



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**



DEBORAH DE LA CRUZ NEUMANN

**AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DO SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉTRICA:
COMO APLICAR A ANÁLISE DE CICLO DE VIDA COMO ESTRATÉGIA DE ECO
CONCEPÇÃO NA SNCF RÉSEAU?**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Ouro Preto

2019

DEBORAH DE LA CRUZ NEUMANN

**AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DO SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉTRICA:
COMO APLICAR A ANÁLISE DE CICLO DE VIDA COMO ESTRATÉGIA DE ECO
CONCEPÇÃO NA SNCF RÉSEAU?**

Trabalho apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como aproveitamento de estudos do Trabalho de Graduação I e II, partes dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Auxiliadora Maria Moura Santi

**Ouro Preto
Dezembro de 2019**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto — UFOP
Escola de Minas



ATA DE SESSÃO DE AVALIAÇÃO DE APROVEITAMENTO DE ESTUDO

Aos dez dias do mês de dezembro de 2019, às 17h00, no Auditório da Fundação Gorceix, no prédio da Escola de Minas do Campus do Morro do Cruzeiro, foi realizada a sessão pública para avaliação de Aproveitamento de Estudo para as disciplinas **AMB109: Trabalho de Graduação I** e **AMB108: Trabalho de Graduação II**, do curso de Graduação em Engenharia Ambiental, para a aluna DEBORAH DE LA CRUZ NEUMANN, matrícula 14.2.1895, referente ao Requerimento Nº 12.840, protocolado pela interessada na Secretaria de Ensino da Escola de Minas, em 14.11.2019, e aprovado pelo Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental, em reunião realizada no dia 21.11.2019, mediante análise e parecer quanto ao aproveitamento do “*Projet de fin d'étude*”, realizado no período de 1º de abril a 25 de setembro de 2019, na “*Société Nationale des Chemins de Fer Français* (SNCF), em programa de mobilidade acadêmica da Universidade Federal de Ouro Preto com a *École Nationale Supérieure Mines Télécom Lille-Douai* (IMT Lille-Douai). A banca foi formada pelos seguintes membros: Profª. Drª. Auxiliadora Maria Moura Santi (DEPRO), Profª. Drª. Irce Fernandes Gomes Guimarães (DEPRO) e Prof. Dr. Flavio Sandro Lays Cassino (DEMET). A avaliação baseou-se no trabalho escrito intitulado “*Évaluation D'Impact Environnemental du Systeme de Traction Électrique: Comment se servir de L'Analyse du Cycle de Vie pour écoconcevoir à SNCF réseau?*”; encaminhado aos membros da banca em tempo hábil; em dois documentos preparados pela aluna — “Experiência e Conteúdo de Base” e “Resumo” transcrito para língua portuguesa; e na apresentação oral do trabalho, em sessão pública, ocorrida nesta data. A exposição oral foi seguida da avaliação de cada um dos membros da banca, que deliberou, ao final, pelo “Aproveitamento de Estudo” para as disciplinas AMB109: Trabalho de Graduação I e AMB108: Trabalho de Graduação II, do curso de Graduação em Engenharia Ambiental, para DEBORAH DE LA CRUZ NEUMANN, e pelo encaminhamento ao CEAMB, como anexos desta ata, a versão do trabalho como elaborado pela aluna, para manter sua

Deborah Neumann *F.* *E.* *Afant*

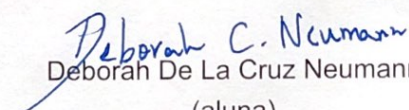
originalidade e autoria, bem como os dois outros documentos citados. A Profª Irce solicitou à aluna que depositasse uma cópia do trabalho, com resumo também em língua portuguesa, no SISBIN/UFOP. Concluída a sessão, eu, Profª. Auxiliadora Maria Moura Santi, lavrei a presente ata que vai assinada por mim, pelos demais membros da banca avaliadora e pela aluna.

Ouro Preto, 10 de dezembro de 2019


Profª. Drª. Auxiliadora Maria Moura Santi
(membro/DEPRO/Escola de Minas)


Profª. Drª. Irce Fernandes Gomes Guimarães
(membro/DEPRO/Escola de Minas)


Prof. Dr. Flavio Sandro Lays Cassino
(membro/DEMET/Escola de Minas)


Deborah De La Cruz Neumann
(aluna)

RESUMO

A preocupação ambiental é um fenômeno em crescimento e, de acordo com a Política de Desenvolvimento Sustentável da empresa SNCF Réseau, a redução da pegada ecológica é definida como uma de suas metas prioritárias. Parte integrante da Direção Geral Industrial e de Engenharia (DGII) da SNCF Réseau, o Departamento de Tração Elétrica (DTE) decidiu se voltar à eco- concepção como forma de ilustrar tal meta, baseada em uma metodologia internacionalmente padronizada: a Análise de Ciclo de Vida (ACV), uma forma de abordagem de Economia Circular regulamentada pela ISO 14040. Minha missão profissional vem portanto por integrar a eco- concepção nas práticas da empresa a partir da avaliação dos impactos relacionados ao ciclo de vida dos Equipamentos de Alimentação das Linhas Eletrificadas (EALE), permitindo assim associar seus “custos ambientais” aos seus devidos “custos econômicos”. Os impactos ambientais dos Produtos de Tração Elétrica – dentre eles o sistema catenário e as subestações de transformação de energia elétrica – são calculados por meio do método “ReCiPe” disponibilizado no software SimaPro e utiliza a função de comparação a fim de realizar as análises de sensibilidade, fundamentais à elaboração de pistas à eco-concepção.

Palavras-chaves: *Desenvolvimento Sustentável; SNCF Réseau; Tração Elétrica; Eco-concepção; Análise de Ciclo de Vida; ISO 14040; Economia Circular; Ciclo de Vida; EALE; Sistema Catenário; Subestações; Impactos Ambientais; SimaPro; Modelagem; Análise de Sensibilidade*

ABSTRACT

Environmental concern is an on-growing phenomenon and the sustainable development policy at SNCF Réseau highlights the ecological footprint reduction as one of its major goals. As to illustrate the policy, the Electrical Traction Department inside the company’s General Direction of Industry and Engineering (DGII) has chosen to turn itself towards eco conception by an international standardised approach: Life Cycle Analysis (LCA), which is foretaken in ISO 14040 and considered as pathway to circular economy. Thus, my professional assignment stands for the integration of eco conception in the company’s practices by evaluating the environmental impacts among the Electric Power Supply Equipment life cycles, which will allow the Department to link their economic costs to their «environmental costs». We calculate those impacts within the Electric Traction Products – catenary system and the substations – using the «ReCiCP» method inside SimaPro software, an elementary tool for this project. A comparison function is also used in order to perform sensitivity analyses, which has a significant role in designing tracks for eco conception.

Keywords: *Sustainable Development; SNCF Réseau; Electric Traction; Eco Conception ; Life Cycle Analysis; ISO 14040 ; Circular Economy ; Life Cycle; Catenary System; Substation; Environmental Impact; SimaPro; Modelling; Sensitivity Analysis*

EXPERIÊNCIA E CONTEÚDO DE BASE

Este projeto de monografia foi desenvolvido a partir da realização de um estágio de seis (6) meses na Société Nationale des Chemins de Fer français (SNCF), empresa responsável pelo gerenciamento de todas as linhas férreas na França.

Mais precisamente, a SNCF Réseau é um dos três Estabelecimentos Públicos de caráter Industrial e Comercial (EPICs) que compõe o Grupo Público Ferroviário, sendo esta a responsável pela gestão da infraestrutura da rede férrea.

Dentro da infraestrutura da malha ferroviária, tem-se portanto a malha eletrificada, que alimenta os trens de circulação no território francês. O Departamento de Tração Elétrica (DTE) se insere portanto neste meio, e se subdivide em 5 pólos principais, sendo um deles o Conselho Energético e de Desenvolvimento Sustentável (CEDD), seção na qual fui acolhida para o estágio.

O contrato de estágio foi possibilitado através de uma parceria de mobilidade acadêmica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) com a École Nationale Supérieure Mines Télécom Lille-Douai (IMT Lille-Douai), que assinou vínculo empregatício com a empresa do dia primeiro de abril de 2019 ao vinte e cinco de setembro de 2019. Esse tipo de estágio é obrigatório à formação do engenheiro na França, e leva o nome de Projeto de Fim de Estudo (PFE).

O PFE é desenvolvido durante os seis últimos meses do aluno-engenheiro na universidade, e demanda a realização de um projeto de conclusão de curso a partir da experiência de um estágio final, sendo defendido perante uma banca composta por um professor – dito responsável pedagógico – e um ou mais profissionais da empresa que acompanharam o aluno em estágio – dito tutor ou mestre de estágio –, equiparando-se assim ao Trabalho de Monografia exigido no final do curso de Engenharia Ambiental.

O trabalho aqui apresentado foi defendido dia dezessete de setembro de 2019 no campus Lahure da IMT Lille-Douai (Douai, Nord 59 – França) e foi aprovado com nota 17,5/20. A banca de avaliação foi composta por:

- Frédéric Klopčic, professor responsável pela opção M.I.O. cuja qual integrei durante meu período de mobilidade acadêmica;
- Hassan Mahmoud, engenheiro elétrico do DTE da SNCF Réseau, responsável pelo acompanhamento do meu estágio;
- Quentin Levy-Abegnoli, engenheiro de meio ambiente externamente contratado no DTE da SNCF Réseau, responsável pela minha orientação e revisão do projeto.

Ouro Preto, 10 de dezembro de 2019.

RAPPORT DE STAGE

ÉVALUATION D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU SYSTEME DE TRACTION ÉLECTRIQUE : COMMENT SE SERVIR DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE POUR ÉCOCONCEVOIR À SNCF RÉSEAU ?

Deborah NEUMANN DE LA CRUZ

Projet de fin d'étude réalisé du 01 avril 2019 au 25 septembre 2019 sous la direction de Hédi KHARRAT, Chef de pôle Conseil Energétique et Développement Durable

Tuteur de stage Quentin LEVY-ABEGNOLI et Maître de Stage Mahmoud HASSAN - CEDD2

Et de Frédéric KLOPCIC, responsable du Mastère Spécialisé M.I.O.



PROMOTION 2019

École Nationale Supérieure Mines-Télécom Lille-Douai

Société Nationale des Chemins de fer Français

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon tuteur professionnel, M. Quentin LEVY-ABEGNOLI, pour les conseils et la conduite tout au long du développement de cette mission de stage. Merci pour sa confiance et pour sa contribution dans les domaines du développement durable.

Je tiens à remercier aussi mon maître de stage, M. Mahmoud HASSAN, et le responsable du pôle CEDD, M. Hédi KHARRAT, pour l'opportunité de stage, le temps passé comme formateur et pour le partage d'expertise.

À mon tuteur pédagogique, M. Frédéric KLOPCIC, merci pour son aide bienveillante à la recherche de stage, son soutien professionnel et pédagogique qu'il m'a apporté pendant ce séjour en France.

Je remercie l'ensemble des collaborateurs de SNCF Réseau dont leurs attentions et bonnes volontés ont permis d'accomplir mes missions. À mes collègues de CEDD pour leur esprit d'équipe et pour leur très bon accueil, en particulier M. Jules PASCAL pour l'échange lexical.

Enfin, je remercie vivement mes camarades de promotion, Breno LOURO et Mariana MORENO qui m'ont accompagné et conseillé lors de la rédaction de ce rapport. J'ai beaucoup apprécié votre aide précieuse tout au long du stage.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
TABLE D'ILLUSTRATION	6
GLOSSAIRE	7
RESUME.....	8
ABSTRACT	8
INTRODUCTION.....	10
1. PRÉSENTATION DU MILIEU D'ACCUEIL	11
1.1. SNCF Réseau	11
1.2. Engagement Environnementaux.....	12
1.3. Mission et début de stage	14
2. TRAVAUX RÉALISÉS	15
2.1. Analyse du Cycle de Vie	15
2.1.1. Cycle de Vie d'un Produit	15
2.1.2. Normes ISO.....	16
2.1.3. Concepts Fondamentaux	16
2.1.4. Méthodologie ACV	17
2.1.5. Logiciels de Calcul.....	17
2.1.5.1. Base de Données.....	18
2.1.5.2. Bilan Produit.....	18
2.1.5.3. SimaPro	18
2.1.6. Les Indicateurs d'Impact	19
2.2. La Traction Électrique	21
2.2.1. La Réseau Électrifié en France.....	22
2.2.2. Équipements d'Alimentation des Lignes Électrifiés	22
2.2.2.1. Les Caténaires	23
2.2.2.2. Les Sous-Station	24
2.3. Méthodologie.....	24
2.3.1. Le développement du projet	24
2.3.2. Planning.....	26
2.4. Composition de l'Inventaire du Cycle de Vie	26
2.4.1. Caténaires	26
2.4.1.1. Définition des objectifs et du périmètre d'étude	26
2.4.1.2. Inventaire des flux	27

2.4.1.3.	Système d'hypothèses	27
2.4.2.	Sous-Stations	28
2.4.2.1.	Définition des objectifs et du périmètre d'étude	28
2.4.2.2.	Inventaire des flux	28
2.4.2.3.	Système d'hypothèses	30
2.4.3.	Ensembles en Commun	30
2.5.	Modélisation sur Logiciel de Calcul.....	31
2.5.1.	Démarches pour la modélisation	31
2.5.2.	Modélisation de la Caténaire	32
2.5.3.	Modélisation de la Sous-Station.....	33
2.6.	Résultats Obtenus	33
2.6.1.	Le système caténaire	33
2.6.1.1.	Analyses de Sensibilité.....	34
2.6.1.2.	Pistes à l'écoconception	39
2.6.2.	Sous-Station de Mitry.....	40
2.6.2.1.	Analyses de Sensibilité.....	41
2.6.2.2.	Pistes à l'écoconception	45
3.	IMPRESSIONS PERSONNELLES	46
	CONCLUSION	47
	BIBLIOGRAPHIE	49
	ANNEXES	51

