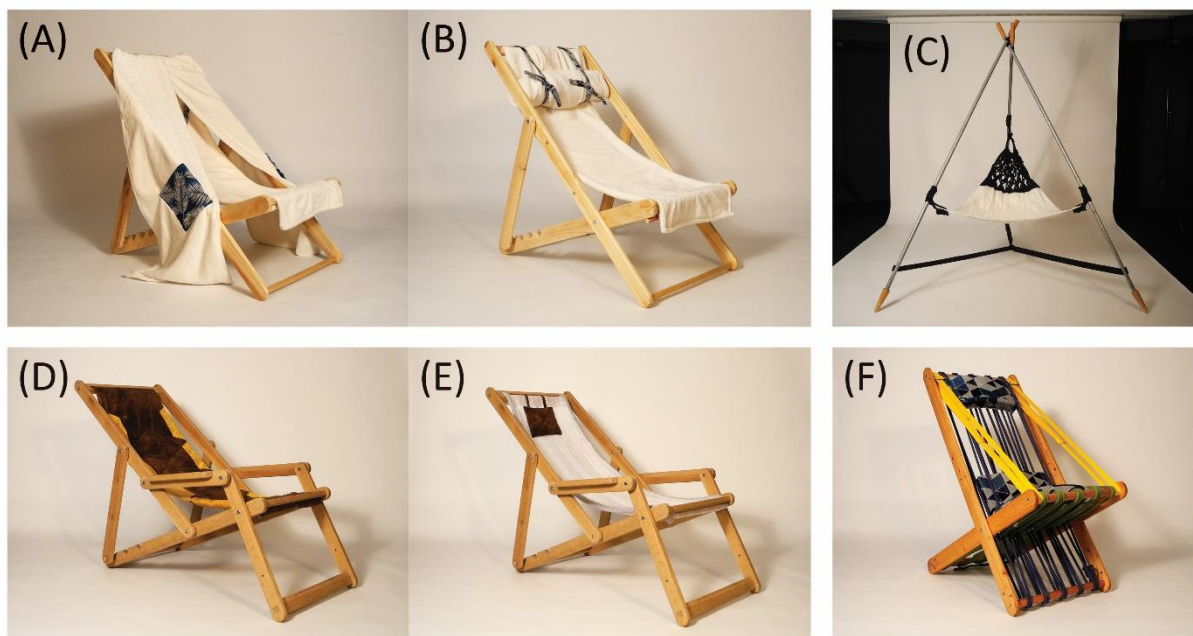


Figure 17 : chiliennes, Morphologie libre. Expérimentation 1, Mines Saint-Étienne, Master Prospective Design, 2018. De gauche à droite : la « Chilienne hivernale » couverture dépliée sur la structure 1 (A) et couverture pliée sur la structure 2 (B); la « Chilienne Tipi » (C); La « Chilienne Abbé Chill », assise simple (E), et assise matelassée (D) ; La « chilienne varappe » (F).

La versatilité des gisements entraîne la conception poussée par le matériau de deuxième vie à laisser certaines fonctions ouvertes pour permettre à d'autres concepteurs de reprendre le projet, là où il en est avec de nouvelles perspectives. Il ne s'agit plus forcément de penser un projet figé dans sa réalisation future. Par exemple, avant l'élaboration d'un produit, une modélisation 3D représente le produit qui sera fabriqué. Dans les logiques de construction classiques, l'image est strictement fidèle au résultat escompté à quelques détails près. En faisant usage de matériaux de deuxième vie, il est parfois difficile de représenter exactement ce à quoi va ressembler le projet dans la mesure où ce dernier peut évoluer en cours de fabrication. Par exemple, si le concepteur prévoit de mettre en œuvre un dallage fait de pierres irrégulières, il serait très difficile pour lui de dessiner le calepinage exact plaçant chaque morceau de pierre ou de carrelage. Dans le cas du produit « chilienne » dont l'assise varie sur presque tous les modèles en raison de la grande diversité de lattes utilisées, il serait vain pour le concepteur de dessiner chaque modèle à une échelle de haute précision dans le registre de la forme. Pour s'adapter à la grande diversité des produits développés, le concepteur anticipe les contraintes de fabrication et la versatilité des gisements de matériaux qui encadrent les variations du produit. Cette démarche a été testée suite à l'expérimentation 1 réalisée avec les étudiants en Master Prospective Design en 2018. En effet, une 2^e version de la structure de la « chilienne hivernale » a été réalisée alors que les étudiants n'avaient pas suffisamment de pièces en stock pour produire une seconde structure. De ce fait, la seconde structure a été adaptée, selon les plans de la première structure, mais avec des matériaux différents (Figure 18 et Figure 19). Les préconisations initiales permettent d'envisager des produits différents en fonction des choix et de la disponibilité des références de matériaux dont dispose l'artisan-créateur : par exemple en phase de conception le concepteur indique de maintenir un écart d'un centimètre entre chaque latte sur la totalité de l'assise. Il préconise également d'éviter les différences d'épaisseur de lattes qui pourraient compromettre le confort de l'assise. Par ailleurs, il indique les dimensions qui permettent de fabriquer l'assise en tissu, si les lattes venaient à manquer (Figure 29). En verrouillant certains paramètres de fabrication, tels que des cotations, des matériaux, des techniques de mise en œuvre, ou des fonctions le concepteur s'assure que le produit sera conforme aux préconisations initiales. Anticiper ces paramètres permet de laisser une marge de manœuvre aux artisans-créateurs en charge de la fabrication. Ainsi, après la phase d'appropriation des plans d'origine, les étudiants peuvent proposer un nouveau plan de chilienne (Figure 18) pour ensuite fabriquer leurs propres déclinaisons du produit en fonction des matériaux dont ils disposent (Figure 19). Cela permet de s'adapter aux contraintes d'un stock qui évolue tout en maîtrisant la marge d'incertitude relative aux variations formelles des matériaux disponibles en phase de fabrication.

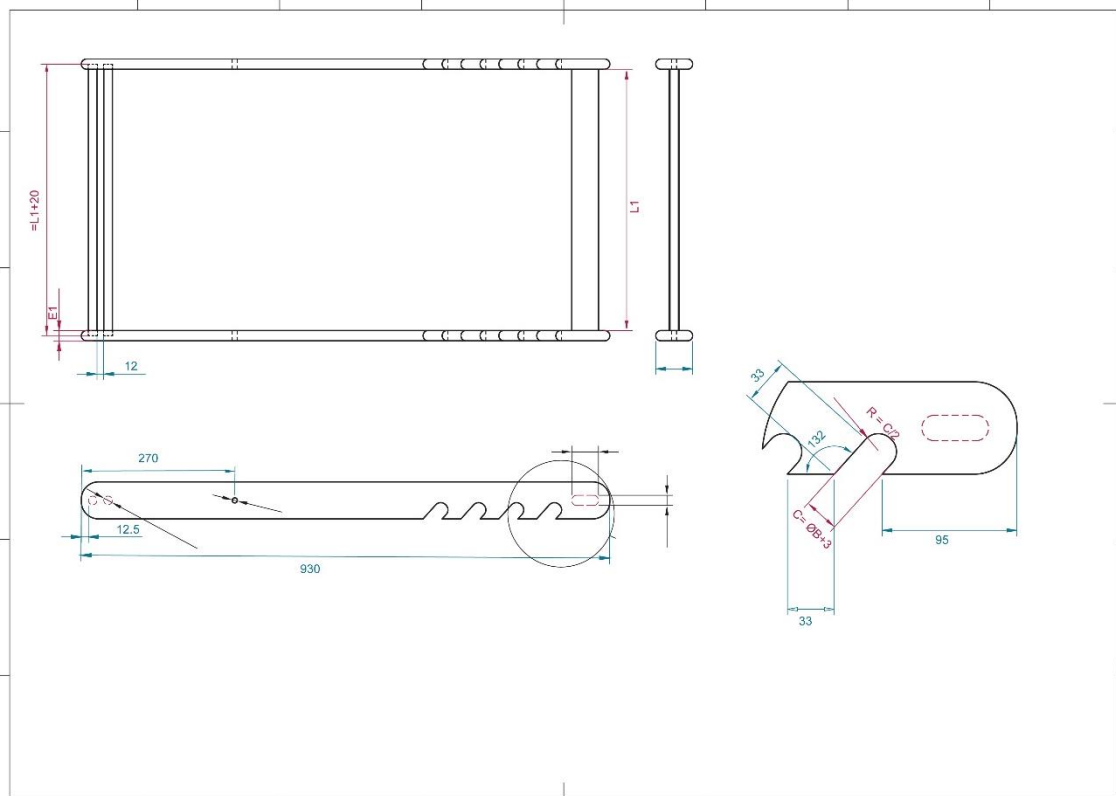


Figure 18 : exemple de variations anticipées sur un produit. Les cotations bleues sont restées fixes d'un produit à l'autre, les cotations rouges indiquent les paramètres variables. La « chilienne hivernale ». GAUTIER Alexia, ERRIGO Jordan, LAMBERT Kévin, BRECHET Bérénice. 2019.

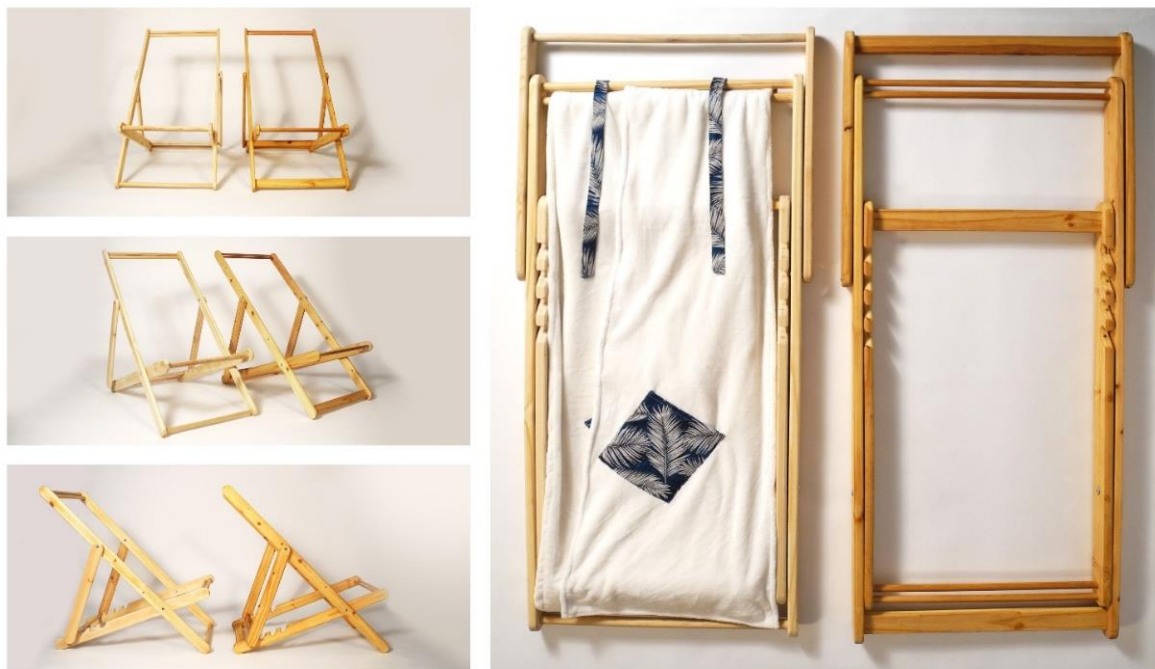


Figure 19 : variations de la structure de la « chilienne hivernale ». GAUTIER Alexia, ERRIGO Jordan, LAMBERT Kévin, BRECHET Bérénice. 2019

Ces exemples illustrent certains avantages que peut apporter un design agile poussé par le matériau (versions diversifiées d'un même produit, absorption d'un volume de matériaux en gisement de deuxième vie, amélioration de la future durée de vie du produit...). Mais, même si l'usage de matériaux de deuxième vie peut ouvrir de nouvelles perspectives dans les opérations de conception, le concepteur doit pouvoir compter sur une chaîne d'approvisionnement fiable et sur des informations de qualité pour être en mesure de faire son travail dans les meilleures conditions possibles. Il en va de même, pour les autres corps de métier. En effet, le concepteur n'opère pas seul, mais en relation plus ou moins directe avec de nombreux corps de métiers qui opèrent sur toutes les étapes du cycle de vie. De ce fait, le concepteur ne peut répondre seul aux problématiques complexes liées à l'élaboration de nouvelles filières, ce qui inclut, l'extraction (identification, démontage, logistique, stockage, planification, caractérisation, etc.), la transformation ou la préservation (procédés, savoir-faire, mise en œuvre, maintenance, réparation, etc.), l'expertise juridique (garanties, assurances, etc.), la planification territoriale (diagnostics, évaluation, prise de décision, etc.). Ces difficultés ne sont pas insolubles, c'est pourquoi nous faisons l'hypothèse qu'un changement de paradigme est nécessaire en vue de modifier le processus de conception et la structuration des filières dans l'objectif d'assurer une continuité entre toutes les échelles de décision (artisans, concepteur, entreprise, décideurs, etc.). Cette continuité permettrait notamment de favoriser les relations de confiance entre les acteurs. En effet, si le rapport aux matériaux est modifié en misant sur la préservation de la mise en forme lorsque cela est possible, on introduit un nouveau regard sur l'ensemble de la chaîne de valeurs.

3.5.2 Expérimentation 2 : logique produit : Reconcevoir une chaudière avec un stock de matériau limité.

La seconde expérimentation, s'est déroulée du 18 au 22 mars 2019 au sein du fablab de l'École des Mines de Saint-Étienne. Des étudiants en DN MADE du Lycée Benoit Fourneyron, du Master Prospective Design et quelques ingénieurs en cycle ICM ont eu quatre jours pour concevoir et fabriquer un prototype de chaudière. Les étudiants étaient répartis par groupes pluridisciplinaires de quatre personnes. Le dernier jour était dédié à la présentation et à la mise en place d'une exposition destinée à présenter les travaux réalisés. Avant le début de cette seconde expérimentation, nous avons collecté des déchets d'ameublement auprès de la Ressourcerie Chrysalide à Saint-Étienne, des cordes auprès de la Fédération Française de Montagne et d'Escalade (FFME) à Planfoy, ainsi que des lisières provenant de l'entreprise Linder dont le site de production se trouve à Violay dans la Loire. L'ensemble des matériaux proviennent d'activités situées dans un rayon de 50 km autour de Saint-Étienne à l'exception de la quincaillerie qui a été commandée neuve (vis de liaison). Ainsi, compte-tenu du temps imparti, les étudiants sont contraints de réaliser leur reconception avec les matériaux disponibles en stock. Afin de pouvoir fabriquer les prototypes en deux jours, les contraintes morphologiques et matérielles ont été verrouillées dans le cahier des charges³². Les autres contraintes sont restées ouvertes : les contraintes fonctionnelles et esthétiques. Par ailleurs, nous avons demandé aux étudiants de documenter le produit de référence, de cartographier

³² Dans un autre cadre, (une expérimentation plus longue, des besoins en entreprise ou en industrie, etc.) l'identification précise de ces contraintes peut répondre à d'autres objectifs, notamment le besoin de cibler précisément un produit pour des raisons de coûts, de stratégie d'entreprise, de disponibilité des matériaux, etc. En ciblant davantage la nature du produit développé, cela permet d'explorer le potentiel de diversification d'un produit de manière à mieux anticiper, réduire et maîtriser l'éventail de résultats espérés.

leurs propositions, de s'inspirer de la classification des objets et d'identifier les éléments variables et invariables dans leurs plans. Le verrouillage des contraintes morphologiques a permis de maîtriser la complexité technique du produit, de cibler les collectes et d'anticiper les commandes en amont de l'expérimentation. En effet, le nombre d'axes de rotation, les quantités de quincaillerie, le nombre de pièces à fabriquer, ou les besoins de bois en mètre linéaire étaient connus dès le début de l'évènement.

La Figure 20, présente les dix prototypes réalisés lors de cette semaine d'expérimentation. Contrairement à la première expérimentation qui a donné lieu à des prototypes très différents en termes de structure et de séquences de pliage (Figure 17), les résultats de cette expérimentation sont beaucoup plus similaires, car il a été demandé aux étudiants de travailler sur une morphologie pré-identifiée dans le cahier des charges (Figure 20).

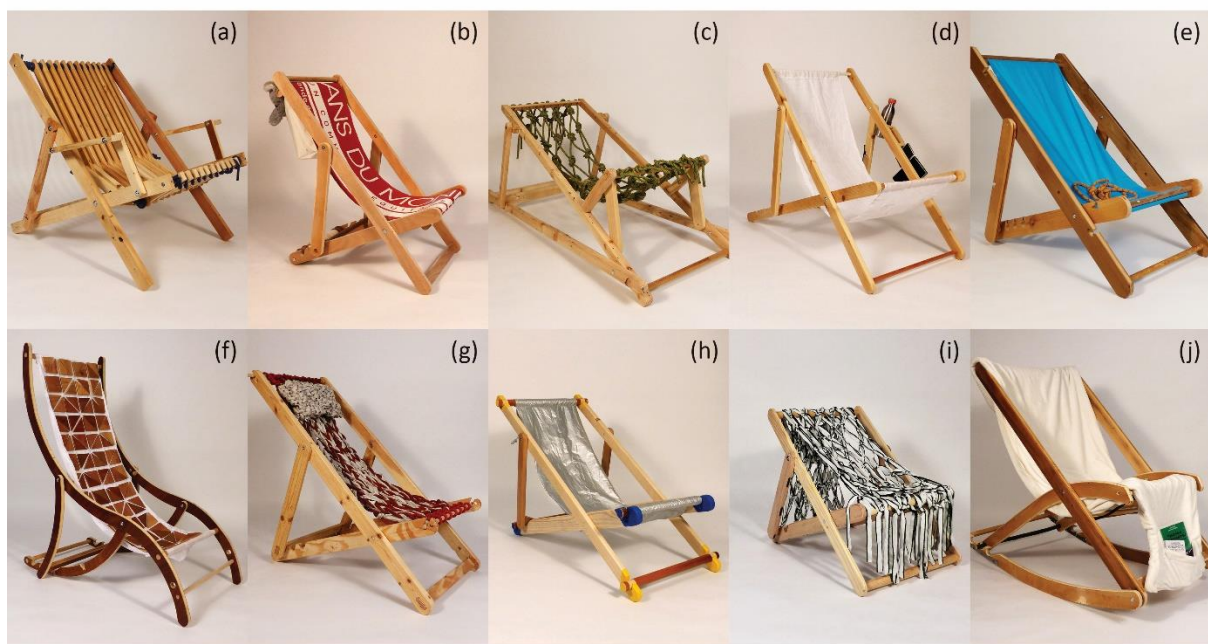


Figure 20 : 10 chiliennes, morphologie contrainte. Expérimentation 2, Mines Saint-Étienne, Master Prospective Design, DN MADE Lycée Honoré d'Urfé, 2019. « Chilienne Mont Bois » (a) ; « Chilienne Doudousitter » (b) ; « Chilienne Chimac » (c) ; « Chilienne Pic Chi » (d) ; « La Chill'ienne » (e) ; « Chilienne N°104 » (f) ; « Chilienne Ciné Chill » (g) ; « Chilienne Baroulienne » (h) ; « Chilienne Tiny chill » (i) ; « Chilienne Rocking Chill » (j).

Lors de cette seconde expérimentation, il a été demandé aux étudiants de compléter certaines informations relatives à leurs démarches de reconception. En particulier, il était demandé des données sur la mise en forme initiale, la provenance l'origine et la destination de la pièce, la nature ou l'étendue des actions de fabrication, le prix estimé neuf, ou l'état des matériaux (Figure 22, Tableau 6). Ces données ont été collectées au cours du processus de conception et de fabrication et permettent de préciser les propositions faites par les étudiants. Cet exercice imposé avait un double objectif, d'une part un objectif pédagogique lié aux enseignements d'écoconception et d'autre part, un objectif pour la thèse, car nous avons pu tester l'opérabilité d'un indicateur « taux de valorisation » dans chaque proposition des étudiants. En effet, dans le cadre de cette thèse, en complément des outils de « divergence » présentés précédemment, d'autres outils complémentaires associés à l'évaluation des scénarios de supercyclage viennent compléter la démarche. Ainsi, cette expérimentation étudiante permet un pré-test pour un ensemble d'indicateurs qui seront explicités dans le chapitre 3. Par

exemple, l'indicateur « taux de valorisation » permet de mesurer la part « d'anciens déchets » que nous appelons « objets », préservés au cours du processus de fabrication. Dans cette expérimentation la quantité de matériaux neufs entrant dans le processus de fabrication est particulièrement faible. Seule la quincaillerie et la colle ont été achetées neuves dans des filières de matériaux existantes. Ainsi, l'indicateur défini ne prend pas en compte la masse des composants neufs, jugés négligeables dans ce cas, entrant dans la fabrication du produit final. Le « taux de valorisation » T_{val} , exprimé en %, est défini par :

$$T_{val}(\%) = 100 \frac{M_{produit}}{\sum M_{objet}} \quad (\text{Équation 1})$$

Avec :

$M_{produit}$: masse du produit final.

$\sum M_{objet}$: somme des masses des objets (anciens déchets) entrant dans la fabrication du produit final.

Dans l'exemple de la « Chill'ienne » présenté ci-dessous (Figure 22), la masse totale des objets avant transformation est de 6280 g. La masse totale après transformation est de 4630 g. Ainsi le groupe « Chill'ienne » a valorisé environ 74 % des objets à leur disposition. La comparaison entre le poids initial des pièces et le poids après transformation a permis de déterminer la proportion d'objets (anciens déchets) préservée et la proportion de chutes générée dans le processus de fabrication. L'expression du taux de valorisation permet notamment de communiquer sur les stratégies de valorisation adoptées par les étudiants. La Figure 21, présente les taux calculés par les étudiants pour les dix prototypes réalisés au cours de la seconde expérimentation. Les résultats obtenus contribuent également à évaluer les différentes propositions, au regard de leur capacité à faire un usage optimal des objets à disposition ; c'est-à-dire en limitant les opérations de transformation et en réduisant les quantités de déchets résiduelles.

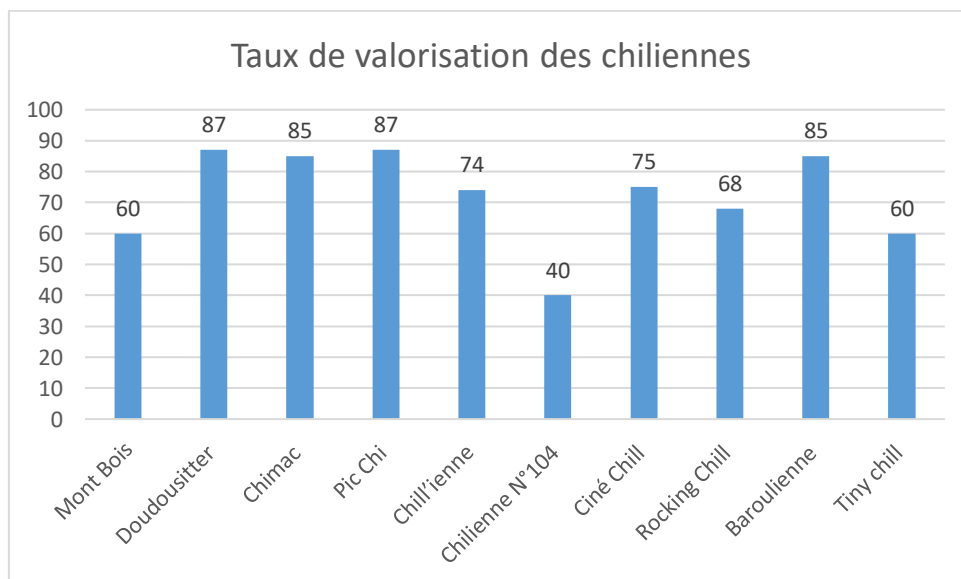


Figure 21 : taux de valorisation des matériaux pour les 10 chiliennes.

Tableau 6 : Données complétées par les étudiants lors de leur reconception de la chilienne (voir référence des pièces sur la Figure 22). Projet « Chill'ienne ». DURAND Lubin, ROSER Matthias, BOUCHET Ameline, DRIRA Adam. Mars 2019.

Référence de la pièce	Croquis de la pièce	Provenance	Origine	Destination de la pièce	Dimensions			Volume		Poids		Composition matérielle	Couleur Aspect de surface	Nature des transformations	Prix du matériau neuf	ÉTAT	REMARQUES
					Lar-geur	Épais-seur	Pro-fon-deur	Pièce ini-tiale	Après trans-for-mation	Pièce ini-tiale	Pièce après trans-for-mation						
		Lieu de col-lecte	Armoire/palette /lit/table/ etc	Structure dossier/ structure assise	Cm.	Cm.	Cm.	Cm3	Cm3	Gramme				Dans l'ordre			
1	1	Ressourcerie Chrisallyde	Probablement meuble	Verticale	10	2.7	150	4050	2701	1586	1426	Bois mas-sif, Chêne.	Aspect brut	Coupe et ponçage	30/45 Euros	Bon état	2 trous
1	1 Bis	Ressourcerie Chrisallyde	Probablement meuble	Verticale	13	2.4	142.5	4446	2701	2586	1426	Bois mas-sif, Chêne.	Aspect brut	Coupe et ponçage	30/45 Euros	Bon état	2 trous
2	2	Ressourcerie Chrisallyde	Latte	Béquille	8	2.4	117	2246	1393	596	514	Bois mas-sif, Pin.	Aspect brut	Coupe et ponçage	10/20 Euros	Bon état	
2	3	Ressourcerie Chrisallyde	Latte	Positionneur	8	2.5	68.1	1362	1077	514	462	Bois mas-sif, Pin.	Aspect brut	Coupe et ponçage	10/20 Euros	Bon état	
1	4	Ressourcerie Chrisallyde	Manches à balai	Pièces transversale	2.5 Diamètre		1200	6000	5600	754	558	Bois Mas-sif.	Certains peint, autres vernis	Coupe	2/5 Euros	Ce-rains assez usés	
1	5	Salle escaalde	Corde d'esca-lade	Bandouil-lère	1.5 Diamètre		200	850	850	164	164	Textile.		Coupe	7 Euros le mètre.	Bon état	
1	6	Successeur Beal	Tissus	Assise	90	0.01	297	267	267	0.80	0.80	Popelline de coton.	Teinté Bleu	Découpe	34 Euros /20m.	Bon état	



Figure 22 : Position des pièces décrites et évaluées dans le Tableau 6 . Projet « Chill'ienne » DURAND Lubin, ROSER Matthias, BOUCHET Ameline, DRIRA Adam. Mars 2019.

3.5.3 La place du matériau dans le processus de reconception des chiliennes

Dans les expérimentations sur les chiliennes, la recherche d'objets et de matières s'est orientée de manière à valider les critères de conception qui avaient été identifiés en amont. Dans la première expérimentation (Figure 17), la reconception s'est faite pendant plusieurs mois à partir d'un stock de matériaux à définir par les étudiants, ce qui a donné lieu à une grande hétérogénéité dans les morphologies des chiliennes obtenues (chiliennes à un, deux ou cinq axes de pliage). Cette hétérogénéité se manifeste à plusieurs niveaux : dans la structure ou dans l'assise, dans les fonctions recherchées, mais aussi dans la diversité des matériaux sélectionnés. Dans la seconde expérimentation (Figure 20), les contraintes ont été plus fortes (stock de matériau et durée de quelques jours), ce qui a abouti à une déclinaison de produits plus ciblée (chilienne à deux axes de pliage).

Lors des deux expérimentations réalisées avec les étudiants, le travail a commencé par la documentation et la sélection de gisements collectés à Saint-Étienne. Chaque groupe a débuté par l'identification des pièces dans le stock à disposition et effectué un premier travail de relevé et de collecte de données afin de caractériser les objets identifiés. Ce travail permet d'obtenir des données précises, notamment sur les dimensions et l'état des objets sélectionnés. Ces données viennent étayer les informations disponibles en phase de conception et / ou de fabrication (Tableau 6 et Figure 22). Cette étape s'apparente, à plus petite échelle, au travail d'état des lieux décrit dans le chapitre 1.

Différentes attitudes ont pu être observées au sein des groupes. Certains groupes se sont appropriés ces données comme contrainte de départ, alors que d'autres groupes les ont intégrées beaucoup plus tardivement, au moment de l'étape de fabrication. Parfois, ces deux attitudes ont coexisté dans la réalisation d'un projet en fonction des pièces ou des composants réalisés. Dans le premier cas, le dessin et l'intention du projet se sont reposés sur le travail de documentation en vue de répondre aux exigences du cahier des charges, alors que dans le second, les groupes ont été contraints d'augmenter le travail de mise en forme pour que les matériaux puissent correspondre à leurs intentions de départ.

Attitude 1 : Dessin et intention naissent de la connaissance du gisement et du cahier des charges.

D'après les calculs effectués par les étudiants (Tableau 6), le groupe qui travaillait sur les « Chill'iennes » a préservé 74 % du gisement initial. La majeure partie des bois utilisés en structure ont fait l'objet de transformations minimales (découpe simple suivant les cotations de la pièce). Les étudiants ont fait le choix de conserver les pièces brutes sans les poncer (excepté un ponçage des tranches après avoir effectué les coupes afin d'ébavurer les pièces). L'esthétique du bois brut avec ses traces d'usure, correspondait à leur projet de chilienne pour festival. Ceci leur a également permis de réduire le nombre et la durée des opérations de fabrication. La Figure 23 présente la sélection des objets avant transformation, les pièces après transformations et le produit fini. Elle montre, les étapes de transformation des pièces ayant servi à la fabrication de « Chilienne hivernale » et de la « Chill'ienne ». Les pièces après transformation sont présentées avec une partie des chutes (Figure 23). Cela met en évidence le dialogue instauré entre la sélection des pièces initiales et celles qui entrent dans la composition du produit fini. En effet, les objets ont été sélectionnés avec soin lors des phases

de découverte et de définition (phases 1 et 2 du processus de conception (Figure 15)). L'identification et la documentation précises des objets en aval de la phase de développement (phase 3 : Développement (Figure 15)) a permis de limiter les pertes de matières lors des opérations de fabrication. En effet, les étudiants ont sélectionné les planches dont les dimensions initiales correspondaient le mieux à la pièce qu'ils souhaitaient réaliser. De plus, les plans ont été réalisés et modifiés, en tenant compte des objets sélectionnés, ce qui implique un aller-retour entre la phase de définition (ouverture des possibilités) et de développement (fermeture au regard des contraintes identifiées).

Sélection des éléments initiaux
(avant transformation)

Bois après transformation

Produit fini



Figure 23 : de l'objet initial au produit fini. La « Chilienne hivernale » et la « Chill'ienne ».

La conception de la « chilienne hivernale » montre ce que le design agile met en œuvre entre une intention de départ et sa nécessaire adaptation en fonction du gisement d'objets. Il s'agit d'une série d'itérations entre une idée, qui peut s'incarner dans un parti pris fort et les attributs de gisements d'objets (localisation, volume, versatilité, formes initiales, nature des matériaux...), jusqu'aux choix précis de chacun d'eux en rapport avec leur rôle (fonction / structure / usage / image). Le design agile manipule également les impacts à minimiser au cours du nombre et de la complexité des étapes de transformation de chaque objet.

Attitude 2 : augmentation des contraintes sur le travail de mise en forme liée aux matériaux inadaptés aux intentions initiales.

Lors de la seconde expérimentation, nous avons pu observer les effets d'une sélection trop

tardive des objets issus du gisement. Ceci a mené à une réalisation très complexe du produit en phase de fabrication, en raison d'un écart trop important entre les intentions formulées dans les premières phases et les objets disponibles. En phase de prototypage, la forme des matériaux ne correspondait pas aux esquisses réalisées préalablement, ce qui a contraint les étudiants à rattraper ce décalage par de multiples opérations de déconstruction et de transformation.

Pour la « chilienne N°104 » (Figure 20), les étudiants se sont inspirés de références de textilisation du bois (*wooden textile*). La finesse et la multiplication des découpes permet d'assouplir le bois et d'obtenir une sensation de textile. Or, ni les matériaux disponibles, ni les procédés à leur disposition ne permettaient d'atteindre ce niveau technique. L'assise, telle qu'elle était imaginée au départ, devait être composée de 340 triangles de bois (Figure 24).

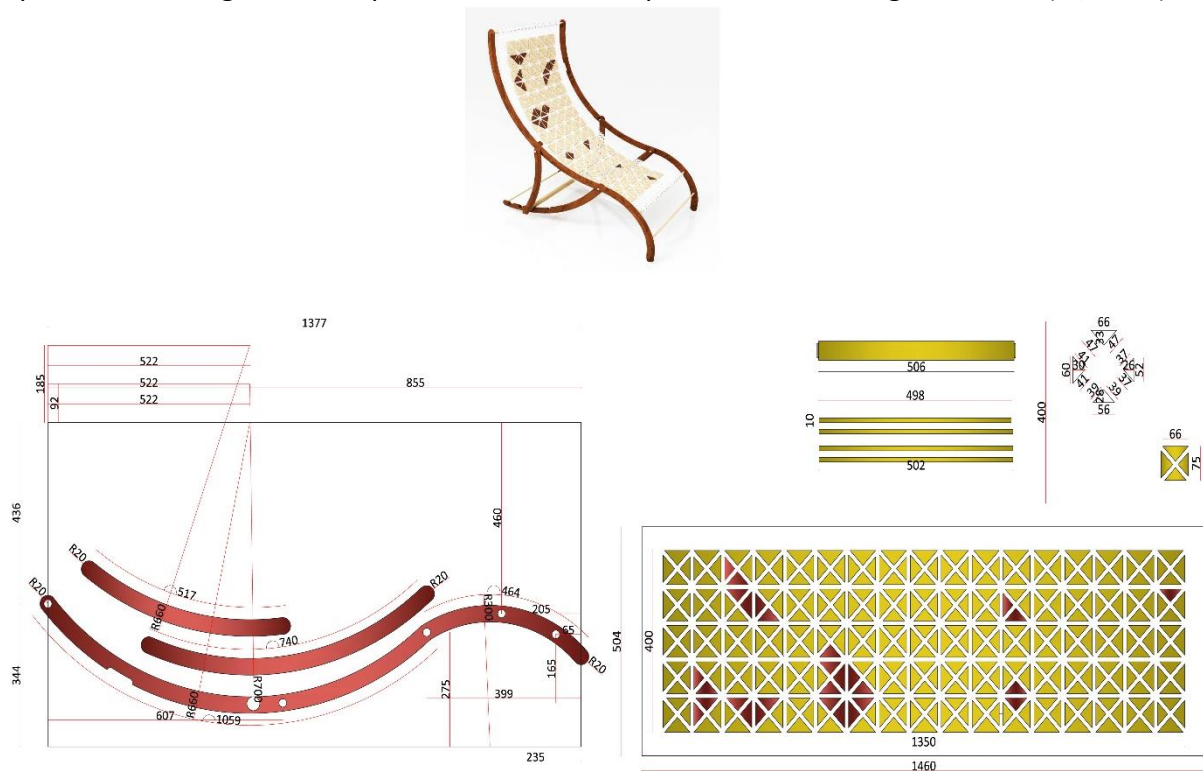


Figure 24 : plans de la « chilienne N°104 ». Laurine, Paul, Camille et Lotfi.

L'opération de découpe étant impossible dans le temps imparti et avec les moyens à notre disposition, le groupe a été contraint de réduire le nombre de triangles afin de limiter les opérations de découpe et garantir la faisabilité des pièces, au détriment du confort. L'assise du prototype final comporte donc 104 triangles découpés dans quatre planches de bois de 30x60x1 cm. Deux planches ont servi à effectuer des tests. Ces triangles ont été agrafés sur le textile de l'assise, multipliant alors le nombre de matériaux assemblés, ce qui rend plus difficile et long la réversibilité du dispositif en fin de vie. La fabrication de ces pièces a nécessité beaucoup de temps de tracé et de nombreuses découpes, parfois délicates à réaliser en raison de la taille des pièces et des outils utilisés (Figure 25). Par ailleurs, les dimensions des pièces sont finalement trop grandes (environ 7 cm de long) pour permettre d'obtenir l'effet « textilisation » initialement envisagé par le groupe.



Figure 25 : essais de textilisation du bois. « Chilienne N°104 ».
Gauche : planches d'origine. Droite : triangles découpés, agrafés sur un textile.

Dans ce même projet « chilienne N°104 », les étudiants souhaitaient soutenir les effets de « textilisation » par une structure courbe. Pour réaliser ces pièces, un panneau issu d'une ancienne porte d'armoire a été sélectionné (Figure 26). Les pièces ont d'abord été tracées sur le panneau et découpées à la scie sauteuse. Elles ont ensuite été poncées et percées à plusieurs reprises pour la réalisation des axes de pliage, pour l'encastrement de barreaux de bois en structure ainsi que pour la réalisation des crans d'arrêt destinés au réglage de l'inclinaison de l'assise de la chilienne.

Le panneau initial (porte d'armoire) pesait 7,650 kg. Il a été découpé à la scie sauteuse, percé à la perceuse à colonne et poncé manuellement. Les pièces obtenues après ces différentes étapes pesaient 0,675 kg. Le travail a donc généré 6,975 kg de chutes courbes et pointues, difficiles à stocker et / ou à valoriser ce qui représente environ 91 % de la masse initiale de la porte. De plus, la porte d'armoire était un composite : sous le placage, le panneau était constitué de lattes collées orientées dans le même sens. Le dimensionnement souhaité par les étudiants en phase d'esquisse (Figure 24) n'était pas faisable dans ce matériau. Une fois soumis à la charge, les pièces structurelles ont cédé à la première utilisation, ce qui souligne la nécessité de documenter précisément la nature, ici, la morphostructure des matériaux de deuxième vie.

Le projet « Rocking Chill » (Figure 20) est une chilienne ayant des pieds conçus pour se balancer : le groupe a fait le choix de créer une courbure dans la structure soutenant l'assise, avec à sa base deux pieds de balancier. Nous pouvons observer dans la Figure 26 que les étudiants se servent de leur gabarit pour dessiner les pièces de structure dans un panneau plat (un ancien fond d'armoire). D'après les données fournies par le groupe, le panneau pesait 10,4 kg avant qu'ils n'entreprennent de le découper. Les pièces réalisées dans ce panneau pesaient 3,2 kg. L'opération a généré 7,2 kg de chutes pour produire ces deux pièces (soit presque 70 %). Pour limiter la production de chutes et optimiser le panneau sélectionné, il aurait été souhaitable de modifier le dessin en conséquence afin de s'adapter à la mise en forme des objets disponibles. Un dessin plus adapté aurait permis de mieux concilier l'intention de mise en forme exprimée dans l'esquisse à la ressource disponible. Cet exemple montre que les étudiants ont eu le réflexe de dessiner une forme, sans avoir au préalable identifié les objets les plus adaptés (ceux qui nécessitent le moins de transformations) pour atteindre la fonction et les performances souhaitées.



Figure 26 : Gauche : découpe des pièces de structure de la « chilienne N°104 ».
Droite : traçage avant découpe du balancier et des pièces de structure de la « Rocking Chill ».

Le groupe « Chimac » a subi une conséquence du gisement limité lors de la seconde expérimentation. En effet, ce groupe a commencé par réaliser des esquisses de leur projet et a souhaité développer un projet entre une chilienne et un hamac (Figure 27). Étant donné que les autres groupes avaient sélectionné les objets du gisement avec lesquels ils allaient travailler, en amont de la définition de leurs projets, le stock était considérablement réduit au moment où le groupe « Chimac » s'est décidé. Ainsi, au lieu d'utiliser les éléments restants et d'adapter leur projet, ils ont préféré prospecter un nouveau gisement d'objets susceptibles de correspondre aux besoins identifiés dans leur phase d'esquisse. Ils ont finalement choisi de travailler avec une palette usagée trouvée sur le site de l'École des Mines.

Scénario d'usage

Chimac peut se déployer de deux façons différentes ; elle s'installe comme une chilienne classique mais peut être suspendue en ramenant les pieds vers le haut et en les liant à un support.

Chimac la chilienne 2 en 1

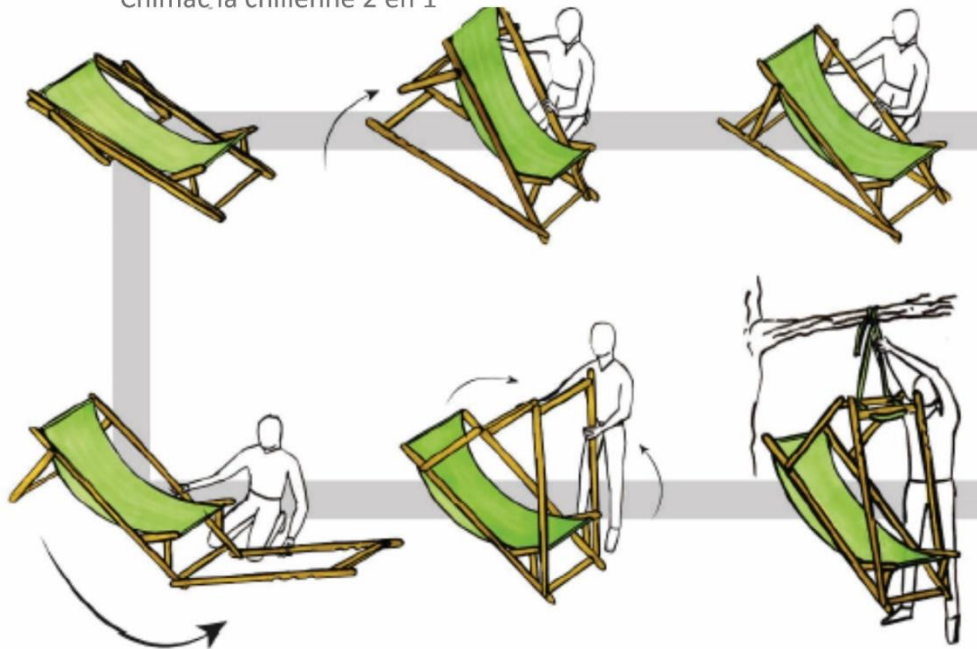


Figure 27 : scénario d'usage et esquisses du projet « Chimac ». GUENIER Clément et CHUITEL Anne-Caroline.

La structure était composée de quatre chevrons sur lesquels étaient cloués les planches (Figure 28). Ils se sont donc attelés à la déconstruction de cette palette pour récupérer les chevrons de structure. Les planches ont d'abord été sciées pour libérer les chevrons destinés à fabriquer les pièces de structure. Les planches ont presque toutes été renvoyées vers l'espace de tri des déchets, à l'exception de deux petits morceaux utilisés pour soutenir l'assise. Les clous étant toujours présents dans les pièces désirées, les étudiants ont dû poursuivre le travail de déconstruction pour pouvoir utiliser les bois. Ces différentes opérations se sont révélées longues et délicates. Les clous ont été dirigés vers la benne à métaux et les chutes de planches vers la benne de déchets DIB (Déchet Industriel Banal). Les chevrons sélectionnés étant trop larges et trop lourds pour être utilisés dans la structure de la « Chimac », les étudiants ont décidé d'effectuer un débit dans la longueur de manière à atteindre la section désirée. Ces débits ont été réalisés à la scie circulaire plongeante. Par ailleurs, les étudiants avaient dessiné des formes ovoïdes percées, à l'extrémité des bois de structure, ce qui a compliqué les opérations de fabrication. La pièce était centrée sur le chevron pour que la partie ovoïde puisse se positionner sur le chevron, ce qui a contraint les étudiants à réaliser deux débits latéraux. Ces détails ont impliqué une augmentation du nombre d'opérations de fabrication en faisant usage de la scie circulaire, de la scie sauteuse, de la perceuse à colonne et des ciseaux à bois. Lors des premiers essais en suspension, les étudiants ont réalisé que l'essence de bois sélectionnée n'était pas assez dense pour résister aux sollicitations de la pièce. Elle a donc cédé au niveau des découpes permettant l'encastrement des bois de structure car les perçages l'avaient fragilisée.



Figure 28 : de l'objet initial au produit fini.
Projet chilienne « Chimac ». GUENIER Clément et CHUITEL Anne-Caroline.

Synthèse des deux attitudes.

Finalement, les deux attitudes rappelées ci-dessous sont possibles sans être exclusives, car elles peuvent cohabiter au cours du processus de conception et de fabrication :

- Sélectionner des matériaux en fonction de leurs caractéristiques (structurels, souples etc.) et dessiner en s'adaptant à leurs aspects identitaires (matières, dimensions, défauts, couleurs, etc.) en vue de l'étape de fabrication.
- Réaliser un dessin, puis chercher les matériaux dont les caractéristiques sont les plus proches possibles des intentions formulées dans le dessin d'origine quitte à le modifier en fonction des

matériaux disponibles. Ce second cas, nécessite d'avoir des possibilités de choix élargis et des informations précises sur les matériaux pour en tenir compte dans le dessin.

Nous avons observé que, lorsque le dessin est réalisé sans tenir compte des données collectées dans les phases de découverte et de définition, cela engendre de nombreuses difficultés en phase de développement et d'implémentation. Cette attitude de conception a poussé les étudiants à commettre quelques erreurs qui ont compromis la résistance du produit, généré une proportion de chutes excessive ou qui ont nécessité des opérations de fabrications ou de démontage trop nombreuses et / ou trop complexes. En faisant abstraction des informations disponibles sur les objets en phase de conception, les étudiants ont été contraints de multiplier les étapes de transformation pour que la réalisation soit fidèle au dessin initial. À l'inverse, les groupes ayant su tirer profit de la mise en forme initiale pour atteindre les performances et la fonction souhaitée ont considérablement réduit le nombre et l'intensité des opérations de transformation. Ce faisant, ils ont également réduit les quantités de chutes et le temps nécessaire à la fabrication des produits.

Les objets issus du gisement étant spécifiques en quantité et en qualités, ils influencent la stratégie de conception et de fabrication afin de tirer parti d'un gisement limité. Plus qu'une simple tentative de mettre en œuvre le principe de réduction des chutes, ce qui nous intéresse ici c'est que les groupes ayant su exploiter les données recueillies en phase de découverte et de définition ont pu réduire le nombre et l'intensité des opérations de transformation.

Ces différentes expérimentations montrent que dans l'hypothèse d'une massification de la production, plusieurs stratégies peuvent être abordées et hybridées. Ces différentes stratégies de conception et de fabrication sont relatives à la diversité des techniques et des échelles de fabrication, ou à la diversité des matériaux et des savoir-faire qui se côtoient au sein d'un même produit :

- des composants ou pièces standardisées qui s'assemblent avec des parties hétérogènes ou uniques,
- des matériaux neufs avec des matériaux de deuxième vie,
- des matériaux hyper-locaux avec des pièces spécifiques produites à l'échelle mondiale,
- des éléments produits par l'industrie qui côtoient certaines parties réalisées de manière artisanale.

L'intensité et les proportions de ces différentes stratégies sont susceptibles de varier en fonction de la nature des produits fabriqués, de leur complexité technique, de la stratégie d'entreprise, de l'échelle de fabrication ou des gisements d'objets disponibles.

Dans la logique produit décrite précédemment, la sélection initiale des matériaux repose sur l'identification des propriétés, des qualités et des valeurs de l'objet qui permettent de répondre à des contraintes fonctionnelles préalablement identifiées. La documentation précise des objets est alors un prérequis pour que le designer dispose de l'ensemble des informations lui permettant d'agencer les formes existantes, et ce, dès les premières phases d'observation et de documentation. Ce travail d'augmentation des connaissances, lui permettra notamment de négocier avec les contraintes formelles à toutes les étapes du cycle de vie de l'objet.

3.5.4 Études de cas complémentaires : logique produit - concevoir un produit poussé par le matériau.

En complément des expérimentations réalisées avec les étudiants, sur la base d'expériences passées et de cas d'études existants, quelques caractéristiques de conception « poussée par le matériau » sont illustrées ci-après :

Laisser différents degrés de libertés à ceux qui possèdent les savoir-faire dans les manières de mettre en œuvre les matériaux ou de les agencer.

Cette démarche d'autonomie laissée aux artisans en phase de fabrication s'illustre dans le développement de plans et gabarits de chiliennes réalisées pour la Ressourcerie du littoral à Dunkerque en 2016³³ (Figure 29). En effet une fois que le prototype initial a été réalisé, la Ressourcerie du littoral s'est emparée des plans et des gabarits en vue de le reproduire. Or, les stocks de lattes à leur disposition dépendaient des aléas de la collecte. Par conséquent, chaque modèle était interprété et fabriqué en fonction des références de lattes disponibles en stock. Cette approche laissait une marge d'interprétation, dans l'agencement et la sélection des lattes pour développer de nouveaux produits. De même, la structure de la chaise a connu quelques variations : un gabarit réalisé initialement permettait de dupliquer les pièces de structure dans des bois ayant une légère différence d'épaisseur. La limite d'épaisseur des planches de palettes sélectionnées par l'équipe de la Ressourcerie avait été préalablement établie entre 12 mm et 18 mm pour que les structures des nouvelles chiliennes ne soient ni trop fragiles, ni trop lourdes. Enfin, lorsque les structures étaient fabriquées, la Ressourcerie proposait également différents textiles d'assise, sélectionnés en fonction des références disponibles.



Figure 29 : variables de matériaux dans un produit. Variation de l'assise en fonction des stocks disponibles. Baptiste Menu, Groupe A Coopérative Culturelle, AFEJI, Ressourcerie du littoral. Dunkerque, 2016.

³³ R.A.D (Ressourcerie d'Art et du Design) est un projet initié par le Groupe A - Coopérative culturelle et l'AFEJI, qui en gère la production et la réalisation. La Ressourcerie du littoral (ÉCO&DéKo) a accueilli des artistes en résidence pour réaliser des projets à partir de matériaux de réemploi.

Intégrer une mixité de matériaux de première et deuxième vie pour plus de flexibilité.

Pour illustrer cela, nous prenons l'exemple de la réalisation d'un prototype de mur d'escalade réalisé dans le cadre de l'évènement « tous Champions³⁴ » à la Cité du design en 2015 (Figure 30). Les exigences de sécurité imposaient des critères de dimensionnement et des contraintes de sélection des matériaux. Pour répondre à ces exigences, la structure du mur de bloc a été conçue avec des matériaux neufs achetés dans les filières classiques de matériaux de construction (chevrons en pin autoclave 63 mm x 75 mm). La base du mur a été réalisée avec des chevrons en douglas (100 mm x 100 mm) et des planches en pin de 25 mm d'épaisseur qui proviennent d'une scierie locale. L'habillage, quant à lui, a été réalisé avec des panneaux de contreplaqué de deuxième vie en très bon état, collectés sur site. Les panneaux en question sont en contreplaqué de bouleau, de 18 mm d'épaisseur qui provenaient d'une exposition réalisée à la Cité du design quelques temps auparavant. Afin de pouvoir intégrer correctement les panneaux de contreplaqué, il a été nécessaire d'ajuster le dessin de la structure de manière à permettre le chevauchement de celle-ci avec l'habillage. Ce chevauchement permettait d'éviter que les jonctions entre les panneaux ne tombent en dehors de la structure de manière à ce que chaque panneau soit vissé directement sur les chevrons. Cette contrainte a nécessité un léger surdimensionnement des parties structurelles afin que la trame de la structure corresponde aux dimensionnements des panneaux. La trame de fixation des inserts destinés à fixer les prises d'escalade, a également été légèrement modifiée. Le mur de blocs est composé de trois pans (un dévers, une dalle (verticale), et un pan positif) et de trois jambes de force. Ces trois pans ont été conçus de manière à être stockés à plat : ils sont solidement assemblés entre eux à l'aide de boulons et de tiges filetées (diamètre 20 mm) ce qui permet le démontage éventuel de la structure. Dans ce projet, la mixité des matériaux a permis de répondre aux exigences de sécurité pour la réalisation des parties structurelles, tout en s'adaptant aux contraintes engendrées par le dimensionnement des panneaux d'habillage. L'ensemble permettait d'atteindre les performances requises pour la réalisation d'un petit mur de blocs. Selon les compétences, les matériaux et les savoir-faire de ceux qui fabriquent, un dialogue est susceptible de s'instaurer et de se structurer. Soit pour s'adapter à des savoir-faire existants, soit pour faire face à des matériaux dont le nombre et la nature sont susceptibles de changer.