TABLE D'ILLUSTRATION

Figure 1: Les 4 enjeux de la politique DD de la DEDD – SNCF Réseau 2017.....	10
Figure 2: La politique DD de SNCF – SNCF Réseau, 2012.....	13
Figure 3: Les flux entrants et sortants d'un système – ADEME 2019	16
Figure 4: Le Synoptique d'alimentation électrique - SNCF Réseau 2007.....	22
Figure 5: Décomposition d'une caténaire 1500 V - SNCF Réseau, 2007.....	23
Figure 6: Caténaire V160 STI, 25 kV sur catalogue – SNCF Réseau, 2017.....	26
Figure 7: Caténaire CSRR STI, 1500 V sur catalogue – SNCF Réseau, 2017	26
Figure 8: Réseau d'un fil de contact, caténaire en 1500 V, de symbole 0.841.3892.....	32
Figure 9: Résultats de la modélisation d'un fil de contact 25 kV.....	34
Figure 10: Résultats de la modélisation d'un fil de contact 1500 V.....	34
Figure 11: Comparaison entre les trois types d'isolateurs.....	35
Figure 12: Comparaison entre les trois types de matériaux disponible pour l'isolateur	35
Figure 13: Variation du taux de recyclage de l'isolateur en verre	36
Figure 14: Comparaison entre les poteaux conçus en bois et en acier, midpoint	36
Figure 15: Comparaison des FC sur voie 1500 V et sur voie 25 kV.....	37
Figure 16: Comparaison de la provenance du cuivre utilisé.....	37
Figure 17: Comparaison de la provenance du cuivre utilisé, IMPACT 2002+	38
Figure 18: Comparaison de la provenance du cuivre utilisé, IMPACT 2002+ découpé.....	38
Figure 19: Étude de dommages de la Sous-Station de Mitry, endpoint	40
Figure 20: Étude de dommages du Transformateur de Puissance, midpoint	40
Figure 21: Analyse comparative de Mitry hors le TR, endpoint	41
Figure 22: Remplacement du cuivre par l'acier dans un Transformateur de Puissance, midpoint.....	41
Figure 23: Comparaison sur la composition d'un Transformateur de Puissance, midpoint	42
Figure 24: Comparaison sur la composition d'un Transformateur de Puissance, IMPACT 2002+.....	42
Figure 25: Variation des pertes électriques du TR sur la Sous-Station de Mitry	43
Figure 26: Variation des pertes électriques de la SELF de condensateur sur la Sous-Station de Mitry.....	43
Figure 27: Variation de la consommation électrique d'un TSA sur le Schéma 5 1x25 kV.....	44
Figure 28: Variation du taux de recyclage de béton pour une dalle de retournement	44
Figure 29: Résumé des éco-pistes sur graphique de faisabilité.....	48
Tableau 1: Indicateur de réussite sur le travail mené.....	26
Tableau 2: Les schémas de traction électrique de la Sous-Station de Mitry-Mory.....	28
Tableau 3: La phase Utilisation liée aux composants de la Sous-Station de Mitry	29
Tableau 4: Extrait du tableau d'hypothèses sur la fin de vie d'un ensemble de matériaux	31
Tableau 5: Les Analyses de Sensibilité du projet caténaire.....	32
Tableau 6: Les Analyses de Sensibilité du projet sous-station.....	33
Tableau 7: Variation du taux de recyclage de béton estimé à la Sous-Station de Mitry, en Ecopoints	44
Tableau 8: Résumé des contributions d'impact selon la variation de la consommation électrique	45
Tableau 9: L'avancement du projet sur le planning projeté	47

GLOSSAIRE

ACV : *Analyse de Cycle de Vie*

ADEME : *Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie*

BT : *Basse Tension*

BP : *Bilan Produit*

CEDD : *Conseil Energétique et Développement Durable*

CSRR : *Complementary Split Ring Resonator – Modèle Caténaire en 1500V*

DGII : *Direction Générale Industrielle et Ingénierie*

D2R : *Développement et Renouvellement des Réseaux*

EALE : *Equipements d’Alimentation des Lignes Electrifiées*

EMM : *Expertise, Maintenance et Métier*

HT : *Haute Tension*

I&P : *Ingénierie & Projets*

I&P-TE : *Ingénierie & Projets – Traction Électrique*

ITE : *Installation de Traction Électrique*

IFTE : *Installations Fixes de Traction Électrique*

ISO : *International Organisation for Standardisation*

LEA : *Logiciel d’Estimation et Assemblage*

LCC : *Life Cycle Cost*

M&T : *Maintenance & Travaux*

RSE : *Responsabilité Sociétale des Entreprises*

SNCF : *Société Nationale des Chemins de Fer français*

SST : *Sous Station*

STI : *Spécification Technique d'Interopérabilité*

TE : *Traction Electrique*

TR : *Transformateur de Puissance*

TSA : *Transformateur de Services Auxiliaires*

V160 : *Vitesse 160km/h – modèle caténaire 25kV*

RESUME

LA PRÉOCCUPATION ENVIRONNEMENTALE EST UN PHÉNOMÈNE EN CROISSANCE ET AU SEIN DE SNCF RÉSEAU LA RÉDUCTION DE L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE EST DÉFINIE COMME ENJEU MAJEUR SELON SA POLITIQUE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE. LE DÉPARTEMENT DE TRACTION ÉLECTRIQUE (DTE), PARTIE INTÉGRANTE DE LA DIRECTION GÉNÉRALE INDUSTRIELLE ET INGÉNIERIE (DGII) À SNCF RÉSEAU, A CHOISI DE SE TOURNER VERS L'ÉCOCONCEPTION POUR ILLUSTRER CETTE DÉMARCHE, QUI A ÉTÉ FONDÉE SUR UNE APPROCHE EXHAUSTIVE: L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV), DÉMARCHE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE RÈGLEMENTÉ PAR L'ISO14040¹. MA MISSION PROFESSIONNELLE PORTE DONC SUR L'INTÉGRATION DE L'ÉCOCONCEPTION DANS LES PRATIQUES DE L'ENTREPRISE, EN EVALUANT LES IMPACTS DU CYCLE DE VIE DES ÉQUIPEMENTS D'ALIMENTATION DES LIGNES ÉLECTRIFIÉS (EALE) PERMETTANT AINSI D'ASSOCIER LEURS «COÛTS ENVIRONNEMENTAUX» À LEURS «COÛTS ÉCONOMIQUES». À TRAVERS DU LOGICIEL DE CALCUL SIMAPRO, LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES PRODUITS DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE – DONT LE SYSTÈME CATÉNAIRE ET LES SOUS-STATIONS – SONT CALCULÉS SELON LA MÉTHODE « RECIPE » ET EN UTILISANT LA FONCTION DE COMPARAISON AFIN DE RÉALISER LES ANALYSES DE SENSIBILITÉ, FONDAMENTALES À L'ÉLABORATION DES PISTES D'ÉCOCONCEPTION.

MOTS CLÉS : *DÉVELOPPEMENT DURABLE; SNCF RÉSEAU; TRACTION ÉLECTRIQUE; ÉCOCONCEPTION ; ANALYSE DE CYCLE DE VIE; ISO 14040 ; L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE ; CYCLE DE VIE ; EALE ; SYSTÈME CATÉNAIRE ; SOUS-STATIONS ; IMPACT ENVIRONNEMENTAL ; SIMAPRO ; MODÉLISATION ; ANALYSE DE SENSIBILITÉ*

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL CONCERN IS AN ON-GROWING PHENOMENON AND THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT POLICY AT SNCF RESEAU HIGHLIGHTS THE ECOLOGICAL FOOTPRINT REDUCTION AS ONE OF ITS MAJOR GOALS. AS TO ILLUSTRATE THE POLICY, THE ELECTRICAL TRACTION DEPARTMENT INSIDE THE COMPANY'S GENERAL DIRECTION OF INDUSTRY AND ENGINEERING (DGII) HAS CHOSEN TO TURN ITSELF TOWARDS ECO CONCEPTION BY AN INTERNATIONAL STANDARDISED APPROACH: LIFE CYCLE ANALYSIS (LCA), WHICH IS FORETAKEN IN ISO14040¹ AND CONSIDERED AS PATHWAY TO CIRCULAR ECONOMY. THUS, MY PROFESSIONAL ASSIGNMENT STANDS FOR THE INTEGRATION OF ECO CONCEPTION IN THE COMPANY'S PRACTICES BY EVALUATING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS AMONG THE ELECTRIC POWER SUPPLY EQUIPMENT LIFE CYCLES, WHICH WILL ALLOW THE DEPARTMENT TO LINK THEIR ECONOMIC COSTS TO THEIR «ENVIRONMENTAL COSTS». WE CALCULATE THOSE IMPACTS WITHIN THE ELECTRIC TRACTION PRODUCTS – CATENARY SYSTEM AND THE SUBSTATIONS – USING THE «RECIPE» METHOD INSIDE SIMAPRO SOFTWARE, AN ELEMENTARY TOOL FOR THIS PROJECT. A COMPARISON FUNCTION IS ALSO USED IN ORDER TO PERFORM SENSITIVITY ANALYSES, WHICH HAS A SIGNIFICANT ROLE IN DESIGNING TRACKS FOR ECO CONCEPTION.

KEYWORDS: *SUSTAINABLE DEVELOPMENT; SNCF RÉSEAU; ELECTRIC TRACTION; ECO CONCEPTION ; LIFE CYCLE ANALYSIS; ISO14040 ; CIRCULAR ECONOMY ; LIFE CYCLE; CATENARY SYSTEM; SUBSTATION; ENVIRONMENTAL IMPACT; SIMAPRO; MODELLING; SENSITIVITY ANALYSIS*

¹ **ISO14040** : définition dans l'Annexe 1.

INTRODUCTION

La préoccupation environnementale est un phénomène en croissance constante, qui gagne de plus en plus de force dans les discours mondiaux. À partir du rapport de 1987 intitulé «Our Common Future», le concept de développement durable s'est étendu à travers le monde et s'est imposé comme une valeur à tous les acteurs économiques, politiques et sociaux. Selon sa définition, le développement durable est la capacité d'une société de se développer sans compromettre les besoins des générations futures.

En gardant la durabilité comme thème central, l'idée d'économie circulaire émerge également aux sphères de discussion environnementale comme moyen de démarche, visant un modèle de consommation dans lequel les matériaux consommés peuvent être réintroduits sur le marché en tant que matière première, évitant ainsi l'exploitation excessive des ressources naturelles.

Au niveau public français, l'Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME) encourage les entreprises à mettre en place une politique d'économie circulaire. En passant du modèle linéaire au modèle circulaire, son objectif est d'assurer un véritable découplage entre la croissance économique et la consommation de matières premières non renouvelables. Dans ce contexte, les concepts d'écoconception et d'Analyse de Cycle de Vie s'insèrent comme stratégies de l'économie circulaire, permettant d'identifier les points forts et les points faibles d'un produit parmi la quantification de son cycle de vie et de son empreinte environnementale.

Au sein de SNCF Réseau, la réduction de l'empreinte écologique est définie comme enjeu majeur selon sa politique de développement durable. Basé sur l'ISO26000² et confiée à la Direction de l'Environnement et du Développement Durable (DEDD), il s'agit aussi de répondre aux pratiques prévues sur la Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE).



Figure 1: Les 4 enjeux de la politique DD de la DEDD – Rapport d'activité Responsable SNCF Réseau 2017 ^[21]

Ma mission professionnelle porte donc sur l'intégration de l'écoconception dans les pratiques de l'entreprise, en évaluant les impacts du cycle de vie des produits et du matériel acheté au sein du Département de Traction Electrique à la Direction Générale Industrielle et Ingénierie (DGII) à SNCF Réseau. Ce rapport vient répondre à un cadre de Projet de Fin d'Étude, période obligatoire de la dernière année en école pour la poursuite du diplôme d'ingénieur, qui résume une expérience de 6 mois acquise en entreprise.

² ISO26000 : définition dans l'Annexe I: Tableau de normes et références ISO

1. PRÉSENTATION DU MILIEU D'ACCUEIL

1.1. SNCF Réseau

Créé en 1937 lors de l'unification des compagnies de chemin de fer existantes et de l'Etat (décret-loi du 31 août 1937), la Société Nationale des Chemins de Fer, SNCF, s'impose aujourd'hui comme référence de la mobilité des voyageurs sur un scénario mondial. Le groupe SNCF est responsable du transport de 14 millions de voyageurs par jour sur un total de 120 pays. Elle compte 270.000 collaborateurs, pour un chiffre d'affaires de 33,5 Milliard d'Euros.

À partir de la réforme de 2014, les compétences de l'entreprise s'organisent autour de trois Établissements Publics à caractère Industriel et Commercial (EPIC), indissociables et solidaires, rassemblés au sein d'un Groupe Public Ferroviaire (GPF) – Loi n°2014-872 du 14 août 2014 :

- SNCF, qui assure le contrôle et le pilotage stratégiques, l'intégration industrielle, la cohérence économique et l'unité sociale du GPF,
- SNCF Réseau, chargé de la gestion de l'infrastructure du réseau ferré national (RFN), auparavant réparties entre Réseau Ferré de France et la SNCF (SNCF Infra et Direction de la Circulation Ferroviaire/DCF),
- SNCF Mobilités, qui gère les activités d'exploitation des services de transport de voyageurs et de marchandises qui étaient précédemment celles de la SNCF.

L'EPIC SNCF, tête de groupe, est le lien naturel entre le Groupe Public Ferroviaire et les « EPIC fils » SNCF Réseau et SNCF Mobilités^[23]. Il s'agit donc de promouvoir l'interrelation et l'évolution du GPF à travers d'une certaine cession d'autonomie aux EPICs, en gardant toujours ses piliers: service public, sécurité, sûreté, performance industrielle et économique.

L'EPIC SNCF Réseau, à son tour, est responsable de la gestion, la maintenance, le développement et l'exploitation des services offerts par le Réseau Ferré National (RFN). Cet établissement est donc en charge de quatre missions principales inhérentes au Gestionnaire d'Infrastructure Unifié (GIU), étant elles :

1. Accès à l'infrastructure ferroviaire du réseau ferré national, comprenant la répartition des capacités et la tarification de cette infrastructure, garantie à travers de l'entité Accès au Réseau (AR)
2. Gestion opérationnelle des circulations, garantie à travers de l'entité Circulation (C)
3. Maintenance, entretien et renouvellement de l'infrastructure, garantie à travers de l'entité Maintenance & Travaux (M&T)
4. Développement, aménagement, cohérence et mise en valeur du réseau, garantie à travers de l'entité d'Ingénierie & Projets (I&P), dont la DGII

La Direction Générale Industrielle et Ingénierie (DGII) fait le lien entre les autres entités et les acteurs externes en concevant et en réalisant des projets de développement de régénération du réseau ferré. Elle développe également des projets de Recherche & Développement afin de proposer des solutions innovantes et une expertise technique qui serviront à l'ensemble des activités de SNCF Réseau. Elle a un statut de maîtrise d'ouvrage dans la réalisation de ses chantiers et de maître d'œuvre dans ses projets^[10].

La Direction est aussi responsable de l'exportation de la technologie et de l'ingénierie SNCF parmi 36 pays, dont 4000 ingénieurs et techniciens. Le Département de la Traction Electrique (DTE), partie intégrant de la DGII, est en charge des engins qui concernent le réseau de distribution électrique du système ferroviaire, en particulier la traction électrique. Il assure sa conception, ses études, sa mise en œuvre, sa gestion et ses prestations.

L'Annexe 2 s'organise dans 5 pôles principaux : Stratégie & Pilotage (SP), Expertise, Maintenance & métier (EMM), Conception & Expertise (CES), Développement &

Renouvellement des réseaux TE (D2R) et Conseil Énergétique & Développement Durable (CEDD).

Le pôle CEDD joue ainsi un rôle fondamental dans la mise en application des enjeux du Développement Durable au DTE, et son appui sur l'écoconception pour la démarche environnemental sera le sujet de discussion des prochains chapitres.

1.2. Engagements Environnementaux

À travers de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement de 1992 – ECO92 ou Rio92 –, le contexte de durabilité commence à s'insérer dans le scénario entrepreneur, et le résultat se présente aujourd'hui notablement dans les codes de Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE).

Sous un cadre mondiale, la norme ISO26000 présentée dans l'*Annexe 1* définit la RSE comme la « responsabilité d'une organisation vis-à-vis des impacts de ses décisions et de ses activités sur la société et l'environnement, se traduisant par un comportement transparent et éthique qui contribue au développement durable, y compris à la santé et au bien-être de la société ».

Dans le contexte de l'Union Européenne, la RSE est définie comme « la responsabilité des entreprises vis-à-vis des effets qu'elles exercent sur la société ». En France, toutefois, l'adoption de ces principes n'a pas été différente; les entreprises se sont adaptées à la création de lignes directrices basées sur le Développement Durable (DD), ce qui a également permis de promouvoir la recherche et le développement de technologies pour les aider à la mise en place des politiques environnementales.

En ce qui concerne l'économie circulaire, le décret n° 2012-557 relatif à la Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) introduit une nouvelle conception au niveau des déchets, qui donne priorité à la prévention et à l'écoconception des produits, suivi par le réemploi et la réutilisation, ensuite le recyclage et la valorisation de la matière, puis la valorisation énergétique et, finalement, l'élimination.

Outre l'apport de l'entreprise auprès des normes et réglementations mondiales, le choix d'une politique volontariste d'économie circulaire constitue un avantage concurrentiel, puisqu'elle contribue à sa visibilité. À SNCF, ces avantages sont notés dans deux domaines principaux :

- dans les relations contractuelles avec les donneurs d'ordre que sont les Autorités Organisatrices ;
- dans la participation à l'effort industriel national de soutien et du développement de filières

La Société National des Chemins de Fer s'appuie donc sur 4 enjeux principaux, dont 12 engagements sociétaux qui sont compris sur la *Figure 2*.

ENJEU CLIENTS : PERMETTRE À TOUS UNE MOBILITÉ DURABLE

- Engagement 1 - Favoriser l'accessibilité pour tous les voyageurs
- Engagement 2 - Développer le porte-à-porte écologique pour les voyageurs et les entreprises
- Engagement 3 - Construire une mobilité durable avec les territoires et pour eux
- Engagement 4 - Développer le transport écologique de marchandises

ENJEU ENVIRONNEMENT : RÉDUIRE NOS IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- Engagement 5 - Généraliser les outils de gouvernance environnementale
- Engagement 6 - Économiser l'énergie, émettre moins de gaz à effet de serre
- Engagement 7 - Agir sur l'ensemble des nuisances potentielles liées à notre activité

ENJEU SALARIÉS : MODERNISER NOTRE PACTE SOCIAL

- Engagement 8 - Favoriser la diversité
- Engagement 9 - Développer la qualité de vie au travail
- Engagement 10 - Accroître l'employabilité

ENJEU COLLECTIVITÉS ET ASSOCIATIONS : SOUTENIR LOCALEMENT LES POPULATIONS FRAGILES

- Engagement 11 - Développer l'éducation aux transports auprès de la jeunesse
- Engagement 12 - Favoriser l'emploi, l'insertion et l'aide aux plus fragiles

Figure 2: La politique DD de SNCF – SNCF Réseau, 2012 ^[19]

Pour répondre aux engagements de l'enjeu « Environnement », quelques cibles ont été aussi établies par SNCF en 2012 afin de réduire la pression sur les ressources et qui possèdent aujourd'hui un délai imminent. Au niveau de la Société en générale, les cibles sont :

- réduire de 15% la consommation d'énergie de traction d'ici 2022 ;
- réduire de 20% la consommation d'énergie pour le fonctionnement des bâtiments d'ici 2022 ;
- réduire de 30% et de 40% les émissions CO2 pour le trafic ferroviaire de voyageurs et pour les marchandises entre 1990 et 2020, respectivement.

Dans le Département de Traction Electrique, ces cibles ont été reprises sous la forme de deux objectifs principaux :

- réduire de 20% les impacts environnementaux des Installations Fixes de Traction Electrique (IFTE) à l'horizon 2020
- valoriser 95% des produits de dépose des IFTE à l'horizon 2020

En charge de la division CEDD, le Département a choisi de se tourner vers l'écoconception pour illustrer cette démarche, qui a été fondée sur une approche type exhaustive: l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Les résultats de ces ACV permettent d'identifier les principales étapes de cycle de vie des IFTE génératrices d'impacts environnementaux et serviront aussi par la suite de base à l'élaboration de pistes d'écoconception.

En respectant le décret n°2012-557, l'engagement 5 de l'entreprise comprend ainsi la favorisation de l'écoconception des produits et matériels achetés ou conçus, notamment par l'analyse du cycle de vie.

1.3. Mission et début de stage

Pour répondre aux objectifs du Département de Traction Electrique liés à l'enjeu environnemental de l'entreprise, le Pôle Conseil Energétique et Développement Durable (CEDD) a pour objectif l'élaboration d'un bilan des impacts environnementaux des Installations Fixes de Traction Electrique (IFTE), comprenant les équipements d'alimentation des lignes électriques (EALE) et les systèmes caténaux.

Pour ce faire, il a été décidé d'établir un catalogue ACV (Analyse du Cycle de Vie) de ces équipements, qui permettra ainsi d'associer un «coût environnemental» au «coût économique» lors de leur conception. Ce rapport vient répondre à l'offre de stage associée à la création de ce catalogue, souhaité par le Département TE.

La mission de stage se divise sur les objectifs suivants, qui constituent aussi les étapes du travail à réaliser:

1. Définition des équipements de traction électrique à étudier et leur découpage en sous-ensembles d'éléments constitutifs;
2. Définition de procédures d'ACV pour les différentes familles de matériel à étudier (bornes de l'étude, unités fonctionnelles à considérer, etc);
3. Réalisation des ACV pour les équipements retenus;
4. Intégration des résultats obtenus dans le logiciel de chiffrage économique des projets de conception des équipements de traction électrique afin de coupler les données économiques et environnementales lors de la conception;
5. Analyse des résultats afin d'orienter la conception des équipements et développer des pistes d'écoconception pertinentes et réalisables ;

Un retro-planning Gantt élaboré dès la première semaine de stage vient garantir le développement complet de cette mission. Les étapes considérées sur le planning sont :

1. **Lancement du projet:** elle concerne l'arrivée et la période d'adaptation à l'entreprise. Il s'agit des renseignements concernant plusieurs sujets, dont la structure du Département, les enjeux environnementaux de l'entreprise à considérer pendant ce projet, le fonctionnement des Installations Fixes de Traction Electrique et le cadrage de stage auprès du pôle CEDD, qui donne des pistes sur la procédure ACV au long de la mission.
2. **Choix des composants pour les ACVs:** elle comprend la définition des équipements de la Traction Electrique à être étudiés, dont les composants et les sous-ensembles du système caténaire et des EALEs. Cette étape sera réalisée grâce aux instructions de plusieurs sections du DTE, afin de définir les limites du champ d'étude.
3. **Collecte de données:** réalisation d'un inventaire de cycle de vie des composants choisis, qui comprendra les flux entrants et sortants au niveau individuel. Comme il s'agit d'un grand répertoire dont les informations ne sont pas toujours disponibles, un ensemble d'hypothèses est prévu pour poursuivre à la modélisation.
4. **Modélisation sur logiciel de calcul:** rentrée de l'inventaire créé sur logiciel de calcul d'impact environnemental – SimaPro – et réalisation des analyses de cycle vie chiffrées par composant. Des analyses de sensibilité seront aussi faites sur le logiciel afin de comparer les résultats et de donner des pistes à l'écoconception des IFTEs.
5. **Intégration LEA:** les résultats d'impact environnemental obtenus seront exportés et couplés au Logiciel d'Estimation et Assemblage – LEA –, responsable pour le chiffrage économique des projets de conception des équipements de traction électrique. A travers l'intégration sur LEA, il sera possible de diffuser les résultats au Département et de sensibiliser les porteurs de projets.
6. **Rédaction rapport de stage:** A part le travail interne réalisé, la rédaction du rapport permettra l'assemblage des résultats obtenus, et formera une première discussion des analyses autour de l'écoconception et du scénario d'impact de la Traction Electrique.

7. **Soutenance:** Élaboration, entraînement et présentation de la mission de stage à l'IMT Lille-Douai.

2. TRAVAUX RÉALISÉS

2.1. Analyse du Cycle de Vie

L'écoconception constitue l'un des axes principaux de la mise en place d'une démarche circulaire économique, qui répond aux appels de l'intégration des aspects environnementaux dans la création et le développement d'un produit. L'Analyse de Cycle de Vie s'insère alors dans ce contexte.

2.1.1. Cycle de Vie d'un Produit

Le cycle de vie d'un produit comprend dans sa définition toutes les parties intégrantes de la vie d'un produit, dès la naissance des matières premières qui seront transformées et assemblées sous forme de produit jusqu'à son élimination comme déchet. On peut le diviser en cinq étapes principales :

- **Extraction** – il s'agit de l'extraction de la matière première, dès la déforestation territoriale destinée à l'exploitation des mines, sa consommation et son impact sur des ressources naturelles pour produire les minéraux / matériaux de base;
- **Fabrication** – cette étape concerne la transformation des matériaux de la première phase en produits destinés à la commercialisation. Les procédés d'usinage et d'assemblage, comme la métallurgie et le découpage de pièces, y sont comprises ;
- **Distribution et Installation** – cette phase prend en compte toutes les questions autour de la distribution d'un produit, dont les emballages utilisés, le moyen de transport, son stockage et les outils pour la livraison et l'installation d'une pièce. La distribution est ainsi une phase de liaison entre les étapes, vu qu'elle comprend aussi la distribution depuis le lieu d'exploitation jusqu'à la destination de la pièce comme déchet.
- **Utilisation** – elle concerne les enjeux liés à la maintenance et la consommation de ressources et d'énergie d'un produit pendant sa période de fonctionnement;
- **Désassemblage et fin de vie** – cette phase comprend le désassemblage d'un produit et son traitement en fin de vie, sa réutilisation dans un nouvel assemblage, le recyclage de ses matériaux composants, l'enfouissement etc.

La réalisation d'une Analyse de Cycle de Vie, est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux en modélisant ces étapes. On peut la définir comme la « compilation et l'évaluation des intrants et des extrants³ et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie »^[12].

Elle constitue de ce fait une des nombreuses techniques de management environnemental existantes, étant capables de refléter la complexité des systèmes étudiés. Par contre, une ACV ne traite pas des aspects économiques et sociétaux d'un produit, et peut difficilement proposer une hiérarchisation absolue en termes de qualité écologique.

L'objectif de l'ACV est alors de présenter une vision globale des impacts générés par les produits (biens, services ou procédés), déclinée selon différentes comparaisons de scénarios. Elle peut donc être utilisée à des fins de communication ou comme outil d'aide à la décision

³ **Intrants** et **extrants**, de l'anglais « input » et « output », il s'agit du traitement de l'information dans un système d'où un flux intrant est saisi à l'entrée pour obtenir à la sortie les résultats traités comme flux extrant.

pour conduire des politiques publiques ou industrielles, notamment l'écoconception de produits.

2.1.2. Normes ISO

L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) est la fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisations (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Dans le cas de l'Analyse du Cycle de Vie, il existe un ensemble de normes qui vont standardiser cette démarche, voici les plus importants:

- **Norme ISO 14040** – sur les principes et cadrage : elle sert de cadre général à la méthode et à la déontologie. Fournit des prescriptions pour l'ACV en termes de transparence des méthodes et des données utilisées. Rend obligatoire la déclaration de la procédure utilisée et de la mise à disposition du public d'un rapport complet sur les résultats de l'étude ; couvre aussi les phases à suivre pour la réalisation d'une ACV.
- **Norme ISO 14044** – sur les exigences et lignes directrices : spécifie les exigences, les démarches et les recommandations en vue de l'analyse des résultats de l'inventaire et de l'évaluation d'impact du cycle de vie ;

Lors de la mise en place d'une ACV basée aux Normes ISO, il est possible de compiler et évaluer les consommations d'énergie, les utilisations de matières premières et les rejets dans l'environnement, ainsi que d'évaluer l'impact potentiel sur les environnements associés à un produit/procédé/service sur la totalité de son cycle de vie.

2.1.3. Concepts Fondamentaux

L'ACV est une approche relative, structurée autour d'un nombre de concepts uniques qui vont permettre son cadrage. L'un des concepts le plus important qui démarre une analyse est la définition de son unité fonctionnelle, qui d'après l'ISO 14040 est la « performance quantifiée d'un système de produits destiné à être utilisé comme unité de référence dans une analyse de cycle de vie ». L'unité fonctionnelle est donc un objectif chiffré, qui oriente l'ACV pour définir la fonction et l'intérêt de l'utilisation d'un tel produit.

Dans une modélisation de cycle de vie cadré aux normes ISO, il est aussi nécessaire de définir les flux de produit et celui de référence. Un flux de produit est une quantité définie de matière ou d'énergie qui rentre – appelé flux intrant ou flux entrant – ou sort – appelé flux extrant ou flux sortant – d'un processus élémentaire. Le flux de référence d'un cycle de vie, autrement, est la mesure des extrants des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle.

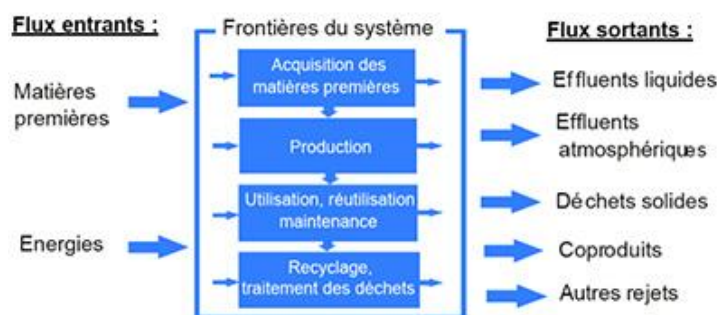


Figure 3: Les flux entrants et sortants d'un système – ADEME 2019

Finalement, on définit l'Analyse de Sensibilité, ayant un rôle essentiel à l'élaboration des pistes et des nouvelles idées pour l'écoconception des produits : une analyse de sensibilité consiste en une « procédure systématique pour estimer les effets sur les résultats d'une étude des choix concernant les méthodes et les données » ^[13]; c'est-à-dire une analyse comparative des impacts associés au cycle de vie quand on fait varier les conditions du scénario évalué. Il est important de signaler que ce type de comparaison est uniquement valable pour des produits qui possèdent la même unité fonctionnelle.