³⁴ Événement organisé par le laboratoire de physiologie de l'exercice - LPE (Université Jean Monnet), Openscop, Open Factory Sainté, Le Mixeur, Sporaltec, la ville de Saint-Étienne, Saint-Étienne Métropole et la Cité du design. En collaboration avec People Olympics, France Living Labs, les villes UNESCO de design, les partenaires du programme européen Human Cities. <<https://www.biennale-design.com/saint-etienne/2015/fr/evenements-in-off/?ev=tous-champions--457>>

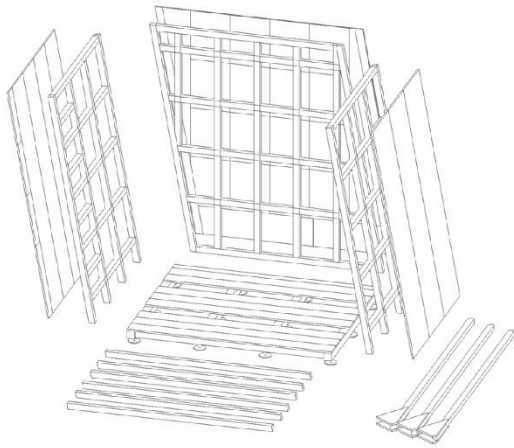


Figure 30 : prototype de mur de bloc réalisé dans le cadre de l'évènement « Tous champions ». Association Open Sources, 2015.

Penser un produit pour plusieurs vies.

La temporalité globale du projet est susceptible d'être interrogée. Une construction ou un objet peut être pensé pour avoir plusieurs vies. Elles peuvent être figées dès la conception initiale, à l'image de la Bouteille « Wobo » de Heineken® conçue par John Habraken en 1963 (Figure 31), ou laissées plus libres (en phase de fabrication, d'usage ou de fin de vie) avec des perspectives plus incertaines que permettent l'intégration de variables, la démontabilité et les modifications de l'objet lorsque la fonction initiale aura atteint ses limites. Les multiples vies de l'objets peuvent donc se penser avec des perspectives plus ou moins lointaines en fonction de la nature de ce qui est construit (produit, projet de scénographie, architecture, infrastructure, etc.).

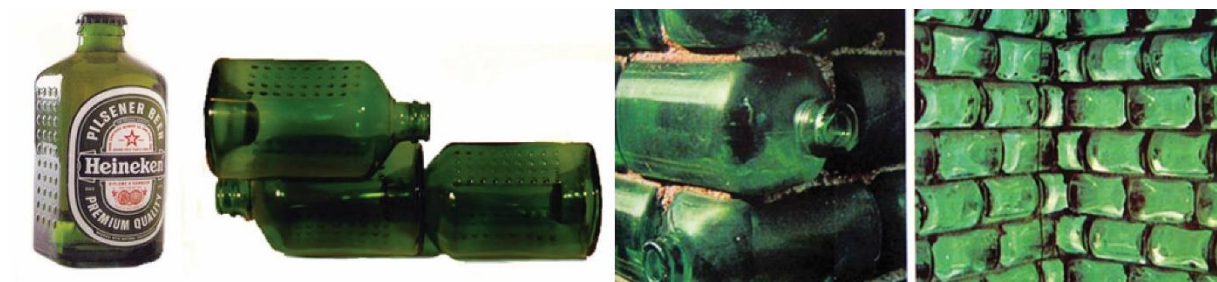


Figure 31: bouteille Wobo de Heineken, John Habraken, 1963.

3.5.5 Expérimentation 3 : logique matériaux : « diverger » à partir des matériaux

Dans cette partie, nous allons décrire une approche qui peut être complémentaire mais néanmoins différente de la logique produit. En effet, la logique matériaux part des objets disponibles pour ouvrir l'éventail de fonctions possibles permettant de les valoriser (Figure 32). Cette démarche se place à l'entrée du premier diamant (Figure 15), à cette étape, le

produit n'est pas encore défini, l'objectif est d'élargir l'éventail des possibles. Ici, l'objet n'est plus recherché pour sa capacité à répondre à une fonction précise préalablement identifiée comme une fonction spécifique d'un produit. Dans la logique matériaux, on part de l'objet initial qui n'a pas de fonction prédéterminée, pour développer un éventail de fonctions potentielles, plus ou moins ouvertes selon la destination de l'objet. Certains objets n'ont pas de fonctions précises, mais leur mise en forme leur confèrent un potentiel fonctionnel ouvert (Cf. les lisières). Le travail consiste à multiplier les options de valorisation en vue de déployer le potentiel fonctionnel de l'objet initial. Pour explorer le potentiel fonctionnel d'un objet, nous utilisons l'outil présenté au paragraphe « du produit à la poussière » (3.2.3) : la frise de valeurs. Dans l'idéal nous essayons d'abord de privilégier des options qui permettent de préserver les spécificités formelles de l'objet initial pour l'intégrer dans un produit, un semi-produit ou un matériau. Les possibilités de mises en forme vont alors varier selon le nouveau statut qu'acquiert l'objet (statut de produit, de semi-produit ou de matériau) : relativement fermée et finie s'il s'agit d'un produit qui répond à une fonction précise, semi-ouvertes sur une palette de mises en forme dans le cas d'un semi-produit, et plus ouverte s'il s'agit d'un matériau puisqu'il se destine à être mis en œuvre sur un champ de mises en forme plus nombreuses. Enfin, une fois réduit à l'état de matière, les possibilités de mises en forme s'ouvrent encore davantage, mais c'est au prix d'une disparition totale de la mise en forme initiale et de son potentiel fonctionnel. Même si préserver la forme est une priorité, cela reste une option compatible avec son retour à l'état de matière dans l'hypothèse où l'on cherche à absorber un gisement. Le retour à l'état de matière ne concernerait alors que la partie qui n'est pas exploitée dans les options identifiées, ou les déchets issus de chutes de chutes et rebuts dans ces options. Les différents scénarios sont donc potentiellement complémentaires ce qui permet d'envisager une répartition quantitative du gisement entre plusieurs options, selon le niveau de transformation des objets utilisés.

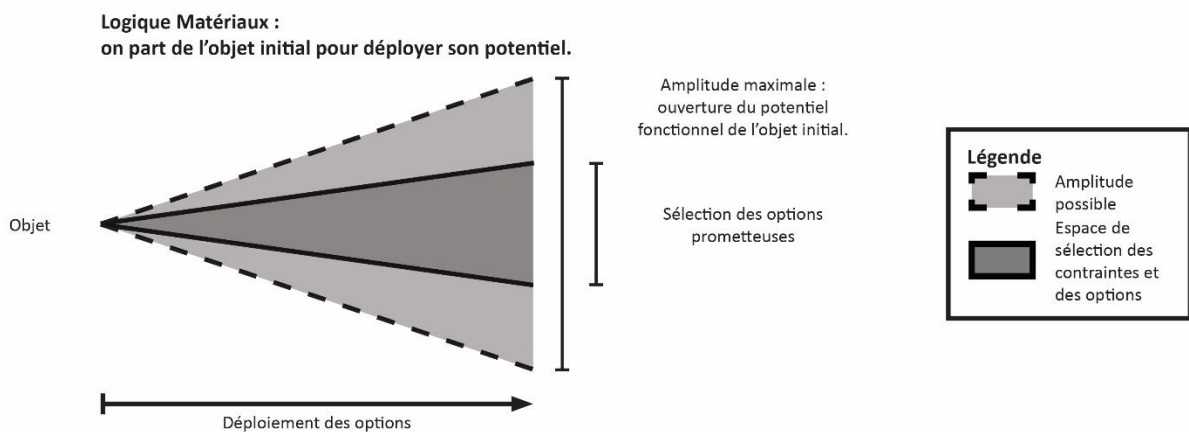


Figure 32 : logique matériaux.

Pour illustrer la logique matériaux, deux expérimentations ont été réalisées : la divergence du matériau « livres » d'une part et la divergence du matériau « lisières textiles » d'autre part.

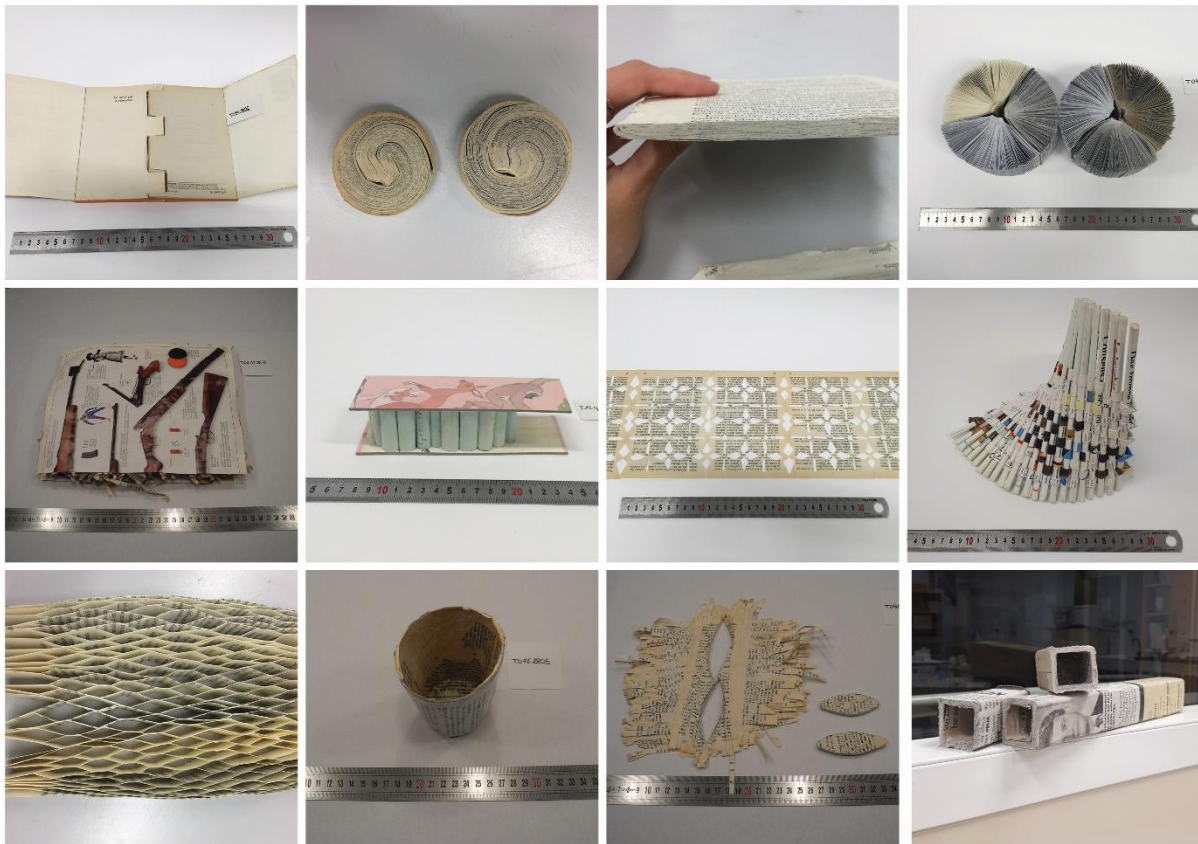


Figure 33 : sélection d'échantillons réalisés avec des livres. HERBERT Clara, SAKWINSKI Manon, CHAREYRON Cléo, WEBER Joaquim, MONEUSE Marie, GENIQUET Elsa, LAMARQUE Nicolas. 2019.

Suite aux collectes effectuées chez Recyclivre et dans l'entreprise de textile Linder, différentes expérimentations ont été développées avec des étudiants en stage à l'École des Mines de Saint-Étienne. À l'issue d'un important travail de recherche et de documentation sur les livres et les lisières les étudiants ont réalisé deux frises de valeur. L'une sur la valorisation des livres d'occasion et l'autre sur la valorisation des lisières. Ces frises ont été d'une grande utilité pour accroître nos connaissances sur les possibilités de valorisation des livres d'occasion et des lisières, mais aussi pour effectuer un état de l'art sur les produits et matériaux existants qui étaient susceptibles d'être fabriqués en faisant usage des déchets que nous avons collectés. Ces nouvelles connaissances nous ont également permis d'obtenir une vision large des possibilités de préservation et de transformation des déchets à notre disposition.

Une centaine d'échantillons de matériaux ont été réalisés par les étudiants au cours de cette période de stage. L'ensemble des échantillons ont fait l'objet d'une documentation retraçant le protocole d'expérimentation : les échantillons ont été photographiés, numérotés et décrits avec précision pour en faciliter l'éventuelle reproduction (Figure 33). Les résultats de cette expérimentation ont été exposés au fablab de l'École des Mines lors de la restitution des travaux. La Figure 34 présente cette exposition avec les échantillons classés par niveau de transformation. Tous les niveaux de transformation y sont explorés : de la préservation totale du livre et de ses sous parties (couverture, pages, tranches), à la transformation quasi-totale de ces éléments. Les combinaisons entre ces niveaux de transformation sont également

étudiées : par exemple des pages pleines associées à des lamelles de papier ; des alvéoles en pages combinées à des couvertures ou des panneaux livres de différentes épaisseurs, etc. (Figure 33) Certains matériaux ont également été mis en forme pour correspondre au cahier des charges d'une logique produit. C'est le cas de l'enceinte en papier qui combine des pièces réalisées sur-mesure (le corps du caisson a été moulé aux dimensions du produit de référence) et des semi-produits inspirés de matériaux existants (la façade avant est constituée de pages collées entre elles à la manière d'un contreplaqué, alors que la façade arrière est découpée dans un panneau livre constitué de lamelles de pages compressées, inspiré des panneaux OSB (Figure 35)).



Figure 34 : échantillons de matériaux fabriqués à partir de livres et de lisères. HERBERT Clara, SAKWINSKI Manon, CHAREYRON Cléo, WEBER Joaquim, MONEUSE Marie, GENIQUET Elsa, LAMARQUE Nicolas, PROVENAT Alban. Exposition de restitution des stages, Fablab EMSE, 2019.

Dans l'approche matériau, nous essayons de préserver la mise en forme de l'objet initial, mais le matériau est conçu pour avoir des fonctions relativement ouvertes. La transformation des objets en matériaux est une première étape vers une nouvelle transformation qui se fera au moment de sa mise en œuvre. Il est possible que le matériau soit utilisé sans transformation, mais bien souvent il subit une nouvelle étape de mise en forme pour pouvoir être intégré dans un ensemble technique plus complexe. Ainsi, les approches « matériau » et « produit », ne sont pas exclusives : elles peuvent être associées et complémentaires (Figure 35).



Figure 35 : enceinte en livres. Techniques mixtes. Logique combinée matériaux et produit. LAMARQUE Nicolas. 2019.

3.6 Conclusion du chapitre 2

La diversité des déchets en circulation sur le territoire soulève de nombreux défis. La documentation des gisements constitue un prérequis afin de pouvoir identifier les différentes possibilités de valorisation des objets en fin de vie.

Le designer, en tant que spécialiste des registres de la forme, est un acteur privilégié pour répondre aux problèmes causés par les objets ayant perdu la fonction pour laquelle ils avaient été conçus. Il faut dire que le design, en se mettant au service de la consommation de masse, porte une certaine responsabilité à l'égard de cette question.

Nous avons exploré dans ce chapitre deux logiques de conception qui permettent d'être plus agile face à l'extrême diversité des gisements de formes : la conception poussée par les gisements de matériaux, et son opposé, qui consiste à mettre le gisement au service de la conception.

En effet, si l'on considère la gestion des matériaux à l'échelle d'un territoire sous l'angle du couple forme-matière, le matériau devient un moteur d'innovation à la fois technique, culturel et organisationnel. En cherchant à dépasser le prisme unique de gestion par la matière (notamment pour l'extraction et la fin de vie), il est nécessaire de développer un design agile qui repose sur un ancrage territorial fort et une adaptation à la spécificité des formes en circulation. Plusieurs entrées sont alors possibles en proposant une lecture du territoire par les matériaux, par les procédés ou par les savoir-faire. Cela modifie l'ensemble de la chaîne de valeurs et nécessite la construction d'un écosystème de conception agile qui repose sur la construction de partenariats locaux ainsi que sur la documentation fine des matériaux et du territoire de référence. Les applications sont nombreuses et dépassent les objectifs associés au produit : les matières à création, les objets d'art et d'artisanat, les outils et procédés non destructifs, les filières, les infrastructures.

Pour pouvoir comprendre ces stratégies et en mesurer les éventuels bénéfices, il est nécessaire de décrire le système étudié, d'évaluer et de comparer les différentes propositions pour aider la prise de décision face à l'étendue des possibilités.

Dans ce travail, nous cherchons à développer des outils destinés à guider la prise de décision dans les stratégies de conception et de fabrication pour évaluer les efforts nécessaires à la valorisation des formes dans un scénario donné. Nous considérons les formes en circulation comme des OBJETS qui entrent dans un système de transformation ou de préservation et nous essayons d'estimer les efforts nécessaires à l'appropriation de ces OBJETS de manière relative, en tenant compte de la nature des OBJETS et système étudié. Nous cherchons à évaluer le potentiel fonctionnel d'une forme afin de tirer profit des valeurs associées à la mise en forme en vue de réduire les efforts nécessaires pour atteindre une fonction souhaitée.

Nous appliquons cette démarche dans la perspective de travailler avec les déchets, en vue d'identifier les meilleures voies de valorisation possibles, c'est-à-dire une manière de valoriser le potentiel de la forme en tenant compte des nécessités sociales, économiques, culturelles et environnementales. De plus, nous cherchons à mieux comprendre l'incidence de l'usage des formes existantes (qu'elles soient issues d'un processus naturel ou artificiel), sur le

processus de conception et de fabrication. Ce travail vise à augmenter la durée de vie des OBJETS sans avoir recours de manière systématique à une transformation totale, qui ferait perdre les bénéfices de la mise en forme.

Nous aborderons donc au chapitre suivant, les modalités d'évaluation des différents scénarios de valorisation par le supercyclage.

4 Outils d'évaluation de scénarios de circulation de la matière.

Cette partie décrit la méthodologie générale sur laquelle repose le processus d'identification, de sélection, de mise en œuvre et d'évaluation des stratégies de supercyclage. Cette méthodologie est résumée en annexe (Figure 10, ANNEXE). Ce chapitre est structuré en trois parties. Dans la première partie nous décrivons la méthode qui repose sur 4 phases : la phase de diagnostic, la phase de proposition, la phase d'implémentation et la phase d'évaluation. Chacune de ces phases est découpée en actions et aboutissent à des résultats. Différents outils ont été élaborés et présentés au chapitre 2 (3.2.4 et 3.3.2). Ces outils nous permettent d'explorer le potentiel des gisements par différents scénarios qui seront évalués grâce aux indicateurs renseignés. L'usage de ces outils sera détaillé de manière à en expliciter les fonctions et les résultats attendus. La seconde partie se concentre sur les outils d'évaluation des scénarios. Dans la troisième partie, sont présentés les quatre familles d'indicateurs que nous avons développés. Enfin, nous ferons l'évaluation des scénarios retenus en s'attachant à la valorisation des livres d'occasion. Ce chapitre se termine par une analyse critique des indicateurs et des résultats obtenus pour l'évaluation des scénarios. Nous discutons ces résultats de manière à les mettre en perspective dans le cadre d'une implémentation à l'échelle du territoire de référence.

4.1 VISION GLOBALE, présentation des phases de travail, des actions et des outils.

4.1.1 Phase 1 : diagnostic

Description de la phase 1.

Le diagnostic a pour objectif d'identifier, de collecter et de traiter les données essentielles à l'évaluation de la situation existante (Phase 2). Une fois que le gisement de déchets a fait l'objet d'un diagnostic, certains déchets peuvent être considérés comme des OBJETS à intégrer dans un scénario de supercyclage.

Parmi les données d'intérêt pour établir le diagnostic, il y a l'ensemble des informations sur le gisement (quantités, qualités, propriétés, saisonnalité et données territoriales) et sur l'entreprise faisant l'objet du diagnostic (répartition géographique des déchets et des sites de production, procédés utilisés, modes de traitement et de stockage des déchets). Des données complémentaires sur le territoire, sur de potentiels partenaires ou sur les modalités de valorisation peuvent également être collectées et traitées en phase de diagnostic pour enrichir les données fournies par l'entreprise.

Plus qu'un état des lieux, cette phase consiste à fournir une première analyse de la situation existante grâce à l'interprétation des données collectées sur le gisement et sur l'entreprise. Ces données peuvent être collectées par le biais d'un questionnaire tel que celui présenté au chapitre 2 (3.1.2).

Outre l'évaluation de l'existant (phase 2), le diagnostic renseigne aussi la réalisation de la phase de proposition (phase 3) en permettant aux concepteurs d'obtenir les données dont ils ont besoin pour identifier et élaborer les scénarios de supercyclage adaptés à l'acteur. Le diagnostic a une fonction de représentation de la situation existante, ce qui permet de faciliter le dialogue entre les acteurs. Du fait de l'existence du diagnostic, l'existant et son scénario renseigné sont « objectivés », au sens où ils deviennent un objet d'étude. Cela rend possible un dépassement des éléments subjectifs au profit du système étudié. La documentation de la situation existante devient alors un levier d'élaboration de scénarios prospectifs, centré sur les particularités des acteurs étudiés.

Action 1 : traiter des informations « entreprises ».

Pour initier un changement, il est essentiel de connaître la situation de référence, et de porter son attention sur son évaluation. L'action 1 est un travail de terrain destiné à collecter des données sur la nature des gisements de déchets et sur l'entreprise. Une fois collectées, ces données font l'objet d'un travail d'analyse destiné à augmenter les connaissances pour permettre l'élaboration du diagnostic. En outre, il permet de mesurer la différence entre le scénario de référence et les scénarios de supercyclage envisagés. Nous appelons les données collectées des « Données Entreprise », celles qui sont fournies par l'entreprise qui fait l'objet du diagnostic, et « Données Ext », toute information complémentaire permettant d'enrichir

le diagnostic comme par exemple des informations sur le territoire, sur les modalités de valorisation ou sur de potentiels partenaires. Les paramètres d'entrée qui permettent de recueillir ces données sont les quantités, les qualités, les propriétés, la temporalité et les aspects territoriaux du ou des gisements étudiés. Lorsque les données du questionnaire ont été traitées, le diagnostic doit permettre d'évaluer la situation existante (action 2) et de fournir les informations nécessaires à l'identification de scénarios de supercyclage adaptés à l'entreprise (Actions 3 et 4). L'information issue de la collecte de données est consignée dans le questionnaire qui une fois rempli doit permettre de réaliser le diagnostic (résultat 1).

Outil de l'action 1 : le questionnaire.

L'action 1 fait appel au questionnaire présenté au chapitre 2 (3.1.2). Ce questionnaire est un outil facilitant la collecte et le traitement des données. Ce dernier est réalisé au moment de l'état des lieux interne. Les données qu'il contient sont organisées selon les catégories suivantes : « Les informations sur le matériau et les procédés de fabrication », « Les informations quantitatives », « Les informations qualitatives », « Les informations temporelles » et « Les informations territoriales ». Cette classification permet de faciliter la réalisation d'un premier diagnostic (Résultat 1) et la mise en perspective des gisements étudiés (Actions 3 et 4). Le diagnostic servira de base pour évaluer la situation de référence au regard des indicateurs (Résultat 2) et à identifier des scénarios prometteurs. Le questionnaire, appelé « fiche matériaux », s'inscrit dans une logique plus générale d'état des lieux mais ne dispense pas d'un effort de validation des informations et données recueillies. Le questionnaire est également conçu pour recueillir les informations essentielles, pour permettre aux concepteurs d'élaborer des stratégies de supercyclage territorialisées (Actions 3 et 4).

Selon la nature et l'ambition du projet, le travail d'état des lieux et de diagnostic peut être plus ou moins développé en fonction du niveau d'information nécessaire à l'élaboration des stratégies de supercyclage envisagées. En effet, le questionnaire peut être réalisé dans un premier temps pour identifier les gisements. Si les scénarios développés en phase de proposition sont prometteurs, le questionnaire peut être affiné dans un second temps, par la collecte de données utiles supplémentaires orientées vers les besoins des scénarios identifiés. Le niveau d'information nécessaire est donc relatif aux scénarios, car il serait contre-productif d'avoir un niveau très élevé de détail si les scénarios envisagés ne tiennent pas compte du travail de documentation effectué en phase de diagnostic. Par exemple, un état des lieux faiblement détaillé peut-être suffisant pour envisager des scénarios test ou simulé. Ce premier recueil de données sera ensuite approfondi selon les besoins identifiés dans les scénarios test. De nouvelles données seront collectées de manière à étayer les connaissances sur le gisement pour consolider la phase de proposition et envisager une éventuelle massification.

Résultat 1 : le diagnostic.

L'action 1 vise à augmenter les connaissances sur un gisement de déchets, sur les stratégies de fabrication et sur les stratégies de valorisation des entreprises étudiées. Le résultat 1 est un diagnostic issu du traitement des données recueillies au sein de l'entreprise étudiée au moment de l'état des lieux interne. Il a pour objectif principal d'extraire les informations indispensables qui permettent de définir le potentiel de supercyclage des OBJETS identifiés en

phase 1. De ce fait le diagnostic proposé contient les informations essentielles à la sélection de nouveaux scénarios de supercyclage. Il permet aux concepteurs de se les approprier dans le processus de conception. L'action 1 permet également d'envisager les possibles répartitions du ou des flux dans différents scénarios potentiels. Ainsi informé sur la nature des gisements, des savoir-faire et des procédés de fabrication, le designer/concepteur est capable de se positionner sur les stratégies de conception et de fabrication qui seront élaborées dans des scénarios de supercyclage (action 3 et 4).

La fiche matériau présentée en Annexe (Tableau 1, ANNEXE), est constituée d'un seul volet. Seule une partie des données ont été collectées. Un découpage en plusieurs volets est envisageable en fonction de la phase de projet (test, pilote ou massification) et de la maturité de l'entreprise par rapport à la question du supercyclage (connaissance de ses gisement, documentation, pratiques de tri, etc.). Un découpage du diagnostic en plusieurs volets permettrait également d'échelonner la collecte de données en fonction des besoins du projet, et de l'état d'avancement des scénarios étudiés.

4.1.2 Phase 2 : évaluation de l'existant.

Description de la phase 2.

La phase 2 est une évaluation du scénario existant basée sur l'utilisation d'indicateurs spécifiquement définis. Elle a pour finalité à produire une analyse du ou des scénarios existants par le biais des indicateurs d'une part, et, à positionner la situation initiale comme une situation de référence d'autre part. Le scénario de référence permet également de positionner les autres scénarios, sa description permet donc d'établir un référentiel commun à tous les scénarios. La phase 2 nourrira alors toutes les phases d'évaluation qui pourront avoir lieu lors du développement de scénarios de supercyclage.

L'évaluation du scénario de référence consiste à donner une première mesure de la capacité de la situation existante à préserver les propriétés, les qualités et les valeurs contenues dans un gisement identifié. Cette évaluation permet de déterminer les contours du système de référence de manière à pouvoir envisager de nouvelles configurations. Elle repose sur les quatre familles d'indicateurs développées dans cette thèse. Ces familles contiennent des indicateurs matière, économiques, territoriaux et de qualités. Elles sont présentées dans la partie dédiée à « la description de l'évaluation des scénarios de supercyclage ». (4.3)

Cette action d'évaluation est importante, car les stratégies de gestion des déchets mises en place par les entreprises sont des scénarios qui possèdent des avantages et des inconvénients qu'il est nécessaire de révéler et de bien comprendre, si l'on souhaite identifier les éventuels bénéfices attribués à une configuration novatrice du système étudié. Évaluer l'existant permet de disposer d'une référence désormais comparable à de nouvelles configurations éventuelles. L'objectif est d'améliorer les performances de valorisation du système initial. Ces performances reposent sur la capacité à préserver et/ou augmenter les propriétés des matériaux, ainsi que les qualités et les valeurs relatives aux scénarios étudiés.

Cette phase 2 se réalise suivant une seule action (action 2).

Action 2 : évaluer le scénario de référence.

Au diagnostic de la phase 1 s'ajoute des données supplémentaires, extérieures provenant de sources ou d'acteurs variés et provenant de l'entreprise.

Trois types de données sont distinguées :

1- Les données entreprise : données appartenant à l'entreprise étudiée.

Exemples de données entreprise : flux entrants et sortants (quantités, qualité, propriétés des semi-produits, produits et déchets), nombre de salariés, données clients et fournisseurs, nature des outils de production et technologies, savoir-faire spécifiques, données recherche et développement, etc.

2- Les données écosystème entreprise (Données Ext 1) : données appartenant à d'autres entreprises en lien avec l'entreprise de référence tels que les fournisseurs, les prestataires de services, les prestataires déchet, les sous-traitants, les entreprises partenaires, etc.

Exemples de données Ext 1 : nature des savoir-faire et des procédés, distances avec l'entreprise de référence, nature et quantité des déchets, positionnement sur le marché, prix des matières, semi-produits, produits ou services, etc.

3- Les données extérieures à l'entreprise (Données Ext 2) : données appartenant à des acteurs extérieurs ou issues de la littérature. Les acteurs extérieurs peuvent être l'Etat et collectivités, d'autres entreprises (concurrentes ou autre secteur d'activité), des associations, des organisations non gouvernementales, des acteurs indépendants, des écoles ou des laboratoires de recherche.

Exemples de données Ext 2 : données issues de la littérature scientifique, d'archives, de documents historiques, données géographique et territoriales (coordonnées géographiques, cartographie, distances, etc.), informations sur les PRODUITS de références provenant de l'entreprise ou disponibles sur internet (prix, fonction, plans, matériaux, assemblages, procédés de fabrication, et toutes autres données susceptible de détailler le PRODUIT de référence), prix des matières, PRODUITS et déchets, annuaires, données juridiques et normatives, etc.

Le ou les scénarios existants sont décrits chronologiquement et évalués sous le prisme des quatre familles d'indicateurs. Nous fournirons une description approfondie des indicateurs, des critères et des paramètres qui permettent l'évaluation de la situation de référence dans la seconde partie de ce chapitre dédiée à « la description détaillée de l'évaluation des scénarios de supercyclage » (4.2). Cette évaluation servira de base pour comparer la situation existante aux scénarios prospectifs de valorisation par le supercyclage développés dans les actions 3 et 4.

Outil de l'action 2 : indicateurs de performance d'un scénario (Action 2).

À l'issue du diagnostic (résultat 1) le gisement d'OBJETS est soumis à une première évaluation (Action 2) dont l'objectif est de déterminer les performances du système de référence et d'entrevoir son potentiel. Pour ce faire, nous avons développé quatre familles d'indicateurs

que nous utilisons ici pour évaluer l'existant : les indicateurs matière, les économiques, les indicateurs de dynamique territoriale et de qualité. Pour une plus grande facilité d'utilisation, l'ensemble des familles d'indicateurs et leur calcul ont été implémentés dans Excel.

Résultat 2 : évaluation de l'existant.

Les résultats de l'action 2 se matérialisent par le résultat de la quantification des indicateurs obtenus via les tableurs Excel. Divers graphiques sont ensuite réalisés pour illustrer ces résultats et faciliter leur appropriation en vue de les discuter. À l'issue de cette première évaluation, une notation des scénarios de référence est obtenue. Le résultat de l'évaluation est un ensemble d'indicateurs qui permettent de souligner les points forts et les points faibles d'un scénario. Ce résultat, illustré et commenté, met en lumière les aspects pour lesquels une marge de progression est possible, ainsi que les compromis à accepter et les pistes d'évolution du système étudié. Ce premier résultat vient compléter le travail de diagnostic initié en phase 1. Le diagnostic de l'existant pourra être comparé aux résultats des scénarios prospectifs issus des phases suivantes afin d'évaluer la pertinence des scénarios centrés sur une démarche de supercyclage. De ce fait, cette phase procure de précieuses informations qui sont autant d'indices sur lesquels les concepteurs peuvent s'appuyer pour guider la stratégie de design à adopter en phase de proposition.

4.1.3 Phase 3 : proposition.

Description de la phase 3.

La phase 3 repose sur la construction de scénarios de pistes nouvelles de valorisation des déchets. Cette étape de construction de scénarios est une étape créative relevant des activités de création ou de design. Dans le cadre de cette thèse, des outils spécifiques ont été élaborés et testés au niveau de leur compréhension et de leur utilisation, voire appropriation, dans le cadre d'ateliers créatifs avec un public d'étudiants (3.5). A défaut d'une véritable évaluation sur l'usage de ces outils, les résultats obtenus ont permis d'avoir un premier retour d'expérience. Ce sont ces outils que nous utilisons dans le cadre de la démarche présentée ici. Ainsi, la phase de proposition a pour objectif d'identifier et de sélectionner les pistes prometteuses en vue de les soumettre au regard des acteurs en charge de la validation des scénarios.

Ces outils méthodologiques en approche créative, sont présentés dans le chapitre 2 : le panorama *product to dust* qui repose sur les frises de valeur (3.2.3) et l'arborescence produit (3.3.2). Ils permettent de mettre en perspective les résultats de la phase 1 en vue d'élargir le potentiel de valorisation. L'action 3 correspond à la construction du panorama *product to dust*. L'action 4 concerne l'identification des variables du PRODUIT et repose sur l'usage de l'arborescence produit. Ces deux actions aboutissent respectivement aux résultats 3a et 3b. Le résultat 3a décrit la mise en perspective des OBJETS dans les frises de valeurs. Le résultat 3b décrit les déclinaisons de certaines options sélectionnées dans les frises de valeur. L'objectif est de décrire finement les scénarios identifiés de manière à anticiper les possibles déclinaisons des scénarios prometteurs. Ces résultats permettent finalement d'identifier des scénarios de supercyclage potentiels afin de canaliser les efforts sur les scénarios les plus adaptés à l'entreprise.

À ce niveau, les scénarios identifiés sont encore au stade de projet. La discussion entre les partenaires repose sur divers livrables destinés à fluidifier la prise de décision vers une éventuelle phase de simulation, d'implémentation et d'évaluation (Phases 4A et 4B). Les livrables de la phase 3 peuvent prendre la forme de schémas, de maquettes, d'échantillons, de prototypes, de vues 3D, etc. De ce fait, des objets intermédiaires de conception jalonnent la phase de proposition de manière à rendre plus tangible les options identifiées dans les actions 3 et 4. Cela nécessite de possibles aller-retours entre la sélection finale des scénarios et l'élaboration des objets intermédiaires de conception pour accompagner la prise de décision vers les étapes suivantes. Si les scénarios envisagés impliquent plusieurs acteurs, la sélection permet de réunir les concepteurs en charge de l'étude, les entreprises impliquées et les éventuels partenaires afin d'aboutir à un accord permettant la validation des scénarios.

Action 3 : construire le panorama Product to dust.

L'action 3 permet de mettre en perspective le résultat des actions 1 et 2. En effet, à l'issue de la phase de diagnostic, se pose une question : est-il possible de développer des pistes d'amélioration de la gestion des gisements de déchets ? L'action 3, permet de déployer différents degrés de transformation ou de préservation des OBJETS de manière à élargir le champ des possibles en déployant diverses hypothèses de valorisation d'un gisement d'OBJETS. Afin de mettre en perspective un gisement spécifique et de répondre aux besoins ciblés par une entreprise, le concepteur exploite les données fournies par le diagnostic ainsi que les données fournies par l'évaluation du scénario de référence (ces données sont compilées dans les résultats 1 et 2). Ce premier jeu de données permet au concepteur d'avoir des informations sur l'entreprise et sur le gisement qu'il va étudier. Afin de compléter ces informations et de nourrir le processus de création/design, le concepteur peut exploiter des données extérieures issues de sources diverses tels que la littérature scientifique, les ouvrages spécialisés, les sites internet, etc. L'ensemble de ces données (Résultat 1, Résultat 2 et Données extérieures) lui servent de références et de source d'inspiration pour explorer le potentiel d'un gisement. Les pistes qui se dégagent de cette première étude ne sont pas exclusives, c'est-à-dire que le déploiement du potentiel d'un ou plusieurs gisements n'implique pas de faire un choix unique qui absorberait la totalité du flux identifié. Il s'agit au contraire d'entrevoir un grand nombre d'hypothèses potentiellement compatibles entre elles qui embarquent des fractions plus ou moins importantes du ou des flux en question. De ce fait, l'action 3 permet au concepteur de répartir les quantités d'un gisement dans plusieurs scénarios de conception plus ou moins destructifs ou préservant. Ces scénarios ne sont pas exhaustifs, c'est pourquoi nous avons développé un outil complémentaire à l'action 3 ; l'arborescence produit présentée dans l'action 4, qui permet de moduler les scénarios prometteurs en faisant varier différents paramètres de conception ou de fabrication du PRODUIT.

Outil de l'action 3 : la construction des frises de valeurs.

Nous avons vu au chapitre 2 que la mise en perspective des gisements s'appuie sur l'utilisation des frises de valeur (modèle à renseigner ou à s'approprier en fonction de l'OBJET de référence) conçues pour donner une vision panoramique du potentiel de l'OBJET à différents niveaux de transformation. Les différents niveaux de transformation ou de préservation de la

mise en forme y sont explorés graduellement, depuis l'absence de transformation jusqu'à la transformation totale de l'OBJET. Au-delà de l'OBJET, ce sont les procédés et les savoir-faire qui sont mis en perspective. En effet chaque niveau de transformation de l'OBJET fait appel à une stratégie particulière qui nécessite des actions et des connaissances qui peuvent être décrites avec plus ou moins de précisions selon les scénarios qui présentent le plus d'intérêt.

La frise, initialement vierge est progressivement complétée. En parallèle de ce travail, un document annexe recense, pour chaque référence, le ou les auteurs, la marque, le lien vers le site internet ou l'ouvrage de référence, les procédés, les matériaux utilisés, les techniques de fabrication, et tout autre information susceptible d'éclairer le concepteur en phase de conception tel que des plans, des documents techniques, des fiches de données environnementales et sanitaires, des informations sur les matériaux ou sur les performances techniques de l'OBJET. Le document annexe peut éventuellement recueillir des informations en vue d'aiguiller la répartition du gisement dans divers scénarios : les quantités d'OBJETS disponibles, les éventuelles pièces détachées et composants, ou les quantités d'OBJETS partiellement transformés comme les chutes ou la poussière.

Résultat 3a : description de N scenario de supercyclage adaptés à l'acteur.

Le résultat 3a est composé de la frise et de son document annexe. Ils sont une source de référence pour le concepteur et les décideurs, laissant ainsi un large choix d'options possibles et de possibilités de répartition d'un gisement dans différents scénarios de valorisation. Ces scénarios ouvrent la voie vers de nombreux objets, semi-produits ou PRODUITS, laissant la possibilité à l'entreprise d'envisager des scénarios impliquant un vaste panel d'acteurs et de possibilités de transformation. Outre la mise en perspective de l'OBJET de référence en deuxième vie, de sa forme inchangée jusqu'à une métamorphose complète, faisant varier les échelles de granulométrie, de la matière à la poussière, la frise sert également de support à l'identification de combinaisons d'OBJETS à différents niveaux de transformation, donnant lieu à des PRODUITS qui tirent profit de multiples niveaux de transformation de l'OBJET de référence dans un même scénario. Ainsi le gisement est exploré dans plusieurs dimensions que sont les combinaisons de niveaux de transformation, et à toutes les échelles : microstructures, matériaux architecturés, PRODUITS simples ou complexes, composites, superstructures. Cet éventail de possibilités ouvre un vaste champ combinatoire qui permet de concevoir dans une perspective multi-échelles, adressant de multiples filières.

La description d'un scénario repose donc sur la documentation de chaque niveau de transformation et des éventuelles possibilités de combinaisons. Le résultat 3a présente et détaille les scénarios de manière à faciliter le processus de sélection (Action 5). Ce résultat est complémentaire au résultat 3b car les frises de valeur et l'arborescence produit sont utilisés en parallèle de manière à explorer les différents scénarios.

Action 4 : construire une arborescence produit.

L'action 4 permet de poursuivre le travail initié à l'action 3, c'est-à-dire, de mettre en lumière le potentiel de transformation et / ou de préservation du gisement. En effet, lorsque différentes stratégies de transformation ou de préservation ont été identifiées par le concepteur en vue d'aboutir à un nouveau PRODUIT, il reste potentiellement une part

d'inconnue : les quantités sont-elles suffisantes pour concevoir un PRODUIT sans que ce dernier soit impacté par la versatilité du gisement ? Est-il nécessaire de penser dès la conception des déclinaisons possibles du PRODUIT de manière à en assurer la fabrication ? Pour faire face aux aléas d'approvisionnement, les contrôler ou les prévoir, le PRODUIT peut être pensé comme un objet évolutif susceptible d'être modifié au gré des évolutions du gisement. Ce travail permet notamment d'anticiper les variations de stock et ses répercussions sur le processus de fabrication d'un PRODUIT. Ces évolutions peuvent être poussées par la nécessité de s'adapter à la temporalité de production des déchets, à la variation des qualités ou des propriétés des gisements utilisés dans les processus de fabrication. À l'inverse, nous faisons l'hypothèse que les évolutions du PRODUIT peuvent être tirés par la conception. En effet le designer qui travaille sur un PRODUIT a deux options non exclusives : soit il s'inspire du gisement comme une contrainte (stratégie poussée), soit il s'empare du cahier des charges et des contraintes de conception pour trouver le gisement approprié (stratégie tirée) (3.5). En tant qu'utilisateur, par le regard et la pratique, le designer peut-être à même de proposer des variations. Contrairement aux matériaux neufs, qui dans l'ensemble assurent une certaine stabilité d'approvisionnement, les matériaux de deuxième vie sont potentiellement tributaires des aléas de leur production (aspects quantitatifs, qualitatifs et temporels). Ainsi, pour répondre à cette particularité, nous avons identifié différents paramètres qui permettent de faire évoluer le processus de conception en fonction de ces aléas. Ces paramètres ont été décrits au chapitre 2, il s'agit de la morphologie, des fonctions, des matériaux ou des attributs esthétiques.

Dans notre cas, nous utilisons l'outil d'arborescence produit pour faire varier les PRODUITS identifiés et explorer les variations potentielles des scénarios sélectionnés qui sont ici liés à nos expérimentations : les panneaux livres et la chilienne.

Outil de l'action 4 : construire une arborescence produit.

Cet outil permet de se focaliser sur une option identifiée à l'action 3 et d'en décrire de potentielles variations classées par entités. L'outil se déploie principalement autour de quatre grandes catégories : les variations morphologiques, les variations fonctionnelles, les variations matérielles et les variations esthétiques. Ces catégories sont ici décrites en fonction de l'étendue des transformations à anticiper en phase de reconception. Les variations morphologiques ont une incidence forte sur l'aspect du PRODUIT, alors que les variations fonctionnelles et esthétiques sont envisagées à un niveau inférieur. Alors que les premières ont une incidence sur la morphologie du PRODUIT, les secondes modifient les aspects perçus, comme la couleur, les aspects de surface ou les motifs. Pour les variations morphologiques, le concepteur doit envisager des modifications significatives dans les documents techniques et traduire ces évolutions dans les plans en proposant différentes versions du PRODUIT. De plus, l'évolution morphologique est susceptible d'avoir une incidence sur l'usage ou la fonction du PRODUIT. Les variations fonctionnelles sont généralement à un niveau inférieur, elles permettent notamment des ajouts envisagés comme des options ou des PRODUITS dérivés. Pour des variations matérielles, le concepteur doit anticiper de possibles déclinaisons des plans et envisager des scénarios de production adaptés aux sources de matériaux convoqués dans la fabrication. Selon la nature des matériaux employés, le concepteur doit anticiper la variation des dimensionnements, des procédés ou des savoir-faire permettant l'élaboration du PRODUIT. Les variations esthétiques, quant à elles, n'ont que peu d'incidence sur le dessin

initial. Le concepteur peut indiquer une variation contrôlée de ce paramètre ou laisser libre court aux choix esthétiques opérés par un technicien ou un artisan qui s'adaptera aux aléas d'un gisement dont seules les couleurs ou les motifs vont varier d'un PRODUIT à l'autre.

Résultat 3b : description de N scenario de supercyclage adaptés à l'acteur.

Le travail d'arborescence produit permet d'élargir les champs d'application pour une option identifiée lors de l'action 3. Ce travail permet au designer / concepteur d'intégrer de manière contrôlée les variations susceptibles d'influencer le processus de fabrication. Le concepteur peut alors prédire l'évolution et l'intensité de certains paramètres afin d'anticiper les répercussions plus ou moins étendues sur les scénarios de fabrication. Le caractère aléatoire de certains gisements peut représenter un risque ou un facteur d'incertitude. Prévoir et anticiper ces aléas permet de limiter la prise de risque et d'en faire une potentielle opportunité pour diversifier les PRODUITS, ou les personnaliser, en tirant profit de la diversité des sources pour en faire un atout, un vecteur d'innovation et de création. De ce fait, l'arborescence produit aide le concepteur à identifier les leviers d'action, en référence à la classification des PRODUITS. Il peut alors intégrer très en amont dans le processus de conception les incertitudes liées au gisement, de manière à valoriser différentes sources de matériaux et / ou élargir les gammes de PRODUITS et collections développées par l'entreprise.

Action 5 : sélectionner des scénarios de supercyclage.

La sélection des scénarios de supercyclage repose en grande partie sur les résultats 3a et 3b : la description de N scénarios de supercyclage adaptés à l'entreprise. En effet, lorsque la phase de diagnostic est terminée, de nombreuses voies de valorisation s'ouvrent pour l'entreprise. Il s'agit alors de s'organiser en vue de simuler, d'évaluer, et / ou d'implémenter une stratégie de supercyclage. Les décideurs se retrouvent alors face à un choix élargi et argumenté qui relève de la stratégie susceptible d'engendrer des coûts, des besoins d'investissement ou de nouveaux partenariats. Ces décisions appartiennent, en premier lieu à l'entreprise et nécessitent d'être étudiées. C'est pourquoi le processus de prise de décision s'appuie sur les résultats du diagnostic (Résultat 1), de l'évaluation de la situation de référence (Résultat 2) et sur les résultats de la phase de proposition (Résultats 3a et 3b). Ce processus de sélection peut se faire en interne et ne concerner qu'une seule entreprise. Pour les cas plus complexes, dans lesquels des savoir-faire, des procédés ou des connaissances nécessitent le montage de partenariats, plusieurs entités peuvent échanger sur les contours et sur la faisabilité des scénarios de supercyclage dans l'objectif de trouver les meilleures optimisations et d'envisager une stratégie multi-acteurs. À l'échelle d'un territoire, il est possible que ces partenariats soient le fruit d'une décision ou d'un encouragement politique (par exemple : partenariat public / privé, délégation de service public), qui incite, voire oblige à l'élaboration de partenariats et contribue de fait à la dynamique territoriale.

Outils de l'action 5 : les objets intermédiaires de conception.

La sélection de scénarios de supercyclage repose d'abord sur l'identification des pistes prometteuses (Résultats 3a et 3b). Dans ce cadre, nous utilisons l'outil *product to dust* à laquelle nous associons l'outil de d'arborescence produit pour identifier ces pistes. Ces deux

outils sont utilisés en combinaison avec de nombreux outils de conception pour illustrer les scénarios et les documenter (croquis, plans, modélisation, maquette, etc.) ; ils peuvent par ailleurs, être développés ou implémentés différemment. Afin de faciliter la prise de décision, des objets intermédiaires de conception viennent conforter les scénarios ayant le plus grand potentiel de développement : différentes expérimentations sur les matériaux ou les produits peuvent ainsi être présentées en phase de validation. Ces expérimentations aboutissent à des échantillons de matériaux, des maquettes représentant les futurs PRODUITS, des images 3D et plans avec de possibles variations issues du travail d'arborescence produit, des croquis, des vidéos et *story-boards* présentant l'évolution des scénarios ou des mises en situation des PRODUITS, des diagrammes et tableurs permettant de chiffrer et d'illustrer les répartitions de quantités d'OBJETS dans les différents scénarios, etc.

Cette description peut sembler identique au développement d'un projet classique, mais son originalité tient dans la reconception et l'adaptabilité : on conçoit, on représente, on sélectionne et on fabrique conformément à la mise en forme souhaitée par le concepteur. Il faut préciser que, quel que soit la nature des OBJETS exploités dans le processus de conception / fabrication (neuf ou de deuxième vie), le concepteur travaille avec de nombreuses mises en forme qui préexistent. En cela ces mises en forme, font déjà partie des contraintes de conception : la forme des matières premières et des nombreux semi-produit et matériaux neufs commercialisés qui acceptent des variations plus ou moins ouvertes et des assemblages.

Ce qui change dans la conception du PRODUIT pour le supercyclage, c'est le fait de présenter des projets dont l'évolution est susceptible de s'ajuster aux variations des stocks de déchets collectés, en quantités et / ou en qualité. Les déchets sont produits de manière décentralisée et sont par nature associés aux lieux de transformation et de consommation. Il en résulte des variations (en matières, en formes, en quantité, en qualités, en temporalité de production) qui ont la spécificité d'être intimement liées aux territoires étudiés, aux lieux, et aux conditions de leurs usages précédents. Dans une perspective de conception classique, les applications envisagées se retrouvent souvent détachées du territoire de référence. Pour les matériaux et produits neufs, les champs d'application sont traditionnellement balisés en phase de conception sur la base de flux stables et contrôlés (selon la nature de ce qui est produit).

Or les flux de déchets sont très hétérogènes et hyper locaux, du fait de leur attachement aux foyers de consommation. Le supercyclage doit donc s'adapter à des mises en forme et une logistique complexe pour valoriser des objets, essentiellement produits par l'industrie et dont les champs d'application ne sont pas encore identifiés. Sur ce point le rôle du design est essentiel pour « *déterminer les propriétés formelles des objets produits industriellement* » [MALDONADO, 1969]. Il s'agit alors d'identifier de nouveaux usages, et de nouveaux modèles de fabrication, intégrés aux lieux dans lesquels les matériaux et déchets sont produits, qui limitent le niveau de transformation de l'OBJET de référence et qui exclue, autant que possible, le recours aux matériaux neufs.

De ce fait, les outils intermédiaires de conception peuvent être utilisés dans une forme classique quand les matériaux sont stables dans le temps « on représente fidèlement ce qui va advenir », ou dans une perspective plus souple, qui laisse présager des incertitudes, des variables et des inconnues. Pour y faire face il est possible de tracer un processus, qui va du

curatif à la prédiction en passant par de la prévision : « on représente alors ce qui peut advenir, les modifications et / ou les variations, en maîtrisant la marge d'incertitude tout en cherchant à limiter l'intensité des transformations que l'on fait subir aux matériaux ». Cette seconde perception du projet rejoint les principes d'amélioration continue, mais ici, c'est une manière d'introduire davantage de flexibilité pour s'adapter « en continu » à des gisements potentiellement beaucoup plus versatiles que les matériaux neufs. Dans cette perspective les outils intermédiaires de conception permettent de délimiter et d'anticiper les marges de manoeuvre sur les PRODUITS, de manière à considérer les opportunités de substitution de matières ou de matériaux, ainsi que les prises d'initiatives et les transferts de responsabilité en phase de fabrication s'il est nécessaire de faire appel à la créativité des ouvriers, techniciens et artisans pour s'adapter à des sources changeantes. Les variations sur les PRODUITS sont des conséquences des choix d'ajustement de conception. L'objectif de ce corpus d'outils est d'aider les designers / concepteurs à représenter les différents degrés de variation des PRODUITS selon leur aptitude à tolérer la différenciation, et ainsi, de limiter la prise de risque lors de la validation d'un scénario.