2.1.4. Méthodologie ACV

D'après les références normatives de l'ISO 14040, une méthodologie ACV selon l'ISO 14040 doit suivre la méthodologie présente dans l'Annexe 3, qui se divise en 4 parties principales:

- 1. Définition des objectifs et du périmètre d'étude:** cette étape permet de définir le domaine d'application de l'ACV, l'amplitude qui sera donnée aux résultats obtenus et sa finalité – qui sont les parties intéressées, à quoi serviront les résultats, quels sont les frontières du système étudié, quels sont les règles que l'étude devra respecter. On définit ici l'unité fonctionnelle du projet et son flux de référence.
- 2. Inventaire des flux :** elle consiste à dresser l'inventaire des flux de matières et d'énergies entrants et sortants associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue ^[1]. C'est la partie de recueil des données d'un produit, classifiées dans 2 catégories – les facteurs d'activité (consommation de carburants, matériaux, etc.) et les facteurs d'émission (gaz à effet de serre, phosphate et nitrate jetés sur l'eau, etc.). Ces données spécifiques (ou primaires) peuvent être complétées par des données génériques (ou secondaires), issues de la bibliographie ou de calculs, lorsque les premières ne suffisent pas ou lorsqu'elles ne sont pas accessibles.
- 3. Évaluation des impacts environnementaux :** il s'agit de mesurer les flux récoltés à l'étape précédente en fonction d'une méthode de caractérisation, qui va donc mesurer les impacts potentiels associés au produit. Il existe différentes façons pour caractériser ces flux sous la forme des indicateurs d'impact, qui seront mieux préciser sur la section suivante.
- 4. Analyse des résultats et interprétation :** dans cette étape, les résultats de l'ACV obtenus sont mis en regard des objectifs initiaux de l'étude. C'est également ici qu'on évaluera la robustesse des résultats et possiblement déboucher sur une liste argumentée de recommandations, tant dans la perspective d'une révision de la conception du produit que pour l'optimisation de son utilisation en termes d'impacts environnementaux.

Cette démarche participe à l'intérêt de l'entreprise à écoconcevoir leurs produits, étant donné que les deux dernières étapes qui concernent l'évaluation environnementale, la recherche de pistes et l'aide à la décision font aussi parties d'une démarche d'écoconception.

Vu la complexité d'inventorier les flux sur un cycle de vie, les ACVs constituent une longue démarche qui restera souvent incomplète, de telle sorte que faire des suppositions autour des composants est nécessaire. Les hypothèses sont ainsi une partie intégrante et essentielle au déploiement d'une ACV et vont aussi influencer les résultats finaux.

2.1.5. Logiciels de Calcul

Comme on l'a vu précédemment, la composition d'un inventaire des flux est une procédure extrêmement complexe et peut également conduire à des résultats incomplets vu la difficulté de collecter et de quantifier des données spécifiques, par exemple le niveau d'émission de phosphore dans l'eau consommée, facteur d'influence sur l'eutrophisation. Dans ce contexte, les plateformes et les logiciels de chiffrage environnemental sont utilisés, qui facilitent la composition d'un inventaire autant qu'ils complètent les données manquantes à partir d'une base extensive de données.

Les logiciels de calculs permettent la modélisation de tout un cycle de vie à partir des informations récoltées sur un produit couplé aux données déjà mesurées sur ces plateformes numériques. Ils suivent généralement la méthodologie ISO et l'évaluation des impacts est quantifiée sur des différents indicateurs environnementaux.

2.1.5.1. Base de Données

Parmi les bases de données disponibles pour modéliser le cycle de vie d'un produit, « EcolInvent Database » est le leader mondial. Fondée en Suisse, EcolInvent contient des informations sur le cycle de vie des plusieurs secteurs d'activités, dont l'énergétique, chimique, usinier, mineur, agricole et de transport ^[4].

La base de données EcolInvent offre aujourd'hui plus de quatorze mille jeux de données liés entre eux, dont chacun décrit un inventaire de cycle de vie au niveau de procédés qui sont mis à jour régulièrement. La base EcolInvent permet ainsi d'intégrer aux modélisations un niveau fiable des flux entrants et sortants, qui ne sont pas souvent faciles à récolter. À l'exemple d'un flux qu'indique la quantité de phosphate sortant dans un processus, les bases de données sur EcolInvent contiennent ce type d'information, qui servira pour après mesurer le niveau d'eutrophisation de l'eau associée à ce processus.

Parmi les bibliothèques disponibles sur EcolInvent, il existe trois systèmes d'enjeux possibles de s'utiliser : « Allocation at Point of Substitution (APOS) », « Cut-Off by Classification » et « Consequential ». Le modèle de système conséquent, qui sera retenue pour la modélisation des inventaires de cycle de vie dans ce projet, gère ses deux choix méthodologiques de manière différente:

1. Il utilise un approvisionnement non limité de produits, basé sur des jeux de données d'activité du marché ainsi que les informations incluses sur le niveau technologique et ;
2. Il utilise la substitution (expansion du système) pour convertir des produits multiples ensembles de données à des ensembles de données mono-produit.

Le modèle qui en découle est un modèle système destiné à refléter les conséquences de décisions à petite échelle et à long terme en tenant compte des contraintes applicables à cette échelle et à cet horizon temporel. Le modèle prend en compte les changements à long terme et la règle du niveau technologique des fournisseurs non soumis à des contraintes dépend de la tendance du marché ^[16].

2.1.5.2. Bilan Produit

L'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), possède une plateforme d'analyse de cycle de vie facile d'utilisation et gratuit – Bilan Produit. Il contient une petite base de données, qui permet la modélisation des composants si simples et une quantification selon les ISO 14040-44, illustré par l'*Annexe 4*.

Néanmoins, Bilan Produit est un outil de sensibilisation à l'écoconception et à l'approche cycle de vie, donc ses fonctionnalités sont très limitées et il n'est pas aux normes ISO 14040 et 14044.

2.1.5.3. SimaPro

Au contraire de Bilan Produit, SimaPro est un logiciel payant qui contient les bases de données EcolInvent complètes, parmi une large bibliothèque. Vu la fiabilité et l'approche de la configuration du logiciel aux normes ISO, SimaPro est l'un de logiciels les plus recommandés aux entreprises qui souhaitent poursuivre une certification d'écoconception ou même d'économie circulaire.

SimaPro est destiné à la collecte, à l'analyse et à la surveillance de la performance environnementale des produits et des services, permettant une polyvalence d'évaluations et la transparence des rapports. Parmi les facilités du logiciel, on peut souligner la confection des bilans d'impacts chiffrés et classés sur différentes catégories, la comparaison de produits/scénarios – outil de valeur pour les analyses de sensibilité – et les affichages sous forme de « réseau » et d'« arborescence », qui illustrent tous les flux entrants et sortants compris dans une chaîne d'approvisionnement et les quantifient selon un choix d'affichage, par exemple le poids des sous-parties y comprises, un type d'émission de polluant d'intérêt, un type de déchets géré parmi le cycle de vie ou un indicateur d'impact environnemental. Ils nous permettent d'évaluer ainsi la contribution des processus dans un produit, fondamental à l'identification des parties à se repenser lors de l'écoconception.

2.1.6. Les Indicateurs d'Impact

Pour débiter une discussion autour des indicateurs d'impact environnemental, il faut d'abord définir son concept. D'après l'ISO14001, qui règle les procédures du management environnemental, un impact environnemental est « tout type de changement à l'environnement, soit-il adverse, bénéfique, entier ou partiel, produit par une organisation humaine ».

Les méthodologies d'analyse de l'impact correspondent à l'ensemble des calculs systématiques utilisés pour obtenir, à partir d'un flux d'Inventaire de Cycle de Vie (ICV), l'impact environnemental qu'il entraîne. Il existe plusieurs méthodes de caractérisation des dommages dont la plus utilisée est celle développée par *Eco Indicator 99*. Ce projet s'est donc focalisé sur les deux moyens de caractérisation d'impacts de cette méthode : « midpoint » et « endpoint ».

La « midpoint » – impact au milieu de la chaîne de causalité – quantifie les effets globaux des substances émises ou consommées et la méthode « endpoint » – à la fin de la chaîne de causalité – propose de quantifier les dommages potentiels qui pourraient en résulter sur trois zones de protection : santé humaine, qualité de l'écosystème et épuisement de ressources.

Les deux approches sont complémentaires, la « midpoint » a une relation plus étroite avec les impacts environnementaux et s'accompagne généralement d'une incertitude relative des paramètres, tandis que la caractérisation « endpoint » est plus facile à interpréter en termes de pertinence de dommages causés^[6].

En ce qui concerne la « midpoint », les masses émises ou extraites sont multipliées par des facteurs de conversion et sommées pour chaque catégorie d'impact afin de fournir un résultat d'impact intermédiaire, souvent exprimé en kilogramme d'une substance de référence. À titre d'exemple, toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, HFC, CFC, ...) peuvent être ramenées à une émission équivalente de CO₂^[9].

La méthode d'évaluation d'impact environnemental ReCiPe, reconnue mondialement, utilise des critères de sélection afin de donner une consistance entre la modélisation sur les catégories d'impacts différents et ses niveaux de toxicité, en gardant toujours une échelle globale et actuelle. Créée par l'Institute National Hollandais de Santé Publique et Environnement (RIVM), l'Université Radboud, l'Université Norvégienne de Sciences et Technologie et la PRé Consultants, elle catégorise le niveau « midpoint » dans 17 indicateurs environnementaux :

- 1. Formation de matières particulaires fines :** L'ingestion respiratoire des MP est liée à plusieurs dommages cardiorespiratoires dont le cancer pulmonaire. La PMFP – ou formation potentielle de matière particulaire – est donc exprimée en kg de PM 2,5 équivalent, dont 2,5 représente le diamètre d'une particule fine en micromètres (µm).

2. **Formation de l'ozone troposphérique (impact humain) :** La formation de l'ozone dans la basse atmosphère est exprimée en kg de NO_x équivalent pour le potentiel d'impact sur la santé humaine.
3. **Formation de l'ozone troposphérique (impact sur l'écosystème) :** La formation de l'ozone dans la basse atmosphère lié aux impacts sur l'environnement est exprimée aussi en kgNO_x éq et apporte la somme des différences entre la concentration horaire moyenne d'ozone et une concentration standard de 40ppb pendant une journée.
4. **Radiation ionisante :** cette catégorie concerne l'émission à l'air de radionucléides, exprimée en Cobalte-60 éq.
5. **Appauvrissement de l'ozone stratosphérique :** exprimée en kg de CFC-11 éq, elle indique les émissions dans l'air participant à la destruction de la couche d'ozone.
6. **Toxicité humaine (carcinogène) et ;**
7. **Toxicité humaine (non-carcinogène) :** Ces catégories d'impact (6 et 7) couvrent les effets des substances toxiques sur la santé humaine. Ces substances peuvent être présentes aussi bien dans l'environnement que sur le lieu de travail. L'éventail des molécules, de leurs voies d'action, des dommages causés, qui dépendent de l'exposition et des effets des expositions, offrent une telle complexité qui les rend difficiles à modéliser. Ainsi, de manière générale, les résultats fournis sont à considérer plutôt comme des ordres de grandeur, des différences devant être observées sur plusieurs facteurs pour pouvoir conclure à une réelle différence en termes d'impacts. L'unité est le kg de 1,4-dichlorobenzène éq.
8. **Réchauffement globale :** Le bilan des émissions de gaz à effet de serre intègre les principaux gaz contributeurs. Un indicateur correspondant à l'impact de ces émissions en termes de potentiel d'effet de serre à 100 ans est calculé. En effet, l'accentuation du phénomène « effet de serre » peut avoir de graves conséquences notamment sur la qualité des écosystèmes. L'évaluation de cet impact s'effectue en calculant le kg de CO₂ équivalent rejeté dans l'atmosphère par un processus.
9. **Modification et utilisation de l'eau :** Comptabilisée en mètre cube (m³), la consommation de l'eau est cruciale sur un bilan d'impact puisqu'elle est une ressource fondamentale.
10. **Eutrophisation aquatique :** Cette catégorie d'impact couvre les effets dus aux hauts niveaux de nutriments dans les écosystèmes. La première conséquence de l'eutrophisation, dans son sens premier, c'est-à-dire affectant un milieu aquatique, est le développement conséquent d'algues, généralement au détriment de certaines variétés de biomasse moins résistantes. Ce développement de matière organique peut limiter fortement la quantité d'oxygène dissoute dans l'eau ou bloquer l'accès à la lumière pour les espèces vivantes en profondeur. Les conséquences exactes de l'eutrophisation pour les milieux terrestres sont moins connues. Néanmoins, de manière globale une élévation de la quantité de nutriments perturbe les équilibres biologiques du milieu récepteur. L'évaluation de cet impact se fait en calculant le nombre de kg de PO₄ équivalent rejeté.
11. **Toxicité aquatique et ;**
12. **Toxicité terrestre :** Les déchets générés par l'activité humaine sont directement en cause dans la pollution aquatique et terrestre. Ces molécules et métaux lourds sont toxiques pour les organismes vivants dans les sols et les milieux aquatiques non marins, entraînant des effets parfois irréversibles, de la disparition des espèces et de la

dégradation de l'écosystème. L'évaluation de ces impacts s'obtient en calculant les kg de 1,4-di-chlorobenzène (1,4-DCB) équivalents rejetés dans l'eau et dans le sol.

- 13. Acidification terrestre :** Elle couvre les effets dus à une importante mobilité et assimilation des polluants comme les métaux lourds et des radionucléides, présents naturellement ou artificiellement dans les sols. En effet, l'acidification des sols est une notion importante car c'est un processus qui influence la fertilité des sols cultivables et leurs pollutions, l'assimilation des nutriments, et l'infiltration des contaminants aux nappes phréatiques, Tous ces impacts accentuent la toxicité terrestre. L'évaluation de ce phénomène se fait en calculant le nombre d'unités de kg de SO₂ équivalent rejeté.
- 14. Modification et utilisation du sol :** cette catégorie concerne la perte d'espèces causée par une modification de l'utilisation du sol – urbanisme, culture permanente, pâturage, reforestation, etc.
- 15. Ecotoxicité marine :** cette catégorie concerne les déchets de potentiel toxique à l'écosystème marin, aussi mesurée en 1,4-DCBeq jetées à l'océan.
- 16. Épuisement de ressources minérales :** exprimée en kg de Cuivre équivalent, cette catégorie consiste à de retraiter déplétion des ressources minérales, non renouvelables, liées à la naissance des produits.
- 17. Épuisement des ressources fossiles :** on entend par ressources fossiles les matières premières telles que le pétrole, charbon, gaz naturel, les minerais mais aussi les énergies non renouvelables, sources d'énergie ne se renouvelant pas assez vite pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'humanité, ou même ne se renouvelant pas du tout. L'évaluation de leurs épuisements s'obtient en comptant le nombre d'unité en kg de pétrole équivalent consommé (kg oil-eq.).

Vu l'ampleur des indicateurs, ces catégories sont généralement rassemblés sur trois domaines principaux de la méthodologie « *endpoint* », utilisés pour faciliter la compréhension des résultats et ainsi simplifier sa diffusion. Les domaines sont :

- **Santé humaine :** exprimée en « *DALY* » (disability adjusted life years), cette donnée comptabilise les années perdues d'une personne, initialement en bonne santé, qui fut endommagé en raison d'invalidé ou accident/mort. C'est l'unité utilisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).
- **Qualité de l'écosystème :** exprimée en « *species.yr* », elle représente la perte potentielle d'espèces terrestres, aquatiques et marines par temps et espace (an.m²) relatives aux impacts associés sur les territoires endommagés.
- **Épuisement de ressources :** exprimée en « *USD2013* » – ou dollar américain –, elle représente les coûts extra liés aux futures extractions de ressources non renouvelables, minérales et fossiles.

La caractérisation des dommages permet d'évaluer la contribution des impacts midpoint à une ou plusieurs de ces catégories vers une mise au point des dommages engendrés, mesurés sur des unités de référence différentes, revenus sur des facteurs de caractérisation. Ces facteurs de caractérisation sont multipliés par les résultats d'impacts intermédiaires, ce qui donne par somme le score de caractérisation des dommages pour chaque catégorie ^[9]. L'assemblage des catégories est décrit dans l'*Annexe 5*.

2.2. La Traction Électrique

Les Installations Fixes de Traction Electrique (IFTE) étant au cœur du métier du département, leur compréhension a été un prérequis à la réalisation des Analyses de Cycle

de Vie. Afin de bien saisir par la suite les enjeux et la construction d'une démarche ACV au sein de SNCF Réseau et de la Traction Electrique, il est nécessaire de développer brièvement ce que sont les IFTE.

2.2.1. La Réseau Électrifié en France

Les Installations Fixes de Traction Electrique comprennent :

- Les sous-stations et postes de traction, de pré-conditionnement et d'essais (multi tensions) ;
- Les centrales sous-stations (CSS) ;
- Les caténaires, feeders et leurs supports ;
- Les appareils d'interruption et leurs organes de commande et ;
- Le raccordement des installations au circuit de retour du courant de traction.

SNCF Réseau est responsable de plus de quinze mille kilomètres de lignes électrifiées en France, soit en courant continu 1500 V soit en courant alternatif 25 000 V, et possède un total de 557 sous-stations. L'EPIC Réseau est aussi responsable de plus de 90% de la consommation électrique annuelle de l'entreprise, qui dépasse les 7TWh/an. L'affichage du réseau électrifié française est disponible dans l'Annexe 6.

2.2.2. Équipements d'Alimentation des Lignes Électrifiées

Les Installations Fixes de Traction Électrique (IFTE) alimentées par le Réseau de Transport d'Électricité (RTE), regroupent les Équipements d'Alimentation des Lignes Électriques (EALE) et les Installations de Traction Électriques (ITE). Sous ces différentes appellations, nous retrouvons le transport de l'énergie avec les lignes haute tension, les sous-stations qui alimentent en courant continu ou alternatif les installations de traction électrique de pleine voie, appelées caténaires.

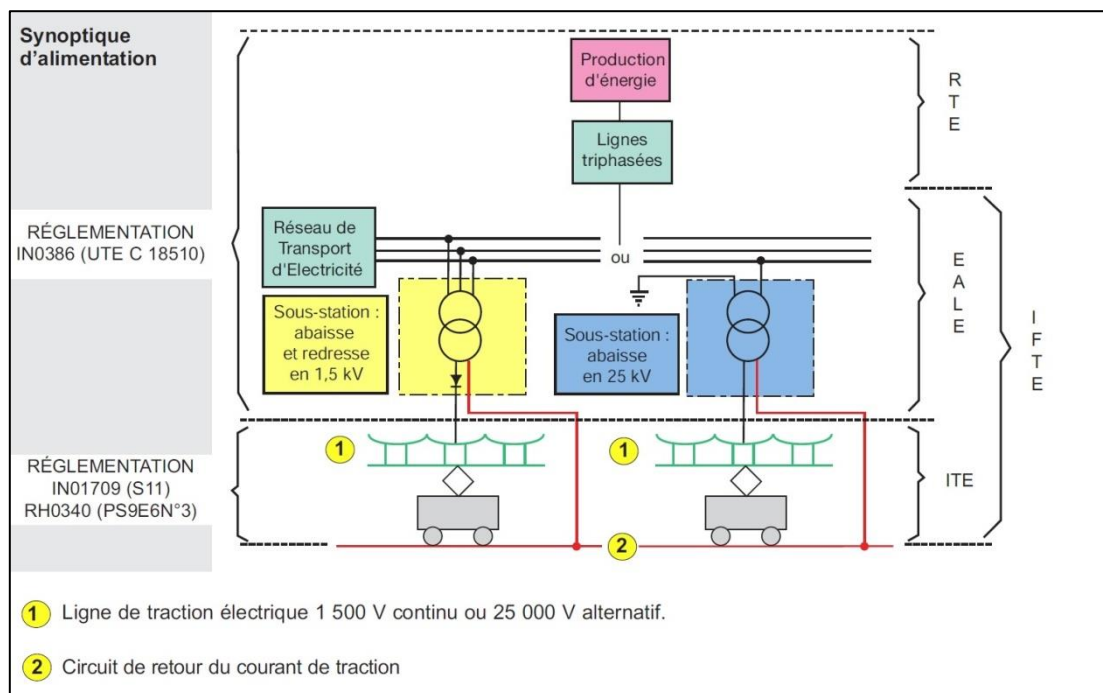


Figure 4: Le Synoptique d'alimentation électrique - SNCF Réseau 2007

Les sous-stations ou les postes de traction constituent des postes de coupure qui sont ordinairement télécommandés depuis une centrale sous-station (CSS) pour assurer l'alimentation normale d'un secteur ou permettre son fractionnement en cas de travaux ou d'incident ^[18].

Les engins de traction sur la locomotive – dénotés de pantographes – captent à travers des fils de contact sur la caténaire le courant nécessaire pour alimenter les moteurs de traction. Puis, par l'intermédiaire des essieux et des rails de roulement, le courant retourne vers une sous-station en empruntant le circuit de retour du courant de traction ^[18].

Le réseau de traction électrique est constitué d'un circuit dans lequel la sous-station constitue le générateur et la locomotive le récepteur. L'énergie électrique est distribuée aux locomotives par ces lignes aériennes de contact communément appelées caténaires sur lesquelles frotte le pantographe. La création de ce réseau exige une importante infrastructure de lignes électriques et de sous-stations, qui seront de ce fait mises en discussion sur cette section.

2.2.2.1. Les Caténaires

La ligne aérienne de traction est appelée caténaire. Élément essentiel du paysage ferroviaire, elle est constituée d'un ou de deux fils de contact suspendus par des pendules à un porteur. Une ligne aérienne de traction électrique comprend :

- des armements assurant la suspension des conducteurs et permettant de fixer leur position par rapport à la voie,
- des poteaux ou des portiques, rigides ou souples, supportant l'armement,
- des conducteurs assurant le transport de l'énergie électrique entre les sous-stations et les engins moteurs

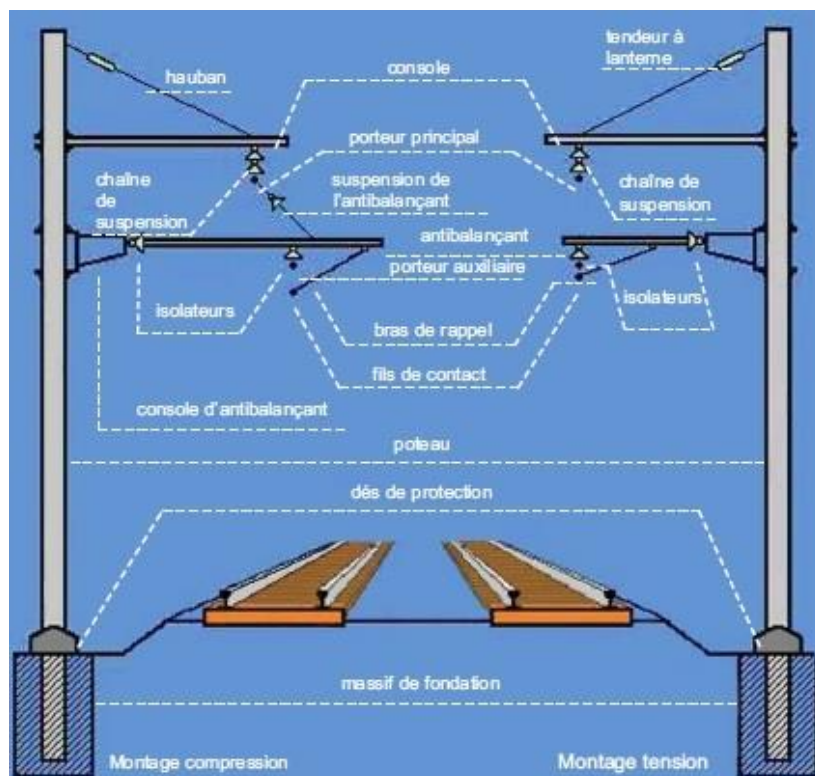


Figure 5: Décomposition d'une caténaire 1500 V - SNCF Réseau, 2007

L'électrification du réseau de traction électrique est réalisée en courant continu 1500 V, à partir de 1920, ou en courant alternatif 25 kV, à partir de 1950. Chacun de ces types d'électrification présente des avantages et des inconvénients qui sont présentés dans l'Annexe 8. Les modèles caténaires sont ainsi disponibles dans l'Annexe 7, cependant chaque modèle possède des pièces et des sous-ensembles distincts avec des matériaux et des tailles variables qui peuvent influencer les impacts sur un cycle de vie.

2.2.2.2. Les Sous-Stations

Le Réseau de Transport d'Électricité (RTE) alimente les Installations de Traction Électrique (ITE) à partir d'un ensemble de lignes triphasées à haute tension. Ces lignes transportent l'énergie depuis les usines de production jusqu'aux secteurs d'utilisation constitués de Sous-Stations^[18].

Les exigences des moteurs de traction équipant les locomotives électriques ne permettent pas d'utiliser directement l'énergie reçue en haute tension. Suivant ce besoin, l'énergie haute tension, en fonction du mode de traction, est transformée par les sous-stations en 1500 V continu ou en 25 kV alternatif.

Une sous-station comporte un poste Haute Tension, un poste de traction électrique composé d'un (ou des) groupe(s) transformateur dit « groupe traction », des départs tractions – qui comprennent les disjoncteurs, interrupteurs, etc – et d'un portique de distribution de courant qui vont ainsi transformer l'électricité en courant circulaire vers les Installations de Traction Électrique de pleine voie – les caténaires. L'adaptation finale de la tension sera réalisée sur la locomotive pour alimenter les moteurs de traction.

Les sous-stations sont télécommandées depuis un CSS. Certaines sous-stations peuvent assurer également la fourniture d'énergie sous 10 kV ou d'autres tensions permettant d'alimenter les installations de signalisation et d'autres installations ferroviaires, comme des gares, ateliers, etc.^[18].

2.3. Méthodologie

2.3.1. Le développement du projet

Dès l'arrivée au stage, nous nous lançons sur une recherche bibliographique parmi les archives de l'entreprise sur les IFTE et les démarches pour l'élaboration des analyses de cycle de vie, suivi d'une réunion d'ouverture et de cadrage de stage qui permet ainsi d'organiser le travail à mener et d'établir les premières étapes au développement de ce projet.

Suite au cadrage, nous définissons l'objectif principal de cette offre : coupler les résultats d'une évaluation environnementale aux données économiques sur le logiciel d'estimation et assemblage (LEA). L'étape suivante est donc la définition des équipements de la TE à inventorier, nommé en tant que choix des composants pour les ACVs.

Les Installations Fixes de Traction Électrique gérées par SNCF Réseau sont variables et se décomposent sur plusieurs modèles de caténaires, pour la partie ITE, et sur une ample possibilité d'assemblages pour la confection d'une Sous Station pour la partie EALE, disponibles sous différents courants. Une priorisation des modèles à répertorier est donc inévitable, et les préférences pour des composants se fixent auprès de plusieurs sections dans le DTE. Pour le système caténaire, deux modèles sur le catalogue sont conseillés par le pôle Développement et Renouvellement des Réseaux (D2R), dont un en 1500 V courant continu et l'autre en 25 kV courant alternatif. Pour la Sous-Station, le pôle Conseil

Energétique et Développement Durable (CEDD) confie un projet déjà fait de transformation de l'énergie haute tension reçue en 225kV sous 2 voies en 25 kV, dont les schémas de traction sont catalogués. Suite à cette planification et délimitation du champ d'étude, il est possible d'avancer sur la collecte de données.

L'acquisition des schémas qui composent une Sous-Station et des plans d'encombrement des caténaires sont ainsi fait à partir des archives internes au Département Traction Électrique, qui permet de repérer tous les composants et ses quantités en tableaux Excel. Les tableaux catalogués couvrent les informations essentielles pour établir les flux entrants et sortants de chaque composant, dont les matières primaires, les procédés de fabrication associés, la distribution vers chaque étape du cycle de vie, les fournisseurs, la durée de vie et les taux de recyclage, d'incinération et d'enfouissement pour la fin de vie. Cette récolte se réalise à travers des logiciels et des plateformes internes utilisés dans le Département, qui composent ainsi la base de données pour la modélisation sur logiciel de calcul. Malgré les nombreuses sources de données internes, les informations souhaitées ne sont pas intégralement disponibles ou connues. Sur ce fait, plusieurs données se soutiennent sur des hypothèses faites tout au long de la recherche, qui sont vérifiées et validées auprès du superviseur de stage.

Dès que les inventaires sont prêts, il est possible de les modéliser sur un logiciel de calcul. Comme une première approche, quelques modélisations se font sur Bilan Produit, plateforme d'analyse de cycle de vie qui appartient à l'ADEME. Vu sa limitation auprès des premiers résultats, il est alors préférable de lancer tous les calculs sur SimaPro, qui offre des résultats plus réalistes. Les analyses de sensibilités sont ensuite réalisées, qui à leur tour constituent un outil important pour donner quelques pistes à l'écoconception. Après une vérification des données auprès des sections intéressées au sein de TE, les résultats des impacts obtenus se font exportés vers l'Excel individuellement sous les catégories « midpoint » et « endpoint ».

Nous rencontrons enfin l'objectif de ce projet dans l'étape d'intégration des résultats obtenus sur LEA, la plateforme d'assemblage des coûts aux projets réalisés au sein du Département TE. Pour ce fait, une entrevue avec les développeurs du logiciel est menée afin de voir les démarches à suivre pour le couplage des « coûts environnementaux » aux « coûts économiques ».

Pour le projet caténaire, il est donc possible de faire l'association de pièces répertoriées de l'inventaire aux pièces répertoriées sur LEA parmi l'utilisation de l'immatriculation spécifique de chaque article, nommé « symbole ». Les résultats exportés sont donc remis sur un tableau commun qui associe le matériau symbolisé avec les catégories « endpoint » – Santé Humaine, Qualité de l'Écosystème et Épuisement de Ressources – et la catégorie « midpoint » dite « Réchauffement Climatique » puis envoyé aux responsables pour le logiciel d'estimation et assemblage. La disponibilité des données sur LEA sera toutefois à l'entreprise de décider et de se lancer aux démarches d'intégration.

Les matériaux utilisés pour le projet Sous-station ne sont pas symbolisés et son intégration ne peut pas être réalisée aux composants du système caténaire. Les analyses de cycle de vie sont réalisées par assemblage des composants découpés en schémas haute tension (225kV) et basse tension (25kV). Les résultats exportés représentent alors une série de composants et de sous-ensembles comprises dans les schémas spécifiques qui font partie du projet de la Sous Station de Mitry, présentés sur les mêmes catégories d'impacts utilisés pour le projet caténaire.

Un point d'avancement avec le superviseur de stage se fait tous les deux semaines pour garantir le progrès du projet et à chaque étape il prévoit une vérification des données.