L'action 5 exploite également les résultats obtenus lors de « l'évaluation de N scénarios initiaux » (résultat 2). Ces résultats, exprimés sous la forme de graphiques et de tableaux, permettent d'éclairer la prise de décision au regard des connaissances acquises sur la configuration de référence. Cette connaissance permet de déployer de nouvelles pistes de travail qui seront comparées aux performances des scénarios initiaux.

Résultat de l'action 5 : validation d'un scénario de supercyclage.

L'action 5 permet d'identifier les scénarios prometteurs de manière à canaliser les moyens et les ressources sur les axes de développement qui attirent l'intérêt de l'entreprise. Cette action de sélection des scénarios est étayée par les résultats des phases précédentes (Phases 1, 2 et 3). Elle aboutit à la validation d'un ou plusieurs scénarios, intra ou inter-acteur(s) qui seront simulés et / ou implémentés. L'avis d'acteur peut être consultatif ou catégorique selon l'acteur impliqué : un fournisseur, un élu, un chef d'entreprise, de futurs usagers, etc. Si l'acteur est un décideur, il peut être sollicité pour un avis et / ou pour une validation.

À ce stade, les décisionnaires ont toujours la possibilité de privilégier les scénarios existants sans rien changer. Cependant différentes pistes sont possibles car les acteurs peuvent :

- Choisir si cette implémentation sera réelle ou simulée.
- Choisir une échelle d'implémentation (micro ou macro) en fonction du niveau de maturité de l'implémentation : test, pilote, ou massification.
- Choisir une distribution des scénarios : la Figure 36 présente un exemple de distribution de scénarios. Elle permet d'illustrer une possible répartition du gisement en fonction du niveau de transformation des OBJETS. On observe que les solutions basées sur le retour à l'état de matière permettent d'absorber de plus gros volumes ; mais ces solutions se révèlent souvent plus onéreuses. Inversement, moins il y a de transformation plus le gisement sera spécialisé : l'absence de transformation limite les besoins d'investissements, mais nécessite de multiplier les pistes pour absorber du volume.

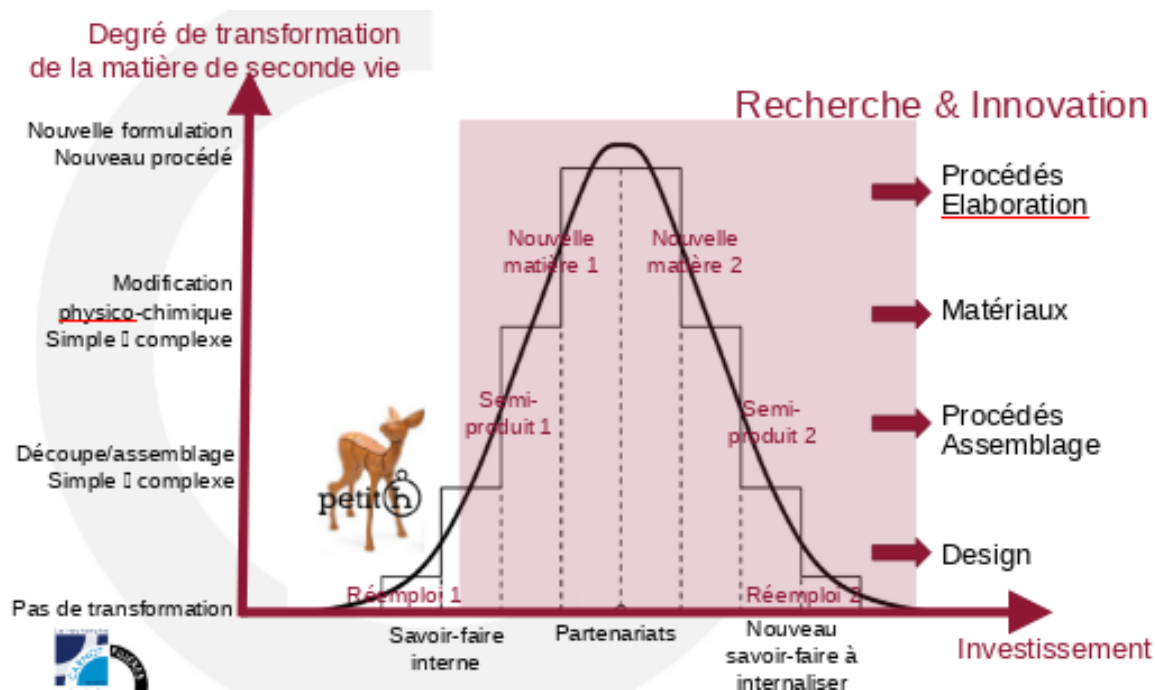


Figure 36 : exemple de distribution des scénarios de supercyclage [BASSEREAU, 2020 (b)].

Si les acteurs sont décisionnaires, ils peuvent prendre la décision de se lancer dans l'étude approfondie et la simulation d'un ou plusieurs scénarios. Ils peuvent également valider un scénario dans la perspective de l'implémenter à des échelles diverses en fonction du niveau de maturité de l'implémentation : l'élaboration d'une phase de test avec la réalisation de prototypes, la mise en place de partenariats, la fabrication de préséries, l'exploitation d'une partie minimale ou significative des gisements de déchets, l'instauration d'une stratégie itérative et graduelle pour limiter la prise de risque, privilégier les scénarios les moins coûteux ou décider d'investir sur une option qui leur semble convaincante, etc. Enfin, lorsque différents scénarios ont été validés, il est toujours possible de choisir une distribution des scénarios en fonction de leurs coûts et relativement aux capacités d'absorption ou de préservation des valeurs, des sous-systèmes identifiés comme prometteurs. En effet, certains scénarios peuvent absorber peu de tonnages, mais créer une forte valeur ajoutée ; alors que d'autres sont susceptibles d'embarquer de grandes quantités de matières au détriment de la préservation des valeurs contenues dans les OBJETS. Il est à noter que différentes variables ont un impact potentiel sur la distribution des scénarios comme les procédés utilisés, la demande pour un produit, les coûts de transports, les impacts environnementaux. Quels que soient les scénarios retenus et leurs niveaux d'implémentation, le processus de validation d'un scénario est soumis à différents facteurs (économiques, culturels, techniques, politiques, etc.) susceptibles d'impacter la prise de décision des parties prenantes.

4.1.4 Phase 4A : implémentation (test, pilote, massification).

Description de la phase 4A.

La phase d'implémentation a pour objectif de mettre en œuvre les scénarios élaborés en coordination avec les acteurs (Action 6) et de rendre faisable ou compréhensible le processus de supercyclage (Action 7).

La validation d'un scénario est une étape vers sa mise en œuvre. Cependant, valider un scénario ne signifie pas forcément qu'il fera l'objet d'une implémentation réelle. On peut tout d'abord distinguer différents niveaux d'implémentation qui distinguent des prises de risques allant de faible à forte : le test, la preuve de concept, la phase pilote, et enfin, selon la situation de l'entreprise, peut-être une massification d'un scénario de supercyclage. La massification ne signifie pas forcément le passage vers une grande échelle de production. En effet, plusieurs types de massification sont envisageables : des produits uniques ou sur-mesure ; des « séries différenciées » intégrant des variations ; des petites, moyennes ou grandes séries. Les niveaux d'implémentation permettent de se diriger par incrémentations successives vers la mise en œuvre d'un ou plusieurs scénarios de supercyclage. Afin de limiter la prise de risque, chaque niveau est évalué (Action 8). Cela permet notamment de recueillir des données pour améliorer la conception des PRODUITS et pour conforter ou invalider le passage vers une autre échelle de production. Ces niveaux d'implémentation correspondent aux boucles de rétroaction test, pilote, massification présentées dans la figure 10 en annexe.

Lorsqu'un gisement est évalué, plusieurs niveaux d'implémentation peuvent éventuellement se côtoyer en faisant cohabiter différents scénarios qui absorbent tout ou partie d'un gisement. Distinguer ces différents niveaux de prises de risques permet d'envisager divers degrés de mises en œuvre allant de l'expérimentation ponctuelle au scénario de rupture. L'objectif ne consiste pas à imposer brutalement un scénario de rupture, même s'il s'agit d'un scénario qui peut advenir au même titre que tous les autres si l'entreprise ou le territoire en fait le choix. Les scénarios de supercyclage sont envisagés comme des opportunités, qui ne s'excluent pas mais se complètent, de manière à pouvoir s'adapter progressivement à l'existant dans une perspective d'amélioration continue ou dans une perspective de rupture. S'engager dans le supercyclage suppose un changement de modèle, dont l'ampleur varie en fonction des scénarios implémentés. Dans une perspective plus globale, le modèle industriel qui produit les chutes et déchets doit être dépassé. Le fait de convoquer l'ensemble des propriétés, des qualités et des valeurs constitue un premier changement de paradigme, repenser le modèle de standardisation, limiter le nombre et l'intensité des opérations de transformation, ou miser sur approche multi-filière constituent d'autres éléments de rupture. L'objectif de ce travail est de chercher à identifier les solutions les plus pertinentes, relativement à l'entreprise ou au territoire étudié.

Dans un premier temps, la phase d'implémentation est simulée, c'est-à-dire que les matériaux, les procédés, les acteurs et la durée de l'implémentation sont représentés sous la forme d'un système à étudier. L'objectif de la phase d'implémentation simulée est d'augmenter les connaissances sur le système étudié, de manière à réduire la prise de risque dans la décision d'application. De ce fait, au lieu de mettre en œuvre des opérations de fabrication, l'implémentation simulée à recours à des moyens de représentation et d'analyse des scénarios³⁵, sans que cela n'impacte la situation existante. Une fois que les contours de ce

³⁵ De nombreux outils peuvent être utilisés pour étudier et simuler l'implémentation. Par exemple : une modélisation du système sous forme de diagrammes de flux, une représentation des produits (croquis, plans, modélisation 3D, etc.), une

système sont établis, un travail de modélisation des scénarios peut être envisagé. L'élaboration de diagrammes de flux permet d'identifier les procédés nécessaires et les quantités de matériaux réelles ou estimées qui traversent le système étudié en vue d'aboutir à la réalisation d'un PRODUIT. Ce séquençage permet de discrétiser le processus de production en actions distinctes et quantifiables relatives aux scénarios étudiés. Ainsi le diagramme de flux permet de produire des données essentielles à la compréhension du processus de production en modélisant le système et les flux qui le traverse. Ces flux sont constitués d'OBJETS, de matières extérieures neuves, de déchets et de PRODUITS. Une fois modélisés, les scénarios sont évalués en phase 4B.

Dans un second temps, une phase de changement est susceptible de se concrétiser grâce aux connaissances acquises dans la phase d'implémentation simulée. En effet, la connaissance liée aux changements encourage de passer par des phases transitoires qui valent preuve de concept : la réalisation de prototypes, la modélisation de scénarios et l'évaluation de ces derniers rassure les décideurs en leur apportant une meilleure visibilité sur de potentielles stratégies à mettre en place. Le passage vers une implémentation réelle ne signifie pas forcément pour l'entreprise de se heurter à des ruptures brutales de référentiel et / ou de paradigmes. Par la diversité des approches possibles, les scénarios de supercyclage ont la spécificité d'ouvrir de nombreuses pistes de développement qui peuvent venir consolider des scénarios existants, modifier certaines parties d'un PRODUIT ou initier de nouveaux partenariats extérieurs en vue de valoriser tout ou partie d'un flux de déchets. Si la phase d'implémentation se concrétise et occasionne une transformation de la situation existante (représentée par le scénario de référence), elle est alors qualifiée d'implémentation réelle. La décision d'implémentation réelle est prise par les acteurs sur la base des simulations et des résultats de l'évaluation. D'autres critères appartiennent également aux décideurs et peuvent motiver leurs décisions comme par exemple la gestion des risques, la stratégie d'entreprise, la politique, la déontologie ou l'esprit d'innovation.

Actions 6 et 7 : s'organiser et supercycler.

Afin de présenter les scénarios de supercyclage de manière claire, nous faisons le choix de construire des diagrammes de flux présentant le flux de matières (déchets, OBJETS, matières extérieures) et le flux d'informations associées. Dans ces diagrammes de flux, chaque scénario de supercyclage met en jeu des actions élémentaires définies avec différents niveaux de description (Famille ; Type ; Description ; Détail Process). Aux niveaux de description les plus détaillés (Description ou détail process) il est possible d'affiner les définitions en vue de s'adapter au système étudié. Par exemple, à ce niveau il est possible de différencier la nature du transport (transport lourd par camion, ou transport léger par camionnette), tri (manuel ou algorithmique) ou celle du conditionnement (emballé avec protection, non emballé, en vrac, etc.).

Les actions élémentaires modèles et les efforts associés sont détaillées dans le tableau 2 en annexe.

cartographie représentant la reterritorialisation des activités, une caractérisation des matériaux, une identification des procédés, etc.

Les actions élémentaires sont classées selon les familles et les types suivants :

FABRIQUER (Assembler) ; FABRIQUER (finir) ; FABRIQUER (mettre en forme) ; PREPARER (nettoyer) ; PREPARER (contrôler) ; PREPARER (réparer) ; TRIER (séparer) ; TRIER (désassembler) ; TRIER (déconstruire) ; TRIER (calibrer) ; STOCKER (conditionner) ; STOCKER (référencer) ; STOCKER (entreposer) ; COLLECTER (transporter) ; DISTRIBUER (donner) ; DISTRIBUER (vendre) ; DISTRIBUER (échanger).

L'action 6 « ORGANISER pour supercycler » s'apparente au « *sourcing* », « extraction », « transport » présente dans les cycles de vie. L'action 7 « SUPERCYCLER » est une description de la stratégie de fabrication adoptée. La Figure 37 présente une description générale des stratégies de supercyclage modélisées sous forme de diagrammes de flux avec un focus large. Ce diagramme détaille les actions incluses dans la phase d'implémentation (Phase 4a (Figure 10, ANNEXE)). Cette phase décrit un système traversé par des flux de matières qui subissent différentes actions de transformation. Les OBJETS y sont conservés ou transformés en plusieurs étapes, d'abord en semi-PRODUIT puis en PRODUITS, de manière à pouvoir être valorisés au cours du processus de supercyclage. Ce processus est décomposé en actions élémentaires qui permettent de décrire, de quantifier et d'évaluer le système étudié. Ce dernier est composé de deux actions de focus large (ORGANISER pour supercycler (Action 6) et SUPERCYCLER (action 7)).

ORGANISER : comprend le tri, la collecte et la préparation en vue du supercyclage.

SUPERCYCLER : comprend l'ensemble des actions de transformation et/ou de préservation qui permettent d'augmenter les valeurs des OBJETS au cours d'un processus de fabrication.

OBJET : est défini par un certain nombre de critères de tri et inversement : ce sont

éventuellement les critères de tri qui permettent de définir la nature des OBJETS à collecter. Un OBJET : se distingue du déchet car il est intégré dans un processus de supercyclage.

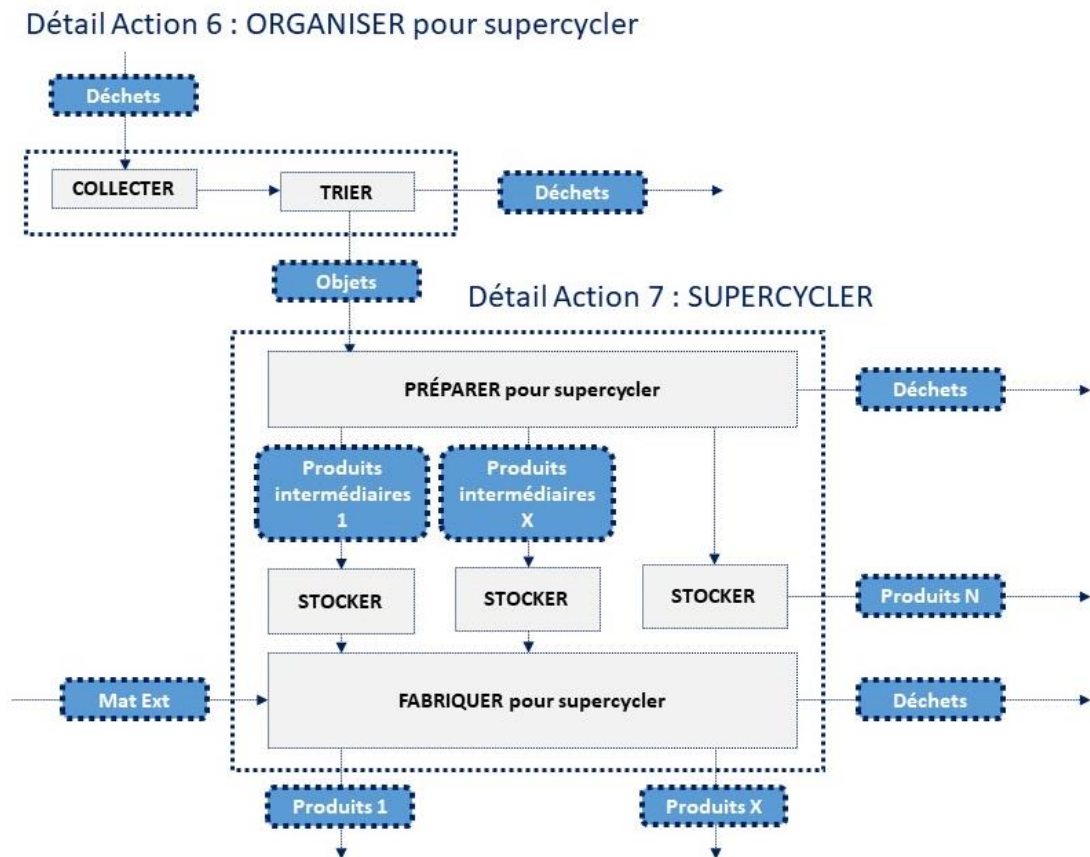


Figure 37 : détail des actions 6 et 7 : description générale des stratégies de supercyclage.

Les actions relatives à l'action 6 sont décrites au paragraphe 0 ; celles relatives à l'action 7 sont décrites au paragraphe 0

Action 6 : organiser pour supercycler.

L'action 6 comprend l'étape de collecte et de tri. Elle a pour objectif de définir les stratégies de collecte et de tri à adopter en vue d'obtenir les quantités et les qualités d'OBJETS permettant de répondre aux exigences du projet de fabrication. Ces exigences sont exprimées sous la forme de critères relatifs à la posture de l'entreprise. Il peut y avoir deux postures : soit on a un gisement que l'on cherche à valoriser, dans ce cas le gisement conditionne en grande partie la stratégie à adopter et la nature des projets qui en découle ; soit on recherche les gisements souhaités en fonction de critères préétablis par les besoins d'un projet. Selon la posture adoptée, l'entreprise peut établir une stratégie de collecte et de tri des déchets, selon des critères relatifs à ses besoins de manière à pouvoir les utiliser dans un processus de fabrication.

La collecte se définit par sa fréquence et par la distance parcourue par les moyens de transports ainsi que par le volume ou la masse d'OBJETS collectés. Sa fréquence est susceptible d'être impactée par le volume des déchets collectés ou par la disponibilité des déchets produit et recherchés par l'entreprise qui collecte. Elle requiert également des

moyens humains susceptibles de varier selon les stratégies adoptées, par exemple s'il s'agit d'une collecte préservante ou non préservante. Différentes méthodes de collecte peuvent être envisagées en fonction de la provenance ou de la fréquence de production des déchets à collecter, mais également en fonction de la nature des transformations envisagées sur le flux collecté :

- La collecte sur site : l'entreprise décide de valoriser son propre gisement de déchets.
- La collecte en « Porte à Porte » (PAP) : l'entreprise collecte dans différents lieux (chez d'autres entreprises, chez des particuliers, etc.).
- La collecte « Points d'Apport Volontaires » (PAV) : des particuliers et/ou des entreprises déposent les déchets à valoriser sur des points centralisés.
- La collecte par « Apport Volontaire » : l'entreprise collecte depuis un lieu déterminé des déchets que les autres entreprises (ou particuliers) lui apportent.

A l'instar de la collecte, l'organisation du tri est relative au scénario étudié. Le tri repose sur des critères qualitatifs et / ou quantitatifs prédéfinis par l'entreprise. Ils sont liés à la nature des OBJETS que l'entreprise souhaite conserver dans un processus de fabrication. L'effort de tri repose sur des critères relatifs au scénario. Ces critères dépendent de la nature des OBJETS collectés (en mélange, pré-triés, assemblés, etc.), de leur répartition géographique (si les déchets sont triés sur site ou en externe), et des actions de fabrication envisagées par l'entreprise pour aboutir à un PRODUIT supercyclé. Pour l'action de TRIER, quatre sous actions ont été définies : « Séparer », « désassembler », « déconstruire » et « calibrer ».

Outils de l'action 6 : les critères de collecte et de tri des OBJETS.

Les critères de collecte reposent sur les propriétés, les qualités et les quantités d'OBJETS à collecter sur un territoire défini. Les critères de tri sont relatifs à la nature des OBJETS entrants dans le système étudié. Cela peut être des critères fondés sur différents paramètres tels que les propriétés des OBJETS (géométriques, sensorielles, matérielles, etc.), les qualités des OBJETS (les valeurs associées, etc.) ou les coûts associés aux opérations de tri (temps de séparation, nécessité d'investissement, etc.).

Le tri peut se faire manuellement ou nécessiter d'investir dans des outils ou des installations plus ou moins onéreuses. Cela dépend de la quantité traitée (masse et volume), de la complexité des OBJETS collectés et de la nature de la valorisation prévue. En effet, des déchets en mélange ou des déchets qui exigent un effort de déconstruction (séparation, désassemblage, déconstruction, calibrage) nécessiteront davantage de main d'œuvre et éventuellement le recours à des outils spécifiques. La méthode de tri envisagée est relative à la nature du scénario envisagé par l'entreprise. La nature du gisement, les quantités traitées ou la temporalité de production des déchets sont susceptibles d'avoir un impact sur les décisions et sur le choix des modalités de valorisation du gisement. Dans l'hypothèse où de multiples scénarios absorbent de faibles quantités, les stratégies de tri seront impactées et potentiellement aussi nombreuses que les scénarios envisagés.

Des quantités importantes nécessitent d'avoir recours à des engins de transport, de levage et de manutention adaptés. De plus, les installations doivent être dimensionnées pour absorber les quantités estimées. Quelles que soient les quantités triées, les consignes de tri relèvent du bon sens et de la législation pour garantir la sécurité du personnel et limiter les impacts sur

l'environnement. Il est également possible de concevoir et réaliser des outils et équipements, plus ou moins mécanisés d'aide au tri et à la manipulation des déchets, en vue de faciliter le travail des opérateurs de tri.

Description des actions de « ORGANISER pour supercycler ».

Les actions incluses à ORGANISER pour supercycler, sont COLLECTER et TRIER (Figure 37).

COLLECTER : action de ramassage qui consiste à récupérer des substances ou des OBJETS, en vue de leur transport vers une installation de traitement.

TRIER : action de séparer, de désassembler ou de déconstruire les OBJETS ou les déchets en fonction de critères prédéfinis (matériaux, ISBN, couleur, format, etc.).

(Séparer) : action de séparation sans transformation (niveau 1)

(Désassembler) : action de transformation partielle en vue de la séparation (niveau 2)

(Déconstruire) : action de transformation totale en vue de la séparation (Niveau 3)

(Calibrer) : action de standardisation d'un OBJET.

Résultat de l'action 6 : l'obtention d'un flux trié à destination d'une opération de fabrication.

Quelle que soit la stratégie de collecte et de stockage (centralisée ou décentralisée), l'action 6 a pour résultat de rendre les déchets utilisables dans un scénario de supercyclage. Les déchets passent alors au statut d'OBJET et pourront être répartis dans les différents scénarios de fabrication validés lors du processus de sélection (Action 5).

Action 7 : supercycler

Le processus de supercyclage a pour objectif de préserver et / ou d'augmenter les valeurs contenues dans un gisement d'OBJET. Ce processus se décompose en trois actions principales : La préparation en vue du supercyclage, le stockage, et enfin, la fabrication de nouveaux produits. La préparation en vue du supercyclage a pour objectif de s'assurer que les propriétés, les qualités et les valeurs des OBJETS sont conformes aux exigences requises pour entrer dans un processus de fabrication. Ils subissent alors des actions de contrôle, de nettoyage ou de réparation selon l'état dans lequel ils sortent du processus de tri. Des procédures de contrôle qualité ou de caractérisation seront parfois nécessaires pour s'assurer que les propriétés et les qualités des OBJETS sont bien conformes aux performances et aux standards requis pour les usages auxquels ils se destinent. Une fois l'action de préparation terminée, les OBJETS sont conditionnés, référencés³⁶ et entreposés. Ils sont alors disponibles et prescriptibles par les concepteurs qui disposent désormais des informations et des garanties nécessaires pour pouvoir les incorporer dans un processus de conception / design et de fabrication. Les OBJETS seront préservés et / ou mis en forme, assemblés et finis selon les préconisations transmises par les concepteurs pour devenir des PRODUITS, des matières à création [SAINT-PIERRE, 2022] [MONGIN, 2022], des semi-PRODUITS, semi-objets, voire des

³⁶ Les fiches de référencement sont susceptibles de varier selon la nature des OBJETS ou des PRODUITS en question. Le référencement permet notamment de connaître l'état du stock disponible, car les OBJETS sont associés à une référence qui permet de les identifier et d'en connaître les caractéristiques. La fiche matériau en annexe (Tableau 1, ANNEXE) présente de nombreux critères susceptibles d'être associés au référencement des OBJETS.

composants qui pourront transiter dans les canaux de distribution afin d'être commercialisés dans leurs nouvelles formes.

Outils de l'action 7 : modéliser des scénarios de supercyclage

Afin de décrire l'action de supercyclage, nous nous reposons sur l'élaboration de diagrammes de flux destinés à représenter l'ensemble du système de production étudié, de la préparation en vue du supercyclage à la distribution de nouveaux PRODUITS. Les scénarios de supercyclage sont représentés sous la forme de diagrammes de flux dont les entrées et les sorties sont quantifiées et définies. Les entrées peuvent être des OBJETS ou des matériaux neufs. Les sorties sont des déchets, des objets artisanaux, des semi-PRODUITS, des PRODUITS, ou des œuvres. Les actions qui jalonnent le processus de production sont également définies de manière à écarter toute ambiguïté sur l'interprétation des actions. Ces diagrammes nous permettent de quantifier les flux qui traversent le système, d'identifier les procédés utilisés et les potentielles options de fabrication qui se présentent à l'entreprise. Enfin, cette représentation nous sert de socle de référence pour le travail d'évaluation des scénarios de supercyclage.

Description des Actions de « SUPERCYCLER » pour le cas d'étude LIVRES.

Le diagramme de flux présenté dans la Figure 38 est appliqué au cas de supercyclage des livres. Le vocabulaire utilisé est adapté à la valorisation du gisement de livres.

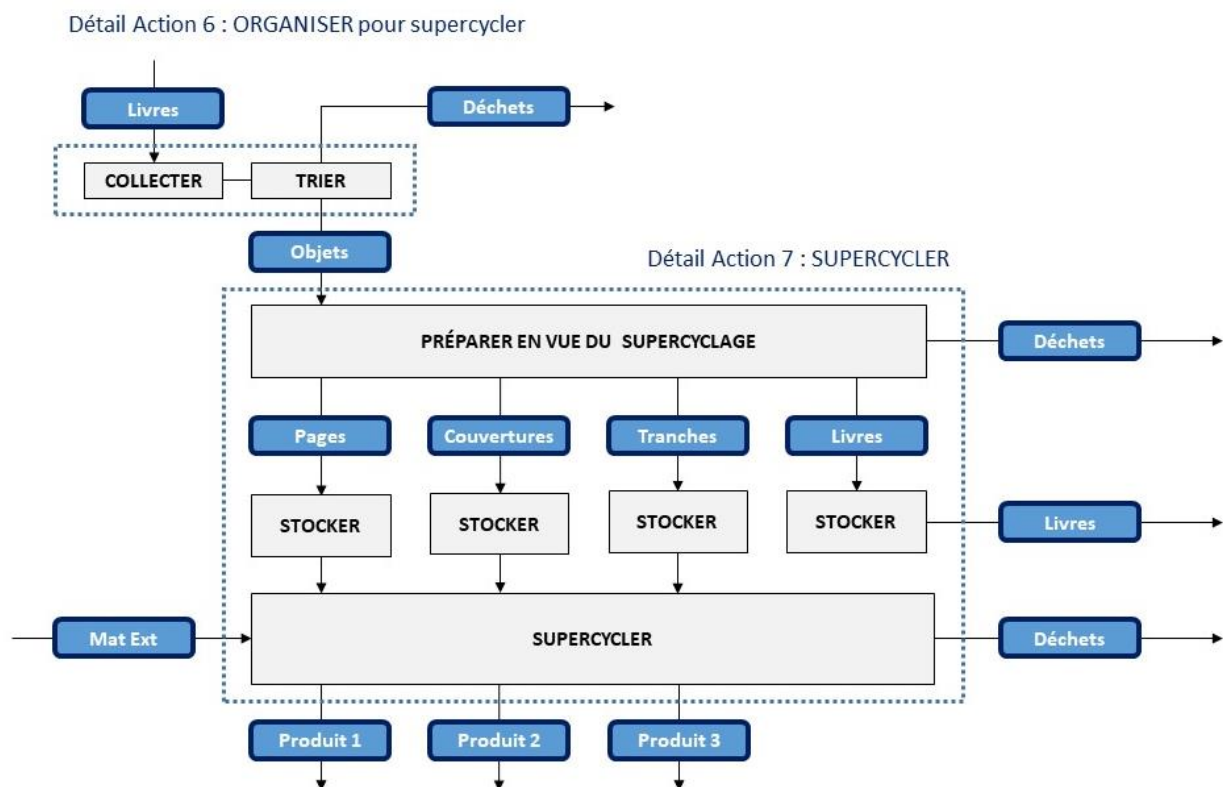


Figure 38 : diagramme de focus Large pour le supercyclage des livres.

Les diagrammes de flux contiennent des actions de focus large, moyen et proche. Ces actions sont annotées avec le code suivant :

PREPARER : action de focus Large.

(Contrôler) : action de focus Moyen

[Scan ISBN] : action de focus proche.

Les actions incluses à SUPERCYCLER sont PREPARER, STOCKER, FABRIQUER, DISTRIBUER.

PREPARER : action de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou PRODUITS qui ne sont pas des déchets sont préparés de manière à être utilisés sans autre opération de prétraitement.

(Nettoyer) : action de nettoyage mécanique ou chimique.

(Contrôler) : action de contrôle visuel.

(Réparer) : action de réparation.

STOCKER : action de conditionner, de référencer et d'entreposer les OBJETS en vue de les rendre disponibles.

(Conditionner) : action de conditionner.

(Référencer) : action de référencer.

(Entreposer) : action d'entreposer.

FABRIQUER : action de mettre en forme, de finir ou d'assembler.

(Mettre en forme) : action de fabrication qui engendre une modification de la mise en forme.

[Broyer] : action de broyage.

[Scier] : action de découpe avec une scie.

[Cisailler] : action de découpe avec une cisaille.

[Laminer] : action de laminage.

[Presser] : action de pressage.

(Assembler) : action de joindre des pièces par un procédé mécanique ou chimique.

[Coller] : action de collage.

(Finir) : action de finition.

[Peindre] : action de peindre.

DISTRIBUER : action de donner, de vendre ou d'échanger.

(Donner) : action de donner des OBJETS sans contrepartie financière.

(Vendre) : action de vendre des OBJETS contre une rémunération financière.

(Echanger) : action d'échanger des OBJETS contre des biens ou des services.

Résultat de l'action 7 : représentation des scénarios de supercyclage.

Les scénarios modélisés sont des variations du scénario de référence ou des représentations de nouveaux scénarios. Une fois que l'ensemble du processus est modélisé, les scénarios peuvent être évalués et comparés avec le scénario de référence (Résultat 2).

Résultat 7 : PRODUITS.

Le PRODUIT est l'aboutissement du processus de supercyclage, et à ce titre, il fait est évalué. Le PRODUIT est également le résultat du processus d'implémentation (Phase 4A). Il peut être dans une phase test, pilote ou dans une phase de massification si les résultats des premières phases (test et pilote) sont convaincants. L'évaluation permet notamment de guider les prises de décision pour envisager le passage vers une plus grande échelle de production ou vers la réalisation de PRODUITS, de semi-PRODUITS, de matières premières de deuxième vie uniques et sur mesure. Aussi, les PRODUITS sont évalués pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences des tests de qualité et aux critères de normalisation de leur univers. Le PRODUIT (du prototype à la fabrication en série) est une source de données importante dans la mesure où il permet d'obtenir un retour d'expérience sur l'ensemble de son cycle de vie. Ainsi, le PRODUIT permet d'obtenir des données essentielles à l'évaluation des coûts, environnementaux, économiques et sociaux engendrés pas sa fabrication.

4.1.5 Phase 4B : évaluation (test, pilote, massification).

Description de la phase 4B.

La phase d'évaluation des scénarios de supercyclage se fait en parallèle de la phase d'implémentation. Elle a pour objectif de fournir des données permettant l'évaluation de manière absolue ou relative, et ceci à plusieurs niveaux, allant de la phase test, à la phase pilote, puis tendre vers la massification ou le sur-mesure. Tout comme la phase d'implémentation, la phase d'évaluation peut se dérouler en plusieurs temps en fonction du niveau de prise de risque par les acteurs impliqués et du niveau de précision souhaité. De la collecte des déchets à la fabrication de nouveaux PRODUITS, la phase d'évaluation couvre la totalité du processus de supercyclage, mais selon les besoins, l'évaluation peut se concentrer sur des parties du système étudié de manière à renforcer les connaissances sur les sous-systèmes identifiés comme prometteurs. Il est par ailleurs possible de distinguer deux temps d'évaluation :

1- L'évaluation « avant implémentation ».

L'évaluation « avant implémentation » est utilisée pour qualifier des scénarios en amont de la mise en œuvre d'une stratégie de supercyclage. Cette évaluation se concentre sur les résultats de la simulation du processus de supercyclage (phase 3). Elle vise à fournir des éléments de décision avant qu'un scénario ne soit implémenté ou qu'il change niveau. Le changement niveau d'implémentation porte à la fois sur la précision des évaluations mais aussi sur le changement de phase (de test à pilote, de pilote à massification, de pilote à réel).

2 – L'évaluation « après implémentation ».

L'évaluation « après implémentation » est utilisée dans un suivi de l'implémentation de tout ou partie du scénario déjà mis en œuvre. Un scénario peut être testé à petite échelle (test pilote), puis extrapolé pour imaginer une plus grande échelle (massification). Le passage d'une échelle à l'autre nécessite des évaluations successives, de manière à valider ou à invalider un scénario. L'objectif est d'identifier des pistes d'amélioration d'un scénario ou permettre la comparaison avec d'autres scénarios.

Même si deux temps d'évaluations sont ici distingués, de nombreux temps viennent ponctuer et enrichir le processus d'évaluation. Les discussions avec les acteurs (Résultat 5 et 6), les boucles de rétroactions (action 9), ainsi que la prise en compte des avis d'acteurs permettent d'obtenir des retours d'expériences et participent au processus d'évaluation et de prise de décision.

L'évaluation repose sur quatre familles d'indicateurs : matières, de qualité, de dynamique territoriale et économiques. Le livrable de cette quatrième phase se matérialise par l'analyse, l'illustration et l'interprétation des résultats obtenus, de manière à pouvoir les communiquer clairement aux acteurs en charge de la prise de décision. Chaque indicateur permet d'exprimer si le scénario est favorable au regard de l'indicateur concerné.

Action 8 : évaluer le scénario de supercyclage.

L'implémentation réelle ou simulée (Phase 4A) est soumise à un travail d'évaluation (action 8) de manière à comparer la situation existante (Résultat 2) avec les scénarios de supercyclage sélectionnés par l'entreprise via les Actions 6 et 7. Le Résultat 4, « évaluation de N scénarios de supercyclage » permet cette comparaison. Le processus d'évaluation donne lieu à des discussions sur l'étendue des implications qu'engendrent la mise en œuvre de stratégies de supercyclage : d'abord, sur la nature du tissu industriel territorial qui est interrogé sous le prisme de sa capacité à valoriser des matériaux de deuxième vie (Résultat 5) ; ensuite sur les méthodes de conception (Résultat 6) dont les ressorts, ordinairement tournés vers la production de nouvelles formes destinées à satisfaire une fonction, s'orientent ici davantage vers un processus de reconception, dont l'objectif est d'identifier les fonctions potentielles des formes déjà produites comme vecteur de nouvelles mises en forme en vue de renouveler leurs usages.

Outils de l'action 8 : les familles d'indicateurs.

Les outils de l'action 8 permettent l'évaluation des scénarios de supercyclage. Ils sont identiques à ceux de l'action 2 (évaluer le scénario de référence). Nous utilisons les mêmes familles d'indicateurs de manière à permettre la comparaison entre le scénario de référence et les scénarios de supercyclage.

Ces indicateurs sont compilés dans un tableur conçu pour attribuer une notation à chaque scénario en fonction de chaque famille d'indicateurs. Le tableur contient également une feuille destinée au bilan global des indicateurs. Cette dernière permet de centraliser l'ensemble des notations (le scénario de référence et les scénarios de supercyclage) de manière à comparer les résultats et à en faire la synthèse.

Résultat 4 : évaluation de N scénarios de supercyclage pour une entreprise.

Le résultat 4 est le fruit de l'évaluation des scénarios de supercyclage. Il repose sur le travail de modélisation des systèmes de production (les diagrammes de flux) et sur l'usage des quatre familles d'indicateurs renseignés par des données entreprises ou des données extérieures. Le Résultat de cette évaluation doit faciliter le processus de prise de décision et limiter les risques

pour l'entreprise qui décide de se lancer dans l'implémentation réelle d'un scénario de supercyclage.

Lorsque plusieurs scénarios de supercyclage sont identifiés, l'évaluation devient une aide pour répartir les flux sur différentes options de fabrication et / ou de recyclage. En effet, même si l'objectif est de valoriser la totalité d'un gisement via le supercyclage, en recycler une partie reste envisageable au même titre que toute autre option de transformation. L'objectif principal est de pouvoir rester agile et d'avancer par itérations successives, en vue de réduire progressivement la part de matériaux qui part dans les filières de gestion des déchets.

Résultat 5 : discussion de l'implémentation de supercyclage sur le tissu industriel territorial.

Le Résultat 5 a pour objectif de discuter les implications des scénarios implémentés avec les parties prenantes. La mise en œuvre de scénarios de supercyclage a des impacts à différents niveaux sur le tissu productif local. Les implémentations peuvent être pensées à court terme, de manière à épuiser un gisement ponctuel, ou sur le long terme si les gisements sont suffisamment stables ou s'ils reposent sur des cycles identifiés. De plus, les impacts sur le tissu productif local sont étroitement liés aux spécificités territoriales. De ce fait, les stratégies envisagées peuvent activer de multiples canaux de fabrication dont l'échelle varie en fonction du tissu productif local et/ou de ses évolutions possibles. Ainsi, certaines stratégies seront axées sur des logiques centralisées, mettant à contribution des outils industriels capables de valoriser des quantités importantes de matériaux. D'autres, reposeront sur de multiples acteurs formant un maillage décentralisé, tels que les artisans, les très petites entreprises (TPE), les écoles d'art, de design ou d'ingénierie, les lycées professionnels, les associations, les particuliers, etc. L'articulation des échelles est également envisageable de manière à ouvrir la voie vers une plus grande adaptabilité du tissu productif local à l'évolution des gisements, des outils et des technologies. Les stratégies envisagées peuvent se faire en plusieurs temps, intégrer de nouveaux acteurs, ouvrir de nouveaux marchés, stimuler l'innovation technique et territoriale, ayant en retour des conséquences sur la nature des implémentations. Ainsi, les discussions ont pour objectif de questionner les implémentations à la lumière de leur évaluation, de manière à les mettre en perspective en cohérence avec les avis des différents acteurs.

Résultat 6 : discussion de l'implémentation de supercyclage sur le processus de conception.

Nous avons vu que la mise en œuvre de stratégies de supercyclage a des implications sur le tissu productif local ce qui ouvre la voie vers de nouvelles possibilités dont les concepteurs peuvent s'emparer. Penser le PRODUIT comme le résultat d'une succession d'étapes de préservation, au lieu de le penser comme une transformation systématique, modifie la perspective dans laquelle se trouvent les concepteurs. Cela peut amener de nouveaux savoir-faire ; de nouvelles méthodes de travail ; de nouvelles techniques ; voire contribuer au développement de nouveaux outils. Viser la préservation totale est un objectif idéal qui doit être recherché de manière à introduire une certaine parcimonie dans le niveau de transformation nécessaire pour atteindre un objectif. Ce changement de perspective implique diverses modifications du processus de conception qui ont été discutées au chapitre 2. Ces modifications sont mises en relation avec les scénarios envisagés et sont discutées avec les acteurs de manière à adapter le processus de conception aux objectifs recherchés et aux contraintes multiples qui jalonnent le processus de conception (exemple de contraintes de

conception : environnementales, économiques, sociales, techniques, réglementaires, sanitaires).

Action 9 : boucles de rétroaction multi-échelles.

Le diagramme de vision globale propose un cheminement sur lequel il est possible de revenir. Les boucles de rétroactions (Action 9) permettent d'évaluer les différentes phases allant de la recherche, au prototype, puis au PRODUIT final. Ainsi, il est préférable d'adapter le schéma en fonction des options choisies. Il est possible d'aller vite sur certaines phases en acceptant de ne pas avoir toutes les données. Si, le résultat obtenu n'est pas convaincant ou satisfaisant, il est possible de revenir à des étapes précédentes pour collecter des données plus précises et augmenter les connaissances en fonction des résultats obtenus dans les premières phases de travail. Ceci permet de travailler dans un contexte d'amélioration continue, à l'image des Méthodes d'aide à l'innovation (MAL'IN) [NADEAU, LEDOUX, 2014]. La collecte de données peut s'enrichir à chaque phase, ce qui permet de réaliser rapidement les premières phases, puis d'affiner le travail sur les phases suivantes. Ceci permet notamment de ne pas faire de sur-qualité là où ce ne serait pas nécessaire. Par exemple, lorsque les scénarios sont encore inconnus, produire une information très précise sur les OBJETS en phase de diagnostic serait une perte de temps si ces deniers se destinent finalement au recyclage ou à l'enfouissement. Pour éviter ce type de problèmes, des boucles de rétroaction sont suggérées pour actualiser chaque phase en fonction des résultats obtenus. Il est donc intéressant de produire rapidement un foisonnement de scénarios, susceptibles d'être implémentés à différentes phases et / ou échelles pour activer l'aspect multi filières et les partenariats. Les données nécessaires et suffisantes pour identifier les scénarios et les différentes phases, sont amenées à varier selon le niveau de maturité de l'entreprise dans la démarche de supercyclage.

4.2 Description des indicateurs d'évaluation d'un scénario.

4.2.1 Description des 4 familles d'indicateurs

Afin de pouvoir évaluer un scénario, quatre familles d'indicateurs ont été développées : les indicateurs matières, les indicateurs économiques, les indicateurs territoriaux et les indicateurs de qualités.

Afin de quantifier ces indicateurs, le scénario de supercyclage étudié et le scénario de référence associé sont décrits à l'aide d'un diagramme de flux exprimant les cheminements de matières et d'informations mis en jeu (Figure 39). En particulier, comme présenté dans la Figure 39 le processus de transformation des matériaux est décrit à l'aide d'actions élémentaires modèles décrites dans le tableau 2 en annexe.

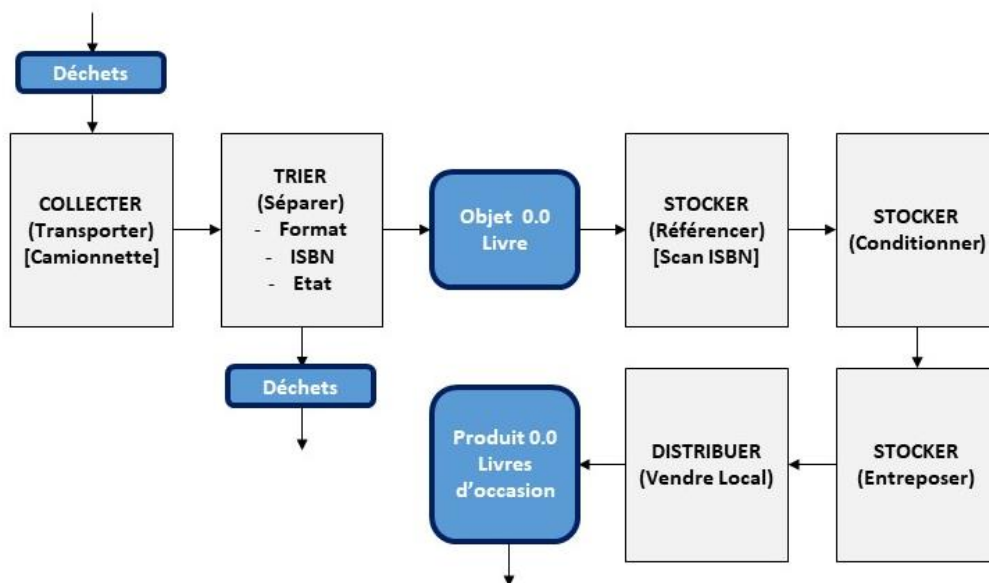


Figure 39: exemple d'un diagramme de flux décrivant un scénario de supercyclage (scénario 0.0).

Pour un scénario donné, les flux de matières mis en jeu dans le processus peuvent être caractérisés par expérimentation (prototypage, présérie...), par recherche documentaire ou par modélisation. Cette caractérisation des flux de matières permet d'obtenir les informations de quantification et qualification.

Afin de calculer les indicateurs pour chacun des scénarios étudiés, une base de données liées aux actions élémentaires de supercyclage est construite en amont (Tableau 2, ANNEXE). Pour calculer les indicateurs, des données sources sont nécessaires. Dans notre cas les données utilisées proviennent essentiellement de la base de données GRANTA, mais il est possible de construire cette base de données différemment. Dans ce travail, les données suivantes ont été sélectionnées pour le calcul des efforts : les coûts moyens humains, les coûts équipement, les coûts outillage, et enfin, la capacité à absorber du volume. Les efforts sont calculés en faisant la moyenne pondérée des efforts d'investissement, des efforts humains et des efforts de fonctionnement. En fonction des OBJETS et des PRODUITS considérés, l'unité de mesure peut être différente (unité de masse, unité de volume, unité fonctionnelle).

En effet, dans le cas où les OBJETS seraient très légers et/ou très volumineux, l'unité de volume peut être favorisée [GOBBO, 2015 (a)]. Cette unité est par ailleurs plus adaptée dans le cas où les OBJETS seraient des poudres ou des liquides. Ainsi le PRODUIT peut-être le résultat d'un mélange de différents liquides ou de poudres provenant d'OBJETS et de matières extérieures. L'unité de volume est également l'unité favorisée lorsqu'il s'agit de transport ou de stockage de manière à anticiper les contraintes logistiques.

L'unité fonctionnelle serait appropriée si l'on compare des performances fonctionnelles recherchées pour l'élaboration de PRODUITS alors que les solutions techniques pour y répondre sont nombreuses. La norme ISO 14044, définit l'Unité Fonctionnelle de la manière suivante : « *Performance quantifiée d'un système de produits, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV* ». Cela permet de comparer différentes solutions ayant des performances fonctionnelles équivalentes, et ainsi, privilégier celles qui ont l'impact environnemental le plus faible pour une fonction donnée.

Pour l'étude « livre », nous choisissons de mesurer en unité de masse.

M_{objet} : masse d'OBJETS entrant dans le processus.

M_{ext} : masse de matière extérieure neuve entrante dans le processus.

M_{chute} : masse de chutes générées pendant le processus.

$M_{produit}$: masse du PRODUIT avec $M_{produit} + M_{chute} = M_{objet} + M_{ext}$

4.2.2 Les indicateurs matières

Nous avons défini deux indicateurs liés aux flux de matières mis en jeu dans le scénario de supercyclage (Figure 11, ANNEXE) :

Ces deux indicateurs permettent de différencier des scénarios en fonction des quantités d'OBJETS ou de matières neuves utilisées dans la fabrication d'un PRODUIT. En effet, nous avons identifié dans la littérature qu'il existait un vide sur l'existence d'outils destinés à donner une mesure des capacités d'un système à faire usage de matériaux de deuxième vie. L'étude de la bibliographie a mis à jour de nombreux indicateurs de mesure de la circularité des matériaux. Or, nous avons constaté que les indicateurs existants ne proposent pas de mesure pour évaluer l'incorporation de matériaux peu ou pas transformés. Par ailleurs, les indicateurs existants, comme la « *productivité matière*³⁷ » ou encore « *l'indicateur d'utilisation cyclique des matières*³⁸ » [MAGNIER et al. 2017] sont destinés à des évaluations macroéconomiques, à l'échelle de l'état ou à des échelles internationales, ce qui rend leur appropriation difficile à l'échelle d'une entreprise ou de communautés de communes par exemple.

Même si les indicateurs de performances opérationnelles (IPO) « *fournissent des informations sur la performance environnementale relative aux opérations d'un organisme.* » ; ces indicateurs « *concernent, notamment, "les entrants" et "les sortants" de l'entreprise (consommation et rejets...).* » [BAURAING et al. 2000]. Ainsi, les indicateurs relatifs aux matériaux vont principalement se concentrer sur « *les quantités de matériaux utilisés par*

³⁷ « *La productivité matières est le ratio rapportant le produit intérieur brut (PIB) à la consommation intérieure de matières (DMC, domestic material consumption). Cet indicateur permet de mesurer la transition vers un système économique plus économe en ressources. Cet indicateur fait partie des cibles relatives aux objectifs de développement durable 2030 définies par l'ONU.* » [MAGNIER Céline et al., 2017]

³⁸ « *L'indicateur d'utilisation cyclique des matières présente la part des déchets valorisés sous forme de matière rapportée au besoin en matière de l'ensemble de l'économie* » [MAGNIER Céline et al., 2017]

unité de produit, quantité d'eau consommée par unité de produit... ». Se faisant, il est alors impossible de déterminer la proportion de matériaux préservés ou partiellement transformés, qui est intégrée aux stratégies de production. C'est pour ces raisons que nous avons fait le choix de développer des indicateurs matières capables de mesurer plus précisément la part de matériaux de deuxième vie intégrée dans le PRODUIT (« fraction massique d'OBJETS dans le PRODUIT ») ou encore, la part de matériaux neufs ou recyclés utilisés dans le PRODUIT (« fraction massique de matières extérieures dans le PRODUIT »). De plus, le calcul de la masse de chutes occasionnée par le processus de production, permet de donner une estimation de la capacité du système étudié à exploiter au maximum les spécificités formelles des matériaux entrants et donc à limiter la production de déchets. Ces indicateurs ont un potentiel d'application adapté à diverses échelles de conception (produit / architecture / urbanisme) et procurent des éléments d'aide à la décision en vue de soutenir le développement de stratégies intégrées dans le tissu productif local.