2.3.2. Planning

Le retro-planning Gantt élaboré est disponible en *Annexe 9*. Il est tenu en contrôle selon une mise à jour à la fin de chaque semaine travaillé, et l'avancement du projet se mesure à travers d'une échelle de 1 à 5, qu'indique l'intensité prévu au travail mené.

Pour indiquer le niveau de qualité de cette mission, un indicateur de réussite a été réalisé. Ceci prend en compte le pourcentage de l'avancement des étapes réalisées comme score d'aboutissement. Il sera repris dans la partie Conclusions de ce rapport.

Indicateur de réussite	
0 – 40%	Insuffisant
41 – 60 %	Bas
61 – 85%	Moyen
86 – 95%	Haut
96 – 100%	Très haut

Tableau 1: Indicateur de réussite sur le travail mené

2.4. Composition de l'Inventaire du Cycle de Vie

2.4.1. Caténaires

2.4.1.1. Définition des objectifs et du périmètre d'étude

D'après la section D2R il est recommandé de choisir un type de caténaire et se fixer sur ces composants. On se centre donc sur un premier modèle classique de caténaire en 25kV courant alternatif : la V160 STI – norme IGTE 21417/318290. Pour le modèle en 1500V courant continu, la CSRR STI est retenue - IGTE 21400/ 010010 –, une caténaire simple et générique.

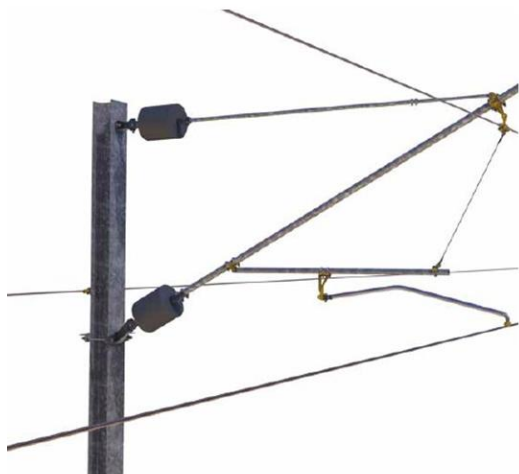


Figure 6: Caténaire V160 STI, 25 kV sur catalogue – SNCF Réseau, 2017 (à gauche)



Figure 7: Caténaire CSRR STI, 1500 V sur catalogue – SNCF Réseau, 2017 (à droite)

L'unité fonctionnelle choisie pour ce projet est : **Intégrer un système caténaire destiné à l'alimentation des lignes de traction électrique pendant 50 ans.**

Les sous-ensembles et les pièces sont récupérés à travers des dessins de montage de la caténaire V160 STI, dont la nomenclature fournit aussi les matériaux symbolisés. Les dessins sont disponibles sur une plateforme interne à l'entreprise désignée BaseCAT. Pour le modèle CSRR STI, les pièces repérées se limitent aux composants principaux qui diffèrent d'un modèle en 25kV, comme le fil de contact, le feeder et le pendule.

2.4.1.2. Inventaire des flux

Une fois les composants définis et validés, nous débutons la composition d'un inventaire de cycle de vie (ICV) avec la récolte des données essentielles sur les composants symbolisés : poids, composition matériel, procédés de fabrication, fournisseur, lieu de stockage etc. Cette récolte est possible à travers du Portail RNAS, plateforme interne de consultation des articles symbolisés de la caténaire. L'autorisation d'accès au Portail se fait auprès du pôle Conception et Expertise du Système TE (CES), section intégrante du Département de Traction Électrique.

Le fil de contact est la partie de la caténaire responsable du transfert de courant électrique aux trains. Au-delà de données récoltées, ces fils ont un surplus de pertes électriques associé à la phase d'utilisation, qui est ici calculé à partir du « Rapport Simplifié ACV Caténaires » réalisé par CEDD en août 2016.

La distance entre les centres de stockage et les fournisseurs est calculé vers deux sites internet, qui comptabilisent la longueur des routes et les trajets en bateau transocéanique.

2.4.1.3. Système d'hypothèses

Les hypothèses retenues sont les suivants :

- La production, la maintenance et le démantèlement des infrastructures et biens d'équipements qui conçoivent les composants des caténaires sont négligés. Cette hypothèse, faite également dans nombreuses Analyses de Cycle de Vie, est basée sur le fait que la part des impacts environnementaux liés à la production des infrastructures et aux biens d'équipements alloués au produit étudié sont négligeables devant les autres impacts associés au produit ;
- Sur une voie courante et à l'ancrage normal et les supports étant indépendants, on considère un massif parallélépipédique applicable à toute terrain sauf instable, type Api et avec la hauteur de 1,40m ;
- Le plan roulement considéré est sous 5,50m de la caténaire ;
- Les pertes énergétiques associées aux systèmes caténaires ont été couplées à la phase d'utilisation des FC ;
- Pour une durée de vie de 50 ans, les composants qui ont un changement associé sont limités aux fils de contact et les pendules ;
- Face aux multiples fournisseurs disponibles pour une pièce, celle qui présente le plus d'informations disponible sur la fabrication/extraction est choisie ;
- Modélisation de la distribution dès l'extraction: en bateau, emplacement du pays d'origine jusqu'au fabricant (données connues ou prises comme hypothèse) ;
- Modélisation pour la distribution dès la fabrication: en camion, emplacement du fournisseur (fabricant connu ou prise comme hypothèse) jusqu'au centre de stockage SNCF (Saint Dizier, Saulon ou Le Mans) ;

La consommation annuelle de la traction électrique est de 7 TWh. Si on considère qu'un tiers des lignes sont en 1500V et un autre tiers est en 25kV, on a une consommation annuelle de 2,33TWh par type d'électrification.

Le pourcentage de pertes d'un réseau 1500 V en voies doubles est de 16,2% soit 0,378 TWh de pertes électriques pour 6000km de lignes. Ce qui correspond à 62,3 MWh par an et

par km. Soit sur 50 ans la durée de vie d'une caténaire, 1600MWh par voie par km, équivalent à 1600 kWh par mètre. Avec un remplacement du FC – symbolisé 0.841.3892 – prévu, la modélisation comprend la moitié de cette consommation, c'est-à-dire 800 kWh/m.an.

Le pourcentage de pertes d'un réseau 25 kV en voies doubles est de 1,7% soit 0,396 TWh de pertes électriques pour 9000km de lignes. Ce qui correspond à 4,41 MWh par an et par km. Soit sur 50 ans la durée de vie d'une caténaire, 110 MWh par voie par km, équivalent à 110 kWh par mètre. Avec un remplacement du FC – symbolisé 0.841.3887 – prévu, la modélisation comprend la moitié de cette consommation, c'est-à-dire 55 kWh/m.an.

2.4.2. Sous-Stations

2.4.2.1. Définition des objectifs et du périmètre d'étude

La Sous-Station de Mitry-Mory est prise comme modèle pour la réalisation de ce projet, conseillé par le pôle Conseil Energétique et Développement Durable (CEDD). Elle est responsable de la transformation du niveau de tension de 225 kV, en basse tension 25 kV vers les installations de traction électrique, ou système caténaire. L'unité fonctionnelle choisie au projet est : **Transformer les tensions des réseaux et alimenter les caténaires pendant 50 ans.**

La Sous-Station de Mitry se décompose en cinq schémas en 225 kV et treize schémas en 25 kV catalogués sur LEA et décrits au *Tableau 2* et dans l'*Annexe 10*. Il est possible de récupérer les sous-parties et la quantité des composants rassemblés dans les schémas de traction vers les documents internes de l'entreprise – séries de prix, dessins de traction et sur LEA. De cette façon, on repère les composants à inventorier à l'étape suivant de l'ACV.

Au-delà des schémas de traction, une sous-station comprend une partie « compléments » qui varie selon le périmètre d'installation et les spécifications de chaque projet, donc les dimensions du bâtiment de contrôle, les entourages du chantier, le système de surveillance et clôture du périmètre ne sont pas fixés. Sur ce fait, nous nous limitons à décrire l'appareillage relatif à Mitry.

Les sous-stations peuvent aussi être classifiées sous les catégories : HT (Haute Tension), BT (Basse Tension), Support (ou charpente), GC (Génie Civil), Bâtiment, Clôture et Accessoires.

Série de Prix – Mitry		
Voltage	Schémas	nb. apparitions
225 kV	4	2
225 kV	5	1
225 kV	7	2
25 kV	1	1
25 kV	2	4
25 kV	3	2
25 kV	4	4
25 kV	5	1
25 kV	6	1
-	compléments	1

Tableau 2: Les schémas de traction électrique de la Sous-Station de Mitry-Mory

2.4.2.2. Inventaire des flux

La composition de l'inventaire se base sur plusieurs sources internes de données, dont l'Analyse de Cycle de Vie de Mitry réalisée par CEDD en 2016. Ce rapport sert de référence:

- à la récupération des poids et des données manquants sur les composants, comme la durée de vie ;
- aux hypothèses pour la distribution massique des matières primaires dans un composant;
- à la vérification de cohérence des calculs réalisés ;
- à l'inventaire qui décrit l'appareillage des bâtiments et des entourages de Mitry et ;
- aux pertes électriques couplées aux composants pertinents;

Composant	Schémas	Total de pertes	Observations
Transfo Puissance	7 225 kV	1,7E+07 kWh	Pertes joules à puissance nominale – circuit fermé
Transfo Puissance	7 225 kV	7930000 kWh	Pertes fer à vide – circuit ouvert
Transformateur SA	5 1x25 kV	2890000 kWh	
Self de condensateur	6 1x25 kV	1,1E+07 kWh	Pertes joules
Disjoncteur	7 225 kV	0,63 kg	SF6
Huile de lubrification	Compléments	10 kg	

Tableau 3: La phase Utilisation liée aux composants de la Sous-Station de Mitry

Les archives relatives au projet de Mitry étant facile d'accès sur le réseau, il est possible de bénéficier de tous les bons de livraison d'articles, les dessins projetés sur AutoCAD, les carnets de génie civil et les documents d'ouvrage pour collecter les données et les distribuer par schémas de traction.

Les calculs relatifs aux poids et aux distributions de matériaux des composants à modéliser sont issus de différentes sources d'informations, rassemblés sur un même fichier Excel nommé « feuille de calcul », référence principale des observations de l'inventaire dans l'Annexe 11.

Les calculs relatifs aux disjoncteurs et aux transformateurs de puissance (TR), de courant (Tc) et de tension (Tt) s'effectuent auprès des informations précises cédées par la section Expertise, Maintenance et Métier (EMM). Responsable pour le contact avec les fournisseurs de pièces, il permet la récupération des données sur la constitution de ces composants et leurs origines.

Pour le calcul du circuit de terre de Mitry, nous mesurons la longueur à travers du dessin sur AutoCAD. La fiche de spécification des câbles acquise pour le projet permet le calcul du poids total, selon le poids linéaire indicatif d'un câble de mise à la terre (MALT), et l'estimation des proportions relatives aux conducteurs (en cuivre) et à l'isolant (en polypropylène).

Les estimations autour des sectionneurs et des commandes électriques et mécaniques de la sous-station sont réalisées à l'aide du bon de livraison de matériel, qui indique les poids et les contenus de chaque colis livré.

Pour la partie support, le carnet de charpentes est utilisé pour faire la distribution des poteaux parmi les schémas. Les flux entrants sont calculés à travers du carnet dont les mesures des structures métalliques, qui sont retenues pour calculer leurs volumes et estimer leurs poids. La même procédure est réalisée pour la partie GC à l'aide du carnet de massifs.

Pour obtenir les données de câblage en BT des schémas, il s'appuie sur les chiffres disponibles dans le logiciel d'estimation et assemblage – LEA – qui fournit les types et les longueurs des câbles.

Enfin, pour le calcul et la distribution des évacuations de terre parmi les schémas de Mitry, le volume total prévu au projet – 170 T de terres évacuées – est partagé sur les schémas de

Mitry proportionnellement aux quantités indiqués sur la série de prix prise de base à l'inventaire.

La distance entre Mitry et ses fournisseurs est calculé vers deux sites internet, qui comptabilisent la longueur des routes et les trajets en bateau transocéanique.

2.4.2.3. Système d'hypothèses

Plusieurs hypothèses qui ont été faites dans l'ACV de 2016 sont retenues suite à l'ajout de nouvelles considérations. En résumé:

- Les composants sans poids significatif comme les pièces de boulonnerie, sont négligés à la composition de l'inventaire d'une Sous-Station ;
- La production, la maintenance et le démantèlement des infrastructures et biens d'équipements qui conçoivent les composants de la sous-station (bâtiments, machines, routes) sont négligés. Cette hypothèse, faite également dans de nombreuses Analyses de Cycle de Vie réalisées par le passé, est basée sur le fait que la part des impacts environnementaux de la production des infrastructures et biens d'équipements allouée au produit étudié est négligeable devant les autres impacts associés au produit ;
- Les opérations de fabrication des composants sont supposées et ne peuvent être considérées comme exactes, faute d'informations plus précises des fabricants ;
- Les opérations de recherche et développement ayant conduit à la mise au point des produits actuels sont négligées faute de données.
- Les inventaires des flux relatifs à la production des intrants mobilisés dans la production des produits chimiques, des consommations d'énergie, des consommations et rejets associés aux procédés, etc. ne sont pas considérées ici, faute d'informations ;
- La modélisation de la distribution dès l'extraction vers les fabricants ne sont pas tous comptabilisés à cause d'un manque d'information ;
- La livraison des composants est faite en camion, de l'emplacement des fournisseurs/fabricants jusqu'à Mitry-Mory;
- Les emballages des composants livrés à Mitry ne sont pas pris en charge ;
- Pour une durée prévue de 50 ans, les composants qui ont une durée de vie plus courte sont comptabilisés concernant leurs changements de pièce.

2.4.3. Ensembles en Commun

Les hypothèses communes à ces deux projets sont :

- Les opérations de recherche et développement ayant conduit à la mise au point des produits actuels sont négligées faute de données ;
- La consommation d'énergie liée au stockage des produits à l'usine de fabrication et/ou au stockage régional avant/après la fabrication des caténaires et après démantèlement de celles-ci, sont négligés. Ces consommations d'énergie étant similaires pour tous les produits, qu'ils soient éco conçus ou non, cette hypothèse n'influe pas sur la comparaison des produits étudiés ;
- En l'absence de données sur le taux de remplissage des camions lors des transports des matières premières, celui-ci a été considéré à 100%. Ce paramètre pouvant avoir une influence sur les bilans environnementaux comparés, il aurait été nécessaire d'avoir un degré de certitude fort sur ces données pour les inclure dans l'étude ;
- Les distances entre usines sont des ordres de grandeur et ne peuvent être considérées comme exactes.

La modélisation de toutes les pièces inventoriées est soumise au même scénario de fin de vie projeté au sein du pôle CEDD qui estime les taux de recyclage, d'incinération et d'enfouissement par type de matériaux. Les flux sortants de chaque composant sont donc calculés à partir de l'ensemble présenté dans le *Tableau 4*.

<i>Matériau</i>	<i>Taux de recyclage (en France)</i>	<i>Taux d'incinération (en France)</i>	<i>Taux d'enfouissement (en France)</i>
Métaux Ferreux / Non-ferreux			
Acier base/inox/ galvanisé	80%	0%	20%
Fonte	80%	0%	20%
Cuivre	70%	0%	30%
Aluminium	60%	0%	40%
Bronze	40%	0%	60%
Laiton	60%	0%	40%
Plastiques / Polymères			
Polyamide	20%	0%	80%
PVC	98%	0%	2%
Résine Epoxy	50%	0%	50%
Silicone	50%	0%	50%
PE/ PU/ PP/ PC	50%	0%	50%
Composés chimiques			
Huile Minéral / Paraffine	0%	64%	36%
Matériaux divers + composants électriques			
Batterie lithium-ion	20%	0%	80%
Fibre de verre	50%	0%	50%
Céramique	0%	0%	100%
Aimant pour moteur	90%	0%	10%
Carte électronique	95%	0%	5%
Matériaux pour Génie Civil			
Béton	80%	0%	20%

Tableau 4: Extrait du tableau d'hypothèses sur la fin de vie d'un ensemble de matériaux

2.5. Modélisation sur Logiciel de Calcul

2.5.1. Démarches pour la modélisation

Au cours du planning, nous entamons l'étape de modélisation sur logiciel de calcul. Les premiers ACVs sont faites sur Bilan Produit, commençant par le schéma 7 en 225kV, suites aux autres schémas et les pièces caténaïres.

La plateforme présente quelques limitations concernant l'entrée des données, comme l'indisponibilité de certains matériaux – béton, céramique, bronze, etc – et de certains processus de fabrication. Outre les données insuffisantes, Bilan Produit pose à ce jour certains problèmes dans la modélisation de la fin de vie, et par conséquent les impacts associés aux recyclages ne sont pas modélisés. D'après les dirigeants de la plateforme, la prévision d'une mise à jour est attendue pendant le deuxième semestre. Étant donnée le délai du planning, toutes les modélisations sont réalisées sur SimaPro.

SimaPro possède deux étapes principales à la modélisation : sur la partie dédiée à l'inventoriât des données la fenêtre « Processus » est retenue à la modélisation individuel de matériau, énergie, transport etc, ce qui permet de créer un composant. Il est possible de

faire l'assemblage d'un processus créé à l'aide de la fenêtre « Étape du Produit » et, pour son évaluation d'impact, la partie dédiée à la « Configuration du Calcul » est utilisée. L'affichage du logiciel se configure dans l'Annexe 12.

La base de données choisie à l'appui des inventaires est celle de l'EcoInvent 3, en mode « consequential, system ». La méthode d'évaluation est la « ReCiPe 2016 v1.1 endpoint method, Hierarchist version ». Les ICV faits au long de la recherche sont donc converties dans un ensemble de données de la base EcoInvent, présentés dans l'Annexe 13.

2.5.2. Modélisation de la Caténaire

Les pièces de la caténaire sont modélisées lors de la création d'un « Processus », puis assemblées individuellement à l'« Étape du produit ».

En phase « Configuration de Calcul », les composants sont évalués en prenant en compte les changements de pièces qui y associés. Les fils de contact par exemple sont susceptibles à un changement sur une durée de 50 ans, donc la configuration du calcul comptabilise deux pièces. La Figure 8 donne le réseau obtenu pour le Fil de Contact de la caténaire en 1500 V – numéro de symbole 0.841.3892.

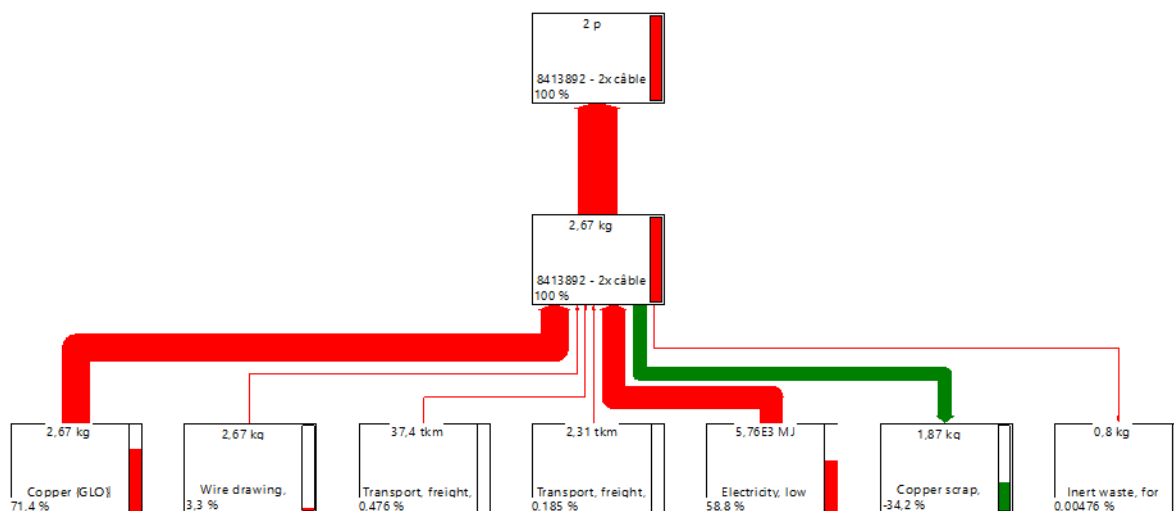


Figure 8: Affichage de l'impact « Santé Humaine » sous la forme de Réseau d'un mètre linéaire de fil de contact de la caténaire en 1500 V, symbole 0.841.3892

En ce qui concerne la comparaison de scénarios possibles, les analyses de sensibilité donnent les pistes à l'écoconception. Nous nous focalisons d'abord sur l'utilisation des trois types différents d'isolateurs qui serviront de base à la variation des hypothèses, dont le changement des taux de recyclage. Le Tableau 5 résume les variations.

nb	Périmètre analysé	Variation
1	Isolateurs	Comparaison type isolateur : Verre x Céramique x Composite
3	Isolateurs verre	Verre : Variation du taux de recyclage
4	Charpente	Poteau en bois x poteau en acier
5	Fils de contact (FC)	FC sur voie 1500V x FC sur voie 25kV
6	FC 1500 V	Provenance cuivre utilisé

Tableau 5: Les Analyses de Sensibilité du projet caténaire

2.5.3. Modélisation de la Sous-Station

Les composants de la Sous-Station sont modélisés lors la création d'un « Processus », puis assemblés individuellement à l'« Étape du produit ». Les pertes électriques sont couplées aux composants qui les entraînent.

En phase « Configuration de Calcul » les pièces sont enfin rassemblées sous la forme des schémas différents et chaque pièce est quantifiée selon son nombre de pièces multiplié par le nombre de changement prévu sur une durée de 50 ans. Pour les composants spécifiques au projet Mitry, comme le bâtiment de commande, les dalles de retournement et les ouvrages de chantier, l'assemblage est fait sous la configuration du calcul dénotée « Compléments ».

Après l'assemblage complet de la Sous-Station modèle, les schémas – et les compléments modélisés – sont rassemblées en une nouvelle configuration du calcul puis multipliées par leurs nombres d'apparitions sur la série de prix de Mitry, démontré en *Annexe 14*.

En ce qui concerne les analyses de sensibilité, le *Tableau 6* résume les variations de chaque scénario. Les premières analyses évaluent d'abord les composants du schéma 7 et le changement des hypothèses autour du transformateur de puissance, partie la plus lourde de la sous-station. Les résultats obtenus sur les ACVs élaborés en 2016 avaient montré une grande influence de la phase d'utilisation sur les impacts environnementaux des EALEs, donc les variations des pertes électriques et de la consommation électrique dans la Sous-Station de Mitry suite aux analyses ont un rôle fondamental au Département TE.

nb	Périmètre analysé	Variation
1	Mitry	Comparaison composants hors Transformateur de Puissance (TR)
2	Transformateur de Puissance	Variation des flux entrants et sortants dans les processus
3	Transformateur de Puissance	Remplacement du cuivre par l'aluminium
4	Mitry	Ajout et diminution des pertes générales au TR
5	Schéma 6 1x25kV	Variation de la consommation électrique de la self de condensateurs
6	Schéma 5 1x25kV	Consommation électrique des services auxiliaires
7	Dalle de Retournement TR	Variation taux de recyclage béton

Tableau 6: Les Analyses de Sensibilité du projet sous-station

Les projets de Sous-Station et de Caténaire réalisés sur SimaPro ont deux unités fonctionnelles différentes, donc ces analyses de cycle de vie ne peuvent pas être comparées. Il est important de noter que l'existence de la sous-station va de pair avec celle des caténaires ainsi que les impacts environnementaux générés par les caténaires peuvent contribuer aux impacts des sous-stations ^[26].

2.6. Résultats Obtenus

Les impacts environnementaux sont calculés à partir de la méthode ReCiPe et groupés selon les catégories et les unités soit en « EndPoint » soit en « MidPoint ». La fonction comparaison sur SimaPro permet la réalisation des analyses de sensibilité.

2.6.1. Le système caténaire

L'étude d'impact de chaque pièce modélisée est exportée individuellement, puis ses chiffres-clés sont couplés sur un même tableau Excel dans quatre catégories principales, dont les trois « endpoints » – Santé Humaine, Qualité de l'Écosystème et Épuisement de

Ressources. La quatrième catégorie retenue s'agit du Réchauffement Climatique de la « midpoint » qui s'exprime en « kg CO₂ eq. », unité familière et de compréhension facile si le département décide de diffuser les résultats sur LEA. L'Annexe 15 donne un extrait du tableau de résultats à intégrer sur LEA et les graphiques de la Figure 9 et la Figure 10 donnent les résultats obtenus pour les fils de contacts utilisés dans les modèle V160 25 kV et CSRR 1500 V, respectivement.

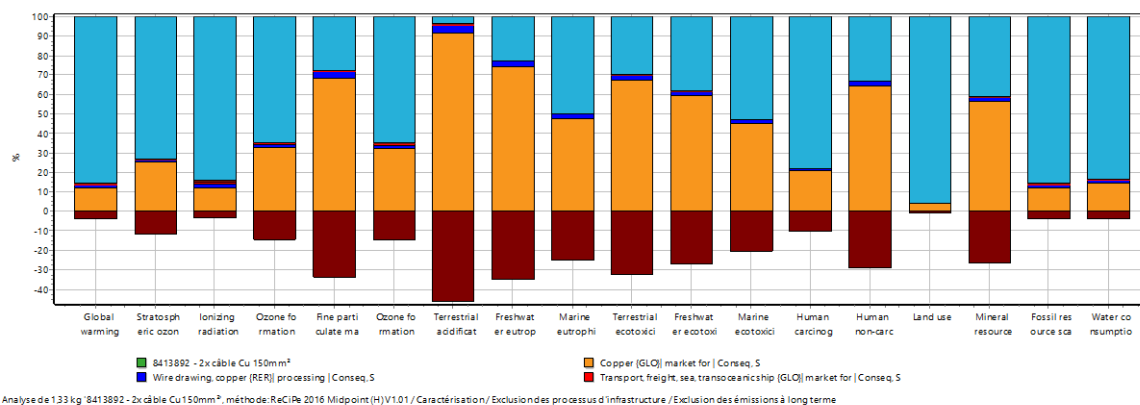


Figure 9: Résultats de la modélisation d'un fil de contact 25 kV, en « midpoint » - en bleu les pertes électriques, en orange l'extraction et production du cuivre et, en rouge, le recyclage lié au cuivre

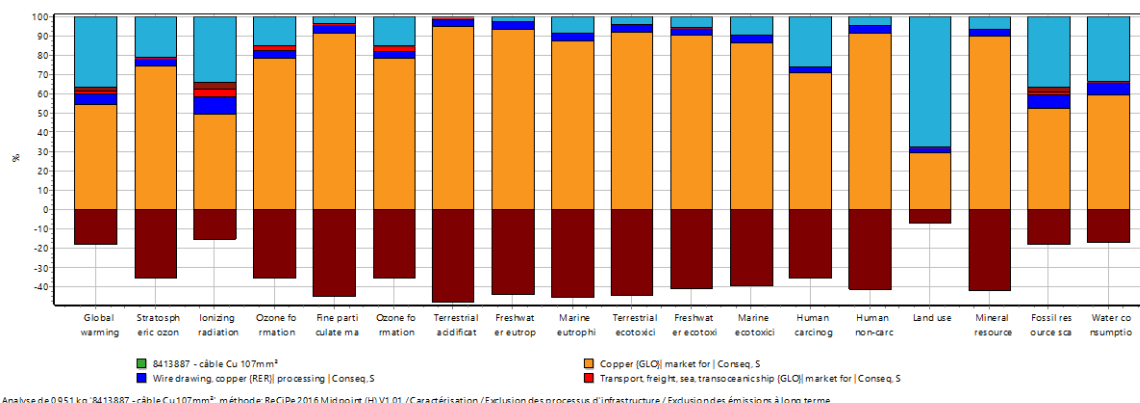


Figure 10: Résultats de la modélisation d'un fil de contact 1500 V, en « midpoint » - en bleu les pertes électriques, en orange l'extraction et production du cuivre et, en rouge, le recyclage lié au cuivre

D'après les résultats affichés, l'influence principale sur le cycle de vie de chaque fil n'est pas la même. Dans le système 1500 V, la phase d'utilisation est responsable de la plus grande partie de l'empreinte environnementale en raison des pertes électriques de 16,2% contre 1,7% en 25 kV.

2.6.1.1. Analyses de Sensibilité

Suite à la reprise du tableau 5, les analyses de sensibilité s'expriment ci-dessous.

1. Comparaison type isolateur : Verre x Céramique x Composite

La configuration du calcul analyse 2 pièces en composite au lieu d'une seule puisqu'il estime un changement de cet isolateur au bout de 50 ans d'utilisation, tandis que les deux autres types ont une durée de vie supposée très grande. La Figure 11 indique que l'impact associé à l'isolateur en céramique est le plus haut sur les trois catégories « endpoint ». Comme son poids est presque le double de celui des autres, l'impact est plutôt associé au modèle d'isolateur utilisé qu'au matériau choisi pour sa conception.

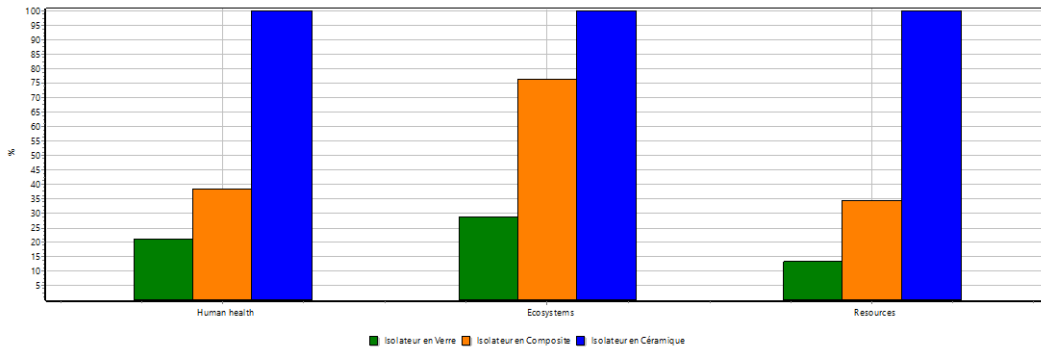


Figure 11: Comparaison « endpoint » entre les trois types d'isolateurs - en vert l'isolateur en verre, en orange l'isolateur en composite et en bleu l'isolateur en céramique

La *Figure 12* analyse les trois types d'isolateurs pour un poids d'un kilogramme chacun, dont les résultats observés divergent de ceux obtenus dans l'analyse précédent. Néanmoins, l'isolateur en verre se maintient comme source d'impact mineur, et on le signale comme favorable à l'écoconception.