Avec les indicateurs matière, nous cherchons à donner une mesure de la capacité des PRODUITS à limiter les consommations de matières premières et de semi-produits neufs, tout cherchant à augmenter la proportion d'OBJETS utilisés dans la fabrication de nouveaux produits finis ou semi-finis.

Le taux d'absorption matière : $R_{ext} = 100 \times \frac{M_{objet}}{M_{objet} + M_{ext}}$

L'indicateur R_{ext} permet de calculer la part d'OBJETS absorbés par un PRODUIT dans un scénario. L'indicateur R_{ext} permet de déterminer si un scénario absorbe plus d'OBJETS que de matières extérieures.

On observe que :

Si R_{ext} est supérieur à 50 %, le scénario absorbe plus d'OBJETS que de matières extérieures. Plus la masse d'OBJET est faible, plus R_{ext} est proche de 0.

Le taux d'absorption PRODUIT : $R_{absorb} = 100 \times \frac{M_{produit}}{M_{objet} + M_{ext}}$

L'indicateur R_{absorb} permet d'évaluer la capacité d'un scénario à transformer des OBJETS en PRODUITS sans générer de déchets. L'indicateur R_{absorb} permet de déterminer si un scénario génère plus de PRODUITS que de chutes.

On observe que :

Si R_{absorb} est supérieur à 50 %, le scénario génère plus de PRODUIT que de chutes.

Si R_{absorb} est inférieur à 50 %, le scénario génère plus de chutes (déchets) que de PRODUITS.

Les indicateurs matières ont pour objectif d'évaluer le rendement des matières dans un scénario existant ou prospectif. Le calcul de ces indicateurs est détaillé dans la figure 11 de l'annexe.

4.2.3 Les indicateurs économiques

Afin d'évaluer les aspects économiques de chaque scénario, trois indicateurs économiques ont été définis (Figure 12, ANNEXE) :

Indicateur économique « Logistique » : $ECO_{Logistique}$

Indicateur économique « Produit » : $ECO_{Produit}$

Indicateur économique « Process » : $ECO_{Process}$

Ces indicateurs économiques se penchent sur des spécificités peu explorées par les indicateurs économiques traditionnels. En effet, ce travail suppose un changement de paradigme dans lequel nous cherchons à préserver l'intégrité formelles des OBJETS en circulation en vue de les intégrer à de nouveaux PRODUITS. Préserver la mise en forme des OBJETS de deuxième vie, permet de limiter les prélèvements de matières premières dans la biosphère, de réduire les quantités de déchets à traiter et d'économiser de l'énergie en valorisant l'énergie dépensée lors du processus de production initial. Or, si les coûts associés à l'extraction, au transport, à la mise en forme des OBJETS, ou au traitement des déchets diminuent, ces derniers se trouvent partiellement ou totalement remplacés par d'autres coûts qu'il est nécessaire d'identifier, de quantifier et d'évaluer.

Ceci nécessite par exemple de reconsidérer l'importance attribuée aux efforts de stockage car, contrairement à un processus économique classique qui aura tendance à favoriser une organisation en flux tendu afin de limiter au maximum le recours au stockage (les ressources étant stockées dans la biosphère, l'extraction suit la demande), la logique de supercyclage va, quant à elle miser sur la nécessité de stocker les ressources avant qu'elles ne soient détruites. Ceci afin de rendre le gisement disponible, d'augmenter les connaissances sur les OBJETS et permettre la création de nouvelles valeurs. Dans la logique de gestion des déchets, le stockage est considéré comme un problème ; l'objectif est de réduire par tous les moyens possibles les quantités de déchets à stocker. Dans la logique de supercyclage, le stockage est une condition qui permet la création et/ou l'augmentation des valeurs. Il est à noter que même si le stockage est nécessaire à l'élaboration de stratégies de supercyclage, il est essentiel de chercher à limiter le temps de stockage, à optimiser, à rationaliser, voire à réduire le besoin de stockage en ciblant la collecte, en s'appuyant sur des stratégies d'écoconception ou en identifiant précisément les exutoires permettant de valoriser le flux d'OBJETS sous forme de PRODUITS. Les coûts associés au tri, à la caractérisation ou au stockage des OBJETS auront tendance à être plus conséquents pour des scénarios de supercyclage que pour des scénarios classiques avec usage de matières neuves. De plus, de nombreuses opérations difficilement mécanisables (associées au tri, à la conception, à l'expertise des valeurs, etc.) supposent un recours plus intensif aux ressources humaines. Dans ce contexte, les indicateurs économiques ont pour but de différencier les scénarios au regard des besoins d'investissement, des besoins humains et des coûts de fonctionnement alloués à chaque scénario. Ainsi, l'objectif de ces indicateurs est de mettre en lumière les avantages et les inconvénients de chaque scénario dans le but d'évaluer la faisabilité économique de stratégies centrées sur logique d'usage intensif de la mise en forme. Le calcul des indicateurs économiques est détaillé dans la figure 12 de l'annexe.

4.2.3.1 L'indicateur économique « Logistique » : $ECO_{Logistique}$

L'indicateur : $ECO_{Logistique}$ est destiné à évaluer la viabilité économique des OBJETS collectés en comparant le coût des OBJETS collectés à celui de PRODUITS et matériaux neufs similaires disponibles sur le marché. Pour que les OBJETS puissent être disponibles, il est nécessaire d'assurer, la collecte, le tri, le conditionnement et le stockage. Dans une perspective de supercyclage ces étapes sont susceptibles d'occasionner la majeure partie des coûts alloués à

la valorisation des OBJETS. Par ailleurs, plus les OBJETS sont volumineux, plus les coûts attribués à la logistique et au stockage sont élevés. Comme la temporalité de production des déchets n'est pas maîtrisée, le stockage est essentiel pour évaluer la ressource, la rendre disponible et permettre le supercyclage des OBJETS. Ainsi, plus le coût de l'OBJET et du stockage sont faibles, plus la marge réalisée sur la vente des PRODUITS devient susceptible de financer les efforts de supercyclage des OBJETS.

L'indicateur : $ECO_{Logistique}$ est calculé en agréant deux sous-indicateurs : « l'influence du coût de l'OBJET pour le scénario considéré » et « l'influence des coûts de stockage et de conditionnement ».

1 - Le sous-indicateur « coût de l'OBJET » pour le scénario considéré.

Ce sous-indicateur a pour intérêt d'identifier les PRODUITS ou matériaux similaires qui serviront de référence pour évaluer le coût des OBJETS collectés.

Pour quantifier ce sous-indicateur « coût de l'OBJET », l'OBJET est considéré en tant que « matière première » entrant dans un processus : il s'agit de comparer le coût de l'OBJET entrant dans le processus à une référence disponible sur le marché (que nous appelons ici une « matière première équivalente »), ayant subi le même processus de transformation que dans le scénario étudié. Cela permet de déterminer si l'OBJET est concurrentiel ou concurrencé par une « matière première équivalente » et de positionner son prix³⁹.

Ainsi, à partir de recherches documentaires, une « matière première équivalente » est désignée et son coût est évalué. De la même manière le coût de l'OBJET est aussi évalué. Le sous-indicateur « coût de l'OBJET » s'évalue entre 0 et 100 et peut prendre les valeurs 0, 25, 50 et 100 selon les critères suivants :

0 : L'OBJET est plus coûteux qu'une autre matière première équivalente.

25 : L'OBJET est légèrement moins coûteux qu'une autre matière première équivalente.

50 : L'OBJET est beaucoup moins coûteux qu'une autre matière première équivalente.

100 : L'OBJET n'a pas de matière première équivalente.

Des coûts moyens par famille de « matières premières équivalentes » sont présentés dans le Tableau 7 ainsi que les sources.

Tableau 7 : exemples de coûts moyens de quelques « matières premières équivalentes ».

Matière première équivalente	coûts moyens	Source documentaire
Céramique technique	1 à 100 € / kg	CES GRANTA Materials Selector [GRANTA, 2022]
Céramique standard (poreuse)	0,01 à 5 € / kg	
Verres	1 à 5 € / kg	
Métaux et alliages	0,1 à 100 € / kg	
Métaux précieux	> 100 € / kg	
Composites	1 à 70 € / kg	
Bois et dérivés	0,5 à 8 € / kg	

³⁹ Le prix dépend de plusieurs paramètres. L'évaluation des valeurs est également un levier important dans l'estimation du prix de l'OBJET ou du PRODUIT (valeur d'authenticité, valeur d'historicité, valeur de rareté, valeur esthétique, valeur d'auteur, valeur d'usage et d'utilisateur) [3.2.4.3].

Bois vrac/recyclé	15 à 45 € / tonne	https://resource-recycling.com/recycling/2021/02/16/prices-for-most-recycled-plastics-continue-to-rise/ Donnée estimée sur la base du prix d'un livre de poche en vente sur internet.
Plastiques et élastomères	0,5 à 10 € / kg	
mousses polymères	1 à 60 € / kg	
Plastiques recyclés	0,4 € / tonne	
Papier recyclé	1 à 40 € / tonne	
Aluminium recyclé	0,1 € / kg	
Acier recyclé	100 € / tonne	
Livre de poche neuf	43€ / tonne	

2 - Le sous-indicateur « coûts de stockage et de conditionnement ».

Le sous-indicateur « stockage » sert à déterminer l'efficacité de stockage des OBJETS et PRODUITS considérés dans le scénario de supercyclage étudié. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser le critère de compacité. Ainsi, nous utilisons la compacité d'un mètre cube d'OBJETS et d'un mètre cube de PRODUITS dans des conditions de stockage cohérentes avec le scénario considéré. Cette compacité peut être évaluée en volume, en masse ou à l'aide d'une unité de mesure pertinente pour le scénario de supercyclage étudié.

Le sous-indicateur « stockage », dont la valeur varie entre 0 et 100, est défini comme la compacité volumique moyenne des compacités OBJETS et PRODUITS, exprimée en pourcentage.

Par exemple :

Pour l'OBJET « livre de poche » de dimension moyenne 17 cm * 11 cm * 2 cm, il est possible de calculer le nombre d'OBJETS stockés par mètre cube en exprimant des hypothèses de conditions de stockage et de compacité théorique associée :

Livres de poche empilés en balle de papier : avec une hypothèse de compacité volumique de 100 % dans un mètre cube, il est possible de stocker 2673 OBJETS / m³

Livres en vrac ou en confettis : avec une hypothèse de compacité volumique de 50 %, il est possible de stocker 1336 OBJETS / m³.

Livres de poche supercyclés dans un mur en livre ou dans un panneau OSB. Avec une hypothèse de compacité volumique de 100 %, il est possible de stocker 2673 OBJETS / m³

Il est aussi possible d'exprimer des conditions de stockage permettant d'évaluer le nombre d'OBJETS stockés par mètre cube et ainsi exprimer la compacité théorique.

Livres de poche dans une bibliothèque : avec une hypothèse de 15 mètres de rayonnage dans un mètre cube car on doit pouvoir lire / accéder au livre, il est possible de ranger 750 OBJETS / m³ soit une compacité volumique de 28 %.

L'indicateur *EcoLogistique* est alors défini comme la moyenne des sous-indicateurs « coût de l'OBJET » et « coûts de stockage et de conditionnement ». Cet indicateur varie entre 0 et 100.

4.2.3.2 L'indicateur économique « Produit » : *EcoProduit*

Cet indicateur permet de représenter la viabilité économique d'un PRODUIT supercyclé. Il permet effectivement de financer les actions de supercyclage. Cet indicateur évalue si la marge générée par le PRODUIT supercyclé permet de financer les efforts supplémentaires attribués au supercyclage.

Pour évaluer l'indicateur : $ECO_{Produit}$ un « produit de référence » est identifié en cohérence avec le scénario de supercyclage étudié. Le « produit de référence » est un produit similaire au PRODUIT supercyclé. Il permet de donner une base d'estimation du prix auquel pourrait être vendu le PRODUIT supercyclé. Le prix du « produit de référence », et sa masse, sont estimés en faisant usage de données extérieures issues de différentes sources (catalogues, prix internet, prix magasin, etc.). Le prix du « produit de référence » permet de positionner le prix du PRODUIT supercyclé sur le marché par rapport au prix d'un produit neuf équivalent. Le prix du « produit de référence » (P_r) est alors exprimé en € / kg. L'objectif est de déterminer la marge financière restant à disposition après soustraction des coûts liés aux matériaux permettant la fabrication du PRODUIT supercyclé (OBJETS et « matières extérieures »). Les coûts des OBJETS et des matières extérieures sont estimés sur la base des coûts moyens identifiés et des flux des matières mis en jeu dans le scénario considéré (Tableau 7 voir 4.2.3.1).

Par exemple :

Les prix de produits de références, exprimés en € / kg, peuvent être calculés :

Livre Poche occasion : 4 € pour 150 g soit 26 € / kg.

Balle de Papier à recycler : 0,01 € / kg (d'après le Tableau 7, le prix du papier à recycler varie entre 1 et 40 € / tonne. Dans ce travail de thèse, nous choisissons arbitrairement 10 € / tonne, car les différents matériaux contenus dans les livres (cartons, colle, plastique, etc.) ne permettent pas d'avoir un flux de papier homogène et de très bonne qualité.

L'indicateur économique : $ECO_{Produit}$ est défini comme :

$$ECO_{Produit} = 100 \times \frac{P_r - ((f_{objet} \times C_{objet}) + (f_{mext} \times C_{mext}))}{P_r}$$

Avec :

P_r : Prix du produit de référence (€ / kg).

f_{objet} : Fraction massique d'OBJET dans le PRODUIT (kg) – (voir 4.2.2).

C_{objet} : Coût moyen du matériau lié au flux d'OBJET (€ / kg) – (voir Tableau 7).

f_{mext} : Fraction de matières extérieures dans le PRODUIT (kg) – (voir 4.2.2).

C_{mext} : Coût moyen des matériaux liés au flux de matières extérieures (€ / kg) – (sources diverses, catalogues, prix internet, prix magasin, etc.).

Sachant que $f_{objet} + f_{mext} = 1$

4.2.3.3 L'indicateur économique « Process » : $Eco_{Process}$

Cet indicateur permet d'évaluer les coûts de production associés aux différentes stratégies de supercyclage en tenant compte des efforts d'investissement, des efforts humains, et des efforts de fonctionnement (capacité à absorber du volume).

L'indicateur économique relié au « Process » repose sur une analyse des actions élémentaires modèles présentées dans le Tableau 2 en ANNEXE. Ces actions représentent des actions élémentaires modèles nécessaires pour mettre en œuvre le scénario de supercyclage. Les données expriment l'effort associé à chaque action élémentaire modèle, en termes de moyens humains, de coût d'investissement et coût de fonctionnement. Cette base d'information a été compilée à partir de la base de données du logiciel CES GRANTA Materials Selector [GRANTA, 2022]. En particulier le tableau 2 en annexe présente les données suivantes :

- Capacité à absorber du volume : est liée à « *Economic Batch Size* » qui exprime la taille de série pour laquelle le procédé commence à être compétitif (Tableau 8). Il est exprimé en 3 niveaux de coûts (1 : faible, 2 : moyen, 3 : élevé).

Tableau 8 : Tableau exprimant la capacité à absorber du volume de matière d'un procédé industriel (d'après [GRANTA, 2022])

SCORE	Taille de série pour laquelle le procédé est compétitif
1	> 2000 pièces
2	Entre 500 et 2000 pièces
3	<500 pièces

- Coût humain associé : cette donnée est collectée dans la base de données des procédés de CES GRANTA (Tableau 9). Il s'agit du « *Relative Labor Intensity* » exprimé en 3 niveaux de coûts (1 : faible, 2 : moyen, 3 : élevé).
- Coût d'investissement : évalué à partir des « coûts équipements », et des « coût outillage ». Il est exprimé en 3 niveaux de coûts (1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : élevé)
- L'Effort économique est alors évalué à partir des « coûts équipements », « coûts humains » et « coût outillage ». Il est exprimé en 9 niveaux de coûts, (1 : faible ; 9 : élevé).

Tableau 9 : Evaluation des coûts d'outillage, d'investissement et de moyens humains, issue de CES GRANTA [GRANTA, 2022]

Relative ranking	Tooling cost, \$	Equipment cost, \$	Labor intensity, hours/unit
Low	< 10 ³	< 10 ⁴	< 0.1
Medium	10 ³ – 10 ⁴	10 ⁴ – 10 ⁵	0.1 – 30
High	10 ⁴ – 10 ⁵	10 ⁵ – 10 ⁶	30 – 300
Very high	> 10 ⁵	> 10 ⁶	> 300

Néanmoins, en fonction du contexte des entreprises et du secteur d'activité, une collecte ad hoc des informations liées aux moyens humains, aux coût d'investissement et aux coût de fonctionnement pourra être réalisée spécifiquement au scénario de supercyclage considéré si cela est pertinent.

L'indicateur économique $ECO_{Process}$ est ainsi calculé sur le principe d'un capital restant après prise en compte des efforts liés aux coûts de production qui comptent les 3 composantes (coûts de moyens humains, coûts d'investissements et coûts de fonctionnement) pour chaque action élémentaire modèle entrant en jeu dans le scénario de supercyclage étudié (0).

Pour évaluer les efforts de production, les actions élémentaires modèles d'efforts 1, 2 et 3 sont dénombrés pour chacune des 3 composantes impactant les efforts de production. Ainsi, les efforts de production $Effort_{Production}$ sont définis par l'équation :

$$\begin{aligned}
 Effort_{Production} = & Coeff^{Humain} \times \sum_{i=1}^3 Effort_i^{Humain} \times N_i^{Humain} \\
 & + Coeff^{Invest} \times \sum_{i=1}^3 Effort_i^{Invest} \times N_i^{Invest} \\
 & + Coeff^{Fonct} \times \sum_{i=1}^3 Effort_i^{Fonct} \times N_i^{Fonct}
 \end{aligned}$$

Avec :

Dans notre cas, nous avons défini $Effort_i$ comme $Effort_1 = 1$, $Effort_2 = 2$, $Effort_3 = 3$ pour chaque composante.

N_i est le nombre d'actions élémentaires modèles d' $Effort_i$ pour chaque composante.

Par ailleurs, un coefficient de pondération est appliqué à chacune des composantes afin de traduire l'effort relatif associé à ces différentes composantes. Dans le cadre de cette thèse, une importance plus grande est donnée aux efforts d'investissement et aux efforts de moyens humains par rapport aux efforts de fonctionnement. La priorité est mise sur l'investissement car ce dernier est généralement validé si l'investissement est jugé rentable au regard des coûts humains et de fonctionnement engendrés par la mise en place des scénarios de supercyclage.

On choisit alors :

$$\begin{aligned} Coeff^{Humain} &= 1 \\ Coeff^{Invest} &= 10 \\ Coeff^{Fonct} &= 3 \end{aligned}$$

L'indicateur économique $Eco_{Process}$ est alors défini :

$$Eco_{Process} = 100 \times \frac{Capital - Effort_{Production}}{Capital}$$

Dans cette approche, la valeur du Capital n'est pas fixée dans l'absolu. La valeur du Capital est ajustée en fonction des objectifs de l'étude afin d'obtenir une plage de variations relatives de l'indicateur économique $Eco_{Process}$ pratique à manipuler (typiquement entre 10 et 1000).

Par exemple, dans une étude comparant différents scénarios de supercyclage, il est possible de définir le Capital comme valant 1,2 fois la valeur maximale des efforts pondérés calculés pour tous les scénarios considérés. La valeur 1,2 est utilisée dans ce travail est arbitraire, elle permet de lisser les résultats obtenus afin d'éviter que la valeur maximale ne prenne le pas sur les valeurs les plus faibles. Ceci a pour effet de réduire l'écart entre les valeurs maximales et les valeurs minimales obtenues.

L'équation du calcul du capital est la suivante :

$$Capital = 1.2 \times \max(Effort_{Production})$$

4.2.4 Les indicateurs des qualités

L'évaluation des indicateurs des qualités repose sur trois indicateurs (Figure 13, ANNEXE) :

« L'indicateur d'utilisabilité » $Qualité_{Utilisabilité}$ qui évalue les efforts associés au stockage et au conditionnement.

« L'indicateur de fonctionnalité » $Qualité_{Fonctionnalité}$ qui évalue les efforts de tri, de transformation et de caractérisation.

« L'indicateur de préciosité » $Qualité_{Préciosité}$ qui évalue les valeurs associées à l'OBJET pour le scénario considéré.

Pour l'évaluation des indicateurs d'utilisabilité et de fonctionnalité, la table des actions élémentaires modèles sera utilisée. Nous définissons un effort global ($Effort^{Global}$) comme la moyenne pondérée des efforts de moyens humains, d'investissement et de fonctionnement par les coefficients ($Coeff^{Humain}$, $Coeff^{Invest}$, $Coeff^{Fonct}$). Les trois typologies d'effort variant de 1 à 3, l'effort global varie donc de 1 à 3. L'équation de calcul de l'effort global est la suivante :

$$Effort^{Global} = \frac{Coeff^{Humain} \times Effort^{Humain} + Coeff^{Invest} \times Effort^{Invest} + Coeff^{Fonct} \times Effort^{Fonct}}{Coeff^{Humain} + Coeff^{Invest} + Coeff^{Fonct}}$$

Avec les coefficients de pondération suivants :

$$Coeff^{Humain} = 1$$

$$Coeff^{Invest} = 10$$

$$Coeff^{Fonct} = 3$$

4.2.4.1 Indicateur d'utilisabilité : $Qualité_{Utilisabilité}$

L'indicateur d'utilisabilité évalue la capacité d'un OBJET à être utilisé en limitant le recours au stockage ou au conditionnement. En d'autres termes, si les efforts de stockage et de conditionnement des OBJETS sont limités, la valeur d'utilisabilité est forte.

Pour évaluer l'indicateur d'utilisabilité, il s'agit de dénombrer les actions élémentaires modèles liées au stockage et au conditionnement (Tableau 10) et de comptabiliser les efforts associés.

Tableau 10 : actions élémentaires modèles liées au stockage et au conditionnement.

Indicateur	Famille	Type
Utilisabilité	STOCKER	Entreposer
	STOCKER	Conditionner
	PREPARER	Nettoyer
	PREPARER	Réparer

Ainsi, l'équation de calcul de l'indicateur d'utilisabilité est :

$$Qualité_{Utilisabilité} = \frac{100}{1 + \sum_{i=1}^3 Effort_i^{Global} \times N_i^{Utilisabilité}}$$

Avec :

i représente les actions élémentaires modèle.

$Effort_i$ définit comme $Effort_1 = 1$, $Effort_2 = 2$, $Effort_3 = 3$ pour chaque composante.

N_i est le nombre d'actions élémentaires modèles d' $Effort_i$ pour chaque composante.

4.2.4.2 Indicateur de fonctionnalité : $Qualité_{Fonctionnalité}$

L'indicateur de fonctionnalité $Qualité_{Fonctionnalité}$ évalue les efforts de tri, de transformation et de caractérisation d'un gisement.

L'effort de tri est lié aux efforts nécessaires à l'obtention d'un flux trié en fonction du scénario de référence. Il tient compte du niveau de mélange d'un gisement en fonction de sa destination finale. Ce paramètre permet d'évaluer si le gisement est « déjà trié », « pré-trié » ou « pas trié » pour le scénario de référence. En outre, il évalue la capacité des OBJETS à être utilisés sans actions supplémentaires, ce qui réduit l'effort de séparation, de désassemblage ou de déconstruction. De plus, l'effort de tri procure une mesure de la capacité de réversibilité d'un gisement, c'est-à-dire que nous évaluons la capacité d'un gisement à être aisément récupéré et utilisé dans un scénario tout en limitant le recours aux actions préalables qui permettent d'en faire usage.

L'effort de transformation est lié à l'intensité des efforts associés aux opérations de fabrication pour qu'un OBJET puisse remplir une fonction. L'intensité des efforts de transformation tiennent compte du nombre et de la nature des actions de fabrication.

L'effort de caractérisation est lié à l'intensité des efforts associés aux opérations de calibrage, de référencement et de contrôle nécessaires pour satisfaire un usage spécifique. Ce paramètre donne une représentation du niveau de sécurité ou de confiance requis pour répondre aux exigences normatives, techniques ou sanitaires dans un scénario déterminé.

Pour évaluer l'indicateur d'utilisabilité, les actions élémentaires modèles liées au tri, à la fabrication et à la caractérisation, détaillées dans le Tableau 11, sont dénombrées et les efforts associés sont comptabilisés.

Tableau 11 : Actions élémentaires modèles liées au tri, à la fabrication et à la caractérisation

Indicateur	Famille	Type
Fonctionnalité	TRIER	Séparer
	TRIER	Désassembler
	TRIER	Déconstruire
	FABRIQUER	Tous types
	TRIER	Calibrer
	TRIER	Référencer
	PREPARER	Contrôler

Ainsi, l'équation de calcul de l'indicateur de fonctionnalité :

$$Qualité_{Fonctionnalité} = \frac{100}{1 + \sum_{i=1}^3 Effort_i^{Global} \times N_i^{Fonctionnalité}}$$

Avec :

i représente les actions élémentaires modèle.

$Effort_i$ définit comme $Effort_1 = 1$, $Effort_2 = 2$, $Effort_3 = 3$ pour chaque composante.

N_i est le nombre d'actions élémentaires modèles d' $Effort_i$ pour chaque composante.

4.2.4.3 Indicateur de préciosité : $Qualité_{Préciosité}$

Trois paramètres sont définis pour évaluer l'indicateur de préciosité : « la valeur culturelle » $Valeur_{culturelle}$, « la valeur d'unicité » $Valeur_{unicité}$ et « la valeur matière » $Valeur_{matière}$.

1 - « la valeur culturelle » : $Valeur_{culturelle}$

La valeur culturelle s'estime sur le modèle de ce qui se pratique, en expertise, chez les commissaires-priseurs, qui rassemble de nombreuses informations traduites en valeur économique. La valeur culturelle est multifactorielle et repose sur une collecte d'informations fondée sur des critères patrimoniaux, historiques et d'innovation. La valeur d'auteur, d'authenticité et de témoignage sont des critères importants qui, s'ils ne donnent pas lieu à des cotes sur un marché de l'art ou d'art décoratif, doivent être estimés.

Les critères patrimoniaux :

Selon la définition de l'Unesco le patrimoine a « une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de l'histoire, de l'art ou de la science » [UNESCO, 1972]. Pour la classification du patrimoine mondial, l'UNESCO définit une liste de critères⁴⁰. Cette liste recense dix critères de sélection pour considérer le patrimoine mondial. Ces critères sont répartis en deux catégories, les critères naturels et les critères culturels (patrimoine immatériel). Des critères de patrimoine local, peuvent également être définis selon le système étudié. À l'échelle régionale, l'inventaire supplémentaire des monuments historiques (ISMH), propose des critères de sélection « *basés sur la qualité architecturale, artistique ou l'intérêt historique du bien. Il se doit aussi d'être authentique, rare, préservé, et / ou représentatif d'un type de construction ou d'une époque*⁴¹ ». Il est à noter que la valeur artistique, et la place de l'œuvre d'art ou de la restauration ne soulève plus de débats pour établir les critères, les méthodes de classification, de préservation et/ou de restauration, depuis des efforts de théorisation qui font autorité [BRANDI, 1963] | RIEGL, 1903]. Un travail récent de recherche par le design textile a appliqué ces critères, en changement d'échelles, non plus au bâti mais aux matériaux le constituant [SAINT-PIERRE, 2022]. Cette recherche orientée démontre que l'OBJET peut également acquérir une valeur patrimoniale par le biais des savoir-faire artisanaux et/ou industriels qui caractérisent un territoire.

Les critères historiques :

Ces critères sont relatifs au nombre de sources archéologiques et historiques (archives et publications) qui permettent d'évaluer la valeur historique d'un OBJET ainsi que les précautions éventuelles à prendre pour sa conservation.

L'évaluation de la valeur historique repose sur la collecte d'informations susceptible de donner une valeur historique à l'OBJET considéré : date de fabrication / ancienneté, valeur d'auteur (avec ou sans cote), état, faits marquants associés et si possible authentifiés, preuve de cette authenticité, valeur de témoignage / période de création, valeur d'usage, valeur de savoir-faire associée à telle manufacture, usine ou contexte de fabrication (voire signature de l'artisan), etc.

Les critères de nouveauté, d'innovation :

Ces critères permettent d'apprécier le caractère nouveau ou innovant des OBJETS étudiés. Pour se faire, l'évaluation repose sur la collecte d'informations susceptibles de justifier la valeur de l'OBJET tel que des brevets, des notices techniques, des publications, des dates de fabrication, etc.

2 - « la valeur d'unicité » : *Valeur*_{unicité}

La valeur d'unicité permet d'estimer la rareté d'un OBJET. Pour cela nous établissons une série de critères qui permettent d'allouer à l'OBJET des valeurs qui le rendent unique. Nous sélectionnons ici des critères d'appartenance à un auteur (sa biographie), une personne célèbre, un propriétaire connu, une marque reconnue, etc. L'évaluation repose, comme pour la valeur historique, sur la documentation (archives) et sur l'identification de signes distinctifs tels qu'une signature, un logo, une trace écrite ou dessinée, des documents prouvant

⁴⁰ Source : <<https://whc.unesco.org/fr/criteres/>> Consulté le 15/12/2021

⁴¹ Source : <<https://www.arch-and-home.fr/architecte-et-maison-conseils/comment-faire-protger-ou-classer-sa-demeure-aux-monuments-historiques-.html>> Consulté le 15/12/2021

l'appartenance à une personne physique ou morale, une preuve du nombre d'exemplaires fabriqués, présents aujourd'hui, justifiant sa rareté et sa valeur de témoignage, etc.

3 - « la valeur matière » : *Valeur*_{matière}

La valeur matière repose sur des critères qui permettent d'allouer à l'OBJET des caractéristiques qui lui confèrent une valeur intrinsèque. Ces critères sont définis ci-après :

Critères d'origine :

Le critère géographique qui tient compte de la provenance, la genèse [SIMONDON, 1958] [TSING, 2004] et la destination d'un OBJET⁴². Le critère d'origine est relatif au territoire de référence.

Critères esthétiques :

Est un critère relatif qui est estimé sur la base d'une comparaison avec d'autres matériaux ayant une fonction similaire. Le critère esthétique semblant particulièrement subjectif, nous avons sélectionné une série de critères qui reposent sur ce qui est perçu par l'utilisateur : les couleurs, les textures, les effets, les motifs, les traces d'usure, la ressemblance visuelle avec d'autres matériaux ou ce qui le distingue (attribut et détail identificateur).

Critères d'ancienneté :

Est un critère relatif permettant d'estimer les valeurs d'ancienneté associées à un matériau. En effet, de nombreux critères comme les traces d'usure (rayures, porosité, fissures, apparition de déformation ou de défauts liés à l'âge, etc.), d'usage (la patine, des marques associées à des usages spécifiques, à des gestes répétés), d'oxydation, ou encore la présence de marques spécifiques comme des logos, de la typographie, des images ou des motifs associés à une date, une époque, une mode.

De plus, des recherches documentaires peuvent être effectuées pour augmenter les connaissances sur les valeurs associées à l'ancienneté d'un matériau ou d'un OBJET, comme par exemple l'estimation de sa date de fabrication, des informations qui témoignent d'usages passés ou de techniques de fabrication anciennes.

Pour tous ces critères, un dossier rassemblant les pièces documentaires et photographiques, lettres manuscrites authentifiées et tout autre élément participant au récit de la première vie de l'OBJET, ses écosystèmes d'origine (voire de genèse), de création, de réalisation et d'emploi (d'utilisation et d'usage) doit lui être associé. L'ensemble permet de construire une valeur d'historicité, un récit qui nourrit en inspiration toute démarche de création / design.

Quantification de ces valeurs et de l'indicateur de préciosité

Chaque paramètre de valeur présenté ci-dessus est évalué de manière relative selon les modalités suivantes :

100 : « L'OBJET possède des valeurs très élevées (incomparable) ».

75 : « L'OBJET possède des valeurs élevées ».

50 : « L'OBJET possède des valeurs moyennes ».

25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles ».

0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs ».

⁴² Par exemple, dans son ouvrage « Du mode d'existence des objets techniques », Gilbert Simondon décrit les « *Demi-chaines techniques de réalisation* » sur la brique (p. 329).

L'indicateur de préciosité est alors la moyenne de ces 3 paramètres.

$$Qualité_{préciosité} = \frac{Valeur_{culturelle} + Valeur_{unicité} + Valeur_{matière}}{3}$$

Il faut noter que chacune de ces valeurs peut elle-même augmenter, lors de l'effort de supercyclage. Au terme du scénario de supercyclage mobilisé, son résultat fait l'objet d'une évaluation suivant les mêmes critères, en vue d'une comparaison avec la première réalisée.

4.2.5 Les indicateurs de dynamique territoriale

Le point de départ de cette thèse repose sur la considération que tout territoire dispose de gisements de matières potentiels quand on considère les déchets, chutes et rebuts issus du tissu industriel local comme des OBJETS.

Ainsi, la mise en place d'une exploitation réelle de ces gisements est susceptible de créer une dynamique territoriale nouvelle mettant en jeu différents acteurs en fonction des scénarios de supercyclage envisagés. L'objectif de ces indicateurs de dynamique territoriale est d'évaluer la stimulation de l'activité d'un territoire de référence du fait de la mise en place d'un scénario de supercyclage.

L'évaluation de la dynamique territoriale repose sur deux indicateurs : un indicateur lié aux acteurs mis en jeu dans les scénarios *Territoire_{Acteurs}* et un indicateur lié au gisement mis en jeu dans les scénarios *Territoire_{Gisement}*. Les modalités de calcul des indicateurs de dynamique territoriale sont détaillées en annexe (Figure 14, ANNEXE).

4.2.5.1 Indicateur lié aux acteurs mis en jeu dans les scénarios *Territoire_{Acteurs}*

Cet indicateur évalue la dynamique engendrée par les scénarios en termes de liens entre acteurs d'un territoire.

La définition du terme « acteurs » peut varier en fonction de l'entreprise, de l'écosystème et des scénarios de supercyclage considérés. Par exemple, pour des scénarios et des entreprises mettant en jeu un mécanisme commercial, il pourra s'agir de comptabiliser les clients et fournisseurs potentiels en tant qu'acteur. Pour un établissement d'enseignement, il pourra s'agir de comptabiliser plutôt des partenaires potentiels.

Par ailleurs, les frontières du territoire de références sont, elles aussi, adaptables en fonction des scénarios étudiés. Ainsi, l'évaluation de l'indicateur de dynamique territoriale liée aux acteurs, est un indicateur relatif, pouvant entrer en jeu dans une étude comparative de plusieurs scénarios ayant trait à un même contour dont un scénario de référence. Dans notre cas, le territoire de référence est la région AUvergne-Rhône-Alpes (AURA) d'une superficie de 69 711 km².

En fonction du contexte d'étude, l'indicateur de dynamique territoriale liée aux acteurs peut alors être défini de différentes façons sachant qu'il s'agit de comptabiliser le nombre d'acteurs existants et potentiels sur le territoire de référence (noté $N_{Acteurs}^{IN}$).

Dans ce travail de thèse l'indicateur $Territoire_{Acteurs}$ est calculé de la manière suivante :

$$Territoire_{Acteurs} = \frac{100}{1,2 * Max(Valeurs)} * N_{Acteurs}^{IN}$$

Avec $Max(Valeurs) = 1946$

Dans le cas général, on optera pour une description absolue de l'indicateur tel que $Territoire_{Acteurs} = N_{Acteurs}^{IN}$ avec des contours de territoire limités à un territoire restreint tel qu'une région.

Si $N_{Acteurs}^{IN}$ s'avère très faible, il sera envisagé d'élargir le périmètre du territoire de référence.

Si $N_{Acteurs}^{IN}$ s'avère très élevé, il sera envisagé de comptabiliser le nombre d'acteur pour une superficie plus faible suivant des spécificités géographiques (une vallée d'emploi), une filière locale représentant une chaîne opératoire, une communauté d'agglomération, par exemple.

4.2.5.2 Indicateur lié au gisement des scénarios $Territoire_{Gisement}$

Cet indicateur a pour objectif d'évaluer la capacité d'un scénario à faire usage d'OBJETS collectés localement. L'indicateur $Territoire_{Gisement}$ repose sur une évaluation des besoins de transport du scénario étudié.

Ce besoin de transport est lié aux actions de collecte des OBJETS. Les conditions de collecte dépendent :

- du volume d'OBJETS à transporter à chaque collecte ($V_{collecte}$),
- de la compacité volumique des OBJETS à transporter ($Compacité_{Objet}$),
- du nombre de collecte par mois ($N_{collecte/mois}$),
- de la distance à parcourir à chaque collecte ($D_{collecte}$).

On peut alors définir un volume équivalent d'OBJET de compacité 100 % ($V_{collecte}^{100\%}$) à transporter à chaque collecte.

$$V_{collecte}^{100\%} = \frac{V_{collecte} * Compacité_{Objet}}{100}$$

L'indicateur de dynamique territoriale liée au gisement est alors le volume équivalent d'OBJET de compacité 100 % collecté par km parcouru. L'unité de volume sera choisie pour permettre une lecture aisée des valeurs (typiquement entre 1 et 1000).

$$Territoire_{Gisement} = \frac{100}{1,2 * Max(Valeurs)} * \frac{V_{collecte}^{100\%}}{D_{collecte} * N_{collecte/mois}}$$

Avec $Max(Valeurs) = 857$

Dans le cadre de ce travail, nous ne tenons pas compte des distances de transport vers les lieux de revente ou de consommation finale des PRODUITS.

La création de déchets qui aboutit à l'abandon, résulte principalement d'une perte de valeurs (valeurs d'usage (valeurs de matière à création, à réalisation), valeurs fonctionnelles, valeurs sociales et culturelles, valeur économique, etc.) ; l'identification, la préservation et la création de valeurs à partir d'OBJETS devenus inutiles constitue donc un levier prometteur pour répondre aux problématiques contemporaines de gestion des déchets. De plus, la préservation des qualités et des propriétés des matériaux permet de limiter la dépendance aux importations et de réduire les consommations de matière et d'énergie, ce qui a pour effet de réduire la pression sur le milieu naturel (préservation du patrimoine naturel) tout en préservant le milieu construit et ses stocks de matériaux (préservation du patrimoine matériel et immatériel). Cela favorise la souveraineté, l'autonomie et l'identité des territoires dans une perspective d'adaptation aux changements. De plus, la préservation, la circulation et la création de valeurs, stimule l'attractivité et la dynamique des territoires en favorisant une innovation respectueuse des spécificités locales et de l'identité du territoire de référence.

4.3 Application des indicateurs au cas d'études « LIVRES »

4.3.1 Présentation générale des scénarios étudiés.

Dans le cadre de cette expérimentation notre travail consiste à valider l'applicabilité des indicateurs pour permettre l'évaluation de scénario de supercyclage. Ainsi, cette recherche se concentre sur le travail d'évaluation, d'identification et de sélection de pistes prometteuses. La caractérisation et la certification du matériau permettant d'aboutir à la normalisation des produits, n'est pas développé dans cette recherche, mais relèvent davantage d'un développement⁴³. Les matériaux et produits pris comme exemples sont au stade de prototypes. Ce sont des esquisses ou des preuves de concept pouvant éventuellement être transposés vers de nombreux semi-produits (planches, moulures, compression moulage, tasseaux, panneaux composites, etc.) dont la mise en forme diffère de celle présentée dans les scénarios abordés ici. Nous resterons donc au stade d'esquisse en privilégiant la pertinence de sélection des scénarios et l'applicabilité des indicateurs dans un processus d'aide à la décision.

La sélection des différents scénarios vise à couvrir un vaste panel de possibilités de supercyclage des livres. Ceci pour permettre d'étudier la réponse et la sensibilité des indicateurs face à des scénarios très hétérogènes : une ou plusieurs entreprises, une grande amplitude de transformation des matériaux, différentes proportions de matières neuves et d'OBJETS, différentes échelles territoriales, des besoins d'investissement variés, etc. En accentuant les contrastes entre les scénarios, nous souhaitons valider l'applicabilité des indicateurs pour savoir s'ils permettent d'évaluer et de différencier les scénarios. Par ces cas d'études nous cherchons à valider ce qui est proposé dans les parties précédentes, à savoir, la

⁴³ Il est possible par exemple de réaliser des tests mécaniques en traction, compression, torsion, cisaillement, des tests de résistance au feu, une caractérisation fine du matériau à plusieurs échelles, un dimensionnement abouti du mobilier, pour garantir de sa bonne utilisation et la tenue de ses performances.

capacité du supercyclage à activer des dynamiques territoriales tout en permettant de préserver les qualités, les propriétés et les valeurs des OBJETS en circulation.

Le système étudié va de la collecte à la réalisation d'un produit issu du supercyclage. L'échelle de l'étude concerne la région AURA. La sélection des scénarios a pour objectif de mettre en relief l'incidence de la transformation sur les aspects mesurés par les indicateurs, c'est-à-dire le rendement des matières, la viabilité économique des scénarios, la préservation ou la perte de valeur associé aux stratégies de supercyclage mises en place, ainsi que les répercussions sur la dynamique territoriale du système étudié.

Les scénarios ont été sélectionnés de manière à couvrir une grande amplitude de niveaux de transformation des OBJETS de manière à évaluer les efforts associés à chaque scénario. Une nomenclature par une série de 2 ou 3 chiffres permet d'identifier les scénarios. Le premier chiffre définit la nature du produit considéré alors que les chiffres suivants définissent des variantes de scénarios. Nous noterons le scénario 0.0 le scénario de référence inspiré du fonctionnement actuel chez Recyclivre. Le scénario 0.0 explore la préservation dans leur fonction initiale des livres (valeur d'usage préservée) par leur revente en tant que livres d'occasion. La Tableau 12 présente les scénarios étudiés.

Tableau 12 : Présentation des scénarios étudiés

N# du scénario	Nom du scénario
0.0	Scénario de référence type « Recyclivre » : collecte pour vente de Livre d'occasion avec encodage numérique
0.1	Collecte pour vente de Livre d'occasion avec encodage manuel
0.2.1	Collecte de livres rares pour la revente
0.2.2	Collecte de livres rares restaurés pour la revente
0.2.3	Collecte de livres rares restaurés pour la revente avec effort d'augmentation de valeur
1.1	Production de panneaux livres
2.1	Production de fauteuils en panneaux livres
2.2	Production de fauteuils en panneaux livres avec coussins en mousse

Chaque scénario est représenté sous la forme d'un diagramme de flux détaillant la succession des actions élémentaires modèles permettant de passer d'un déchet à un OBJET, puis d'un OBJET à un PRODUIT. Les actions élémentaires sont classées selon une hiérarchie à trois niveaux : la « famille » qui regroupe les actions de focus large ; le « type », qui regroupe les actions sous un focus intermédiaire ; et enfin la « description », qui permet de donner des information plus précises sur l'action et sa nature (ex : nature du conditionnement (cartons, palette, etc.), type de transport utilisé (camionnette, poids lourd, etc.), la nature et l'intensité des actions de tri (peu mélangé à fortement mélangé, tri manuel ou tri automatisé, etc.)). À chaque action correspond des efforts en termes d'investissement, de fonctionnement et de moyens humains. Ces efforts sont évalués spécifiquement pour le scénario considéré sur la base des efforts d'actions élémentaires modèles rassemblés dans le tableau 2 en annexe et construit à partir des données de matériaux et procédés de la base de données CES –GRANTA [GRANTA, 2022].

Par ailleurs, pour chaque scénario, les paramètres nécessaires pour calculer les valeurs des différents indicateurs sont :

- Le système étudié permet de cerner les frontières du système étudié. Il s'agit d'identifier le déchet qui entre dans le système, et le PRODUIT qui en sort, ainsi que les types d'actions élémentaires qui entrent en jeu.
- Le déchet : il s'agit du déchet qui entre dans le système.
- L'OBJET : il s'agit du déchet après identification comme pouvant être supercyclé.
- Le PRODUIT : il s'agit du PRODUIT sortant du système étudié, résultat de la transformation de l'OBJET par les actions élémentaires décrites dans le scénario.
- Une « matière première équivalente » est définie comme une matière qui, si elle remplace l'OBJET dans le scénario, donne un produit équivalent en passant par les mêmes actions élémentaires.
- Un « produit de référence équivalent » est un produit qui fournit le même service que le PRODUIT considéré.
- Le territoire d'action du scénario : dans notre cas, nous avons choisi la région AURA (69711 km²).

Pour chaque série de scénarios, les paramètres seront rassemblés dans un tableau « description du scénario ». Puis, les résultats des différents indicateurs, définis dans le chapitre 3.2 rappelés dans le Tableau 13, sont rassemblés dans un autre tableau et représentés sur un diagramme radar pour faciliter la lecture des résultats et une comparaison entre les scénarios. Enfin, les résultats sont discutés, comparés et mis en perspective dans la partie « analyse critique » qui clôture ce chapitre.

Tableau 13 : Famille d'indicateurs et indicateurs associés.

Familles d'indicateurs	Indicateurs associés (valeurs entre 0 et 100)
indicateurs matières	taux d'absorption matière (R_{Ext} ou R_{ext}) taux d'absorption PRODUIT (R_{Absorb} ou R_{absorb})
indicateurs économiques	indicateur Logistique ($Eco_logistique$ ou $ECO_{Logistique}$) indicateur PRODUIT ($Eco_produit$ ou $ECO_{Produit}$) indicateur Process ($Eco_process$ ou $ECO_{Process}$)
indicateurs des qualités	indicateur d'utilisabilité » ($Qualité_utilisabilité$ ou $Qualité_{Utilisabilité}$) indicateur de fonctionnalité » ($Qualité_fonctionnalité$ ou $Qualité_{Fonctionnalité}$) indicateur de préciosité » ($Qualité_préciosité$ ou $Qualité_{Préciosité}$)
indicateurs de dynamique territoriale	indicateur lié aux acteurs ($Territoire_acteurs$ ou $Territoire_{Acteurs}$) indicateur lié au gisement » ($Territoire_gisement$ ou $Territoire_{Gisements}$)

4.3.2 SERIE DES SCENARIOS 0 : revente de livres d'occasion.

4.3.2.1 Description des scénarios.

Le Tableau 14 décrit le scénario de référence (0.0) ainsi que les 4 variantes (0.1 / 0.2.1 / 0.2.2 / 0.2.3) au regard du système étudié, des déchets, OBJETS, des matières premières équivalentes, PRODUIT concerné et produit équivalent de référence ainsi que la zone territoriale concernée.

Tableau 14 : description du système étudié.

Paramètre	Scénario 0.0	Scénario 0.1	Scénario 0.2.1	Scénario 0.2.2	Scénario 0.2.3
SYSTEME ETUDIE	Entreprise de collecte de livres pour la revente d'occasion.	Entreprise de collecte de livres pour la revente d'occasion (Encodage manuel sans algorithme).	Entreprise de collecte de livres rares pour la revente.	Entreprise de collecte de livres rares restaurés pour la revente.	Entreprise de collecte de livres rares restaurés pour la revente avec effort d'augmentation des valeurs.
DECHET	Livre	Livre	Livre	Livre	Livre
OBJET	OBJET 0.0	OBJET 0.1	OBJET 0.2.1	OBJET 0.2.2	OBJET 0.2.3
MATIERE PREMIERE EQUIVALENTE	Livre neuf	Livre neuf	NA	NA	NA
PRODUIT	Livre revendable	Livre revendable	Livre Ancien / Rare PRODUIT 0.2.1	Livre Ancien / Rare PRODUIT 0.2.2	Livre Ancien / Rare PRODUIT 0.2.3
PRODUIT DE REFERENCE EQUIVALENT	Livre neuf	Livre neuf	NA	NA	NA
TERRITOIRE	Région AURA	Région AURA	Région AURA	Région AURA	Région AURA

Description du scénario 0.0 : revente de livres d'occasion par Recyclivre.

Le Scénario de référence (0.0) est inspiré du fonctionnement de Recyclivre. Il a été construit sur la base d'entretiens effectués chez Recyclivre Lyon en décembre 2018. Des données complémentaires nous ont été fournies par Recyclivre Lille ainsi que par Recyclivre Paris. De plus, un échantillonnage de livres destiné au rebut a été effectué dans l'antenne Lyonnaise de Recyclivre en 2019 afin de réaliser une étude exploratoire des pistes de supercyclage du matériau livre.

Les livres d'occasion sont collectés par Recyclivre Lyon dans un rayon d'environ 25 km. Chaque collecte représente un déplacement moyen de 50 km et permet de collecter environ 1200 livres, soit environ 500 kg [GAUDE, 2020]. La collecte se fait trois à six fois par semaine en véhicule électrique.

Une fois chez Recyclivre, un premier tri écarte les livres endommagés. Chaque livre qui possède un numéro ISBN et un code barre est scanné ; les autres livres sont écartés et parfois donnés à des antiquaires si les agents en charge du tri estiment qu'il peut avoir de la valeur sur un critère de rareté. Etant donné le faible nombre de livres donnés à des antiquaires, nous ne prendrons pas cela en compte dans le modèle d'évaluation, cela constitue une hypothèse simplificatrice de notre scénario de référence. Le livre ayant un numéro ISBN et un code barre permet de recueillir des informations sur l'ouvrage, tel que l'auteur, le titre du livre, son année de publication, le nombre de pages, etc. En fonction de ces informations, un algorithme évalue s'il existe une demande (*Ranking*) pour ce livre. Développé en interne, un logiciel utilise cet

algorithme, et si l'ouvrage peut être revendu en moins de deux semaines, un prix lui est attribué. Les ouvrages pouvant être revendus sur le marché de l'occasion sont étiquetés pour permettre leur traçabilité. Ils sont ensuite triés par format (Poche / Petit / moyen / grand) de manière à optimiser le conditionnement en cartons et le transport. Les cartons sont chargés sur palette pouvant contenir approximativement 1100 livres chacune. Ils sont ensuite expédiés en semi-remorque deux fois par mois pour être centralisés à Evry, à proximité de Paris (Figure 40). Le stock qui représente environ un million de livres est géré par une entreprise d'insertion solidaire *Log'ins*. Une fois massifiés sur Paris, les livres revendables sont référencés et disponibles à la vente via le site internet de Recyclivre (devenu leader européen de la revente en ligne de livres d'occasion). Les livres peuvent alors être expédiés depuis Paris vers toute la France.



Figure 40 : centralisation de livres d'occasion dans l'entrepôt de Recyclivre à proximité de Paris. Source : Recyclivre (<https://fr.investiretplus.com/index.php/portfolio/recyclivre/>)

Les livres écartés sont considérés comme « indésirables ». Ils représentent environ 60 à 80 % du poids de ce qui est collecté selon les antennes et les périodes concernées. Les livres « indésirables » sont mis au rebut en vrac dans des containers poubelle de 240 litres. Ces derniers sont collectés deux fois par semaine par un partenaire de Recyclivre : l'entreprise Elise. « En 2018, ce sont 80 tonnes de livres qui ont été collectées par Elise, soit une moyenne de 6,6 tonnes par mois. » [GAUDE, 2020]. Une fois chez Elise, les livres sont conditionnés manuellement dans des caisses palettes de 600 litres. Ces caisses sont expédiées par camion de 19 tonnes chez Véolia Chassieux qui se charge de massifier les gisements pour les envoyer dans des usines de recyclage du papier [GAUDE, 2020].

La Figure 41 donne le diagramme de flux du scénario (0.0).

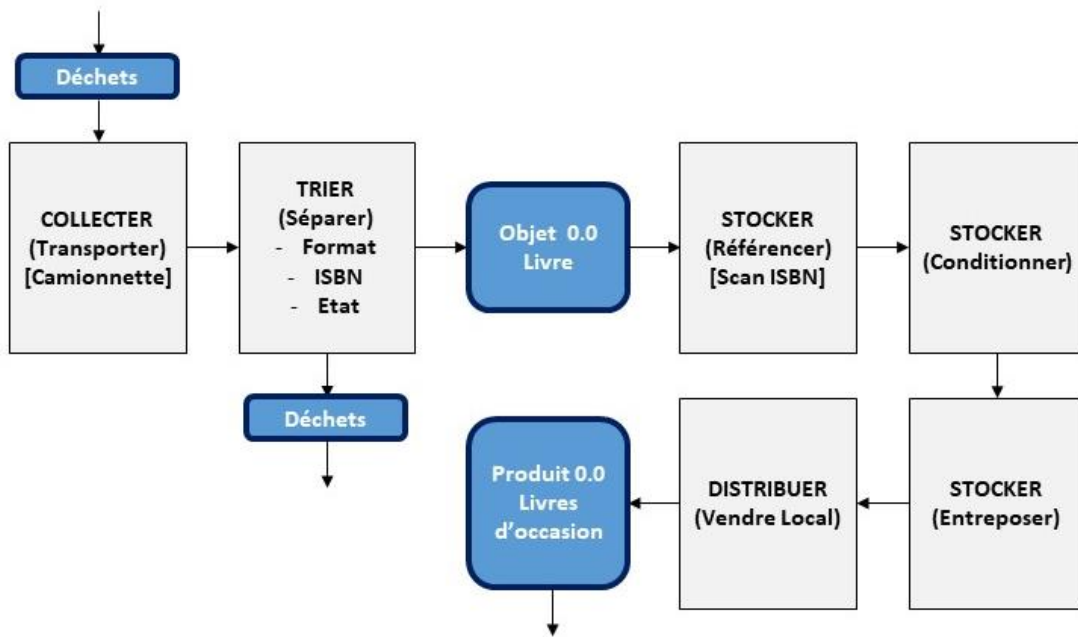


Figure 41 : diagramme de flux du scénario 0.0. « Revente des livres d'occasion chez Recyclivre ».

Les données issues du diagramme de flux permettent d'identifier les actions élémentaires du scénario étudié. Pour chaque scénario, les actions élémentaires sont regroupées dans un tableau. Les valeurs des efforts associées aux actions élémentaires sont déterminés de manière comparative avec les actions de la base de données GRANTA [GRANTA, 2022]. De manière générale, les actions sont du même ordre de grandeur que les actions proposées par GRANTA, cependant certaines actions peuvent obtenir des notes plus ou moins élevées en fonction de la description proposée (par exemple pour comparer deux actions TRANSPORTER selon les moyens de transport utilisés). Au besoin, les actions ou les données manquantes et les efforts correspondants à ces actions sont déterminés arbitrairement, relativement à celles issues de la base de données GRANTA.

Ainsi, le scénario 0.0 se compose d'actions élémentaires qui sont regroupées dans une table. Ces actions élémentaires sont listées par ordre chronologique et les efforts associés sont mentionnées (investissement, humain, fonctionnement et global) (Tableau 15).

Tableau 15 : table des actions élémentaires (scénario 0.0).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Séparer	Format ISBN Etat	1	2	3	1
STOCKER	Référencer	Scan ISBN	1	1	1	1
STOCKER	Conditionner	Cartons Palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Rayonnage	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre local		1	1	2	1

Description du scénario 0.1 : revente de livres d'occasion par une nouvelle entreprise.

Le scénario 0.1 considère une entreprise qui collecte des livres en fin de vie et les trie pour les revendre sur le marché de l'occasion. Cette entreprise n'est pas équipée d'un algorithme permettant le référencement rapide des livres collectés. De ce fait, l'encodage doit être réalisé manuellement. Cette variante du scénario 0.0 a pour objectif de tester la sensibilité des indicateurs en réponse aux différents efforts engendrés par les actions élémentaires. En effet, dans ce scénario les actions sont identiques au scénario de référence (0.0), cependant l'entreprise doit effectuer l'encodage manuellement (Figure 42) ce qui modifie l'action STOCKER (Référencer) [Encodage manuel]. Les OBJETS et les PRODUITS restent les mêmes, ce qui permet d'évaluer deux variantes très similaires mais avec une variation des efforts nécessaires à la valorisation des livres d'occasion. Nous faisons l'hypothèse que les efforts associés au référencement manuel des livres auront une incidence sur l'évaluation de ce scénario, en raison du temps et des efforts supplémentaires requis pour effectuer l'encodage des livres d'occasion manuellement, et l'estimation de leurs prix.

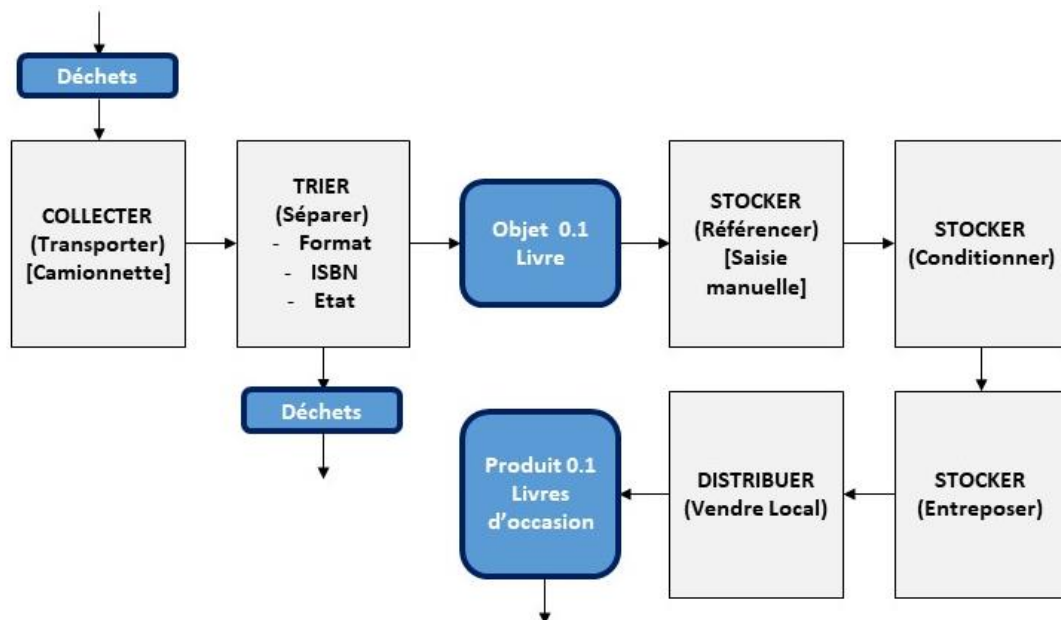


Figure 42 : diagramme de flux du scénario 0.1 « Revente de livre d'occasion dans une nouvelle entreprise ».

Comme pour le scénario 0.0, le diagramme de flux du scénario 0.1 comporte 6 actions. Néanmoins, l'action STOCKER (référencer) [Saisie manuelle] présente dans le Tableau 16, nécessite davantage d'efforts humains et de fonctionnement que l'action STOCKER (Référencer) [Scan ISBN] (Tableau 16). De ce fait l'effort global attribué à cette action dans le scénario 0.0 est égal à 1 ; alors que dans le scénario 0.1, l'effort global est de 2.

Tableau 16 : table des actions élémentaires (scénario 0.1).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Séparer	Format ISBN Etat	1	2	3	1
STOCKER	Référencer	Saisie Manuelle	1	3	3	2
STOCKER	Conditionner	Cartons Palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Rayonnage	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre local		1	1	2	1

Description du scénario 0.2.1 :

Le scénario 0.2.1 considère une entreprise qui collecte des livres en fin de vie et les trie pour les revendre sur le marché de l'occasion (Figure 43). Cette entreprise est adossée à Recyclivre, elle identifie les livres anciens et / ou rares qui sont collecté dans le flux de déchet de Recyclivre. L'encodage et le référencement se font manuellement, car les livres anciens ne possèdent que rarement un numéro ISBN. Ces livres étant très spécifiques, ils nécessitent un effort de caractérisation élevé pour identifier et documenter leurs valeurs. Les valeurs des efforts sont présentées dans le

Tableau 17.

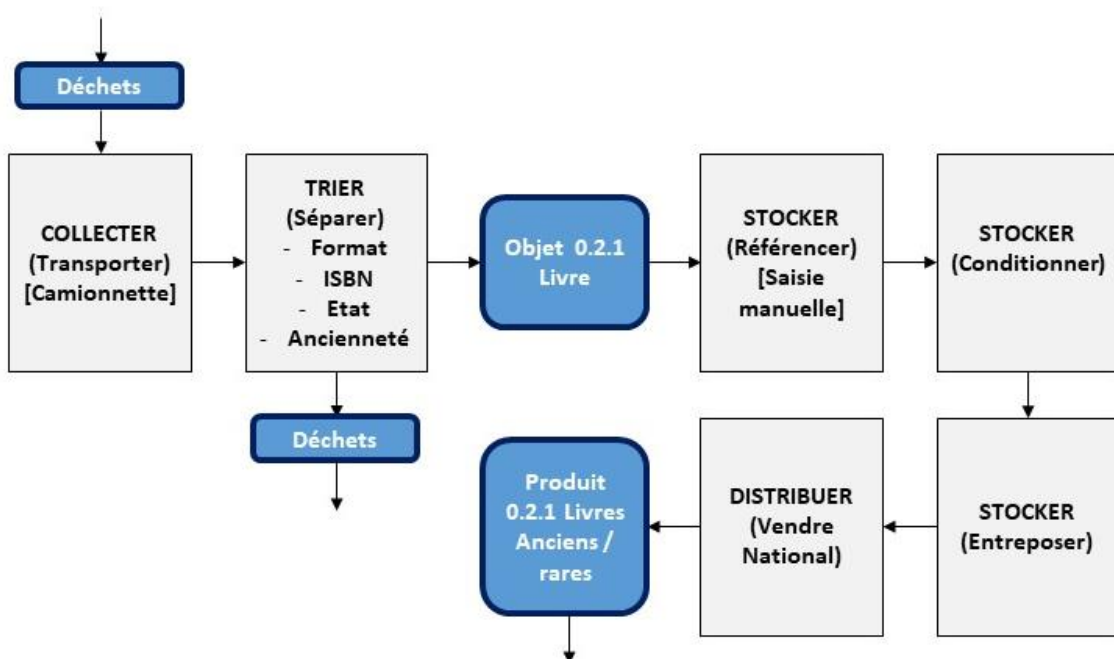


Figure 43 : diagramme de flux du scénario 0.2.1 « Revente de livres anciens et/ou rares ».

Tableau 17 : table des actions élémentaires (scénario 0.2.1).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Séparer	Format ISBN Etat	1	2	3	1
STOCKER	Référencer	Saisie Manuelle	1	3	3	2
STOCKER	Conditionner	Cartons Palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Rayonnage	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre National		1	2	2	3

Description du scénario 0.2.2 :

Le scénario 0.2.2 est une légère variante du 0.2.1, il se différencie du scénario précédent en raison de l'ajout d'une action de restauration. Les actions élémentaires présentes dans la Figure 44 sont détaillées dans le Tableau 18 ainsi que les valeurs des efforts associés.

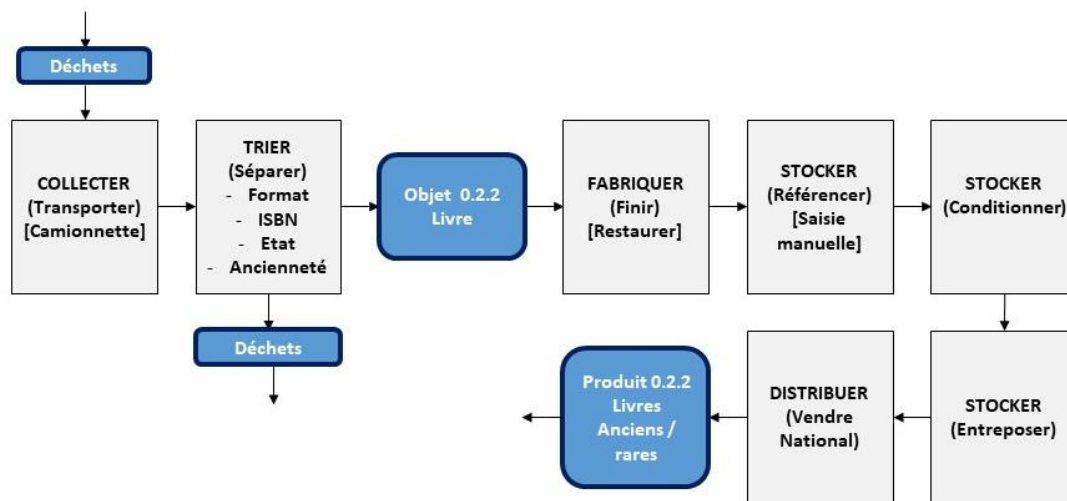


Figure 44 : diagramme de flux du scénario 0.2.2 : « revente de livres anciens et / ou rares, avec restauration (augmentation des valeurs d'auteur et d'usage). »

Tableau 18 : table des actions élémentaires (scénario 0.2.2).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Séparer	Format ISBN Etat Ancienneté	1	2	3	1
FABRIQUER	Finir	Restaurer	2	3	3	2

STOCKER	Référencer	Saisie Manuelle	1	3	3	2
STOCKER	Conditionner	Cartons Palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Rayonnage	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre National		1	2	2	3

Description du scénario 0.2.3 :

Le scénario 0.2.3 considère une entreprise qui collecte des livres en fin de vie et les trie pour les revendre sur le marché de l'occasion. Cette entreprise, adossée à Recyclivre, identifie les livres anciens et / ou rares qui sont collectés dans le flux de déchet de Recyclivre. L'encodage et le référencement se font manuellement car les livres ne possèdent pas forcément de numéros ISBN. Ce scénario détaille une configuration introduisant la restauration et la valorisation des livres avec un effort d'augmentation des valeurs. La valorisation consiste à documenter les valeurs d'auteur (recherche de manuscrits, de preuves associées au livres, etc.), d'authenticité (expertise commissaire-priseur, datation), d'historicité (traçabilité des propriétaires, cadeau, objets associés...) et d'origine (recherches sur le contexte dans lequel le livre a été écrit, propriétaires successifs, provenance des matériaux, etc.). L'augmentation des valeurs repose sur des domaines d'expertise spécifiques qui ont pour but de caractériser, d'authentifier et de garantir les valeurs associées aux livres d'occasion.

Les actions élémentaires qui composent le diagramme de flux présenté dans la Figure 45 sont décrits dans le Tableau 19.

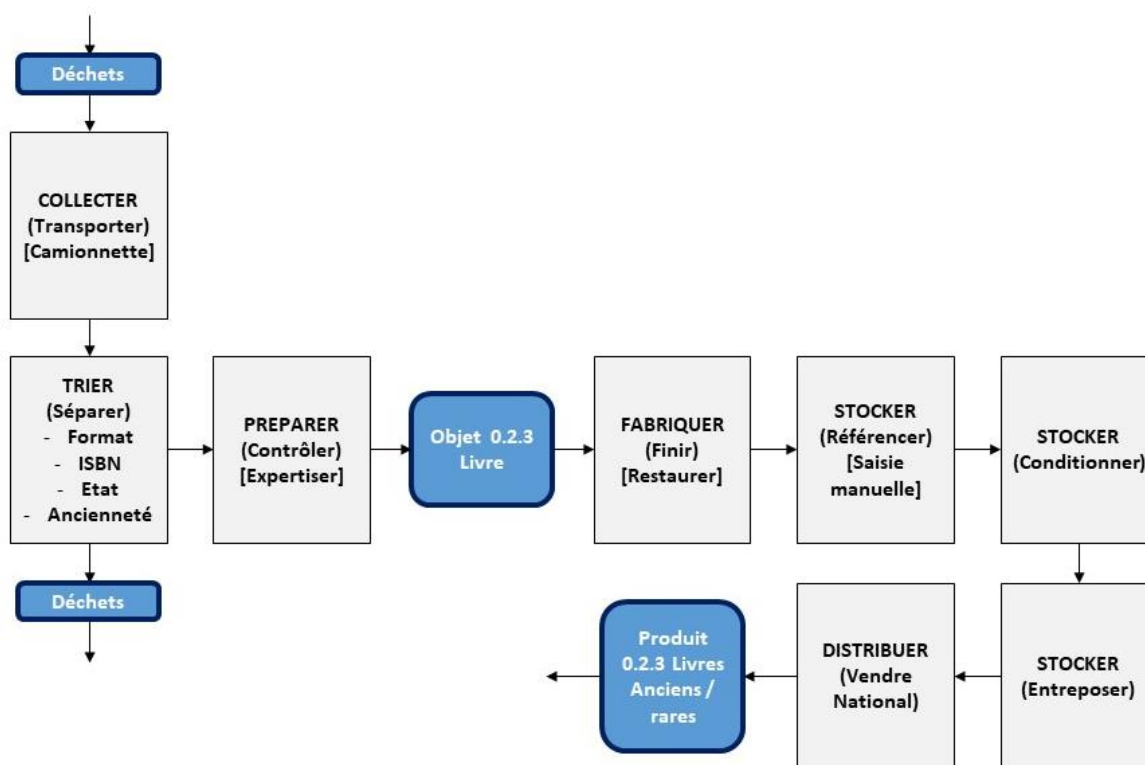


Figure 45 : diagramme de flux du scénario 0.2.3 : « revente de livres anciens et / ou rares, avec contrôle, expertise spécifique (augmentation des valeurs d'auteur, d'usage, d'authenticité, d'origine et d'historicité) et restauration. »

Tableau 19 : table des actions élémentaires (scénario 0.2.3).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Séparer	Format ISBN Etat	1	2	3	1
PREPARER	Contrôler	Expertiser	1	3	3	2
FABRIQUER	Finir	Restaurer	2	3	3	2
STOCKER	Référencer	Saisie Manuelle	1	3	3	2
STOCKER	Conditionner	Cartons Palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Rayonnage	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre National		1	2	2	3

4.3.2.2 Calcul des indicateurs pour les scénarios de la série 0

Les indicateurs liés aux scénarios de la série 0 sont calculés sur la base des paramètres détaillés dans le Tableau 20. Chacun des indicateurs est détaillé ci-après.

Les paramètres associés au « **Nombre de collecte par mois** » et à la « distance à parcourir par collecte », sont inspirés des données fournies par Recyclivre. Ce paramètre ne change pas pour les scénarios de la série 0.

Le volume de déchet / OBJET par collecte : est déterminé par les données collectées chez Recyclivre [GAUDE, 2020], ce qui représente environ 30 % d'OBJETS sur le total des livres collectés.

Les indicateurs matières : cette série de scénarios se concentre sur la revente de livres d'occasion, les PRODUITS ne contiennent pas de matières extérieures ($M_{ext} = 0$ et $f_{mext} = 0$) et sont donc intégralement constitués d'OBJETS ($f_{objet} = 1$). Néanmoins, d'après les données fournies par Recyclivre, pour 100 livres collectés ($M_{objet} = 100$), 30 sont revendus d'occasion et 70 sont mis au rebut ($M_{chute} = 70$). Cette valeur de M_{chute} est considérée pour les scénarios 0.0 et 0.1. Pour les scénarios de la série 0.2, la revente de livres rares est considérée, dans ce cas, la valeur $M_{chute} = 95$ est choisie.

Pour évaluer la **compacité**, l'unité de mesure choisie est le nombre de livres de poche aux dimensions 17x11x2 cm stockable par mètre cube.

La « compacité OBJET » : en faisant l'hypothèse d'une compacité à 100 % par mètre cube il est possible de ranger approximativement 2673 OBJETS « livres de poche » par mètre cube. Dans ce scénario les livres sont rangés en vrac dans des poubelles de 240 litres. Nous faisons l'hypothèse que les livres en vrac sont à compacité 50 %, ce qui permet de mettre environ 1336 OBJETS par mètre cube.

La « compacité produit » : les livres de poche sont rangés sur les rayonnages d'une bibliothèque. La contrainte étant de pouvoir accéder aux livres, les consulter et voir les tranches, nous faisons l'hypothèse qu'il y a 15 m de rayonnage par mètre cube. Il y a donc 50 OBJETS par mètre linéaire, soit 750 OBJETS / m³. La compacité produit est de 28 %.

La « compacité moyenne » : pour ce scénario en considérant la moyenne de la « compacité OBJET » et de la « compacité produit » est alors de 39 %.

Le « matériau lié au flux de déchet » : est défini comme étant du papier en vrac. Le coût moyen de ce matériau est de l'ordre de 0,01 € / kg. Et il n'y a pas de flux de matières extérieures dans cette série de scénarios 0.

Concernant le **nombre d'acteurs** impliqués dans les scénarios. Les acteurs sont de natures différentes en fonction de scénarios considérés. Il peut s'agir de clients, fournisseurs et / ou partenaires, par exemple. Pour toute la série des scénarios 0, pour la partie « collecte », seules les collectes en bibliothèque sont considérées soit 724 en région Auvergne-Rhône-Alpes⁴⁴ (16000 au niveau national⁴⁵). Pour la partie « vente », Recyclivre revend ses ouvrages d'occasion uniquement via son site internet. Ainsi, il y a peu d'acteurs impliqués sur le territoire pour la partie vente.

Une variation des paramètres associés aux indicateurs est observée en fonction des scénarios. Les paramètres qui varient sont les suivants :

La masse de PRODUITS valorisée dans chaque scénario en raison de la disponibilité des livres rares ou d'occasion. Pour les scénarios de la série 0.2, nous estimons que les livres rares et / ou anciens représente environ 5 % de la masse collectée, alors que pour les livres « classiques » cela représentent environ 30 % de la masse collectée (scénarios de la série 0.0 et 0.1).

Le prix du produit équivalent varie en raison de la nature des OBJETS sélectionnés dans le gisement et des efforts attribués à l'augmentation des valeurs. En effet, les livres rares et / ou anciens sont plus chers que les livres d'occasion « classiques ». Pour les scénarios de la série 0.2, nous estimons que le prix des livres rares et / ou anciens est dix fois supérieur au prix des livres d'occasion « classiques ».

Les paramètres associés aux valeurs culturelles, d'unicité et de matière présentent également des variations significatives. Pour les scénarios de la série 0.0 et 0.1, qui concernent les livres d'occasion « classiques » l'évaluation des valeurs associées reste comprise entre 0 et 50. En revanche, pour les scénarios de la série 0.2, les OBJETS sélectionnés et les efforts attribués à l'augmentation des valeurs contribuent à une notation plus élevée que pour les scénarios 0.0 et 0.1.

Les résultats des indicateurs de la série 0 sont rassemblés dans le Tableau 20. L'évaluation comparative est représentée sous la forme d'un diagramme radar à 10 axes dans lequel chaque axe représente un indicateur (Figure 46).

⁴⁴ Source : <https://auvergnerhonealpes-livre-lecture.org/annuaires/bibliotheques> Consulté le 14/10/2021.

⁴⁵ Source : <https://www.culture.gouv.fr/Sites-thematiques/Livre-et-lecture/Les-bibliotheques-publiques> Consulté le 14/10/2021.

Tableau 20 : données de calcul des indicateurs pour les scénarios de la série 0.

Paramètre	Scenario 0.0	Scénario 0.1	Scénario 0.2.1.	Scénario 0.2.2.	Scénario 0.2.3.
Nombre de collecte par mois	20 / mois	20 / mois	20 / mois	20 / mois	20 / mois
Distance à parcourir par collecte	50 km	50 km	50 km	50 km	50 km
Volume de déchet / OBJET par collecte	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)
M objet	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
M ext	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
M chute	70 (tri ISBN des livres ne pouvant être revendus)	70 (tri ISBN des livres ne pouvant être revendus)	95 (tri ISBN des livres ne pouvant être revendus)	95 (tri ISBN des livres ne pouvant être revendus)	95 (tri ISBN des livres ne pouvant être revendus)
M produit	30 %	30 %	5 %	5 %	5 %
Fraction massique d'OBJET dans le PRODUIT (f_{objet})	$1(f_{objet} + f_{mext} = 1)$	$1(f_{objet} + f_{mext} = 1)$	$1(f_{objet} + f_{mext} = 1)$	$1(f_{objet} + f_{mext} = 1)$	$1(f_{objet} + f_{mext} = 1)$
Fraction massique de matières extérieures dans le PRODUIT (f_{mext})	0	0	0	0	0
Coût moyen du matériau lié au flux de déchet (€ / kg)	0.01 (Papier vrac)	0.01 (Papier vrac)	0.01 (Papier vrac)	0.01 (Papier vrac)	0.01 (Papier vrac)
Coût moyen du matériau lié au flux de matières extérieures (€ / kg)	Pas de matières ext associées à ce scénario	Pas de matières ext associées à ce scénario	Pas de matières ext associées à ce scénario	Pas de matières ext associées à ce scénario	Pas de matières ext associées à ce scénario
Prix du produit équivalent (€ / kg)	43 € / kg (Livre neuf)	43 € / kg (Livre neuf)	430 € / kg (Livre rare)	430 € / kg (Livre rare)	430 € / kg (Livre rare)
Compacité OBJET (%)	50 % (Livres vrac)	50 % (Livres vrac)	50 % (Livres vrac)	50 % (Livres vrac)	50 % (Livres vrac)
Compacité PRODUIT (%)	28 % (livres rayonnage)	28 % (livres rayonnage)	28 % (livres rayonnage)	28 % (livres rayonnage)	28 % (livres rayonnage)
Caractères de valeur culturelle	50 : « L'OBJET possède des valeurs moyennes »	50 : « L'OBJET possède des valeurs moyennes »	50 : « L'OBJET possède des valeurs moyennes »	75 : « L'OBJET possède des valeurs élevées »	100 : « L'OBJET possède des valeurs très élevées (incomparable) »
Caractères de valeur d'unicité	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »	50 : « L'OBJET possède des valeurs moyennes »	75 : « L'OBJET possède des valeurs élevées »	100 : « L'OBJET possède des valeurs très élevées (incomparable) »

Caractère de valeur matière	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »
Nombre d'acteurs dans le territoire	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 1 (Site Internet, vente par correspondance).	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 1 (Site Internet, vente par correspondance).	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 1 (Site Internet, vente par correspondance).	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 1 (Site Internet, vente par correspondance).	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 1 (Site Internet, vente par correspondance).

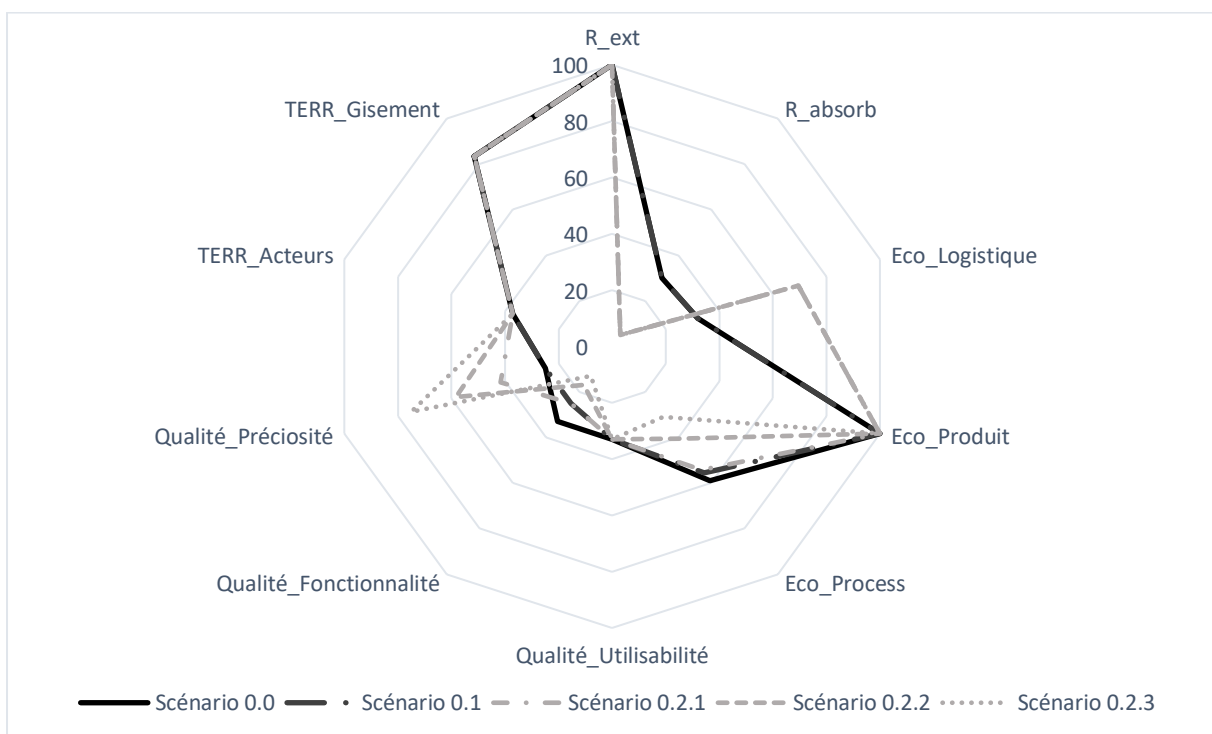


Figure 46 : évaluation comparative des scénarios de la série 0.

La Figure 46 montre que les scénarios de la série 0 se distinguent principalement sur les paramètres de l'indicateur matière R_{absorb} , de l'indicateur $Eco_{Logistique}$, $Eco_{Process}$ ainsi que sur les indicateurs $Qualité_{Fonctionnalité}$ et $Qualité_{Préciosité}$.

Plusieurs indicateurs permettent de différencier les scénarios de revente de livres d'occasion (0.0 et 0.1), des scénarios de revente de livres rares et / ou anciens (série 0.2). En effet l'indicateur R_{absorb} montre les quantités de PRODUITS valorisés sur une base 100 (soit 30 % pour les livres d'occasion et 5 % pour les livres rares et / ou anciens). Pour l'indicateur éco-Logistique, ce sont les critères associés au « coût de l'OBJET » qui permettent de différencier les scénarios (Pour les scénarios 0.0 et 0.1 « l'OBJET est légèrement moins coûteux qu'une autre matière première équivalente » alors que pour les scénarios de la série 2 « l'OBJET n'a pas d'autres matière première équivalente »). Les variations observées pour l'indicateur $Qualité_{Fonctionnalité}$ sont dues au nombre d'actions élémentaires et aux efforts associés.

Enfin l'indicateur *QualitéPréciosité* mesure la capacité des scénarios à créer de nouvelles valeurs. Ce dernier ne permet pas de différencier les scénarios 0.0 et 0.1 car les OBJETS évalués sont les mêmes (livres d'occasion), cependant l'indicateur est capable d'effectuer une distinction entre les scénarios de la série 2 en raison des efforts de restauration et d'expertise destinés à augmenter les valeurs des OBJETS.

L'indicateur *EcoProcess* (prise en compte du nombre d'actions de fabrication) permet de distinguer l'ensemble des scénarios de la série 0, en revanche aucune différenciation n'est observable sur les scénarios des séries 1 et 2 en dépit de la variation du nombre d'actions de fabrication.

Les indicateurs *R_{ext}*, *TerritoireActeurs* et *TerritoireGisements* ne sont pas discriminants car les données de calcul sont identiques.

L'indicateur *EcoProduit* donne également des résultats non discriminants bien que les données utilisées présentent de grandes disparités. Ce résultat est dû au rapport entre « le coût moyen du matériau lié au flux de déchet » et le « prix du produit de référence ». Dans ce cas d'étude sur la valorisation des livres, le prix du déchet est si faible (0,01 €) que l'écart entre le « coût du déchet » et le « prix du PRODUIT » est systématiquement très élevé. De ce fait, les résultats obtenus sont identiques malgré les différences de prix de vente des PRODUITS qui varient d'un facteur 1 à 10 (de 43 € à 430 €).

4.3.3 SÉRIES DE SCÉNARIOS 1 et 2 : fabrication de panneaux de structures (1) et de fauteuils à partir de ces panneaux de structure (2)

Le scénario 1.1 détaille la fabrication de panneaux de structure à partir de livres, similaires aux panneaux OSB fabriqués par compression et collage de copeaux de bois. Le scénario 2.1 se concentre sur la fabrication d'un fauteuil mono-matériaux entièrement réalisé en panneaux de structure « livres ». Le scénario 2.2 détaille une variante de ce fauteuil qui consiste à intégrer des matériaux neufs pour la réalisation d'une assise en mousse destinée à améliorer le confort du PRODUIT.

Le Tableau 21 présente les contours des systèmes étudiés pour les scénarios 1.1, 2.1 et 2.2. Chaque scénario sera décrit ci-après.

Tableau 21 : description du système étudié : séries de scénario 1 et 2.

Paramètre	Scénario 1.1	Scénario 2.1	Scénario 2.2
SYSTEME ETUDIE	Le système est composé de trois entreprises complémentaires.	Le système est composé de trois entreprises complémentaires.	Le système est composé de trois entreprises complémentaires.
DECHET	Livre	Livre	Livre
OBJET	OBJET 1.1	OBJET 2.1	OBJET 2.2
MATIERE PREMIERE EQUIVALENTE	Copeaux de bois	Copeaux de bois	Copeaux de bois
PRODUIT	Panneaux livres	Fauteuil	Fauteuil
PRODUIT DE REFERENCE EQUIVALENT	Panneau OSB	Fauteuil	Fauteuil
TERRITOIRE	Région AURA	Région AURA	Région AURA

4.3.3.1 Description du scénario 1.1

Dans ce scénario, les copeaux de bois utilisés dans la fabrication de panneaux de structure en OSB sont substitués par des copeaux de papiers des pages de livres. Trois entreprises partenaires sont considérées : Recyclivre, Elise et Dispano. Recyclivre collecte les livres en fin de vie et les envoie chez Elise. Elise se charge de désassembler les livres en séparant les pages des couvertures. Les pages sont alors broyées et les copeaux conditionnés en sacs. Ces copeaux sont suffisamment gros pour laisser apparaître des petites parties de texte ou d'images donnant un aspect visuel spécifique aux panneaux, renvoyant à leur origine et permettant l'identification du gisement. Les aspects visuels peuvent éventuellement être maîtrisés en affinant les critères de tri lors de la sélection des livres (par exemple sur des critères esthétiques). Enfin, Dispano se procure les copeaux pour réaliser des panneaux livres type OSB. Les copeaux sont encollés, pressés, et sciés. Les chutes issues de la production sont conservées de manière à être broyées de nouveau pour revenir dans la fabrication de panneaux livres. Une fois fabriqués, les panneaux sont référencés et conditionnés sur palette pour être stockés en vue d'être expédiés chez les revendeurs de matériaux de construction à l'échelle régionale.

La Figure 47 présente le diagramme de flux représentant le scénario 1.1 . Il se décompose en actions élémentaires caractérisées par des efforts associés (Tableau 22).

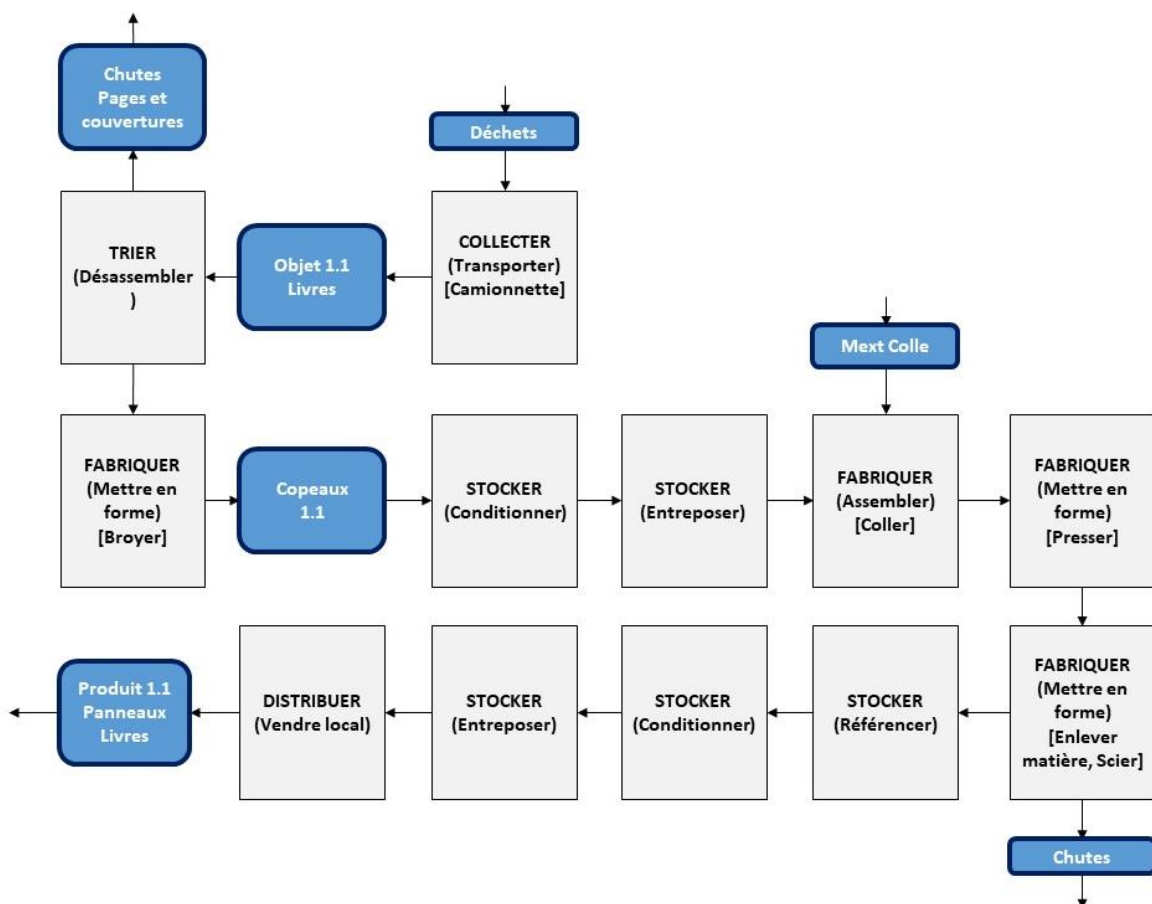


Figure 47 : diagramme de flux du scénario 1.1 : « fabrication de panneaux livres ».

Tableau 22 : table des actions élémentaires (scénario 1.1).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Désassembler		1	2	2	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Broyer	1	1	1	1
STOCKER	Conditionner	Sac	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Copeaux	1	1	1	1
FABRIQUER	Assembler	Coller	1	1	1	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Presser	2	1	1	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlever matière (Scier)	1	2	2	1
STOCKER	Référencer		1	1	1	1
STOCKER	Conditionner	Palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Panneaux	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre local		1	1	2	1

4.3.3.2 Description du scénario 2.1 et 2.2 : fabrication de fauteuils

La série de scénarios 2 considère trois entreprises partenaires : Recyclivre qui collecte des livres en fin de vie, Elise broie les livres pour en faire des copeaux et Dispano qui se procure les copeaux pour réaliser des panneaux livres type OSB. Ces panneaux sont sciés et assemblés sur place par fixation mécaniques pour réaliser la structure d'un fauteuil. Les fauteuils fabriqués sont référencés, conditionnés et stockés chez Dispano en attente d'être distribué sur un marché local.

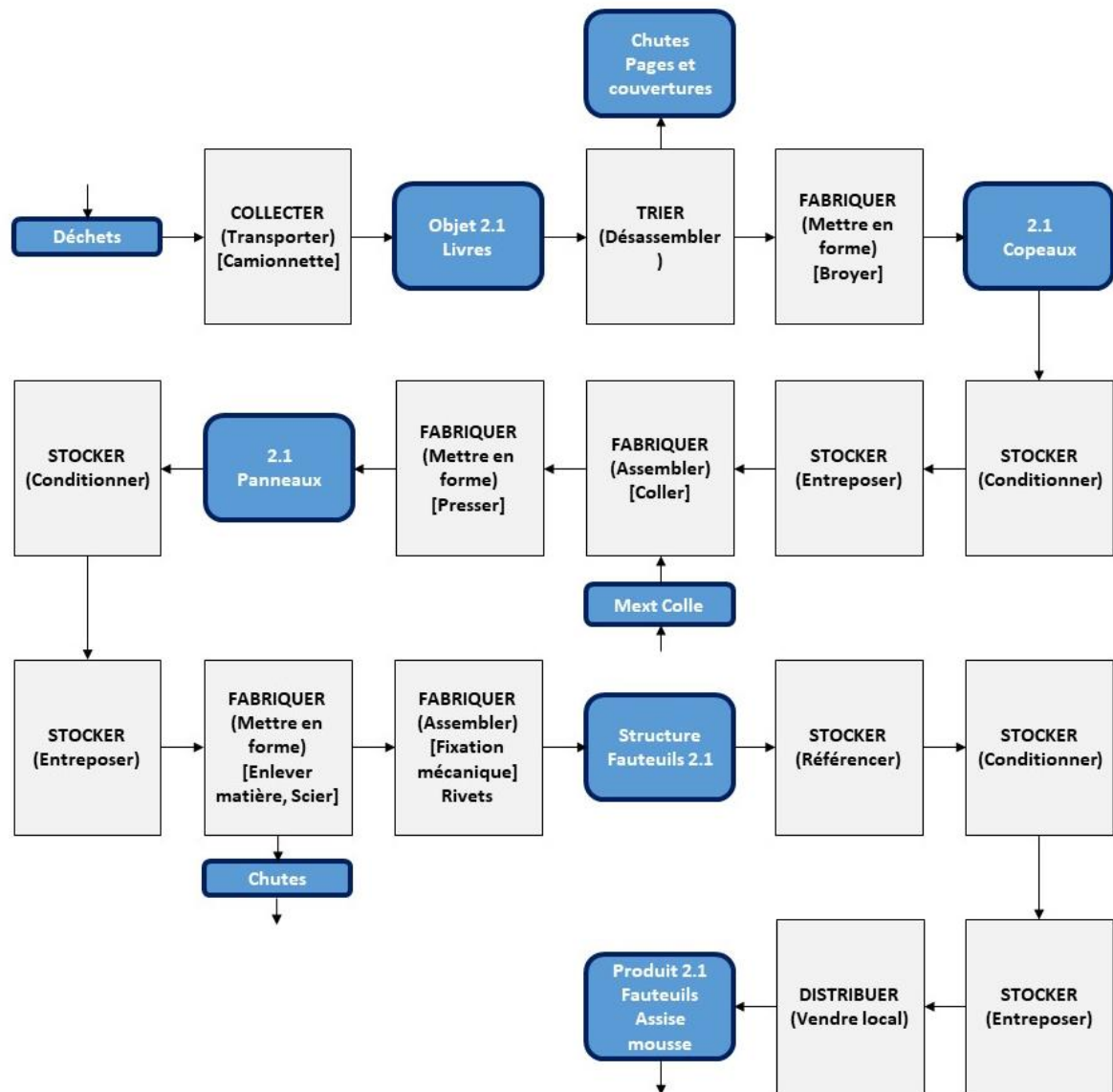


Figure 48 : diagramme de flux du scénario 2.1 : « fabrication de mobilier en panneaux livres ».

Le scénario 2.1 se concentre sur la fabrication d'un fauteuil mono-matériau entièrement réalisé en panneaux livres. Le scénario 2.2 détaille une variante qui consiste à intégrer des matériaux neufs pour la réalisation d'une assise en mousse destinée à améliorer le confort du PRODUIT. La Figure 48 présente le diagramme de flux associé au scénario 2.1. Les actions élémentaires contenues dans ce diagramme sont décrites dans le Tableau 23 :

Tableau 23 : table des actions élémentaires (scénario 2.1).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Désassembler		1	2	2	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Broyer	1	1	1	1
STOCKER	Conditionner	En sac	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Copeaux	1	1	1	1
FABRIQUER	Assembler	Coller	1	1	1	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Presser	2	1	1	2
STOCKER	Conditionner	Sur palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Panneaux	1	1	1	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlever matière (Scier)	1	2	2	1
FABRIQUER	Assembler	fixation mécanique rivets	1	2	3	1
STOCKER	Référencer		1	1	1	1
STOCKER	Conditionner	Sur palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Structure	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre local		1	1	2	1

La Figure 49 représente le diagramme de flux associé au scénario 2.2. Ce diagramme est composé d'actions élémentaires listées chronologiquement et des efforts associés dans le Tableau 24.

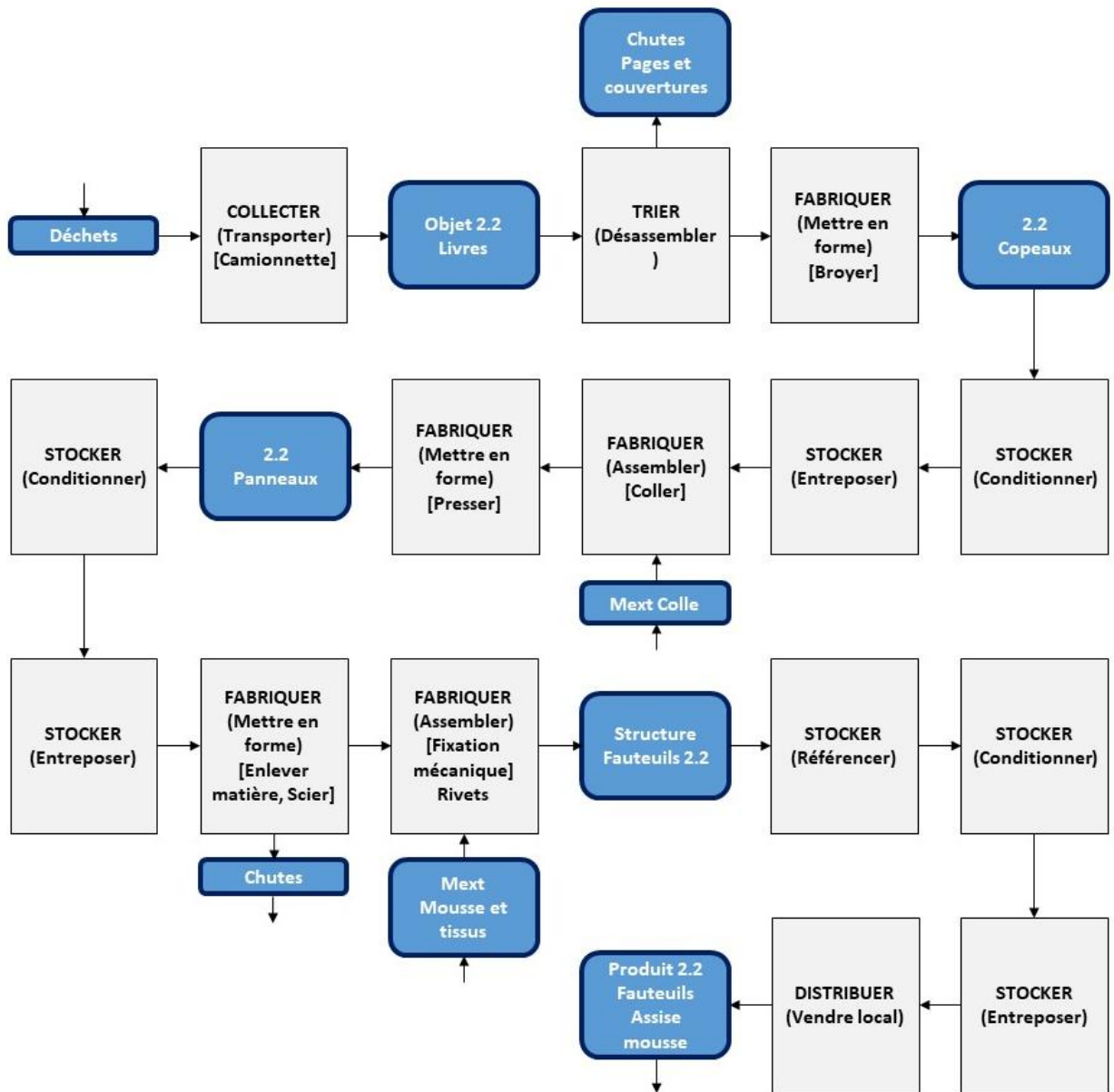


Figure 49 : diagramme de flux du scénario 2.2 : « fabrication de mobilier en panneaux livres avec assise en mousse ».

Tableau 24 : table des actions élémentaires (scénario 2.2).

Action élémentaire			Effort associé			
Famille	Type	Description	INVESTISSEMENT	HUMAIN	FONCTIONNEMENT	GLOBAL
COLLECTER	Transporter	Camionnette	1	2	3	1
TRIER	Désassembler		1	2	2	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Broyer	1	1	1	1
STOCKER	Conditionner	En sacs	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Copeaux	1	1	1	1
FABRIQUER	Assembler	Coller	1	1	1	1
FABRIQUER	Assembler	Presser	2	1	1	2
STOCKER	Conditionner	Sur palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Panneaux	1	1	1	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlever matière (Scier)	1	2	2	1
FABRIQUER	Assembler	fixation mécanique rivets	1	2	3	1
STOCKER	Référencer		1	1	1	1
STOCKER	Conditionner	Sur palette	1	1	1	1
STOCKER	Entreposer	Structure	1	1	1	1
DISTRIBUER	Vendre local		1	1	2	1

4.3.3.3 Calculs des indicateurs pour les scénarios 1.1, 2.1 et 2.2

Les données de calcul utilisées pour l'évaluation des scénarios 1.1, 2.1 et 2.2 sont présentées dans le Tableau 25.

Ces scénarios ont été regroupés car ils se concentrent sur la fabrication de panneaux (Scénario 1.1). En effet, ces panneaux sont utilisés pour produire du mobilier dans les scénarios 2.1 et 2.2. De ce fait, de nombreux paramètres exploitent des données identiques :

- La fréquence des collectes reste inchangée (20 km / mois) car ces scénarios reposent sur les collectes effectuées par Recyclivre. Cependant, la distance à parcourir est plus grande que pour les scénarios de la série 0 en raison du nombre de partenaires impliqués et la nécessité de transporter les livres chez Elise, puis chez Dispano. Le volume collecté est donc identique à tous les scénarios (séries 0, 1 et 2). De même la compacité OBJET (livres en vrac) reste fixe à 50 %.

- Le coût moyen du matériau lié au flux de déchet reste identique pour l'ensemble des scénarios séries 0, 1 et 2) dans la mesure où ils reposent tous sur un flux de déchet papier dont le coût est estimé à 0,01 € / kg.

- Les valeurs associées à l'OBJET restent identiques pour les scénarios de la série 1 et 2. En effet, ces scénarios exploitent des livres considérés comme « indésirables » par Recyclivre. De ce fait les livres sont broyés en vue de produire des copeaux de papier issus des pages. Les valeurs associées à l'OBJET sont donc estimées comme étant particulièrement faibles pour la valeur matière ; voire inexistantes pour les valeurs culturelles ou pour les valeurs d'unicité.

Cependant les scénarios des séries 1 et 2 se distinguent sur divers paramètres :

- Contrairement aux scénarios de la série 0, les scénarios des séries 1 et 2 consomment des matières extérieures neuves (M_{ext}). La production de panneaux utilise de la colle (scénario 1.1). Ces panneaux sont utilisés dans les scénarios de la série 2 (fauteuils), d'où la présence de colle dans une proportion équivalente pour les 3 scénarios. Le scénario 2.2 se distingue des autres scénarios par l'usage de mousse utilisée pour la confection de l'assise. Des chutes sont produites à chaque étape de transformation des semi-PRODUITS. Les proportions de chutes

sont également conservées d'un scénario à l'autre, mais varient en fonction de la complexité du PRODUIT. Chaque PRODUIT étant différent (panneau (1.1), fauteuil (2.1), fauteuil confort (2.2)), la masse du PRODUIT est donc ajustée pour chaque scénario. La variation de ces paramètres a donc une incidence directe sur la fraction massique d'OBJETS dans le PRODUIT (f_{objet}), ainsi que sur la fraction massique de matières extérieures (f_{mext}). La compacité PRODUIT subit d'importantes variations dans la mesure où la transformation des panneaux en mobilier réduit significativement la compacité du PRODUIT développé.

- Le « prix du produit équivalent » varie pour chaque scénario des séries 1 et 2 car chaque scénario propose un produit spécifique dont l'équivalent est unique.

- Les données utilisées pour mesurer la dynamique territoriale sont identiques aux scénarios de la série 0 pour le nombre de fournisseurs. En effet, le nombre de fournisseurs est inchangé sur l'ensemble des scénarios car tous reposent sur la collecte effectuée par Recyclivre. Cependant, nous pouvons observer une variation du nombre de clients en fonction des PRODUITS développés qui ciblent des marchés différents (magasins de bricolage (1.1) ou de mobilier (série 2)).

Toutes les données sont regroupées dans le Tableau 25.

Tableau 25 : données de calcul des indicateurs pour les scénarios 1.1, 2.1 et 2.2.

Paramètre	Scénario 1.1	Scénario 2.1	Scénario 2.2
Nombre de collecte par mois	20 collectes	20 collectes	20 collectes
Distance à parcourir par collecte	70 km	70 km	70 km
Volume de déchet / OBJET par collecte	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)	0.36 m ³ (500 kg à densité 700 kg / m ³ et compacité 50 %)
M objet	100 kg	30 kg	30 kg
M ext	10 kg (colle)	3 kg (colle) (Nous faisons l'hypothèse que les fixations mécaniques ne sont pas représentatives et ne sont pas comptées.)	5 kg (Colle 3 kg + Coussin 2 kg) (Nous faisons l'hypothèse que les fixations mécaniques ne sont pas représentatives et ne sont pas comptées.)
M chute	15 kg (pages, et couvertures (10 kg)) + sciage des panneaux (5 kg)	6 kg (3 kg Chutes pages et couvertures + 3 kg découpes des panneaux en structure)	6 kg (3 kg Chutes pages et couvertures + 3 kg découpes des panneaux en structure)
M produit	95 kg (650 kg / m ³)	27 kg (panneaux livres structure)	29 kg (27 kg (panneaux livres structure) + 2 kg de mousse)
Fraction massique d'OBJET dans le PRODUIT (f_{objet})	0,89	0,89	0,84
Fraction massique de matières extérieures dans le PRODUIT (f_{mext})	0,11	0,11	0,16
Coût moyen du matériau lié au flux de déchet (€ / kg)	0.01 € (Papier vrac)	0.01 € (Papier vrac)	0.01 € (Papier vrac)
Coût moyen du matériau lié au flux de matières extérieures (€ / kg)	Coût moyen = 10 € / kg - Colle à 10 € / kg (1200 \$ US / tonne - colle mélamine urée formaldéhyde résine poudre)	Coût moyen = 10 € / kg - Colle à 10 € / kg (1200 \$ US / tonne - colle mélamine urée formaldéhyde résine poudre)	Coût moyen = 8 € / kg - Colle à 10 € / kg (1200 \$ US / tonne - colle mélamine urée formaldéhyde résine poudre) - mousse à 6 € / kg

Prix du produit équivalent (€ / kg)	1,5 € / kg (panneau OSB 9/12 mm ep.)	Fauteuil 200 € / 27 kg = 7,4 € / kg	Fauteuil 200 € / 29 kg = 7 € / kg
Compacité OBJET (%)	50 % (Livres vrac)	50 % (Livres vrac)	50 % (Livres vrac)
Compacité PRODUIT (%)	100% (Panneaux stockés sur palette)	7 %	15 %
Caractères de valeur culturelle	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »
Caractères de valeur d'unicité	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »	0 : « L'OBJET n'a pas de valeurs »
Caractère de valeur matière	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »	25 : « L'OBJET possède des valeurs faibles »
Nombre d'acteurs dans le territoire	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 77 (Magasins de bricolage)	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 898 magasins de mobilier (pages jaunes) Total : 1622 acteurs	Fournisseurs : 724 (Bibliothèques) Clients : 898 magasins de mobilier (pages jaunes) Total : 1622 acteurs

La Figure 50 présente les résultats obtenus pour l'évaluation des séries de scénarios 1 et 2. Nous pouvons observer que la série 1 se distingue des scénarios de la série 2. En effet pour les scénarios de la série 2 les données exploitées sont très similaires, mais se distinguent des résultats obtenus pour la série 1 notamment sur la dynamique territoriale associée au nombre d'acteurs, ce qui a une incidence sur le nombre d'actions de stockage et de conditionnement des semi-PRODUITS utilisés dans la fabrication et donc un effet direct sur les résultats obtenus pour l'indicateur *Eco_Logistique*. L'indicateur *Eco_Produit* subit également de fortes variations, car la valeur créée pour la fabrication de fauteuils est nettement supérieure à la valeur créée par les panneaux. Les indicateurs *R_ext* et *R_absorb* présente de subtiles variations en raison de l'usage de matières extérieures dans la fabrication des PRODUITS.

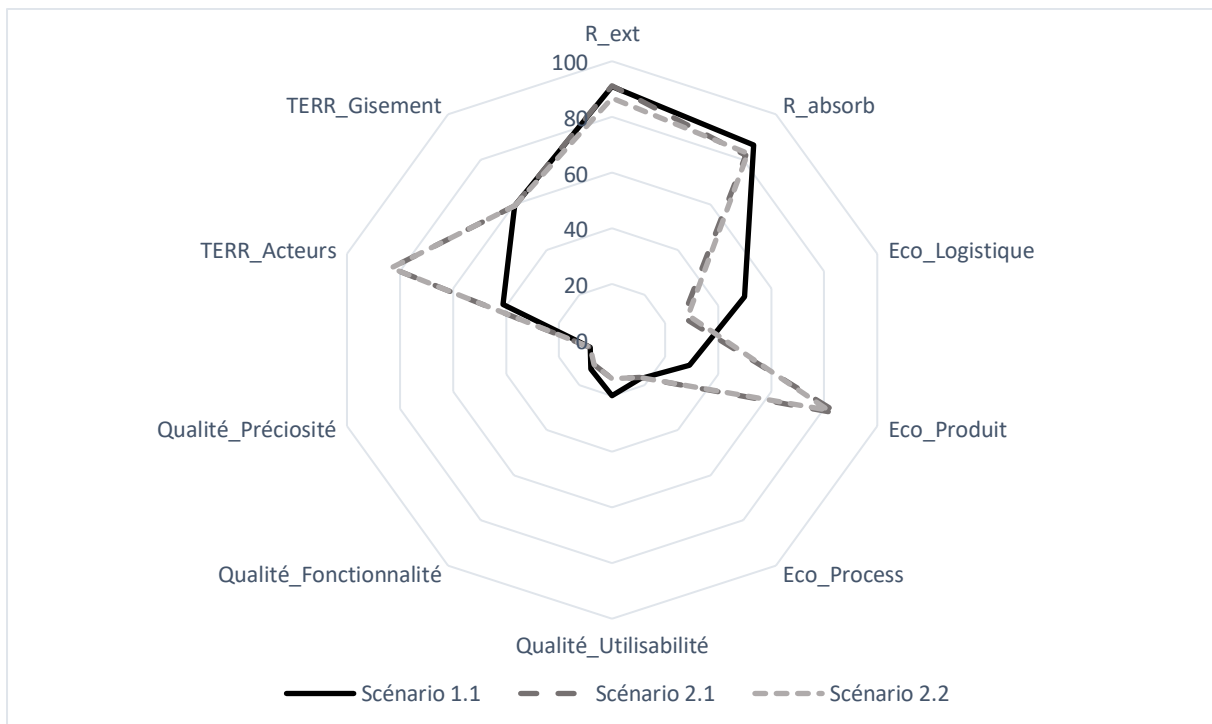


Figure 50: évaluation comparative des scénarios (séries 1 et 2).

Les indicateurs de qualité donnent également des résultats très proches :

- L'indicateur de préciosité donne des résultats identiques pour chaque scénario car les mêmes OBJETS sont évalués.

- Les indicateurs *Qualité_{Fonctionnalité}* et *Qualité_{Utilisabilité}* obtiennent des résultats très similaires pour les séries de scénario 1 et 2.

L'intensité des efforts de stockage et de conditionnement permettent de différencier la série 1 de la série 2 pour l'indicateur *Qualité_{Utilisabilité}*, même si les résultats sont proches. Cependant aucune différence n'est perceptible sur la série 2 car le nombre d'actions STOCKER (entreposer) et STOCKER (conditionner) sont identiques. En effet pour les scénarios de la série 2, le nombre de semi-PRODUITS est identique, de ce fait les efforts comptabilisés ne permettent pas de discriminer ces scénarios.

Les résultats obtenus pour l'indicateur *Qualité_{Fonctionnalité}* sont également peu différenciant. En effet, les efforts de tri, de fabrication et de caractérisation sont globalement équivalents pour les séries 1 et 2. Une légère discrimination entre la série 1 et 2 peut-être constatée, bien que les résultats obtenus pour la série 2 sont identiques. La différence entre la série 1 et 2 est due au nombre d'actions de transformation (FABRIQUER).

Pour ces deux indicateurs, une légère distinction est visible entre les scénarios de la série 1 et ceux de la série 2 car la fabrication de mobilier nécessite des efforts supplémentaires (efforts de tri, de stockage, de conditionnement, de transformation et de caractérisation) pour aboutir au PRODUIT fini.

4.3.4 Discussion des résultats – Analyse critique.

Dans cette partie les résultats obtenus suite à l'évaluation des scénarios seront discutés. Par ailleurs, les points forts, perspectives et faiblesses des indicateurs seront abordés de manière à fournir les clés de compréhension pour une amélioration ultérieure des outils d'évaluation présentés dans le cadre de ce travail de recherche.

4.3.4.1 Choix des scénarios et résultats.

Pour cette discussion, nous avons choisi de nous focaliser sur les scénarios les plus représentatifs de chaque série. Ainsi, quatre scénarios sont comparés en fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur (Tableau 26).

Tableau 26 : présentation des scénarios représentatifs pour l'analyse critique des résultats

N# du scénario	Description du scénario
0.0	Scénario de référence type « Recyclivre » : collecte pour vente de Livre d'occasion avec encodage numérique
0.2.3	Collecte de livres rares restaurés pour la revente avec effort d'augmentation de valeur
1.1	Production de panneaux livres
2.1	Production de fauteuils en panneaux livres

La comparaison des scénarios est présentée sur un diagramme radar (Figure 51). Afin de faciliter la lecture et la comparaison entre les scénarios, le scénario de référence est présenté en trait continu. Ainsi, trois scénarios sont comparés au scénarios de référence 0.0.

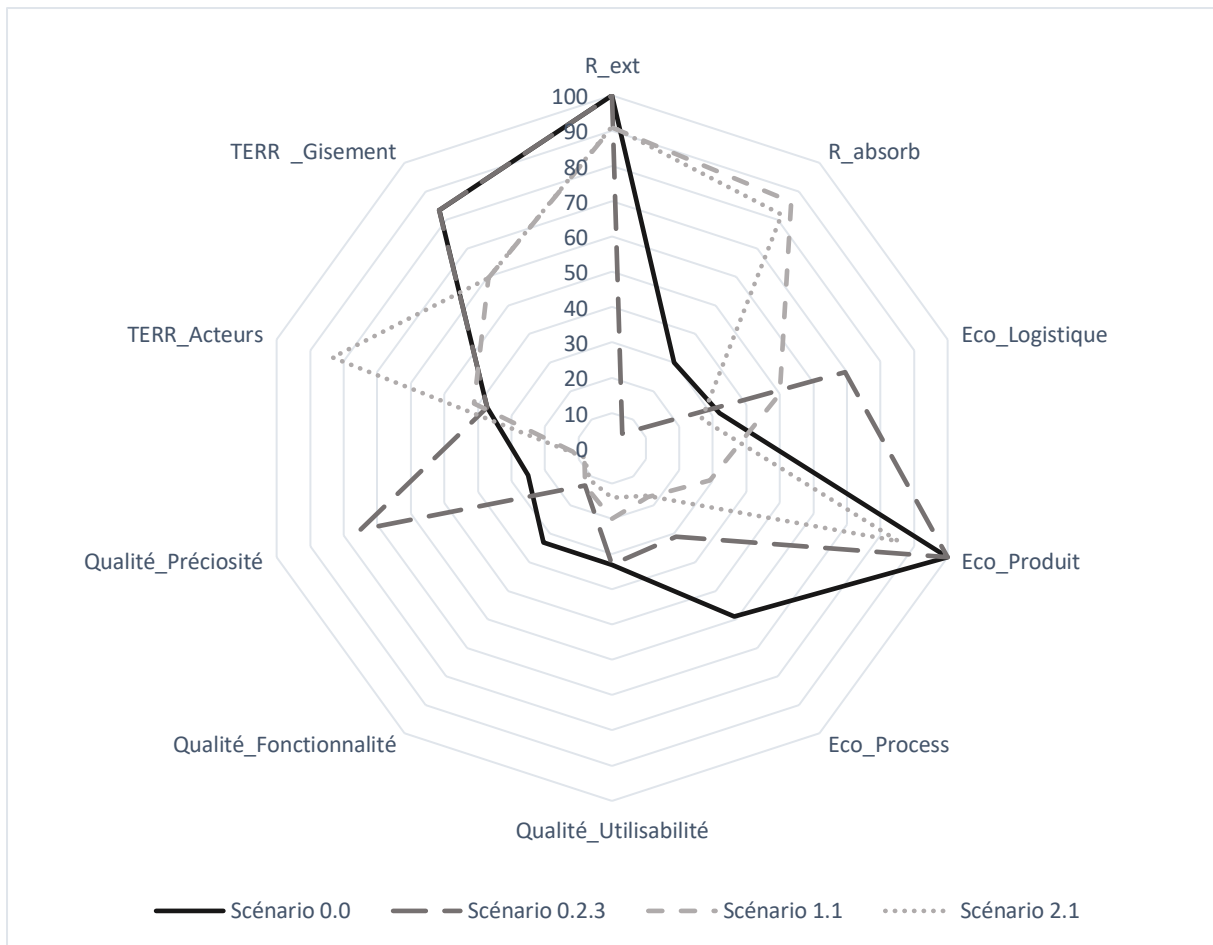


Figure 51 : comparaison entre les scénarios 0.0 / 0.2.3 / 1.1 et 2.1.

4.3.4.2 Comparaison des résultats pour les indicateurs matière

Indicateur R_{ext} : taux d'absorption matière.

L'indicateur R_{ext} reste systématiquement élevé (Figure 52). Ceci est dû au fait que l'ensemble des scénarios sont exclusivement tournés vers des stratégies de supercyclage. De ce fait les scénarios n'utilisent que très peu de matières neuves et privilégient toujours la valorisation d'OBJETS.

Indicateur R_{absorb} : taux d'absorption PRODUIT.

L'indicateur R_{absorb} témoigne quant à lui d'une variation importante entre les scénarios (Figure 52). Le scénario de référence absorbe 30 % des OBJETS collectés car seuls les livres d'occasion revendables sont valorisés. On distingue que le scénario 0.2.3 se situe bien en dessous de la capacité d'absorption du scénario de référence. En effet les critères de tri du scénario 0.2.3 sont beaucoup plus exigeants et seuls les livres anciens sont valorisés ce qui représente 5 % du total de livres collectés. En revanche, les scénarios 1.1 et 2.1 obtiennent un score beaucoup plus élevé que les autres scénarios (86 % du flux est absorbé pour le scénario 1.1 et 82 % pour le scénario 2.1). Ces résultats s'expliquent par le fait que la quasi-totalité des livres peuvent être valorisés dans ces scénarios car les critères de tri sont beaucoup moins exigeants et moins nombreux que pour les scénarios de vente des livres d'occasion.

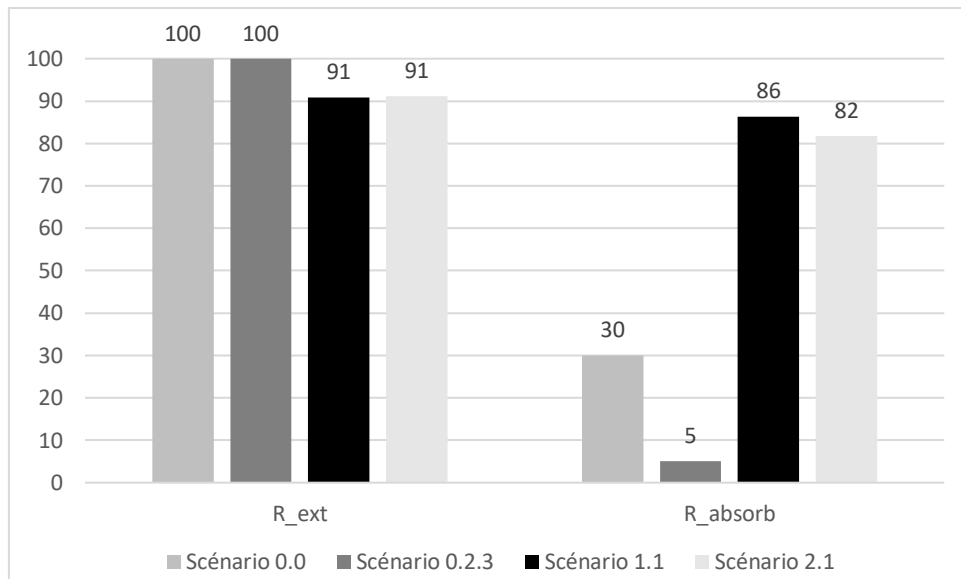


Figure 52 : comparaison des résultats pour les indicateurs matière.

4.3.4.3 Comparaison des résultats pour les indicateurs économiques.

Indicateur $Eco_{Logistique}$: viabilité économique des OBJETS collectés.

L'indicateur $Eco_{Logistique}$ présente de grandes disparités dans les résultats obtenus (Figure 51). Les résultats s'échelonnent entre 27 (pour le scénario 2.1) et 70 (pour le scénario 0.2.3) (Figure 53). La note du scénario 2.1 s'explique par le faible coût des OBJETS utilisés (livres en vrac) et par le fait que ces OBJETS peuvent aisément être remplacé par d'autres matières premières équivalentes (copeaux de bois ou autres OBJETS en papier et carton). De plus, la compacité volumique du PRODUIT est très faible (compacité PRODUIT 7 %) en raison de l'espace nécessaire au stockage des fauteuils assemblés. En revanche la note du scénario 0.2.3 est beaucoup plus élevée. Il s'agit de la revente de livres rares ou ancien, de ce fait aucune matière première équivalente ne peut concurrencer le PRODUIT. Il est donc irremplaçable pour ce scénario. La note est également augmentée en comparaison avec le scénario de production de fauteuils car la compacité volumique des livres rares et anciens est nettement plus élevée (Livres en rayonnage compacité PRODUIT de 28 %) que la compacité volumique des fauteuils assemblés. En ce sens l'indicateur $Eco_{Logistique}$ permet bien de différencier les scénarios étudiés.

Indicateur $Eco_{Produit}$: viabilité économique d'un PRODUIT supercyclé.

L'indicateur $Eco_{Produit}$ attribue des résultats identiques pour les scénario 0.0 (100/100) et 0.2.3 (100/100). Un écart s'observe avec le scénario 2.1. (85/100) (Figure 53). Cependant le scénario 1.1 se distingue nettement des autres scénarios avec un résultat beaucoup plus faible (29/100). Cette différence s'explique par le prix de vente du PRODUIT au kilo qui est relativement faible pour les panneaux OSB (1,5 € / kg) en comparaison avec les livres d'occasion (43 € / kg), les livres rares et anciens (430 € / kg) ou la fabrication de fauteuils (7,4 € / kg). De plus, la fraction massique de matières extérieures dans le PRODUIT est plus élevée dans le scénario 1.1 que dans les autres scénarios qui n'utilisent pas ou très peu de matières extérieures. Le prix des matières extérieures, même s'il est peu élevé dans le scénario 1.1, a également un impact sur le résultat obtenu. La faible sensibilité de l'indicateur

sur les scénarios 0.0 ; 0.2.3 avec le scénario 2.1 s'explique notamment par le fait que ces scénarios ne consomment pas (ou très peu) de matières extérieures neuves tout en ayant un prix de revente élevé du PRODUIT par kilo. Par ailleurs, la fraction massique d'OBJETS dans les PRODUITS est très élevée pour les scénarios étudiés (elle est maximale (= 1) pour les scénarios 0.0 et 0.2.3 car il y a 100 % d'OBJETS dans le PRODUIT) ; ce paramètre dont les valeurs sont maximales, rend la comparaison difficile entre les scénarios. De ce fait, le rapport entre le prix des OBJETS et le prix de revente des PRODUITS reste très élevé si l'on compare le prix très faible des OBJETS collectés (déchet papier à 0,01 € / kg) au regard du prix de revente des PRODUITS.

Indicateur $Eco_{Process}$: coûts de production associés aux différentes stratégies de supercyclage.

Les résultats obtenus pour l'indicateur $Eco_{Process}$ donnent une amplitude de valeurs comprise entre 17 et 59 (Figure 53). La note favorable attribuée au scénario 0.0 témoigne du fait qu'aucune opération de transformation n'est effectuée dans ce scénario. Par ailleurs, l'encodage des livres se faisant via l'algorithme les coûts humains s'en trouvent réduits. En effet le scénario 0.2.3 effectue l'encodage manuellement et ajoute diverses actions élémentaires associées à la restauration des livres anciens et à l'expertise des valeurs. Ces actions supplémentaires ont une incidence sur les résultats obtenus ce qui est dû à l'augmentation des efforts associés aux actions de fabrication ([Restaurer]) et de préparation ([Expertiser]). Ces actions ont pour conséquence d'augmenter le coût humain, sans nécessiter d'investissement supplémentaires. Le scénario 1.1 reçoit quant à lui une note de 17. Le résultat obtenu pour ce scénario est inférieur au scénario de référence, car même si le nombre d'actions de préparation est inférieur, le nombre d'actions de fabrication et de stockage nécessaires à l'élaboration des panneaux est plus conséquente que pour la revente de livres d'occasion en raison du nombre de semi-PRODUITS qui entrent dans la fabrication des panneaux. Le résultat du scénario 2.1 témoigne de l'impact associé aux nombres d'actions de fabrication et de stockage car les fauteuils nécessitent davantage d'actions élémentaires que pour le scénario des panneaux livres (Scénario 1.1). Par ailleurs l'investissement nécessaire à la fabrication de mobilier est supérieur à l'investissement requis pour la fabrication de panneaux.

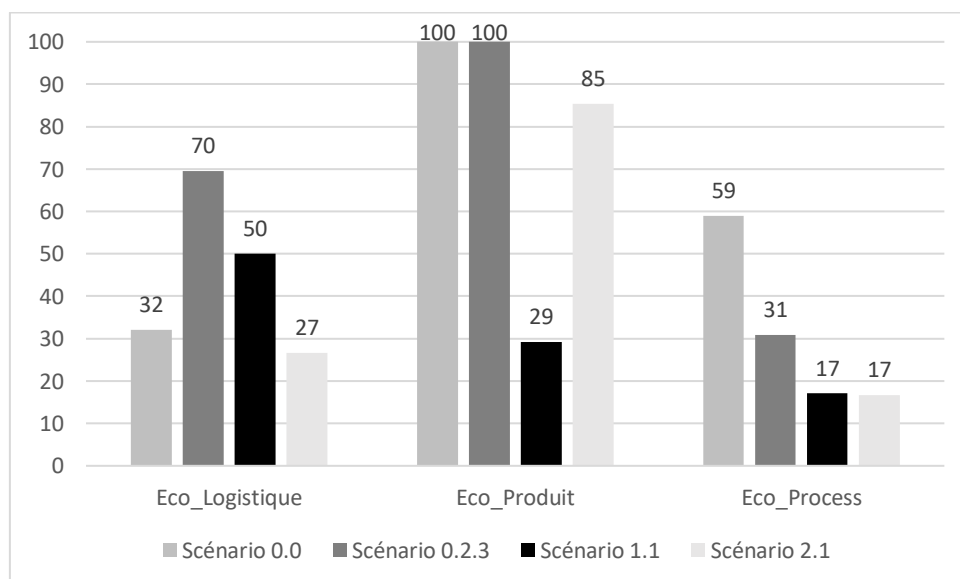


Figure 53 : comparaison des résultats pour les indicateurs économiques.

4.3.4.4 Comparaison des résultats pour les indicateurs de qualité.

Indicateur $Qualité_{Utilisabilité}$: capacité d'un OBJET à être utilisé en limitant le recours au stockage ou au conditionnement.

Les résultats obtenus pour l'indicateur $Qualité_{Utilisabilité}$ (Figure 54) montrent que le scénario de référence se prête bien à la revente de livres d'occasion car le flux ne nécessite que peu d'opérations de stockage ou de conditionnement. Pour rappel, le calcul de cet indicateur fait appel au calcul de l'effort de stockage lié aux actions STOCKER(Entreposer) et de l'effort de conditionnement lié aux actions STOCKER(Conditionner), PREPARER(Nettoyer) et PREPARER(Réparer).

Pour cet indicateur nous essayons d'évaluer la valeur de disponibilité du flux afin de savoir si ce dernier est exploitable sans nécessiter d'opérations de stockage et de conditionnement ; ou si au contraire il est nécessaire d'anticiper et de multiplier les opérations de stockage pour rendre le flux d'OBJETS disponible. De ce fait plus le nombre d'actions de stockage et de conditionnement est élevée, moins le scénario est favorable. La différence entre le scénario 0.0 et le scénario 0.2.3 s'explique principalement en raison des efforts associés au référencement des livres qui est automatisé dans les scénario 0.0 alors que le scénario 0.2.3 doit avoir recours au référencement manuel.

Indicateur $Qualité_{Fonctionnalité}$: évalue les efforts de tri, de transformation et de caractérisation d'un gisement.

Les résultats obtenus pour l'indicateur $Qualité_{Fonctionnalité}$ (Figure 54) s'échelonnent entre 33 et 11. La note la plus élevée est attribuée au scénario de référence, mais peu de différences sont observées entre les autres scénarios. Pour rappel, le calcul de cet indicateur fait appel au calcul de l'effort de tri lié aux actions TRIER (ici, Séparer, Désassembler et Déconstruire), de l'effort de transformation lié aux actions FABRIQUER et de l'effort de caractérisation lié aux actions TRIER(Calibrer), STOCKER(Référencer) et PREPARER(Contrôler).

L'indicateur de fonctionnalité permet d'évaluer les qualités fonctionnelles des OBJETS entrants dans un processus de supercyclage. De ce fait, si la valeur fonctionnelle des OBJETS est élevée pour un scénario, cela permet de réduire le nombre d'opérations de tri, de transformation ou de caractérisation. Le scénario 0.0 obtient une valeur élevée comparée aux scénarios 0.2.3, 1.1 et 2.1. En effet, pour le scénario de référence, les OBJETS ne requièrent aucune opération de transformation ; ils sont donc utilisés sans qu'il soit nécessaire d'en modifier la forme. Par ailleurs, les critères de tri pour ce scénario permettent de valoriser 30 % du flux selon l'indicateur R_{absorb} . Le scénario 0.2.3 ne nécessite également aucune opération de transformation, cependant les critères de tri pour les livres sont beaucoup plus exigeants. Ainsi une grande partie du flux est écartée (seul 5 % des livres sont conservés selon l'indicateur R_{absorb}) car la majeure partie des OBJETS collectés ne peuvent satisfaire les exigences fonctionnelles associées aux livres rares et anciens. Les scénarios 1.1 et 2.1 obtiennent également un score faible en comparaison du scénario de référence, car bien que les panneaux livres et le fauteuil soient peu exigeants sur les critères de tri, il est nécessaire d'avoir recours à de nombreuses opérations de fabrication pour que le flux puisse répondre aux fonctions attendues pour ces scénarios.

Indicateur *Qualité*_{Préciosité} :

Les résultats obtenus pour l'indicateur *Qualité*_{Préciosité} (Figure 54) permettent d'observer que les qualités associées aux livres d'occasion sont préservées pour les scénarios 0.0 et 0.2.3. Par ailleurs, les actions de focus proche [Restaurer] / [Expertiser] présentes dans le diagramme de flux du scénario 0.2.3 ont pour effet d'augmenter les valeurs associées aux livres d'occasion. C'est la raison pour laquelle le scénario 0.2.3 obtient un résultat beaucoup plus élevé que le scénario de référence. En revanche, les scénarios 1.1 et 2.1 ne préservent que très peu de valeurs associées aux livres d'occasion en raison des processus de transformation utilisés dans ces scénarios. En effet, les actions de focus proche [Désassembler] / [Broyer] / [Presser] / [Coller] / [Scier] associées à ces scénarios ne permettent pas de préserver les valeurs culturelles ou les valeurs d'unicité identifiées dans les OBJETS utilisés. Seule une partie de la valeur matière associée au livre d'occasion est conservée dans ces scénarios. Or, pour le papier, la valeur matière est très faible (10 € / t). Pour les scénarios de la série 1 et 2, une approche par le design peut se justifier pour augmenter les valeurs associées aux OBJETS. Par exemple il est possible de placer, en fond de moule, des pages ou des copeaux présentant un intérêt particulier : le texte, la typographie, les couleurs ou les images apparaîtraient alors au premier plan sous forme d'effets visuels, de textures, de motifs ou de « cadavres exquis ». Une telle approche permettrait notamment de créer de la valeur ajoutée en s'appuyant sur les valeurs esthétiques, les valeurs d'auteur, les valeurs d'unicité, ou de savoir-faire.

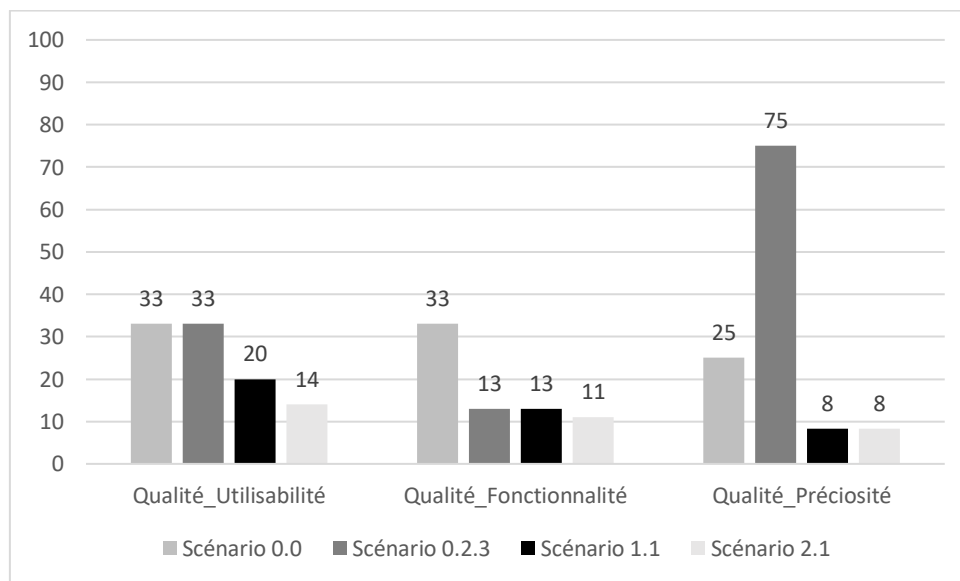


Figure 54 : comparaison des résultats pour les indicateurs de qualité.

4.3.4.5 Comparaison des résultats pour les indicateurs de dynamique territoriale.

Indicateur *Territoire*_{Acteurs} : la dynamique engendrée par les scénarios en termes de liens entre acteurs d'un territoire.

Les résultats obtenus pour l'indicateur *Territoire*_{Acteurs} sont représentés dans la Figure 55. Pour l'ensemble des scénarios, l'indicateur de dynamique territoriale considère un nombre de fournisseurs identiques car Recyclivre collecte chez les particuliers et dans les bibliothèques. Pour le calcul, nous avons donc retenu le nombre de bibliothèques en région Auvergne-Rhône-

Alpes, soit 724 bibliothèques⁴⁶. Les variations de résultats proviennent du nombre de clients sur le territoire de référence : soit 77 magasins de bricolage⁴⁷ en région AURA pour le scénario 1.1 ; et 898 magasins de mobilier⁴⁸ pour le scénario 2.1. Les différences de résultats proviennent donc de la variation du nombre de clients identifiés sur le territoire de référence. En effet, le nombre élevé de magasins de mobilier joue en faveur du scénario 2.1. En revanche, la vente par correspondance est difficilement quantifiable, de ce fait le nombre de clients pour les scénarios de la série est comptabilisé comme un unique client : le site internet de Recyclivre. Cette prise de position a un impact fort sur la dynamique associée aux scénarios de la série 0.

Indicateur *Territoire*_{Gisements} : la capacité d'un scénario à faire usage d'OBJETS collectés localement.

Les résultats obtenus pour l'indicateur *Territoire*_{Gisements} permettent de différencier deux types de scénarios (Figure 55). Les données utilisées sont restées inchangées pour l'ensemble des scénarios 0, car nous faisons l'hypothèse que les paramètres de collecte restent les mêmes pour ces scénarios. En effet le flux considéré pour les scénarios 0 sont tous issus de la même collecte : la collecte effectuée par Recyclivre. Cependant les scénarios de des séries 1 et 2 impliquent davantage de partenaires, le nombre de kilomètres parcourus par collecte est donc plus grand, ce qui a pour effet de faire baisser la note obtenue par l'indicateur *Territoire*_{Gisements}.

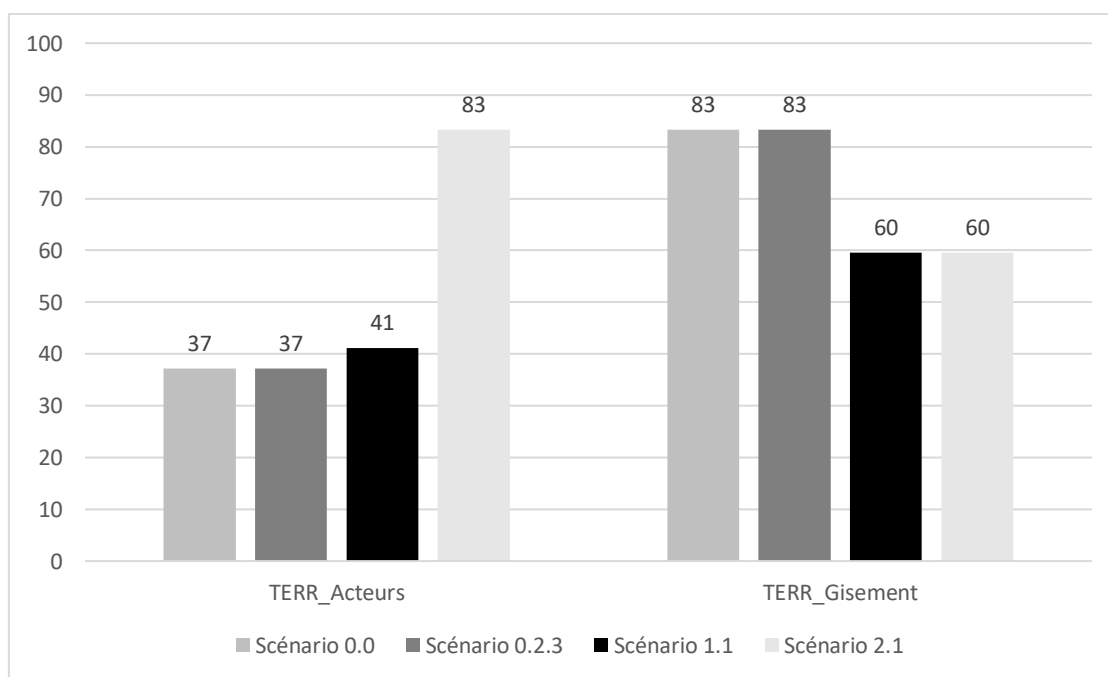


Figure 55 : comparaison des résultats pour les indicateurs de dynamique territoriale.

⁴⁶ Source : <https://auvergnerhonealpes-livre-lecture.org/annuaires/bibliotheques> Consulté le 14/10/2021.

⁴⁷ Source : pages jaunes : consulté le 14/10/2021.

⁴⁸ Source : pages jaunes : consulté le 14/10/2021.

4.3.4.6 Analyse critique des indicateurs.

Cette partie de l'analyse a pour finalité de prendre du recul sur les périmètres des indicateurs proposés et d'en faire ressortir les limites.

Les indicateurs matières.

R_{ext} : l'indicateur R_{ext} a été construit pour prendre en compte les proportions de matières neuves utilisées dans un processus de production. Cependant, il ne donne pas d'information sur la nature des matières neuves qui entrent dans ce processus. La prise en compte de la nature des matières neuves peut être un indicateur intéressant en termes de toxicité associée à cette matière ou de pression sur la ressource associée.

R_{absorb} : cet indicateur permet d'obtenir des données sur les proportions de matières neuves et d'OBJETS qui entrent dans un processus de fabrication tout en permettant une mesure des quantités de chutes générées au cours de ce processus. Cependant, cet indicateur ne tient pas compte du niveau de transformation des OBJETS et des matériaux neufs au cours de ce processus. Par conséquent, il ne permet pas de distinguer un OBJET intégralement préservé (issu du réusage du réemploi ou du détournement (Cf. séries de scénarios 0)) d'un OBJET intégralement transformé (issu d'une refonctionnalisation forte ou d'un processus proche du recyclage (Cf. séries de scénarios 1 et 2)). L'objectif poursuivi est de préserver autant que possible la mise en forme des OBJETS en vue de l'intégrer dans un nouveau PRODUIT. C'est pourquoi il serait intéressant de prendre en compte le niveau transformation des OBJETS au cours du processus de fabrication dans une version future de la méthode.

Les indicateurs « matière » donnent de précieuses informations sur l'aptitude d'un processus de fabrication à faire usage d'OBJETS en substitution de matériaux neufs. De plus, les résultats issus de l'indicateur matière sont susceptibles d'être exploités par d'autres indicateurs (Cf. $Eco_{Produit}$).

Ces indicateurs s'inspirent de la notion de « *taux d'incorporation* » ou de « *taux d'utilisation circulaire* » [SEDILLOT, BLIVET, 2021]. Cependant les indicateurs matière s'en différencient, car ils proposent une analyse qui inclut les OBJETS, les chutes et les matières extérieures (ces dernières comprennent les matières premières et les matières premières issues du recyclage (MPR)). Ainsi, les indicateurs matière ne se tournent pas exclusivement vers les matières issues du recyclage mais ne peuvent être utilisés à la même échelle.

Il serait intéressant de compléter ces indicateurs par d'autres données tels que les consommations d'eau ou d'énergie associées à la transformation des OBJETS ou des matériaux neufs [DECOUZON, MAILLEFERT, 2012], le nombre de kilomètres parcourus, ou encore, à l'image de l'indicateur de productivité des matières, de proposer une mesure de la valeur créée par la valorisation des OBJETS par unité de matière au cours du processus de fabrication [OCDE, 2015]. Il est important de souligner que dans des dynamiques complexes, de nombreux impacts ont lieu avant ou après le processus de fabrication et engendrent des consommations d'énergie ou de matériaux qui ne sont pris en compte par les indicateurs matières. Ainsi, il est important de tenir compte des biais associés aux flux directs et indirects « *c'est-à-dire toutes les matières consommées à l'étranger pour fabriquer les biens importés,*

y compris celles qui ne franchissent pas la frontière (exemple : combustibles énergétiques utilisés pour produire l'acier qui est importé). » [MAGNIER et al. 2017]

Les indicateurs économiques.

EcoLogistique : le coût de l'OBJET est abordé de manière relative par rapport à une matière première équivalente qui sert de référence. L'échelle de notation (0, 25, 50, 75, 100) a été choisie entre 0 et 100 avec 5 modalités afin d'assurer un différenciant. Cependant, il serait intéressant de faire des analyses de sensibilité de cette échelle de notation (ajouts ou suppression de modalités) afin d'en évaluer l'effet discriminant. De plus, une quantification pourrait être envisagée. Cependant, le point bloquant le plus important se situe sur l'existence des données et leur accessibilité.

En outre, cet indicateur aborde le stockage sous l'angle de la compacité volumique des OBJETS et des PRODUITS. D'autres unités de compacité pourraient être envisagées afin d'être plus pertinentes au regard du scénario : nous pouvons noter par exemple la masse ou le nombre de kilomètres parcourus.

EcoProduit : cet indicateur exploite les données issues de l'indicateur matière afin d'évaluer les coûts associés aux OBJETS et aux matières extérieures en fonction du prix de vente estimé d'un « produit neuf équivalent⁴⁹ ». Pour son développement, l'indicateur *EcoProduit* est inspiré de la notion de « productivité des matières » [SEDILLOT, BLIVET, 2021], [MAGNIER et al. 2017]. Le « coût moyen du matériau lié au flux de déchet » exprime le prix de vente du déchet s'il est valorisé dans des filières de gestion des déchets, c'est-à-dire la valeur économique du déchet en cas de revente dans les filières de recyclage. Pour le papier nous avons une valeur de 0,01 € / kg. Nous avons donc le prix du déchet par unité de matière (ici le prix au kilo du papier). Ce prix est mis en relation avec le prix de vente estimé du PRODUIT (produit de référence équivalent) pour une quantité égale de matière utilisée : ici nous avons 43€ / kg pour les livres d'occasion ; 430 € / kg pour les livres anciens ou rares ; 1,5 € / kg pour le prix de vente de l'OSB et 7,4 € / kg pour un fauteuil. Nous cherchons à démontrer que le supercyclage permet d'augmenter les valeurs en s'appuyant sur le design et les savoir-faire. Il se trouve qu'à quantité de matière égale (ici un kilo de livres), la valeur économique par unité de matière est très différente si l'OBJET devient un déchet, ou si l'OBJET devient un PRODUIT supercyclé. Nous postulons que la valeur supplémentaire créée par le supercyclage par unité de matière permet de financer la valorisation de l'OBJET, et de contourner, dans la mesure du possible, les filières de recyclage, d'enfouissement ou de valorisation énergétique. En effet, si l'OBJET livre est considéré comme un déchet papier, sa valeur économique est presque nulle (0,01 € / kg). En revanche, si ce même OBJET est considéré comme un livre d'occasion (ou tout autre PRODUIT issu du supercyclage), en opérant un changement de regard et de paradigme productif, sa valeur moyenne est de 43€ / kg. Ici nous avons une valeur économique qui est multipliée par 4300 pour les livres d'occasion (43€ / kg contre 0,01 € / kg) ; par 43 000 pour

⁴⁹ Le prix du produit neuf de référence est donné à titre indicatif, car il est possible que les valeurs associées au PRODUIT supercyclé justifient un prix plus élevé ou plus faible selon le scénario. Afin de permettre un éventuel ajustement permettant de mieux justifier le prix du produit de référence, il est possible d'exploiter les résultats issus des indicateurs des qualités (Préciosité, Fonctionnalité, Utilisabilité).

les livres anciens ou rares ; par 150 pour les panneaux OSB et par 740 pour les fauteuils⁵⁰. L'augmentation de la valeur économique étant significative dans le cadre d'une stratégie de supercyclage, cela permet d'envisager des filières qui ne misent pas uniquement sur la quantité absorbée (Cf. filières de recyclage), mais plutôt, sur la qualité des PRODUITS développés (pièces uniques, petites, moyennes ou grandes séries). En s'appuyant sur la préservation des valeurs, plutôt que sur leur destruction, nous cherchons à démontrer que cela permet de financer les activités de collecte, de tri, de conception / création et de fabrication. De plus, si l'on poursuit dans cette logique, les chutes sont préservées et les OBJETS (livres d'occasion, panneaux, fauteuils), sont destinés à revenir tôt ou tard dans un processus de préservation, ce qui augmente encore le rendement économique, ou la « productivité » associée à l'OBJET. Le potentiel de l'OBJET peut ainsi être mis en perspective en vue d'augmenter encore davantage la « *productivité matière* », ou la productivité OBJET, au cours des multiples cycles de vie auxquels il se destine. Pour augmenter les valeurs à chaque cycle, les stratégies de supercyclage s'appuient sur l'adaptation et la diversification, c'est-à-dire sur une granulométrie plus fine du potentiel d'absorption du flux d'OBJET. Pour se faire, le supercyclage cherche à accroître la connaissance des matériaux (des micro, méso et superstructures, géométrie, topologie [BRECHET, 2013]), des savoir-faire et du système territorial dans lequel ils s'inscrivent, ce qui nécessite de postuler sur une augmentation significative du nombre de filières pour résoudre le problème quantitatif.

Le paramètre « Coût moyen du matériau lié au flux de matières extérieures (€ / kg) » est calculé en faisant la moyenne des coûts des matières extérieures entrant dans le processus de valorisation de l'OBJET. Or, nous n'avons pas tenu compte des consommations intermédiaires, des flux d'eau ou d'énergie utilisés. Dans une version ultérieure, la prise en compte de ces flux permettrait d'améliorer la pertinence de l'indicateur.

Les indicateurs de qualité

Qualité_{Fonctionnalité}, Qualité_{Utilisabilité}, Eco_{Process} : l'indicateur *Eco_{Process}* évalue l'ensemble des actions qui sont traduites en coûts d'investissement, en coûts de fonctionnement, et en coûts humain. Les indicateurs *Qualité_{Fonctionnalité}* et *Qualité_{Utilisabilité}* comptabilisent certaines actions afin d'évaluer des efforts plus ciblés (Cf. efforts de stockage, de tri, de conditionnement, de transformation ou de caractérisation).

Les indicateurs *Qualité_{Fonctionnalité}*, *Qualité_{Utilisabilité}* et *Eco_{Process}*, reposent sur la comptabilité du nombre d'actions. Par conséquent les résultats obtenus sont influencés par les méthodes de modélisation et ceci à deux niveaux :

- Le premier niveau concerne la réalisation des diagrammes de flux. Plus ils sont détaillés, plus le nombre d'action est conséquente. Par exemple, l'indicateur *Qualité_{Utilisabilité}* évalue les efforts de stockage et de conditionnement. Ces efforts s'appliquent au stockage et au conditionnement des OBJETS, des semi-PRODUITS et des PRODUITS. Plus ils sont nombreux, plus le nombre d'actions est conséquente si l'on tient compte des actions qui permettent le stockage et le conditionnement mises en forme intermédiaires. Ceci est également valable pour l'indicateur de fonctionnalité qui évalue les efforts de tri, de transformation et de

⁵⁰ Le prix des fauteuils et les livres rares ou anciens est estimé. Pour simplifier, nous considérons que les livres rares ou anciens ont un prix dix fois supérieur aux livres d'occasion classiques. Il s'agit d'une valeur arbitraire, car le prix dépend de l'estimation et des valeurs associées au livre. Le prix de ces livres peut être inférieur, ou nettement supérieur selon l'estimation.

caractérisation. Il est donc important de bien définir le niveau de description des diagrammes de flux et des actions afin de s'assurer que les évaluations et comparaisons sont faites au même niveau de détail.

- Le second niveau concerne les efforts associés à chaque action dans le tableau des actions élémentaires. En effet, quatre niveaux sont proposés pour chaque action élémentaire : la famille, le type, la description et le détail process. À ces quatre niveaux sont associés 3 types d'efforts : « l'effort d'investissement », « l'effort humain », « l'effort de fonctionnement ». Ces derniers permettent de calculer « l'effort global » pour chaque action. Or, l'évaluation des indicateurs de qualité repose sur le nombre d'actions et sur les efforts associés à celles-ci, ce qui influence les résultats obtenus par les indicateurs qui utilisent ces actions. Par exemple, « l'effort de tri » est susceptible d'avoir une forte amplitude de variation, car les efforts associés au tri des OBJETS varient en fonction de la nature du tri (tri grossier, tri fin) et des outils disponibles (Cf. Tri manuel, algorithme).

Le niveau de détail des actions ainsi que les efforts associés constituent un second levier de différenciation des résultats. De plus, la nature des données exploitées pour définir les efforts ont une incidence sur les résultats obtenus par les indicateurs (base de données GRANTA, autres bases de données, connaissances personnelles).

Pour l'évaluation des Scénarios de la série 0, une précision supplémentaire aurait permis de différencier davantage les scénarios. En effet, l'estimation du prix, en plus du référencement, demande une expertise et des compétences spécifiques qui ont un coût. Or dans les scénarios 0.1, 0.2.1, 0.2.2 et 0.2.3, les coûts ne sont pas estimés par un algorithme. L'ajout d'une action (Référencer) [évaluer le coût] dans les diagrammes de flux, aurait permis d'intégrer ces coûts et de gagner en précision dans notre évaluation. De même pour les scénarios de la série 1 et 2, pour l'ajout d'une étape de séchage des panneaux.

Qualité_{préciosité} : l'indicateur de préciosité est quantifié suivant une échelle à 5 modalités équitablement réparties entre 0 et 100 (0 ; 25 ; 50 ; 75 ; 100). Il serait intéressant de faire des analyses de sensibilité de cette échelle de notation (ajouts ou suppression de modalités) afin d'en évaluer l'effet discriminant. Par ailleurs, d'autres sources documentaires et jeux de données peuvent être exploités pour évaluer la préciosité d'un gisement selon la nature des scénarios étudiés. En effet, les valeurs étudiées ici sont les valeurs culturelles, les valeurs matière et les valeurs d'unicité. Différents critères ont été élaborés pour les besoins de ce travail de recherche mais peuvent se révéler inopérants ou inadaptés pour certaines catégories d'OBJETS ou dans certains contextes. Mettre à jour d'autres valeurs, et / ou de nouveaux critères spécifiques au gisement, au scénario ou au territoire étudié peut s'avérer nécessaire.

En outre, il est important de mentionner que cet indicateur est fortement scénario dépendant. L'OBJET pris seul et sans contexte (exclus d'une filière de valorisation) indépendamment de tout scénario est considéré comme un déchet. La valeur est donc relative à la nature des semi-PRODUITS ou des PRODUITS développés dans les scénarios.

Les indicateurs de dynamique territoriale

Territoire_{Acteurs} : l'indicateur de dynamique territoriale associé aux acteurs est basé sur une estimation du nombre d'acteurs impliqués dans un scénario de supercyclage. Cette unité est susceptible d'introduire un biais en fonction de la nature et de la taille des acteurs impliqués. Par exemple, le nombre d'acteurs peut être conséquent si le scénario envisagé sollicite de nombreux acteurs de petites taille, comme un réseau d'artisans, d'acteurs indépendants ou de petites entreprises. Ce nombre sera considérablement réduit si le scénario sollicite de grands groupes. Il est donc important de décrire précisément les critères de sélection des acteurs convoqués dans un scénario pour justifier les résultats obtenus. Dans le cas de la revente de livres d'occasion, nous avons fait le choix de ne pas comptabiliser le nombre de clients particuliers qui achètent des livres d'occasion via le site internet de Recyclivre. Les acteurs sélectionnés pour la série 0 sont donc comptabilisés sur la base du nombre de fournisseurs que sont les bibliothèques. Or, pour les scénarios de la série 1 et 2, les fournisseurs et les distributeurs ont été comptabilisés. Ces scénarios obtiennent donc un nombre d'acteurs potentiels beaucoup plus élevé. Cet exemple montre qu'il est essentiel de préciser l'étendue du cycle de vie concerné par l'évaluation, ainsi que les critères de sélection des acteurs. Il est donc essentiel de rester prudent sur l'interprétation des résultats obtenus.

De plus, le nombre d'acteurs est relatif à la taille du territoire, à la densité de population, à la nature des bassins d'emploi (Bassin d'industrie lourde, territoire rural, pratiques artisanales), ou à la nature des données utilisées pour identifier les acteurs du système étudié. Les résultats obtenus sont donc étroitement liés la description du territoire de référence. Selon les sources de données utilisées, le nombre d'acteurs est susceptible d'avoir d'importantes variations. Dans ce travail nous faisons le choix de comptabiliser les acteurs qui se situent sur le territoire de référence. Or, la dynamique est relative à l'échelle étudiée (l'entreprise, la ville, la région) et à la nature des liens considérés. Tenir compte des acteurs identifiés sur le territoire de référence peut contenir un biais, dans la mesure où l'activité d'un territoire ne se limite pas à des liens de « *proximité géographique* ». Dans leur étude sur les synergies éco-industrielles à Dunkerque, Christophe Beaurain et al. (2017) mettent en évidence deux types de « *proximités* » : la « *proximité géographique (ou spatiale)* » la « *proximité relationnelle* » [BEAURAIN et al. 2017]. Se faisant, il est délicat d'apporter une mesure absolue de la dynamique associée à un scénario ou à un territoire car de nombreux acteurs impliqués dans la dynamique locale peuvent se situer en dehors du territoire de référence.

Territoire_{Gisements} : Cet indicateur repose sur une évaluation des besoins de transport du scénario étudié. Il est évalué via le volume équivalent d'OBJET de compacité 100 % collecté par km parcouru. Les résultats obtenus permettent de différencier deux types de scénarios : la série 0 ; et les séries 1 et 2 (Figure 55). Les variations observables proviennent uniquement du critère associé au nombre de kilomètres. Ceci est dû au choix des scénarios qui sollicitent les mêmes acteurs et au choix des données (le nombre de collecte et la compacité OBJET restent inchangé pour l'ensemble des scénarios). Or, la compacité OBJET pourrait être un facteur de différenciation si l'on tient compte des caractéristiques et du nombre de mises en forme intermédiaires des OBJETS. En effet, les semi-PRODUITS ont des compacités très variables en fonction de leur niveau de transformation : le livre initial, les copeaux de pages ou les panneaux ont des volumes très différents, ce qui impacte le stockage, le

conditionnement et le transport pour chaque scénario. Nous avons adopté pour une compacité moyenne unique, associée à la densité du papier offset. Cette prise de position a pour effet de rendre les résultats plus homogènes et de masquer les effets associés à la mise en forme. Pour pallier à ce problème, la prise en compte des différentes densités et volumes associés à la mise en forme des produits et semi produits au cours de leur cycle de vie pourrait être une piste d'amélioration.

4.3.4.7 Synthèse des limites et perspectives sur la méthode d'évaluation

Afin de permettre la prise de décision, les indicateurs développés dans le cadre de ce travail sont destinés à couvrir différentes approches, c'est pourquoi quatre familles d'indicateurs ont été développés : les indicateurs matière, les indicateurs économiques les indicateurs des valeurs et les indicateurs territoriaux. Cependant, les aspects de la prise de décision sont complexes et peuvent mobiliser de nombreuses parties prenantes aux intérêts parfois contradictoires. Ainsi, de nombreux facteurs sont à même de peser sur les prises de décision et d'influer sur la lecture des résultats : aspects politiques (décision de l'entreprise, contexte réglementaire, incitations fiscales), économiques (partenariats, économies d'échelle, volonté d'investissement, amortissement, prix du transport), image de marque.

Même si une lecture par indicateurs est proposée ici Il est préférable de croiser les résultats obtenus pour pouvoir évaluer la capacité des différents scénarios à faire circuler les valeurs existantes ou à reconsidérer la notion de valeur afin d'en créer de nouvelles. Les nécessaires interactions entre les entreprises et leur environnement, nécessitent de penser les services rendus par le milieu naturel ou les territoires. De ce fait, ces valeurs ne peuvent être considérées au simple bénéfice d'une entreprise en faisant du territoire un acteur exogène. Comme le souligne M. Maillefert, le « *le territoire devrait être intégré comme un construit endogène* » [MAILLEFERT, ROBERT, 2017]. Il s'agit ici de souligner que les bénéfices sont partagés entre de multiples parties prenantes qui œuvrent communément au développement de la « *valeur territoriale* » [MAILLEFERT, ROBERT, 2017].

À ce titre, le terme « entreprise » utilisé dans ce travail de thèse permet de désigner le ou les acteur(s) concerné(s) par le système étudié. Cependant, ce travail est développé pour s'adapter à différentes échelles ou à de multiples acteurs. Ceci permet d'ouvrir ce travail à tout gisement provenant d'atelier d'artisans, d'évènements, de projet architectural, ou urbain, de communes ou de collectivités territoriales. À ce sujet, la méthode que nous avons développée doit pouvoir être adaptée à ces différentes échelles. En effet, celle-ci peut être mise en œuvre par des acteurs qui en ont les moyens et / ou l'habitude, comme les grandes entreprises ou les collectivités. Même si certains outils peuvent être appropriés par des acteurs de petites taille, cette méthode peut paraître trop complexe et / ou trop coûteuse pour des petites entreprises ou des artisans. Une version simplifiée et réduite devrait permettre de surmonter ce problème en proposant le « *juste et nécessaire méthodologique* » pour permettre à l'ensemble des acteurs de se l'approprier et de coopérer ensemble [AOUSSAT, 1996] [THOUVENIN, 2002].

Nous envisageons le design comme une discipline clé pour repenser le processus de conception en faveur d'une meilleure appropriation des formes et des fonctions. Le regard design identifie les ressources dans le gisement des déchets, met en cohérence des valeurs et

des détails identificateurs. Dans cas de notre sujet d'étude sur la valorisation des livres, l'approche par le design et la création permet de multiples points d'entrée comme par exemple les typographies reconnaissables, leur histoire dans le design graphique, les qualités de papier qui deviennent des matières à création à de plus petites échelles qu'il est possible de préserver et valoriser, en imprimerie, par collage, en réunissant des thématiques, des styles et des niveaux de clartés, etc. Les PRODUITS fabriqués, peuvent être déclinés en de nombreuses mises en forme définitives ou intermédiaires. Ces PRODUITS disent l'origine des matériaux qui les composent et la matière littéraire destine les PRODUITS à des écosystèmes spécifiques.

5 Conclusion Générale

Au cours du temps différents changements de régimes matériels et métaboliques, ces derniers sont liés à des régimes techniques et technologiques. D'abord ancrés dans les territoires, les différents régimes se sont mondialisés.

Malgré une diversification et une complexification considérable des outils, des matériaux et des techniques, susceptible de servir une transition vers un système plus intégré à son environnement naturel, l'évolution de ces régimes n'a pas abouti une intégration du métabolisme territorial dans son environnement. Au contraire, l'évolution des régimes matériels a entraîné une augmentation continue des quantités extraites, de l'énergie nécessaire à son fonctionnement et des rejets dans l'environnement. Outre l'urgence environnementale, le constat humain et social est aujourd'hui préoccupant.

La prise de conscience des limites du système actuel a déjà plus d'un demi-siècle, mais nous avons hérité des structures et l'organisation des régimes précédents, dont le fonctionnement et le dimensionnement s'avèrent inappropriés pour répondre aux enjeux actuels. Une nouvelle approche est donc souhaitable pour réduire l'intensité des flux, et repenser leur configuration notamment en repensant le lien entre le territoire et la circulation des matériaux.

Pour répondre à cette problématique, une diversification des stratégies de valorisation des matériaux en fin de vie est abordée de manière à pouvoir traiter l'intégralité d'un flux, non plus sous l'angle d'une voie unique qui repose sur une centralisation des gisements et des outils, mais par une multiplicité de solutions, mettant en œuvre des acteurs, des matériaux, des procédés et des savoir-faire sur un territoire défini.

L'appropriation des formes ayant perdu leur usage constitue un levier prometteur pour repenser l'activité métabolique des territoires. Repenser les flux de matières sous l'angle de circulation des formes nécessite de revoir les processus de production et de préservation des formes en circulation. Pour pallier à ces deux injonctions contradictoires, d'abord celle de préserver la forme, puis celle de la remettre en mouvement pour lui donner un nouvel usage, une graduation des niveaux de transformation est abordée dans l'objectif de tirer profit le plus longtemps possibles des attributs associés à la mise en forme. Clarifier les enjeux sémantiques que recouvre chaque niveau de transformation apparaît comme un premier pas pour mieux comprendre les différentes implications et de les traduire dans les processus de conception. Augmenter les connaissances sur le territoire et les matériaux en circulation constitue un prérequis. Cela procure de nombreuses informations essentielles dans un processus de conception. Cela permet également de garantir la chaîne de confiance entre tous les niveaux de la chaîne de valeur. Des outils de conception ont été proposés. Dans une approche créative, ils permettent une graduation des niveaux de transformation, pour explorer un large éventail de scénarios de transformation. Les outils « *product to dust* » et « *dust to product* » répondent à ce besoin en clarifiant les niveaux de transformation des OBJETS ainsi que les passerelles envisageables entre chaque niveau. À ces outils s'ajoute « l'arborescence produit » qui permet de composer de manière agile avec une grande diversité de gisements et de niveaux de transformation. Dans ce cadre deux approches complémentaires sont possibles : l'une, « poussée par les gisements », où la disponibilité des matériaux guide le processus de

conception ; et l'autre, dite « tirée par la conception » qui consiste à mettre le gisement au service des besoins exprimés par le cahier des charges.

Bien que la préservation des formes possède des avantages, elle engendre des coûts (économiques sociaux et environnementaux) et soulève de nombreuses contraintes qu'il faut pouvoir évaluer et comparer. C'est pourquoi, un pré-modèle de circulation des matériaux est développé de manière à aiguiller la prise de décision face à l'amplitude des scénarios envisageables. Par un effort de caractérisation et d'évaluation des scénarios, ce pré-modèle ouvre la voie vers une meilleure compréhension des efforts associés à chaque étape du processus de valorisation. Ces efforts sont traductibles en coûts économiques, sociaux et environnementaux. Différents niveaux d'implémentation permettent de simuler ou de mettre en œuvre les solutions proposées, et ce, sur différentes échelles de temps ou d'espace. Quatre familles d'indicateurs permettent d'évaluer les scénarios identifiés, en tenant compte de leur capacité à s'inscrire dans un processus de valorisation des formes en fin de vie. Le pré-modèle et les indicateurs sont inspirés des méthodes d'analyse quantitatives du métabolisme territorial, mais y associent les aspects qualitatifs propres aux disciplines de la création et du design. En effet, pour que les OBJETS puissent circuler, nous avons démontré qu'ils ne sont pas réductibles à des flux de matières qu'il s'agit de contrôler et de quantifier, mais qu'ils intégrés à un ensemble plus large qui conditionnent leur appropriation et leurs usages : les propriétés, les qualités et les valeurs. Dans ce cadre, la qualification, la comparaison et l'évaluation de multiples stratégies est abordée afin d'apporter des éléments mesurables et des connaissances permettant d'aiguiller le processus de décision et les stratégies de transformation à mettre en place.

La circulation et la préservation des formes, constitue une approche complexe qui nécessite de renouveler et d'approfondir la connaissance des flux de matières. Les propriétés mécaniques d'un OBJET résident également dans sa mise en forme (les formes ont des profils de performances en fonction des matières utilisées), celui-ci est donc bien plus qu'une matière, il est le point de départ d'une réflexion technique sur le potentiel fonctionnel d'un OBJET. Puisqu'il est plus difficile de déterritorialiser la circulation des formes que celle des matières, en raison de leur ancrage culturel, cette réflexion s'inscrit dans un contexte local. Les métiers de la conception, du design et de la création, associés à des échelles diverses, aux compétences, aux outils et aux savoir-faire issus de l'artisanat, de la recherche et / ou de l'industrie, permettent une approche souple, créative et structurée face à la nécessité de penser un système intégré et cohérent de valorisation du couple forme-matière. Passer par le spectre des formes en circulation, et leurs usages existants ou potentiel, permet une relecture de la notion de métabolisme territorial dans laquelle les OBJETS sont le moteur d'une dynamique culturelle sobre, durable et innovante.

6 Bibliographie

- ADEME. « Déchets, chiffres clés. » *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie*, Édition 2016, 96 p.
- ADEME. « REPAR 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie. » Édité par ADEME, BELLASTOCK, CSTB, avril 2018, 545 p.
- ADEME. « Les filières à responsabilité élargie du producteur. PANORAMA. » *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie*, Édition 2017, 40 p.
- ADOUE Cyril. « Mettre en œuvre l'écologie industrielle. » Éditions *Presses polytechniques et universitaires Romandes*, 2007, 106 p.
ISBN : 978-2-88074-710-7.
- AFNOR. « Management environnemental Comptabilité des flux matières Cadre général. » 2012, 42 p.
- ALCHERMES Joseph. « Spolia in Roman Cities of the Late Empire: Legislative Rationales and Architectural Reuse. » *Dumbarton Oaks Papers*, vol. 48, 1994, pp. 167 – 178.
URL : <https://www.jstor.org/stable/1291726>
- ALI Ahmed K, BADINELLI Ralph, JONES James R. « Re-Defining Architectural Design Process through Building a Decision-Support Framework for Design with Reuse. » *The International Journal of Sustainability Policy and Practice*. Vol. 8, Issue 1, 2013, 19 p.
- ALI Ahmed K. « “Between Design Process and Process Design” Integrating Reuse Decisions Into Design Process. » *R+R 2013 Reclaim and Remake International Symposium*, Washington, DC. 11-13 April 2013, 7 p.
- ALI Ahmed K. « Architecture within a circular economy: Process mapping a resource-based design-bid-build project delivery system. » *Enquiry, The ARCC journal*, Vol. 14, Issue 1, 2017, 14 p.
ISSN : 2329-9339
- ALLENBY Braden.R. « Understanding Industrial Ecology from a Biological Systems Perspective. » *Total Quality Environmental Management*, 1994, pp. 343 – 354.
- (a) ALLWOOD Julian, ASHBY Michael, GUTOWSKI Timothy, and WORRELL Ernst. « Material efficiency: A white paper. » *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55, No. 3, November 2010, pp. 362 – 381.
DOI : 10.1016/j.resconrec.2010.11.002
- (b) ALLWOOD Julian, CULLEN Jonathan, COOPER Daniel, MILFORD Rachel, PATEL Alexandra, CARRUTH Mark, and MCBRIEN Martin. « Conserving our metal energy, Avoiding melting steel and aluminium scrap to save energy and carbon. » *WellMet 2050. University of Cambridge, Department of engineering*, United Kingdom, September 2010, 20 p.
ISBN : 978-0-903428-30-9
- AMORCE, ADEME. « Recueil d'exemples de collectes préservantes favorisant le réemploi et la réutilisation. » *Collection expertises*. Novembre 2015, 122 p.
Référence ADEME : 8647
- AOUSSAT Améziane. « La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle. » Thèse de doctorat, Spécialité Génie industriel, *École Nationale Supérieure d'Art et Métiers*, Paris, 1990.
- AOUSSAT Améziane. « *Contribution à la modélisation du processus de conception de produits*. » Mémoire d'Habilitation à diriger des Recherches, Grenoble, 1996.
- ASHBY Michael, JOHNSON Kara. « Material selection in mechanical design ». *Butterworth-Heinemann*, First published by Pergamon Press 1992, Third edition, 2004, 624 p.

eBook ISBN : 9780080468648

ATELIERS D'ART DE FRANCE. « La branche professionnelle des métiers d'art, au service d'un secteur d'avenir ». Rapport, Juillet 2018, 26 p.

AUSILOUX Vincent, CHARRIE Julia, JEANNENEY Matthieu, MARGUERIT David, PLOUX-CHILLES Adélaïde. « Note d'analyse - Au-delà du PIB, un tableau de bord pour la France. » France Stratégie et le Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE), 23 juin 2015, 3 p.
URL : <https://www.strategie.gouv.fr/publications/dela-pib-un-tableau-de-bord-france>

BARLES Sabine. « L'invention des déchets urbains, France, 1790-1970 ». *Champ vallon*, 2005, 304 p.
ISBN : 2.87673.417.6

BASSEREAU Jean-François, CHARVET PELLO Régine, FAUCHEU Jenny, DELAFOSSE David. « Les objets intermédiaires de conception / Design, instruments d'une recherche par le design ». *Sciences du design, Pratiques et discours*, Presses universitaires de France, Vol.2, No. 2, 2015, pp. 48 – 63.
ISSN : 2428-3711

BASSEREAU Jean-François, CHARVET-PELLO Régine, BONNAMY Louise. « Design sensoriel ». *Éditions Techniques de l'ingénieur*. 10 juillet 2009, 23 p.
Réf : AG2310 V1

(a) BASSEREAU Jean-François, MONGIN Antonin, SAINT-PIERRE Anna, MOSSE Aurélie. « Pour faire le portrait d'un matériau de la *french touch* dans la mode et le luxe », *Convention MATERIAUX 2018*, Atelier 2, Matériaux et Patrimoine, Strasbourg, 19 au 23 novembre 2018.

(b) BASSEREAU J.F., MONTEUX C., MOSSE A., MERLET BRIAND M., JOURDAN O. « Le papier plume, conception d'un matériau up cyclé par et pour la création », *Convention MATERIAUX 2018*, mardi 20 novembre 2018, Strasbourg.

(a) BASSEREAU Jean-François. « Du recyclage au supercyclage, la vie des objets en question », *conférence développement durable*, CARATS MODE & LUXE, Mines Paris tech. 24 février 2020.

(b) BASSEREAU Jean-François. « DE LA TEXTILISATION, TEXTILISME et INTER TEXTILISATION en question ». Séminaire *Soft Matters*, École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs, Paris, 2020.

BEAURAIN Christophe, MAILLEFERT Muriel, LENOIR VARLET Delphine. « La proximité au cœur des synergies éco-industrielles dunkerquoises », *Flux*, 2017/3-4 (N° 109-110), pp. 23 – 35.
DOI : 10.3917/flux1.109.0023.
URL : <https://www.cairn.info/revue-flux-2017-3-page-23.htm>

BAUMAN Zygmunt. « La vie liquide ». *Éditions du Rouergue*. 7 août 2006, 202 p.
ISBN-13 : 978-2841567751

BAURAING Eddy, NICOLAS Jacques, VON FRENCKELL Marianne. Annexe technique N°1. « Les Indicateurs de Performances Environnementales. » *Ministère de la région Wallonne, Fondation Universitaire Luxembourgeoise*, Décembre 2000, 28 p.

BELL Simon, MORSE Stephen. « Sustainability indicators, measuring the immeasurable? » *Earthscan Publications*, 1999, 175 p.
ISBN : 9781853834974

BERANGER, Anne. « Favoriser la création de nouveaux objets par les matériaux et les procédés au sein d'une maison traditionnelle à forte identité : le cas d'Hermès ». Spécialité « Génie Industriel », Sous la direction de AOUSSAT Améziane, directeur, et BASSEREAU Jean-François, Co-directeur, *École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*, 20 décembre 2011, 205 p.

BIHOUIX Philippe, GUILLEBON Benoit. « Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société ». *Édition EDP Science, collection Matériaux et Procédés*. Novembre 2010, 299 p.
ISBN : 2759805492

BOCKEN Nancy, DE PAUW Ingrid, BAKKER Conny, VAN DER GRINTEN Bram. « Product design and business model strategies for a circular economy ». *Journal of Industrial and Production Engineering*, Vol. 33, No. 5, April 2016, pp. 308 – 320.
DOI : 10.1080/21681015.2016.1172124
ISSN : 2168-1015 (print)
ISSN : 2168-1023 (Online)

BOUAZIZ Olivier, BRÉCHET Yves and EMBURY John David. « Heterogeneous and Architected Materials: A Possible Strategy for Design of Structural Materials ». *Advance Engineering Materials*, Vol. 10, Issue 1-2, February 2008, pp. 24 – 36.
DOI : 10.1002/adem.200700289

BOURSIER Anne-Laure, SAINT-PIERRE Anna, BASSEREAU Jean-François. « Économie circulaire et Super Cyclage ». *Construction 21*, Novembre 2019.
URL : <https://www.construction21.org/france/articles/h/economie-circulaire-et-super-cyclage.html>

BRADLEY Guy, SHELL Scott. « Design for Deconstruction and Materials Reuse ». *Proceedings of the CIB Task Group 39 – Deconstruction Meeting*, edited by CHINI Abdol and SCHULTMANN Frank. CIB Publication 272, 2002, 244 p.
URL : [http://www.cce.ufl.edu/Design for Deconstruction and Materials Reuse.pdf](http://www.cce.ufl.edu/Design%20for%20Deconstruction%20and%20Materials%20Reuse.pdf)

BRANDI Cesare. « Théorie de la restauration ». *Éditions du patrimoine*. Édition originale, 1963. 208 p.

BRAUDEL Fernand. « Civilisation matérielle économie et capitalisme, XV-XVIII siècle – 1- Les Structures du quotidien ». *Édition Le livre de Poche, Collection Références*, Novembre 1993, 736 p.
ISBN : 2253064556

BRAUNGART Michael, MC DONOUGH William. « Cradle to Cradle: Remaking the way we make things. » *San Val Éditions*, avril 2002, 193 p.
ISBN-10 : 0613919874

BRECHET Yves. « La science des matériaux : du matériau de rencontre au matériau sur mesure ». *Collège de France/Fayard, collection « Leçons inaugurales du Collège de France »*, Paris, juin 2013, 48 p.
ISBN : 978-2-2136-7775-0

BRODHAG Christian. « L'écoconception, un outil au cœur de l'économie circulaire. » *Responsabilité & Environnement 76*, 2014, pp. 33 – 37.

BRÜTTING Jan, DESRUELLE Joseph, SENATORE Gennaro, FIVET Corentin. « Design of Truss Structures Through Reuse ». *Structures*, Vol. 18, April 2019, pp. 128 – 137.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.006>

CALATAYUD Philippe, Kambiz MOHKAM. « L'empreinte matière un indicateur révélant notre consommation réelle de matières premières ». *Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, Commissariat Général au Développement Durable, Datalab*, Avril 2018, 4 p.
ISSN : 2555 – 7572

CAMAGNI Roberto, CAPELLO Roberta, NIJKAMP Peter. « Towards Sustainable City Policy: An Economy-Environment Technology Nexus. » *Ecological Economics*, Vol. 24, Issue 1, January 1998, pp. 103 – 118.
URL : [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00032-3)

CAZENEUVE Jean, AKOUN André. « La sociologie et les sciences de la société. » Édition *Retz-C.E.P.L*, Collection *les encyclopédies du savoir Moderne*, 1975, 543 p.

ISBN : 978-2-7140-0017-0

CHOPPIN Julien, DELON NICOLA. « Matière grise : matériaux, réemploi, architecture ». *Éditions du pavillon de l'Arсенal*. Octobre 2014, 365 p.

ISBN-13 : 978-2354870263

COOPER Daniel R., ALLWOOD Julian M. « Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life. » *Environmental science and technology. American Chemical Society*, August 2012, 46 (18), pp. 10334 – 10340.
DOI : [dx.doi.org/10.1021/es301093a](https://doi.org/10.1021/es301093a)

COOPER Daniel R., GUTOWSKY Timothy G. « The Environmental Impacts of Reuse, A review. » *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21, No. 1, December 2015, pp. 38 – 56.
DOI : <https://doi.org/10.1111/jiec.12388>

CORVELLEC Hervé, I. STÅL Herman. « Evidencing the waste effect of Product-Service Systems (PSSs). » *Journal of Cleaner Production*, Vol. 145, March 2017, pp. 14 – 24.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.033>

CROSS Nigel. « Engineering Design Methods, Strategies for Product Design ». *Wiley-Blackwell Edition*. Third edition. 2000, 212 p.
ISBN : 9780471872504

CULLEN Jonathan. « Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine? » *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21, No. 3, May 2017, pp. 483 – 486.
DOI : <https://doi.org/10.1111/jiec.12599>

DEBACKER Wim, GALLE Waldo, VANDENBROUCKE Mieke, WIJNANTS Lien, CHUNG Lam Wai, PADUART Anne, HERTHOOGS Pieter, DE TEMMERMAN Niels, TRIGAUX Damien and DE TROYER Frank. « Design for Change: Development of an Assessment and Transitional Framework (summary). » Danny Wille, Stationsstraat 110, 2800 Mechelen, April 2015, 10 p.

DEBAISE Didier. « Le langage de l'individuation », *Multitudes*, No. 18, 2004, pp. 101 – 106.
DOI : 10.3917/mult.018.0101.
URL : <https://www.cairn.info/revue-multitudes-2004-4-page-101.htm>

DECOUZON Cyril, MAILLEFERT Muriel. « Évaluer des projets d'écologie industrielle sur des parcs d'activité : des synergies au territoire. » *Géographie, économie, société*, 2012/4 (Vol .14), pp. 411 – 434.
URL : <https://www.cairn.info/revue-geographie-economie-societe-2012-4-page-411.htm>

DEVLIEGER Lionel, GHYOOT Michaël, BILLIET Lionel, WARNIER André. « Déconstruction et réemploi – comment faire circuler les éléments de construction ». Lausanne (EPFL), *Presses polytechnique et universitaires Romandes*, 2018, 232 p.
ISBN : 978-2-88915-239-1

ELKINGTON John. « Cannibals with Forks: the Triple Bottom Line of 21st Century Business. » *New Society Publishers (en)*, 1998.

EPEA Netherland BV, SundaHus i Linköping AB. « Framework for materials passports. » BAMB Building As Material Bank, Co-funded by the Horizon 2020 Framework Programme of the European Union, May 2017, 125 p.

ERKMAN Suren. « Vers une écologie industrielle : Comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper industrielle ? » *Éditions Charles Léopold Meyer*, Paris, première édition 1998, 147 p.
ISBN : 978-2843770272

FCRBE. Interreg FCRBE. « Review of existing pre-demolition tools, policies, resources for identifying, quantifying and organizing the reclamation of reusable elements. » *Interreg North West Europe, NWE739: Facilitating the*

Circulation of Reclaimed Building Elements in Northwestern Europe, September 2019, 42 p.

FROSH R.A., GALLOPOULOS N.E. « Strategies for Manufacturing. » *Scientific American*, Vol. 261, Special Issue « Managing Planet Earth », September, 1989, pp. 144 – 152.

GAUDE Amaury. « Évaluation environnementale de pistes de supercyclage du matériau « livre » ». Rapport de Projet Industriel. *Mines Saint-Étienne*, Janvier 2020, 33 p.

GARCIA Julien, TONNELIER Pierre, MILLET Dominique. « Construction de modèles environnementaux de véhicules pour l'évaluation environnementale des innovations. » *CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux, France. Août 2013, 7 p.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03440547>

GEERTS Gaspard, GHYOOT Michaël, NAVAL Susie. « Guide for facilitating the integration of reclaimed building materials in large-scale projects and public tenders. » Interreg NWE 739: Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements (FCRBE), October 2018 - January 2022. Working Draft version, 26 March 2020, 93 p.

GEORGESCU-ROEGEN Nicholas. « La décroissance ; entropie écologie économie. » *Éditions Sang de la terre*, Paris, Troisième édition, 2006, 302 p. Première édition 1979.
ISBN : 2869853750

GHYOOT Michaël. « Le concepteur et les matériaux de construction. Éléments de réflexion pour une reconfiguration des circuits de l'économie matérielle par les pratiques architecturales contemporaines. » *Art de bâtir et urbanisme*, Sous la direction du Prof. Jean-Louis GENARD, *Faculté d'architecture La Cambre / Horta, Université Libre de Bruxelles*, Année académique 2013-2014, 324 p.

GHYOOT Michaël. « Objectif réemploi. Pistes d'action pour développer le secteur du réemploi des éléments de construction en Région de Bruxelles-Capitale. » *Le Bâti Bruxellois source de Nouveaux Matériaux*. Août 2017, 70 p.

(a) GOBBO, Émilie. « Déchets de construction, matières à conception. Analyse des stocks et flux de matières dans le cadre des opérations de rénovation énergétique en Région de Bruxelles-Capitale. » *Université catholique de Louvain*, Novembre 2015, 509 p.

(b) GOBBO Emilie. « Le bâtiment comme gisement de matières, Analyse du bilan métabolique (matières) des opérations de rénovation énergétique en Région de Bruxelles-Capitale. » *2nd Interdisciplinary Symposium on Sustainable Development, How to accelerate the transition ?*. Louvain-la-Neuve, Belgique, Mai 2015, 23 p.
Permalien : <http://hdl.handle.net/2078.1/171279>

GORGOLEWSKI Mark, MORETTIN Lawrence. « The Process of Designing with Reused Building Components. » CMS2009: Conference on Construction Material Stewardship. In, *LIFECYCLE DESIGN OF BUILDINGS, SYSTEMS AND MATERIALS*. Edited by *Elma Durmisevic*, Conference Proceedings. Rotterdam, the Netherlands, 2009, pp. 105 – 109.
URL : <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB14291.pdf>
ISBN : 978-90-9024420-4

GRAEDEL, T. E.; LANZANO, T.; POTT, W.; and ARAUJO, R. J., « Multiscale Life-Cycle Assessment. » *Yale School of the Environment Publications Series*. 16. 2005, 25 p.
<https://elischolar.library.yale.edu/fes-pubs/16>

GRANTA, <https://www.ansys.com/fr-fr/products/materials/granta-edupack> (consulté le 15/06/2022)

GUIDOT Raymond. « Histoire du design de 1940 à nos jours. » *Collection Beaux-Arts, Édition Hazan*, 27 octobre 2004, 344 p.
ISBN-13 : 978-2850259678

GUPTA Surendra M., VEERAKAMOLMAL Pitipong. « Disassembly of products ». *NIST Systems Integration for Manufacturing Application Program*, Final Report, December 1996, 195 p.

HAUSCHILD, M., JESWIET, J., ALTING, L. « From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. » *Manufacturing Engineering* 3, 2005, pp. 1 – 21.

HEISEL Félix, RAU-OBERHUBER Sabine. « Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster. » *Journal of Cleaner Production*, 2019, 16 p.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118482>

HUNT Robert G., FRANKLIN William E. « LCA — How it came about. » *The International Journal of Life Cycle Assessment*, March 1996, pp. 4 – 7.
DOI : <https://doi.org/10.1007/BF02978624>

HUYGEN Jean-Marc. « La poubelle et l'architecte : Vers le réemploi des matériaux. » *Éditions Actes Sud*, Arles, 2008, 184 p.
ISBN : 978-2-7427-7546-0

INGOLD Tim. « Les matériaux de la vie ». Dans « matières à former », *Socio-Anthropologie*, N°35, 2017, p.9 – 22, 214 p. (ISBN 979-10-351-0013-1) Ce texte est la traduction, par Christel Paris, de Tim Ingold (2013), « The Materials of Life », dans Id., INGOLD Tim. *Making. Anthropology, Archaeology, Art and Architecture*. Éditions Routledge, Londres, Mars 2013, pp. 17 – 31. 176 p.
ISBN-13 : 978-0415567237

ISMAIL Nurul Hanna. « 2-DFR : un cadre conceptuel destiné aux concepteurs pour un remanufacturing durable ». Écoconception. *Université Grenoble Alpes*, 2016, 202 p.
NNT : 2016GREAI063

ISO. « Règles de structure et de rédaction des normes internationales. » Directives ISO / CEI, Partie 2. Cinquième édition, 2004. 74 p.

JANNE Henry, MORSA Jean, DELRUELLE-VOSSWINKEL Nicole, COENEN Jacques. « Technique, développement économique et technocratie ». *Collection de sociologie générale et philosophie sociale*. Publié avec l'appui du Ministère de l'Éducation nationale et de la Culture. Bruxelles, Université libre de Bruxelles, Institut de Sociologie fondé par E. Solvay, 1963, 226 p.

JEGOU Anne. « Les origines du développement durable. » *L'information géographique*, Vol. 71, 2007/3, pp. 19 – 28.
DOI : 10.3917/lig.713.001

JULIEN Marie-Pierre, ROSSELIN Céline. « La culture matérielle ». Paris, Édition *la Découverte*, Collection *Repères*, 2005, 128 p.
URL: <https://www.cairn.info/la-culture-materielle--9782707144935.htm>
ISBN : 9782707144935

LABRUSSE Rémy. « Textiles ». *Perspective*, 1 | 2016, *Institut national d'histoire de l'art*. juin 2016. 275 p.
URL : <https://journals.openedition.org/perspective/6179>
DOI : 10.4000/perspective.6179
ISSN : 2269-7721

LACOVIDOU Eleni, PURNELL Phil. « Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse ». *Science of the Total Environment*, Vol. 557 – 558, 1 July 2016, pp. 791 – 807.

LAFORÉST Valérie. « Analyse environnementale à l'aide des meilleures techniques disponibles (MTD). » *Les Rencontres CARATS : 3ème édition consacrée au développement durable pour la mode & le luxe*. HAL Archives ouvertes, 2020-02-24, Paris, France 2020. 17 p.

LATOURE Bruno. « L'impossible métier de l'innovation technique – PROTEE une nouvelle méthode d'évaluation des projets fortement incertains. » In Philippe Mustar et Hervé Penan, *Encyclopédie de l'innovation*, Paris, Économica, 2003, pp. 9 – 26.

LATOURE Bruno, WOOLGAR Steve. « La vie de laboratoire. La production des faits scientifiques. » *Éditions La découverte*, Paris, 1979. Repris par LEMONNIER, Pierre. Des objets pour penser l'indicible. La nécessaire convergence des théories de la culture matérielle. Dans SCHLANGER Nathan et TAYLOR Anne-Christine. La préhistoire des autres. *Éditions la Découverte*, Paris, 2012.

LE BCEUF Jocelyne. « Jacques Vienot 1893-1959, pionnier de l'esthétique industrielle. » *Éditions Presses Universitaires de Renne, Collection Art et Société*, Broché, avril 2006.
ISBN : 2753502315

LE COQ Marc. « Approches méthodologiques en conception de produits. » Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, *LCPI, Arts et Métiers ParisTech*, Paris, 2007.

LEROI-GOURHAN, André. « L'homme et la matière. » *Édition Albin Michel, Collection Sciences d'aujourd'hui*, juillet 1943, 352 p.
ISBN : 978-2226062130

LINDBERG Suzana. « La question de la techno-écologie. » *Multitudes*, Vol. 4, No. 5, 2016, pp. 167 – 177.
URL : <https://www.cairn.info/revue-multitudes-2016-4-page-167.htm>
DOI : 10.3917/mult.065.0167.

LLORACH-MASSANA Pere, FARRENY Ramon, OLIVER-SOLÀ Jordi. « Are cradle-to-cradle certified products environmentally preferable? Analysis from an LCA approach. » *Journal of Cleaner Production*, Vol. 93, April 2015, pp. 243 – 250.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.032>

LOEWY Raymond. « La laideur se vend mal. » *Éditions Gallimard*. 22 juin 1990 (publication originale 1953), 464 p.
ISBN-13 : 978-2070720132

LOMMEE Thomas. « Open Standards: design for adaption. A new design vocabulary. » *Intrastructures*, Commissioned by Sophie krier / *The Graphic Design Museum*, Breda, the Netherlands, September 2010.

LONDON Bernard. « L'obsolescence planifiée. Pour en finir avec la grande dépression. » *Revue du MAUSS*, 2014/2 (n° 44), pp. 47 – 50. (texte original : *Ending the Depression through Planned Obsolescence (1932)*).
DOI : 10.3917/rdm.044.0047.
URL : <https://www.cairn-int.info/revue-du-mauss-2014-2-page-47.htm>

LOOS Adolf. « Ornement et crime. » *Éditions Rivages, Collection Petite bibliothèque rivages*, février 2015, 224 p. (Première édition 1908).
ISBN : 2743629827

LOPEZ-ONTIVEROS Miguel-Angel, ZWOLINSKI Peggy, BRISSAUD Daniel. « Caractérisation des produits remanufacturables. » *Laboratoire Sols Solides Structures*, 2003. 8 p.
URL : <https://docplayer.fr/109459688-Caracterisation-des-produits-remanufacturables.html>

MACARTHUR Ellen. « Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. » *Fondation Ellen Macarthur*, 2013.

MALDONADO, Tomàs. - *"El diseno industrial reconsiderado" (1969)*. Gustavo Gili. S.A. 1977.

MAGNAGHI Alberto. « Le projet local. » *Collection Architecture + Recherche*. 2003, 123 p.
ISBN : 2-87009-850-2

MAGNIER Céline et al. « 10 indicateurs clés pour le suivi de l'économie circulaire. » Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat, Datalab, Édité par le *Service d'Observation des Statistiques (SOeS)*, mars 2017, 36 p.

MAGNON Lucien, QUARANTE Danielle. « Design industriel. » *Éditions Techniques de l'ingénieur*. 10 mai 1996.
Référence : T70 v1
Permalien : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-conception-et-production-tiagc/archive-1/design-industriel-t70/>

MAILLEFERT Muriel, SRENCI Nicola. « Écologie industrielle et nouveaux modèles économiques. Quels enjeux de développement pour les territoires ? » *Colloque du RIODD*, Saint-Étienne, 6-8 juillet. 2016, 27 p.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01350016>

MAILLEFERT Muriel, ROBERT Isabelle. « Nouveaux modèles économiques et création de valeur territoriale autour de l'économie circulaire, de l'économie de la fonctionnalité et de l'écologie industrielle », *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, Décembre 2017, pp. 905 – 934.
DOI : 10.3917/revu.175.0905.
URL : <https://www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2017-5-page-905.htm>

MARI, Enzo. « Proposta per un autoprogettazione. » Edizioni Corraini, Galleria Milano, 1974.

MEADOWS Donella H. [and others]. « *The Limits To Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind.* » Universe Books, New York, 1972.
ISBN : 0-87663-165-0

MENU Baptiste (a). « Matière mobile. » Dans *Azimuts, Éditions de la Cité du design / École Supérieure d'Art et de Design de Saint-Étienne (ESADSE)*, No. 34, Saint-Étienne, printemps 2010, pp. 104 – 109.
ISBN : 978-2-912808-38-7

MENU Baptiste (b). « Le design symbiotique. » Dans *Azimuts, Éditions de la Cité du design / École Supérieure d'Art et de Design de Saint-Étienne (ESADSE)*, No. 35, Saint-Étienne, automne 2010, pp. 81 – 106.
ISBN : 978-2-912808-42-4

MENU Baptiste, FAUCHEU Jenny, LAFOREST Valérie, BASSEREAU Jean-François. « Valorisation du couple forme-matière, un enjeu d'avenir ? » *Conférence Matériaux 2018*, Strasbourg, 19-23 novembre 2018.

MENU Baptiste, FAUCHEU Jenny, LAFOREST Valérie, BASSEREAU Jean-François. « From product to dust: looking at the ways to regenerate value in product life cycle. » *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, Volume 1, Issue 1, July 2019, pp. 3321 – 3330.
DOI : <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.339>

MILLET Dominique, Collectif Hermès-Lavoisier. « Intégration de l'environnement en conception. L'entreprise et le développement durable. » Éditions *Hermès-Lavoisier*. Septembre 2003, 252 p.
ISBN : 978-2-7462-0732-5

MUMFORD, Lewis. « *Technique et civilisation.* » Éditions Parenthèses, Collection *Eupalinos*, Marseille, 2016, 480 p. Première édition 1934.
ISBN : 978-2-86364-672-4

MOLES Abraham. « Théorie de la complexité et civilisation industrielle. » *Communications, Les objets*, No. 13, 1969. pp. 51 – 63.
DOI : <https://doi.org/10.3406/comm.1969.1185>

MOLES Becky. « Reuse the pressing issue. » SALVO. Posted on February 09, 2020, 01:57 PM | By Becky Moles. <
https://www.salvoweb.com/salvonews/27740-reuse-the-pressing-issue?fbclid=IwAR2hqysO-uaMRvQSt_G7E8M-Q9hCtPFmiS65zIBD5Q1LpU6FWicPLoJ99dw>

Consulté le 06/03/2020

MONGIN Antonin, SAINT-PIERRE Anna, BASSEREAU Jean-François, MOSSE Aurélie. « CRAFTING MEMORIA THROUGH WASTE: HAIR AND RUBBLE AS (CREATIVE) HERITAGE. » *Interior Provocations*, New York, 2018.

MONGIN Antonin. « L'artisanat d'art du cheveu coupé : le cheveu comme matière à création d'une recherche par la pratique du design textile. » Sous la direction de Jean-François Bassereau et de Aurélie Mosse. *Université Paris Sciences et Lettres (PSL), Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs (ENSAD)*. Février 2022.

MONTO Mani, GANESH L.S, VARGHESE Koshi. « Sustainability and Human Settlements. Fundamental Issues, Modeling and Simulations. » *SAGE Publications Pvt. Ltd*, First edition (August 29, 2005), 209 p. ISBN : 978-07-619-3385-4

NAVARRO Alain. « Peut-on rêver d'une planète sans déchet ? » Dans *La méthode scientifique*, par Nicolas Martin, France Culture, le 22/11/2016, 57mnts. <https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/peut-rever-dune-planete-sans-dechet>

NADEAU Jean-Pierre, LEDOUX Yann. « Outil rapide de recherche d'idées : Fast Eco-MAL'IN. L'éco-innovation par la méthode Eco-MAL'IN. » Éditions *techniques de l'ingénieur*, 2014

NILAKANTAN G., NUTT S. « Reuse and upcycling of aerospace prepreg scarp and waste. » *Reinforced Plastics*, Vol. 59, No. 1, January, February 2015, pp. 44 – 51.
URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.repl.2014.12.070>

Observatoire sur la responsabilité sociétale des entreprises (Orse). « Analyse comparative d'indicateurs de développement durable. » *Ministère de l'économie des finances et de l'industrie*, 2003, 113 p.

OCDE. « Indicateurs clés d'environnement de l'OCDE ». *Organisation de Coopération et de Développement Economiques*, Direction de l'Environnement de l'OCDE, Paris, France, 2004, 38 p.

OCDE. « Material Resources, productivity and the environment. » OECD Green growth studies, *OECD Publishing*, Paris, 12 février 2015, 172 p.
ISSN : 22229523
DOI : <https://doi.org/10.1787/22229523>

O'ROURKE Dara, CONNELLY Lloyd, KOSHLAND Catherine. « Industrial ecology: a critical review. » *International Journal of Environment and Pollution*. Vol. 6, No. 2/3, 1996, pp. 89 – 112.

OROZA, Ernesto. « Rikimbili. Une étude sur la désobéissance technologique et quelques formes de réinvention. » *Publication de l'université de Saint-Étienne, Cité du design*, 2009.
ISBN : 978-2-86272-527-7

OZENFANT Amédée, JEANNERET Charles-Edouard. « Après le cubisme. » *Éditions des Commentaires*, Paris, 1918.

PADUART Anne. TRANSFORM. « Transformable structures for sustainable development. » *Department of Architectural Engineering, Vrije Universiteit Brussel*, Brussels, Belgium June 2017, 18 p.

PEARSON Parker, BEVIN Richard, IXER Rob, POLLARD Joshua. « Craig Rhos-y-felin: A Welsh bluestone megalith quarry for Stonehenge. » *Antiquity*, Vol. 89, Issue 348, December 2015, pp. 1331 – 1352.
DOI : 10.15184/aqy.2015.177

PERRIN J., LECLER Y., VILLEVAL M.C. « L'ingénierie concourante comme résultat d'une organisation d'apprentissage à la coopération. » *Rapport ECT pour le compte du Programme HTT. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche*. Janvier 1995.

PIALOT Olivier, MILLET Dominique, TCHERTCHIAN Nicolas. « How to explore scenarios of multiple upgrade

cycles for sustainable product innovation: the “Upgrade Cycle Explorer” tool. » *Journal of Cleaner Production*, Volume 22, Issue 1, 2012, pp. 19 – 31.

ISSN : 0959-6526

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.001>.

PILZ Reiner. « Reiner Pilz ». *Salvo Monthly*, N°23, p.11 – 14, Octobre 1994.

PONGIGLIONE Margherita, CALDERINI Chiara. « Material savings through structural steel reuse: a case study in Genoa. » *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 86, May 2014, pp. 87 – 92.

URL : <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.011>

PROST Robert (sous la direction de), BASSEREAU Jean-François, BOUDON P. et al. « Concevoir, inventer, créer. Réflexions sur les pratiques ». *Éditions L’Harmattan, Collection villes et entreprises*, Paris, 1995, 338 p.

ISBN : 2-7384-3610-2.

QUARANTE, Danielle. « Éléments de design industriel. » *Collection Université de Compiègne, Éditions Maloine*, Paris, 1984, 478 p.

ISBN : 2-224-00963-1

RAMALHETE Pedro, SENOS Anna, AGUIAR Carlos. « Digital tools for material selection in product design. » *Materials and design*, Vol. 31, No. 5, May 2010, pp. 2275 – 2287.

URL : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.013>

RESEAU DES RESSOURCERIES. « Observatoire National Des Ressourceries. » *Édition 2017. Édité par le réseau national des Ressourceries, 2017, 28 p.*

RICHET Sophie, PERRY Nicolas, MILLET Dominique, VAUTIER Marc, POMPIDOU Stéphane, ROCHE Ivan. « Les enjeux d'écoconception associés à l'économie circulaire. » *EcoSD annual workshop 2018, Presses des Mines-Transvalor*, Novembre 2019, 154 p.

ISBN : 978-2-35671-580-7

RIEGL Aloïs. « Le culte moderne des monuments, sa nature et ses origines. » Paris, *Éditions Allia*, 2016, 112 p. (publication originale, 1903)

ISBN-13 : 979-1030401431

RIFKIN Jérémy. « La troisième révolution industrielle : Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde. » *Éditions Les liens qui libèrent*, 2012, 416 p.

ISBN : 2918597473

RUSSO Davide, RIZZI Caterina. « Structural optimization strategies to design green products. » *Computers in industry*, Volume 65, Issue 3, April 2014, pp. 470 – 479.

SAINT-PIERRE Anna, BASSEREAU Jean-François, MOSSE Aurélie. « *Les Petites Affiches* : textilisation of architectural memory through the transformation of rubble », *Textile Intersection*, – London, Loughborough University UK 12-14th of September, 2019, 23 p.

DOI : <https://doi.org/10.17028/rd.lboro.9724712.v1>

SAINT-PIERRE Anna. « Textiliser la mémoire bâtie par la réutilisation in-situ des déchets architecturaux. » Sous la direction de Jean-François Bassereau. *Université Paris Sciences et Lettres (PSL), SACRe, École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs (ENSADLAB), Soft Matters*. Paris, 21 Mars 2022

SEDILLOT Béatrice, BLIVET Céline. « Indicateurs clés pour le suivi de l'économie circulaire. Édition 2021 », Édité par Le service des données et études statistiques (SDES), Ministère de la transition écologique, DATALAB, Avril 2021. 44 p.

ISSN : 2555-7580 (imprimé)

ISSN : 2557-8138 (en ligne)

SEMPER Gottfried. « *Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Aesthetik. Ein Handbuch für Techniker, Künstler und Kunstfreunde, I. Die textile Kunst, für sich betrachtet und in Beziehung zur Baukunst* » Frankfurt am Main, 1860 [traduction française partielle : *Du style et de l'architecture : écrits, 1834-1869*, J. Soullou (éd.), Marseille, 2007], trad. I. Kalinowski et E. Thibault, *Éditions d'en bas*, Lausanne, 2018, 182 p.

SEVE Bernard. « La notion de forme dans les arts. » *Cycle genèse des formes*. LNA No. 75, Lille, 7 Novembre 2017, pp. 7 – 8.

SEYS Sophie. « Vers un dépassement des freins réglementaires au réemploi des éléments de construction. Un meilleur cadre pour le réemploi de produits, pas d'obligation de marquage CE et un système d'évaluation ad hoc. » *Le Bâti Bruxellois Source de nouveaux Matériaux*. Rotor ASBL, décembre 2017, 97 p.

SIMONDON Gilbert. « Entretien sur la mécanologie. (1968) » *Revue de synthèse*, tome 130, 6e série, No. 1, 2009, pp. 103 – 132.
DOI : 10.1007/s11873-009-0072-9

SIMONDON Gilbert. « Du mode d'existence des objets techniques. » *Édition Aubier* (26 octobre 2012), Publication Originale 1958.
ISBN-13 : 978-2700704280

SITA RECYCLAGE. SUEZ Environnement. « Voyage en recyclage. Au cœur d'une industrie d'avenir. Matières à réfléchir, visite guidée de nos unités industrielles. » p.13, 200?

SMICVAL. « Rapport annuel 2017 sur le prix et la qualité du service public de prévention et de gestion des déchets ménagers et assimilés. » *Syndicat Mixte Intercommunal de Collecte et de Valorisation du Libournais Haute-Gironde*, 2017, 40 p.

SULLIVAN Louis. « FORM FOLLOWS FUNCTION. De la tour de bureaux artistiquement considérée. » *Introduction de Claude Mignot (Paris-4), Postface de Thomas Leslie (Iowa State University)*. Collection Fac-similé, Texte Original 1896, Décembre 2011, 80 p.
ISBN : 978-2-36509-003-2

SUNDIN Erik. « Life-Cycle Perspectives of Product/Service-Systems: In Design Theory. » In: *Sakao T., Lindahl M.* (eds) *Introduction to Product/Service-System Design*. Springer, London, 2009, pp. 31 – 49.
URL : https://doi.org/10.1007/978-1-84882-909-1_2
ISBN : 978-1-84882-908-4

SUNDIN Erik, BRASS Bert. « Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. » *Journal of Cleaner Production*, Volume 13, Issue 9, 2005, pp. 913 – 925.
ISSN : 0959-6526
URL : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.04.006>.

TCHERTCHIAN Nicolas, YVARS Pierre-Alain, MILLET Dominique. « Bénéfices et limites d'une approche CSP/ACV pour l'écoconception de systèmes complexes ; application à une navette maritime à motorisation hybride Application navette maritime. » 2012, 29 p.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00832425>

THOMAS, Julian. "The Trouble with Material Culture." In *Overcoming the Modern Invention of Material*. Dans Jorge V. O., Thomas J. (dir.), Special issue of *Journal of Iberian Archaeology*, 9-10, Porto, ADECAP, 2007, pp. 11-23.

THOUVENIN Éric. « Modélisation des processus de conception de produits et développement de la capacité d'innovation : application au cas des PME-PMI. » *Sciences de l'ingénieur [physics]*. *Arts et Métiers ParisTech*, 2002, 164 p.

TSING Anna. « Friction: an ethnography of global connection. » *Princeton University Press*, 2004, 344 p.

ISBN : 978-0691120652

TURNER R.K., PEARCE D.W. « Sustainable economic development: economic and ethical principles. » In: Barbier E.B. (eds) *Economics and Ecology*. Springer, Dordrecht, 1993, pp. 177 – 194.

URL : https://doi.org/10.1007/978-94-011-1518-6_11

UNESCO. « Convention sur la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel 1972. » Paris, le 16 novembre 1972, 16 p.

UNESCO/CCI, Symposium, « L'artisanat et le marché mondial : commerce et codifications douanières » - Manille, 6-8 octobre 1997.

VALLET Flore, EYNARD Benoît, MILLET Dominique, GLATARD MAHUT Stéphanie, TYL Benjamin, BERTOLUCI Gwenola « Using eco-design tools: An overview of experts' practices. » *Design Studies*, Volume 34, Issue 3, 2013, pp. 345 – 377.

ISSN : 0142-694X

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.destud.2012.10.001>.

WANG Qj, TANG Dubing, YIN Leilei, YANG Jun. « A Method for Green Modular Design Considering Product Platform Planning Strategy. » 9th International Conference on Digital Enterprise Technology, DET 2016, Intelligent Manufacturing in the Knowledge Economy Era. *Procedia CIRP* 56, Vol. 56, 2016, pp. 40 – 45.

URL : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.013>

WAAS Tom, HUGÉ Jean, BLOCK Thomas, WRIGHT Tarah, BENITEZ-CAPISTROS Francisco, and VERBRUGGEN Aviel. « Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-Making Strategy for Sustainable Development. » *Sustainability*, August 2014, 23 p.

DOI : 10.3390/su6095512

WIMMER Wolfgang, ZÜST Rainer. « ECODESIGN PILOT: Product-Investigation-, Learning-and Optimization-Tool for Sustainable Product Development. » *Springer Dordrecht*, 2001, 99 p.

ISBN : 978-1-4020-0965-5

DOI : <https://doi.org/10.1007/0-306-48393-9>

YOUNES Chris. Dans « L'esprit des matériaux, architecture et philosophie n°2 : Recyclage et urbanité ». *Éditions de la Villette et de l'École Supérieure d'Architecture de Grenoble*, Paris, janvier 2010, pp. 86 – 89.

ISBN : 978-2-915456-36-3

LIVRET DES ANNEXES

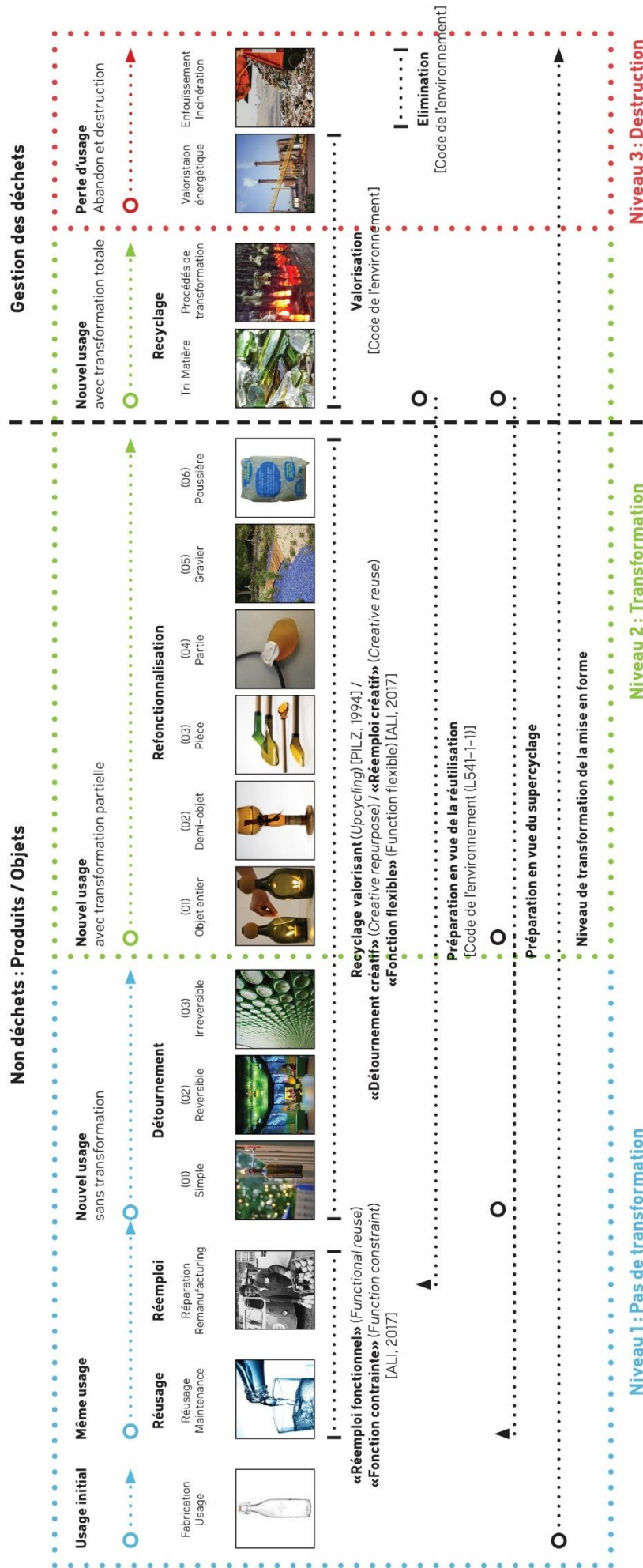
Tableau 1 : « fiche déchet » utilisée pour l'état des lieux.

Fiche matériau N° :

Référence matériau / Produit :

DOMAINE	CATÉGORIE	SOUS-CATÉGORIE	UNITÉ	DESCRIPTIF
Matériau - Objet	Produit	Nature du produit		
	Matériaux	Description matérielle du produit	%	
	Procédés de fabrication	Nature du ou des procédés		
Conditionnement - stockage - Logistique	Géographie	Site de production		
		Lieu de stockage		
		Distance à parcourir entre le lieu de production et de stockage	Km	
	Tri	Nature du tri : Trié / Vrac / Mélange		
	Conditionnement	Sur palette / en sacs / Big Bag / rouleaux / carton, etc.		
	Taille du conditionnement	Surface et/ou volume LgxlgxHt	cm et Mcube	
	Remarque	Opération (à faire sécher ?) / déconstruction ?		
	Précautions	Au sec / Protéger du froid ou chaud, des Uv, etc.		
Métrologie	Propriétés	Descriptif technique du matériau (FDES)		
	Quantité	Longueur / largeur / Hauteur (épaisseur)	Cm	
		Volume par unité	CM Cube	
		Volume total par mois	M Cube	
		Poids par unité	Kg	
		Poids total par mois	Tonnes	
	Valeurs	Coût de production du produit neuf	Euro/tonne	
		Prix de vente neuf	Euro/tonne	
		Valeur en fin de vie (prix de revente ou de traitement de la matière). <u>Valeur négative ou positive</u> Valeur spécifique : auteur, ancienneté, historique, symbolique, unicité, préciosité, etc.	Euro/tonne	
Temporalité	Durée de production du déchet	Mois		
Saisonnalité	Oui / non - Si oui, désigner une période	Mois		
Visuels - Sensoriel	Qualités	Joindre une image du produit en annexe : vues en plan - élévation - perspective.	Jpeg - nom de(s) l'image(s)	
		Comportement à l'eau (Hydrofuge-imperméable), au slovant, à la chaleur et au séchage, tenue au feu, etc.		
		État : Neuf - Usure superficielle (patine, rouille, bouloches, etc.) - Déformé - Endommagé (trou, fissuration, etc.)		
	Géométrie	Plan 2D / 3D - Ou croquis avec cotations	Dxf / Obj Cm	
	Couleur	Ral / Pantone / Nuancier	Ref	
	Odeur	Forte - légère - aucune		
	Toucher	Lisse - Doux - fluide - rêche - élastique - villex - refieffé - glissant - tombé.	+ ou -	
	Remarques	Traitement de surface ou dans la masse ? Variations visuelles ? Ennoblement (Stone Wash, amidon, etc.) ?		
Fin de vie	Mode de traitement	Don - revente - recyclage - incinération - enfouissement.		
	Surcyclage	Nature de la valorisation : rembourrage, fibres, artisanat textile, etc		

Diagramme de valeur : exemple de la bouteille en verre



Légende

- |.....| Limites d'une définition.
-> Mouvement de transformation d'un objet.
- O..... Point de départ d'un objet.
- Limite entre le statut de produit et le statut de déchet.
- Niveau 3 : Destruction.
- Niveau 2 : Transformation.
- Niveau 1 : Pas de transformation.

Figure 1 : frise « product to dust » d'une bouteille en verre : niveaux et vocabulaire associé aux étapes de transformation d'un objet. Menu, 2018.

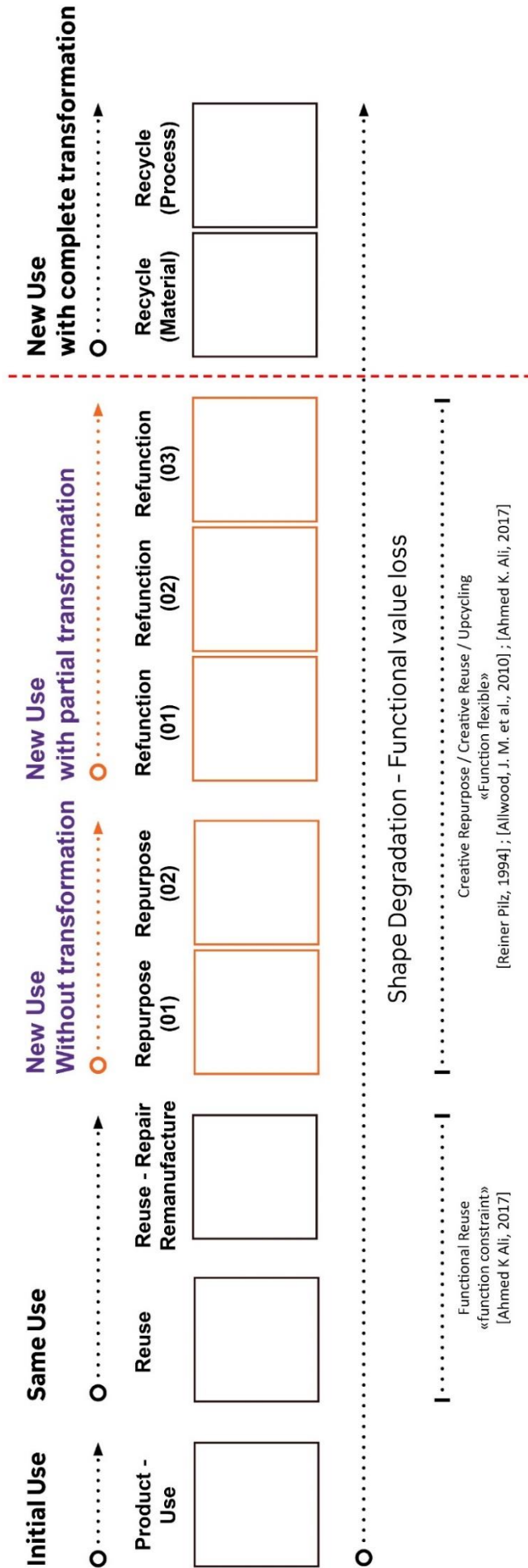
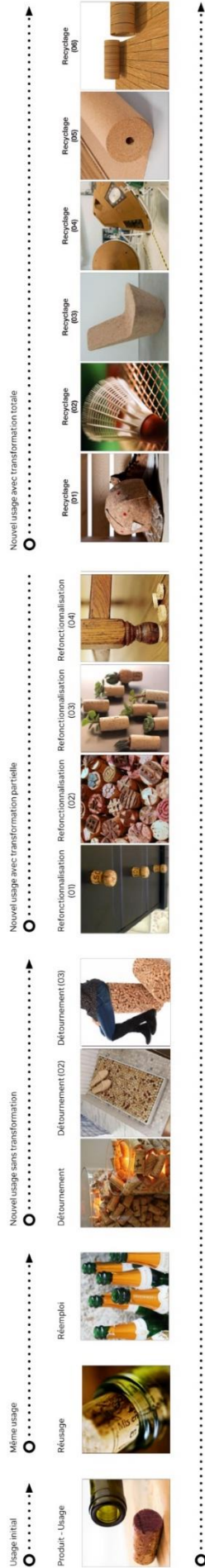


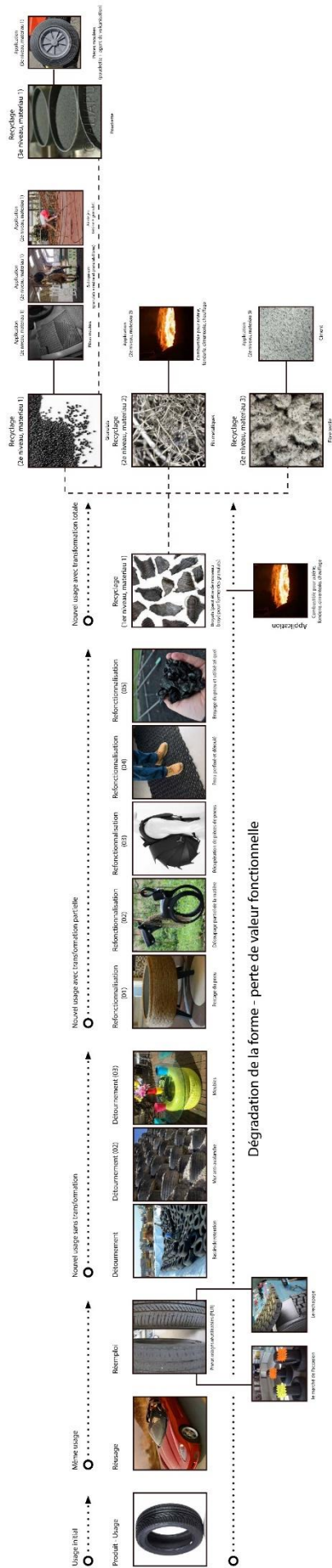
Figure 2 : Canevas de la frise « product to dust » donné aux étudiants avec les différents termes relatifs aux niveaux de transformation des matériaux. 2018.

Figure 3 : frise de valeurs du liège. Master Prospective Design. Mines Saint-Etienne, 2018.
 Étudiants : CAIRON Axel, BRECHET Bérénice.



Dégradation de la forme - perte de valeur fonctionnelle

Figure 4 : frise de valeur des pneus. Master Prospective Design. Mines Saint-Etienne, 2018.
 Étudiants : MATTAS Joan, CORBINEAU Betty.



Dégradation de la forme - perte de valeur fonctionnelle

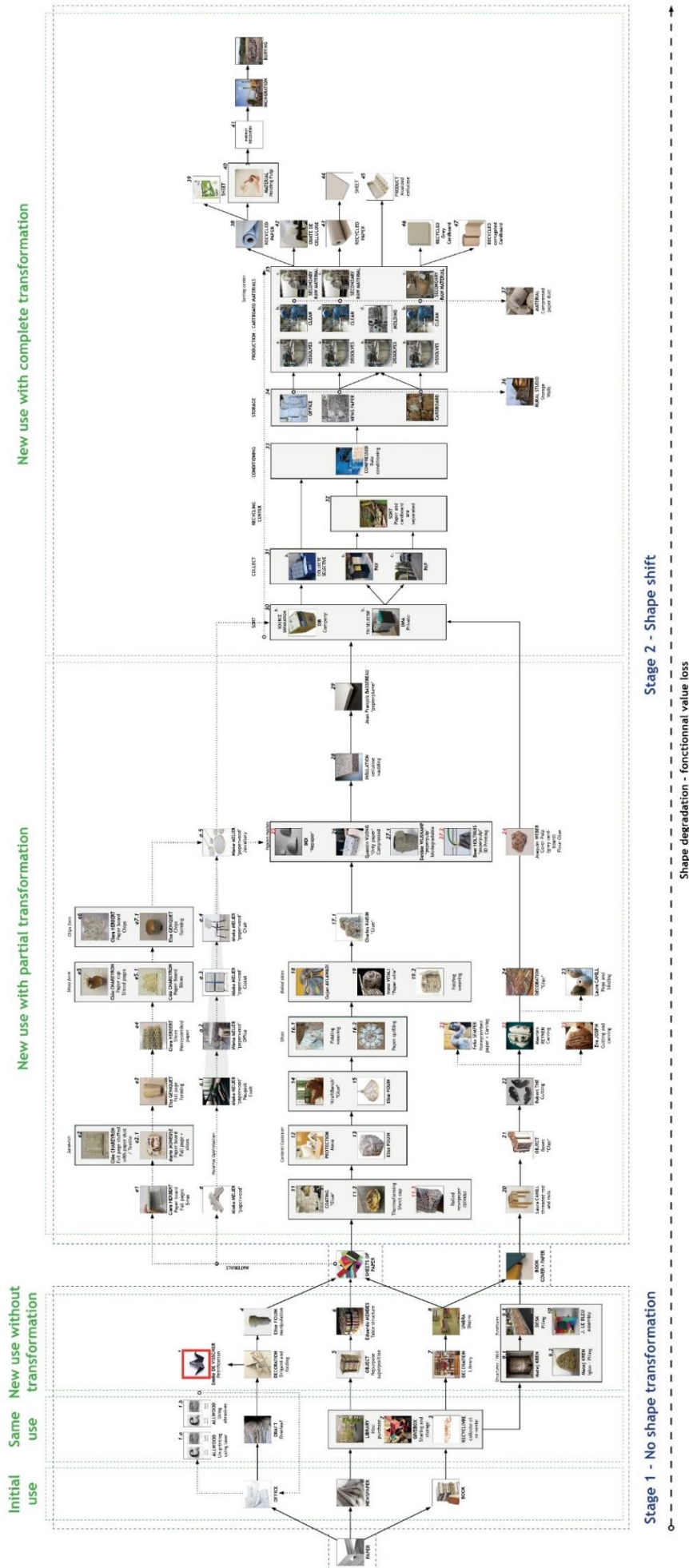


Figure 5 : frise « from product to dust » du livre. Étudiants en stage à Mines Saint-Étienne 2019 : HERBERT Clara, SAKWINSKI Manon, CHAREYRON Cléo, WEBER Joaquim, MONEUSE Marie, GENIQUET Elsa, LAMARQUE Nicolas.

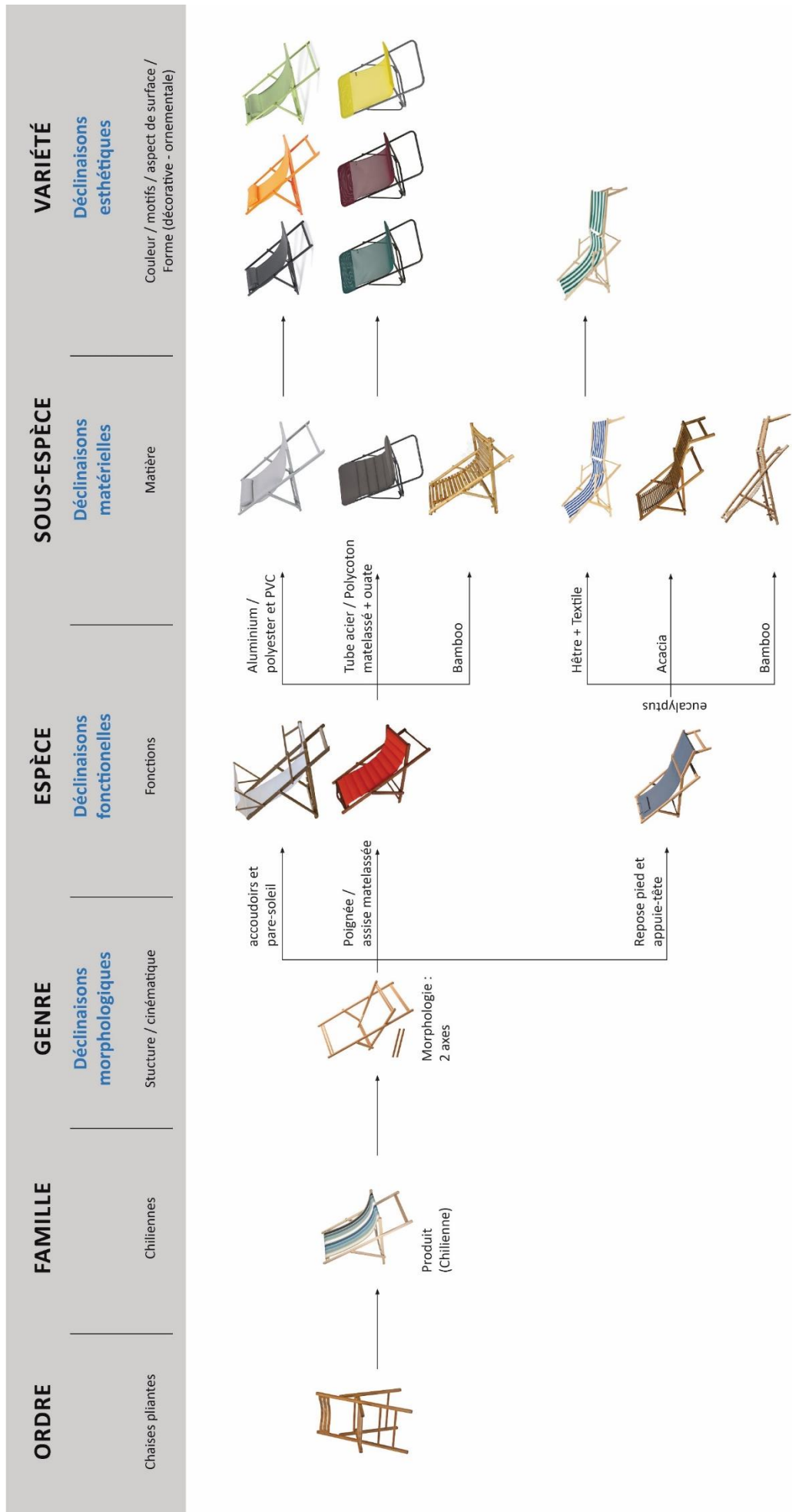


Figure 7 : classification des produits : exemple de déclinaison d'une famille de chiliennes, 2018.

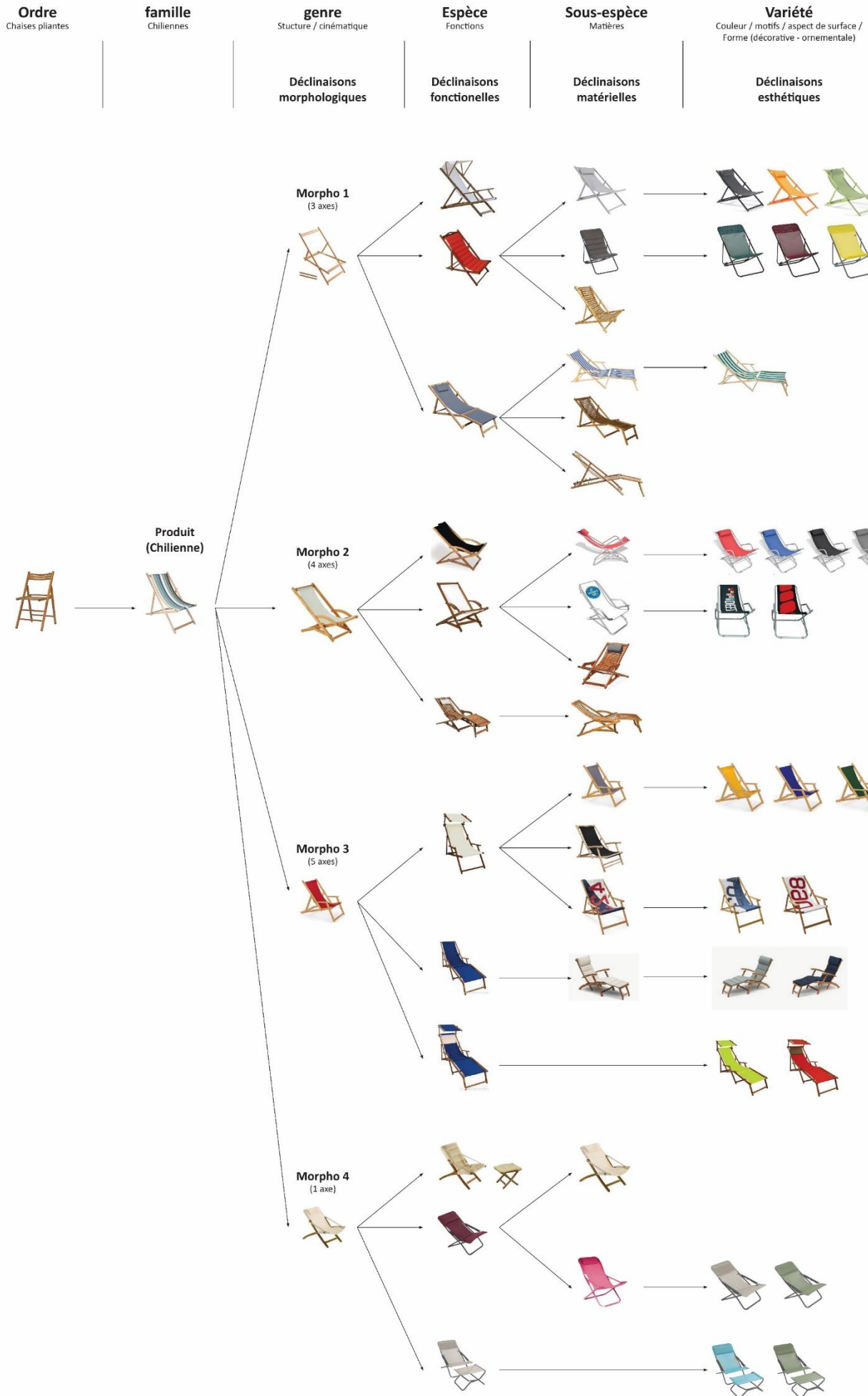


Figure 8 : classification des produits déployée : les variations de la chiliennes. 2018.



version 1 en chute de bande de coton

33



version 2 en chute de fils de coton

34



version 3 en corde d'escalade

35

Figure 9 : variation des scénarios de collecte de la « chilienne Tipi ». LISBONA David, TEIKI Céleste, LAURENCY Emma, SAGHRAOUI Emna. Mines Saint-Étienne, 2019.

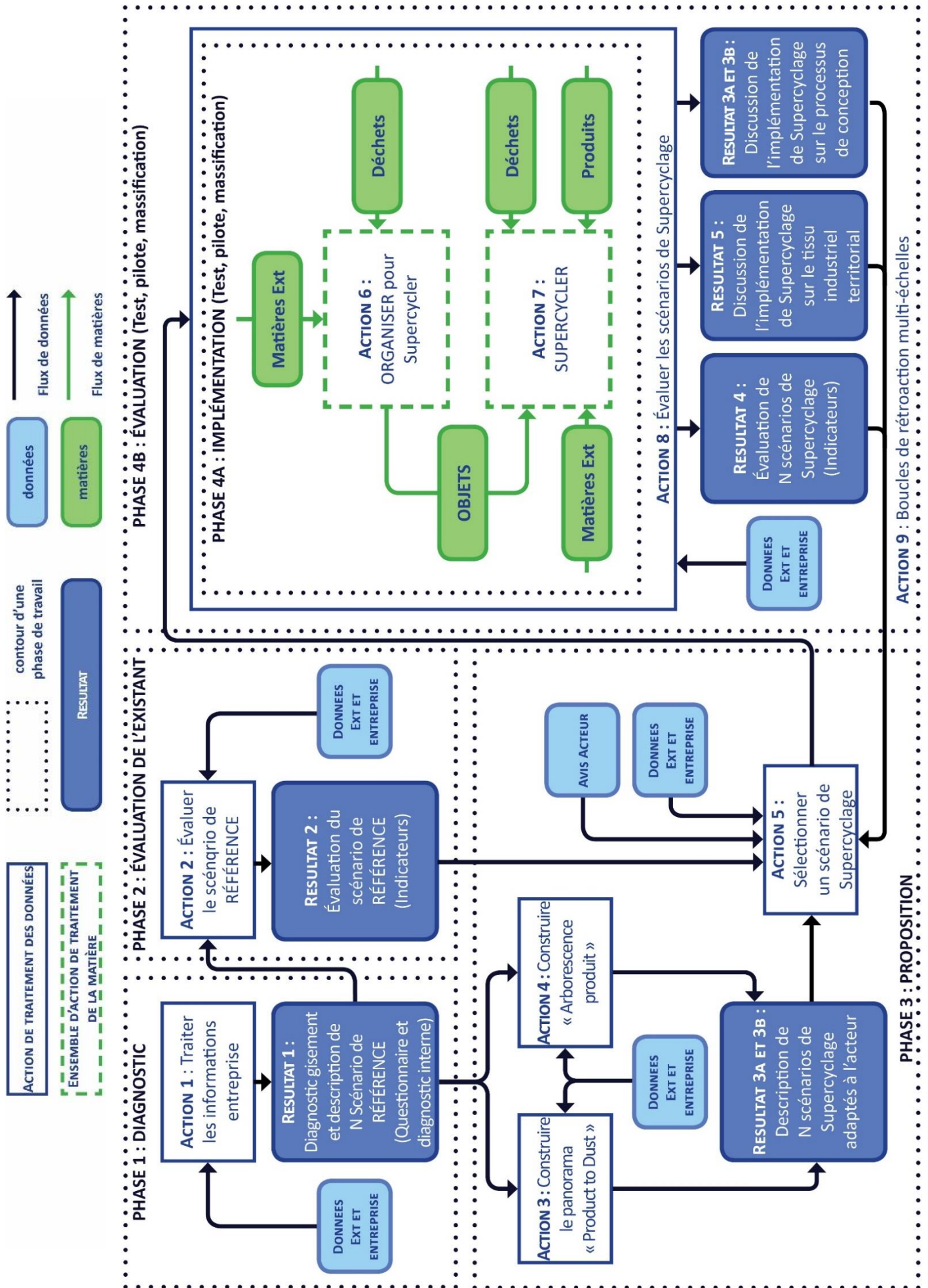


Figure 10 : Description générale de la méthode de supercyclage.

Tableau 2 : liste des actions élémentaires modèle et leurs efforts associés.

FAMILLE	Type	Description	Détail Process	Effort INVESTISSEMENT	Effort HUMAIN	Effort FONCTIONNEMENT	Effort GLOBAL
			COEFF	10	3	1	Moyenne pondérée des 3 efforts
			MIN	1	1	1	1
			MAX	3	3	3	3
FABRIQUER	Assembler	Coller	Flexible/Rigide	1	1	1	1
FABRIQUER	Assembler	Fixation mécanique	attache fileté/couture	1	2	3	1
FABRIQUER	Assembler	Fixation mécanique	Encliquetage/Cerclage	1	1	3	1
FABRIQUER	Assembler	Fixation mécanique	Rivet/agrafe	1	2	3	1
FABRIQUER	Assembler	Soudage	mécanique	2	1	3	2
FABRIQUER	Assembler	Soudage	thermique	1	1	3	1
FABRIQUER	Assembler	Soudage	mécanique	2	1	3	2
FABRIQUER	Assembler	Soudage	thermique brasage	1	1	2	1
FABRIQUER	Assembler	Monter	action manuelle+savoir	1	2	2	1
FABRIQUER	Assembler	Compacter	Balle de papier (compactage indus)	2	1	1	2
FABRIQUER	Assembler	Presser		2	1	1	2
FABRIQUER	Finir	Peindre	Pistolet peinture	1	2	2	1
FABRIQUER	Finir	Polissage mécanique		2	3	3	2
FABRIQUER	Finir	Placage		1	2	3	1
FABRIQUER	Finir	Traitement thermique	Carburation	1	2	2	1
FABRIQUER	Finir	Restaurer		2	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Broyer		1	1	1	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Déformation	Extrusion	3	1	3	3
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlèvement matière	Percer	1	2	3	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Ajout de matiere	Frittage Selectif par Laser	2	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Compression Isostatique Frittage	2	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Compression Frittage	2	1	2	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Moulage poudre	3	1	2	3
FABRIQUER	Mettre en forme	Déformation Feuille	Feuilles	3	2	1	3
FABRIQUER	Mettre en forme	Déformation Feuille	Repoussage Tour	1	2	3	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	composites pré-impregnés	2	2	1	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Hand Lay-up	1	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	RTM	2	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Pultrusion	2	1	1	2

FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Injection	3	1	2	3
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Thermoformage	1	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Soufflage	2	1	2	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Extrusion	2	1	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlèvement matière	Cisaillage	1	2	3	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlèvement matière	Fraisage	2	2	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlèvement matière	Sciage	1	2	2	1
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlèvement matière	Forage	1	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlèvement matière	Découpe jet abrasif	1	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Enlèvement matière	Electro-érosion	2	2	2	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Deformation	Forgeage	3	1	2	3
FABRIQUER	Mettre en forme	Deformation	Laminage	2	2	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Déformation Feuille	Estampage	2	1	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Fonderie cire perdue	1	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Fonderie Sable	1	3	3	2
FABRIQUER	Mettre en forme	Transformation matiere	Moulage	2	2	3	2
PREPARER	Nettoyer			1	1	3	1
PREPARER	Contrôler	Contrôle visuel		1	1	3	1
PREPARER	Contrôler	Expertiser		1	3	3	2
PREPARER	Réparer			1	2	3	1
TRIER	Séparer	Peu de critères		1	2	2	1
TRIER	Séparer	Beaucoup de critères		1	2	3	1
TRIER	Désassembler			1	2	2	1
TRIER	Déconstruire			1	2	2	1
TRIER	Calibrer			1	2	2	1
STOCKER	Conditionner	Sac / Palette / Carton		1	1	1	1
STOCKER	Référencer	Scan ISBN		1	1	1	1
STOCKER	Référencer	Saisie Manuelle		1	3	3	2
STOCKER	Entreposer			1	1	1	1
COLLECTER	Transporter	Transport lourd	Semi-remorque	2	1	1	2
COLLECTER	Transporter	Transport léger	Camionette	1	2	3	1
DISTRIBUER	Donner			1	1	3	1
DISTRIBUER	Vendre	Local		1	1	2	1
DISTRIBUER	Vendre	national		1	2	2	1
DISTRIBUER	Echanger			1	1	2	1

LÉGENDE

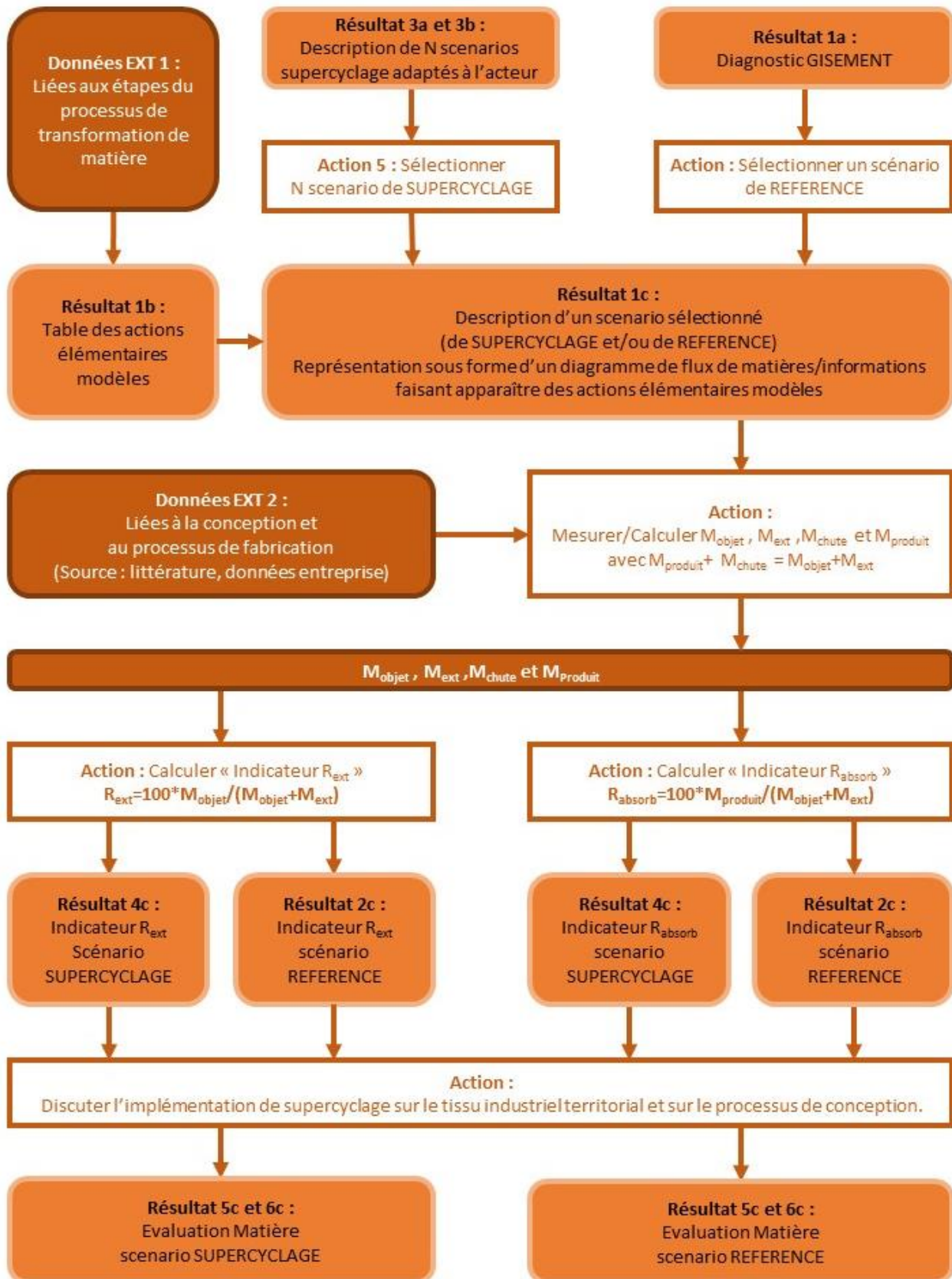


Figure 11 : diagramme de calcul des indicateurs matière.

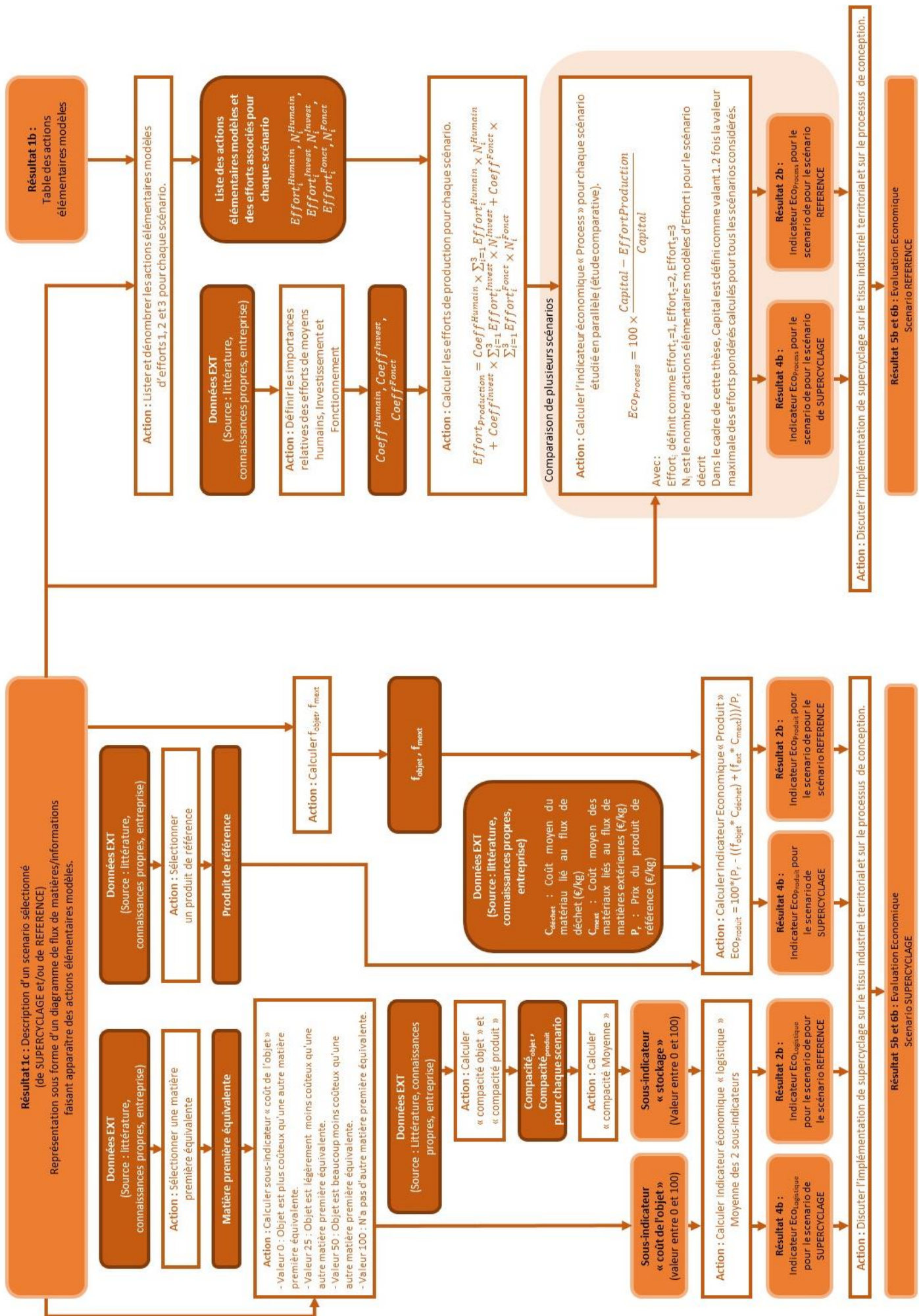


Figure 12 : diagramme de calcul des indicateurs économiques.

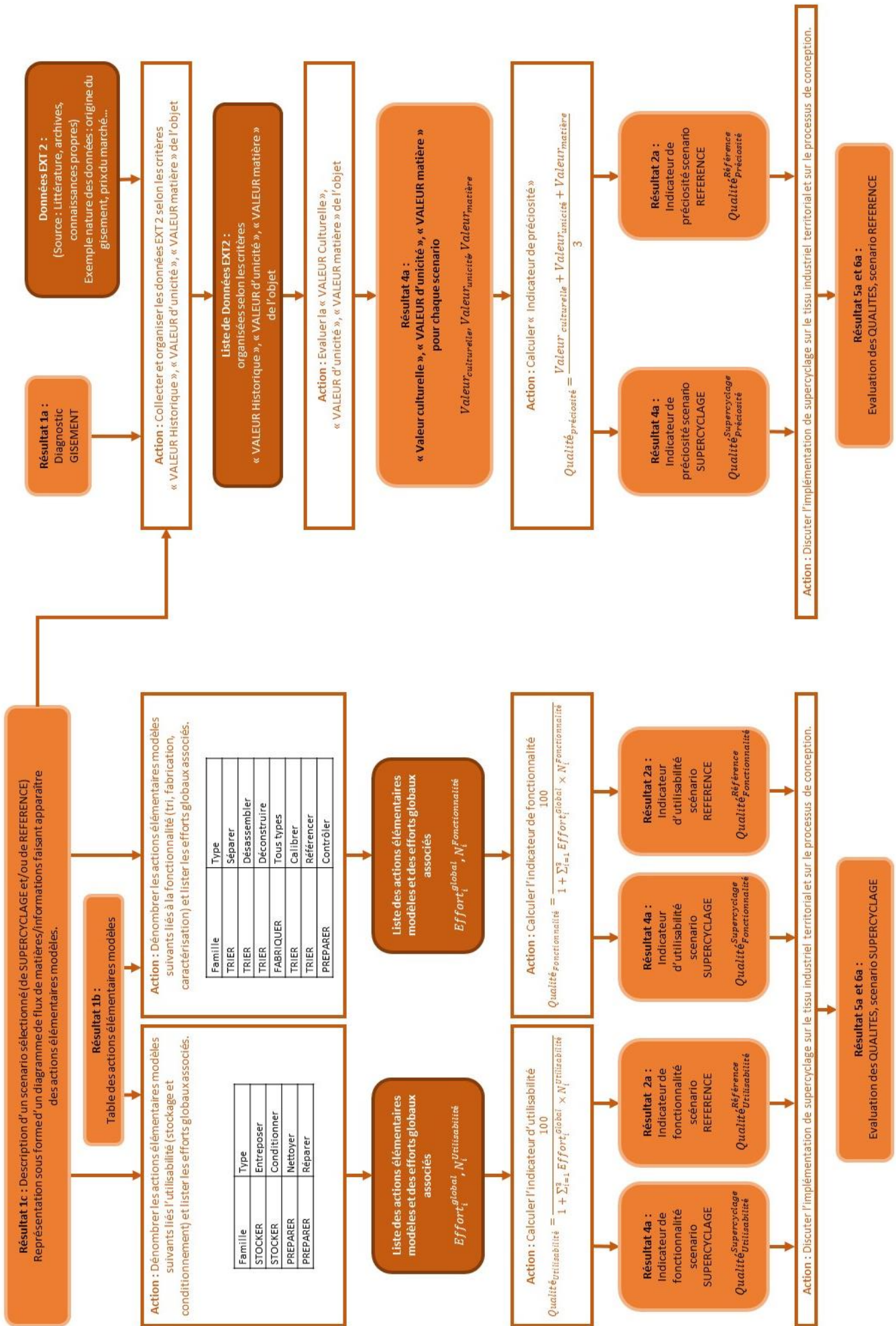


Figure 13 : diagramme de calcul des indicateurs de qualité.

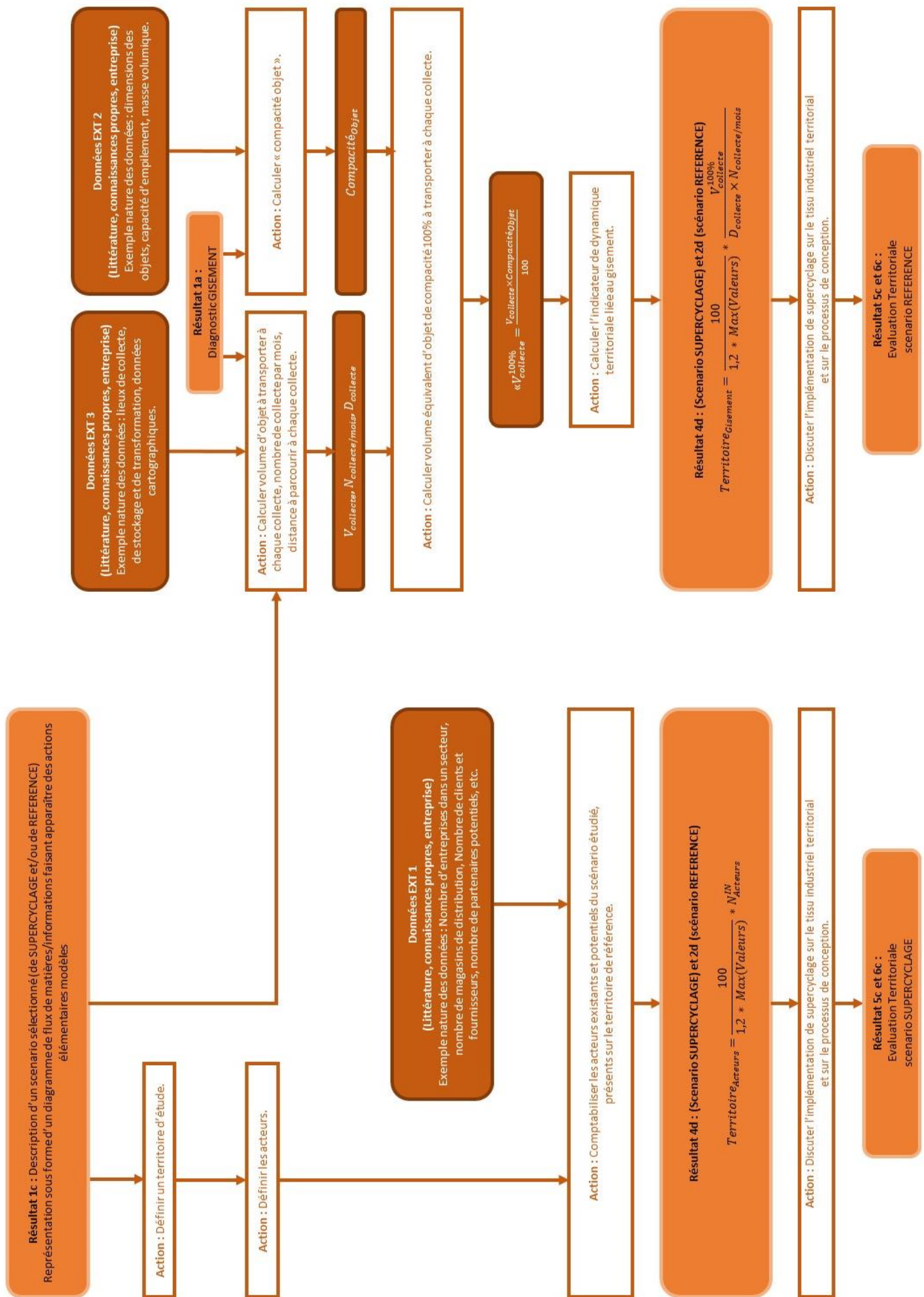


Figure 14 : diagramme de calcul des indicateurs de dynamique territoriale.

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

NNT : 2022LYSEM018

Baptiste MENU

Dissertation title : Elaboration and evaluation of territorialized strategies of second hand materials valorization by design.

Speciality : Material Science

Keywords : Waste, Reuse, Recycling, circular economy, Design, second hand materials, territory.

Abstract :

Progressive structuration of industrial activities at global scale is leading to the construction of recycling industry based on matter processing. So that, matter can be introduced in technical chains of standardized production. Standardization is aiming to guarantee high quality levels of matter recirculation. However, this well-established process is raising forefront issues: the rapid transformation of shapes into matter flows is requiring high consumption of energy for transportation and transformation, what's more, this process is usually causing values and material properties loss. Against the flow of standardization moves, this work is offering a fresh look on second hand material recirculation channels through a divergent creative move from the first steps of design process, suggesting the development of numerous territorialized materials flows acting in synergy. In this thesis, operational tools are developed for companies and local authorities in order to perform a diagnosis of input and output material flows (in particular, materials identified as "waste"); analysis and development of innovative trails for materials flows recirculation thanks to the use of creation support tools; and finally the evaluation of these trails thanks to the help of performance indicators. Those tools are tested in a case study on second hand books valorization.

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

NNT : 2022LYSEM018

Baptiste MENU

TITRE DE LA THÈSE : Élaboration et évaluation de stratégies territorialisées de valorisation des matériaux de deuxième vie par le design

Spécialité : Sciences et génie des matériaux.

Mots clefs : déchets, réemploi, recyclage, économie circulaire, conception, matériaux, territoire, design.

Dans une perspective historique, matériaux et territoires ont pendant longtemps entretenu des liens étroits. Se faisant, les matériaux, les savoir-faire et les techniques ont induit des mises en formes associées à l'identité des territoires. La structuration progressive des activités industrielles à l'échelle mondiale a entraîné dans son sillage un découpage des chaînes techniques qui suppose d'augmenter le nombre de mises en formes intermédiaires en vue de produire indépendamment des lieux d'extraction ou de consommation.

La caractérisation des matières associées à leurs mises en formes permettent une certaine maîtrise de la chaîne de valeurs. Cela permet de prédire le comportement des matériaux pour des fonctions choisies. En fin de vie, lorsque les produits ont perdu la fonction pour laquelle ils avaient été conçus, le retour à l'état de matière semble inévitable pour que ce processus puisse recommencer. Cependant, ce processus bien établi soulève des enjeux importants : la transformation rapide jusqu'à l'état matière contribue à dégrader les propriétés, les qualités et les valeurs contenues dans les objets en circulation et requiert d'importantes consommations énergétiques pour les transporter et les transformer.

Ce travail de thèse explore le vocabulaire associé à la transformation des objets et met en lumière le rôle central des activités de conception dans l'appropriation des formes et de leurs fonctions. L'objectif est de fournir des outils d'aide à la décision destinés aux acteurs désireux de trouver des solutions à hautes valeurs ajoutées, pour les objets voués à devenir des déchets.

Dans ce cadre deux outils d'aide à la conception sont développés afin d'explorer le potentiel fonctionnel des objets au-delà du cycle de vie initial. Ces outils permettent l'élaboration scénarios en vue d'explorer le potentiel de la forme dans un large éventail de possibilités de préservation ou de transformation. De plus, un pré-modèle de circulation des objets et des indicateurs sont proposés. Déployés sous quatre axes (évaluation matière, économique, qualités, territoriale), ces indicateurs permettent d'évaluer et de comparer des scénarios existants à de potentielles alternatives. Ceci, afin d'identifier les pistes de valorisation les plus prometteuses à l'échelle du territoire étudié. L'application à un cas d'étude sur des scénarios de valorisation de l'objet livre permet de valider ces propositions et de mettre en évidence les points forts, les limites et les perspectives de ce travail dans le déploiement de stratégies territorialisées de valorisation objets.