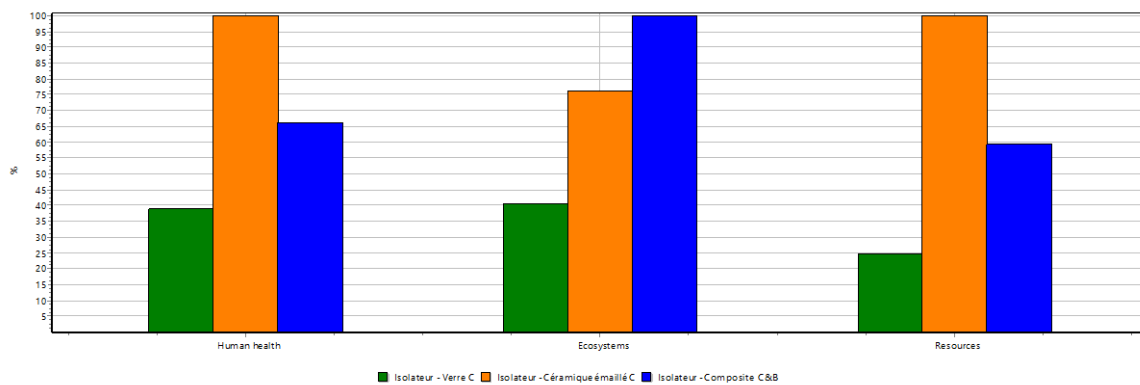


Figure 12: Comparaison « endpoint » d'un kilogramme d'isolateur sous les trois types de matériaux disponibles - en vert l'isolateur en verre, en orange l'isolateur en composite et en bleu l'isolateur en céramique

2. Isolateur en Verre : variation du taux de recyclage

Le graphique de la *Figure 13* affiche les résultats de la catégorie « midpoint » obtenus à l'évaluation de l'influence du taux de recyclage d'un isolateur en verre. Il indique l'importance de la destination en fin de vie du verre à la comparaison des taux de recyclage à 80% en vert, à 40% en orange et sa destination complète à la décharge en bleu. L'importance de la réinsertion d'un matériau est ici visible et ce type d'analyse se montre favorable à l'entreprise soit à la sensibilisation environnementale interne soit comme outil de promotion à l'économie circulaire.

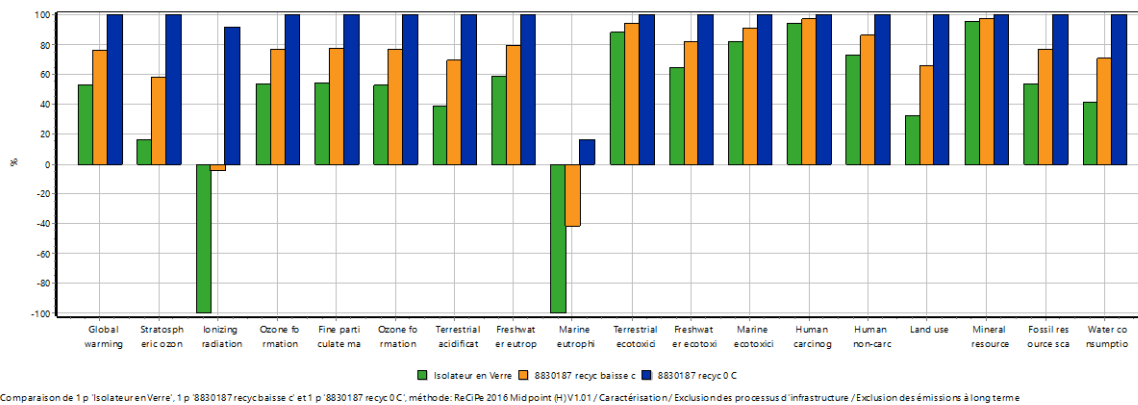


Figure 13: Variation du taux de recyclage de l'isolateur en verre - en vert l'isolateur en verre avec un taux de recyclage de 80%, en orange taux de recyclage de 40% et en bleu sans recyclage

3. Charpente : Poteau en bois x poteau en acier

En recherche des alternatives plus durables au système caténaire, les poteaux sont aussi modélisés en bois dont les données adoptées sont dans l'Annexe 16, conforme les trois différents types de bois disponibles sur le logiciel SimaPro : azobé, meranti et eucalyptus.

Les résultats de l'analyse de sensibilité sont affichés dans le graphique ci-dessous sous les catégories d'impact « midpoint ». L'analyse est très sensible aux hypothèses faites au tour du bois choisit et le taux de recyclage haut attribué au métal favorise visiblement son utilisation. L'analyse nécessite donc un approfondissement des caractéristiques et des procédures d'un possible poteau à adopter, étant donné que l'entretien des poteaux en bois au long de sa durée de vie est aussi important à la description des impacts.

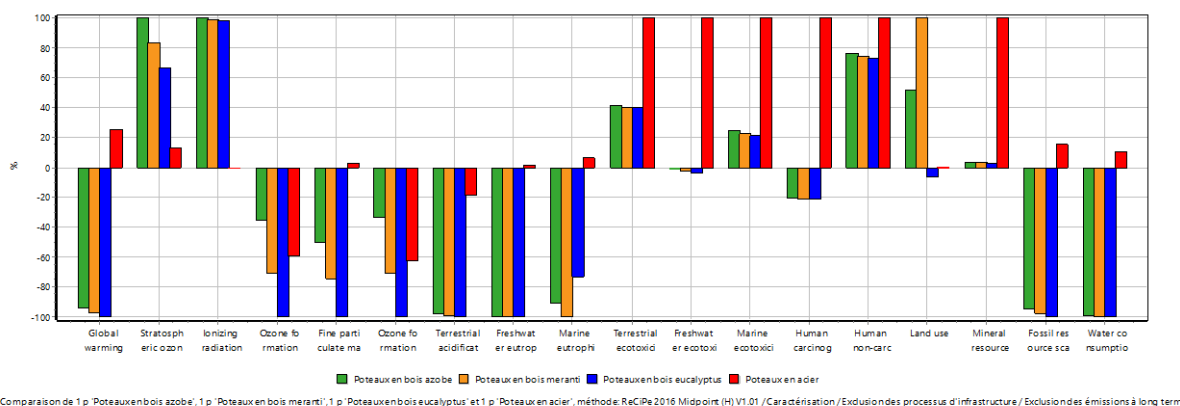


Figure 14: Comparaison « midpoint » entre les poteaux conçus en bois et en acier, midpoint – en vert le poteau en azobé, en orange le poteau en meranti, en bleu le poteau en eucalyptus et en rouge le poteau en acier

4. Fil de Contact : sur voies 1500 V x 25 kV

La Figure 15 compare les fils de contact utilisés en voie courant continu 1500 V et en 25 kV alternatif au cadre des impacts en endpoint. Le câble symbolisé 0.841.3892 référent au fil de contact en 1500 V surpasse les impacts de celui en 25 kV en raison de sa perte électrique élevée.

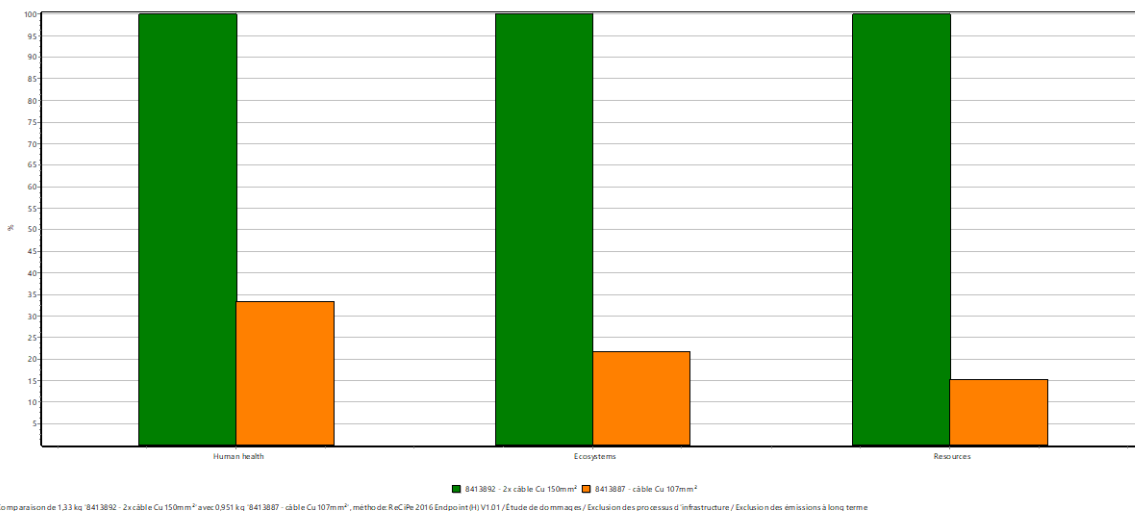


Figure 15: Comparaison « endpoint » des FC sur voie 1500 V (en vert) et sur voie 25 kV (en orange)

5. Fil de Contact : Provenance cuivre utilisé

Afin de trouver des alternatives pour réduire l'impact associé au cuivre, la Figure 16 analyse le fil utilisé sous 1500 V continu avec un changement sur le mode de fabrication du cuivre: un processus spécifique d'électrolyse lié à l'extraction par solvant disponible sur SimaPro comme « Copper, from solvent-extraction electro-winning {GLO} market for | Conseq, S ».

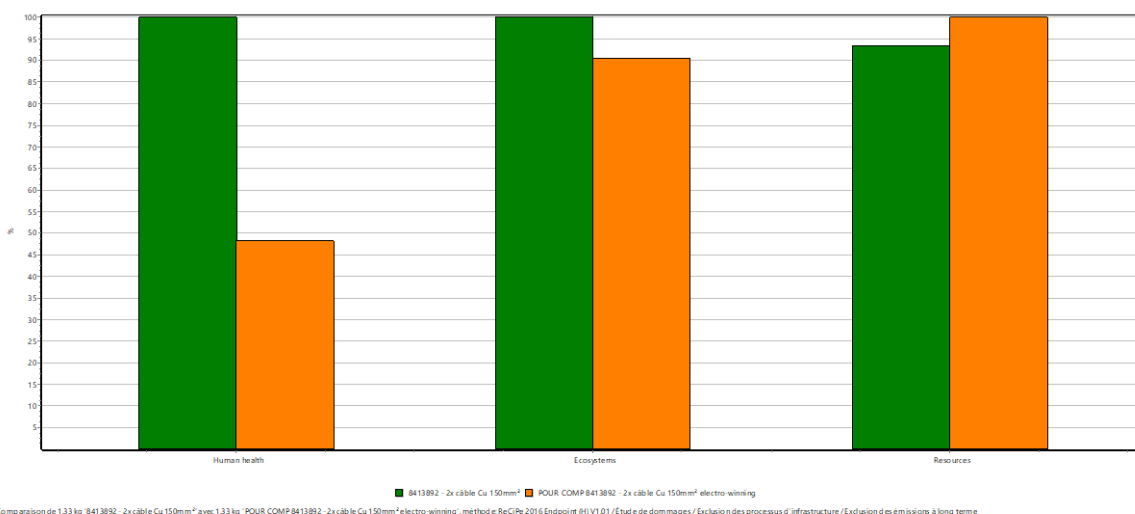


Figure 16: Comparaison endpoint de la provenance du cuivre utilisé – en vert le cuivre sans spécificités et en orange le cuivre « from solvent-extraction electro-winning »

Les résultats obtenus en « endpoint » montrent une grande variation entre les deux modes de fabrication analysés parmi les catégories d'impact, donc nous lançons l'analyse à nouveau à l'aide d'une méthode hors ReCiPe qui va évaluer les impacts sur une échelle unique, appelé Ecopoints. La méthode « IMPACT 2002+ » permet de pondérer quatre catégories finales d'impact sous un « score environnemental » mesuré en écopoints – ou Pts. Les nouveaux résultats se figurent ci-dessous.

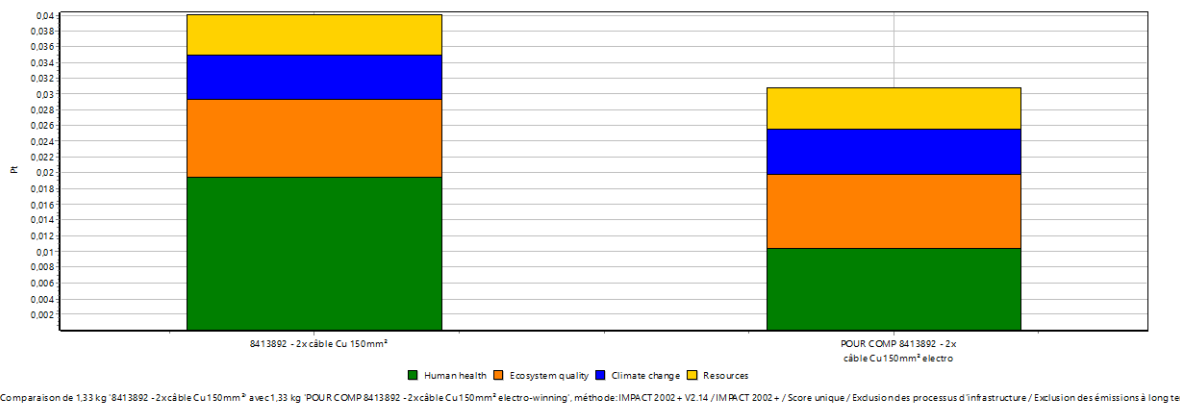


Figure 17: Comparaison de la provenance du cuivre utilisé avec la méthode IMPACT 2002+ et l'échelle en Pt. (Ecopoints) – en vert la catégorie « Santé Humaine », en orange « Qualité des Ecosystèmes », en bleu « Réchauffement Climatique » et en jaune « Épuisement de Ressources »

D'après le graphique, l'impact lié au cuivre issu de l'électrolyse est visiblement plus faible, ce qui peut indiquer un point à considérer par l'entreprise. Vu la grande demande de câbles et d'équipements en cuivre au sein de la traction électrique, le département pourrait exiger de ses fournisseurs un produit dont les procédures de fabrication et d'extraction sont connues et plus propres, ce qui réduirait les impacts liés à la matrice de SNCF Réseau. Parmi ces données il est possible de modéliser un matériau plus détaillé sur le logiciel de calcul, opportun à la comparaison selon les concurrents et utile à la publicité de l'entreprise sur le scénario de durabilité.

La Figure 18 montre le même graphique obtenu de la méthode « IMPACT 2002+ » découpé dans ses catégories « midpoint ».

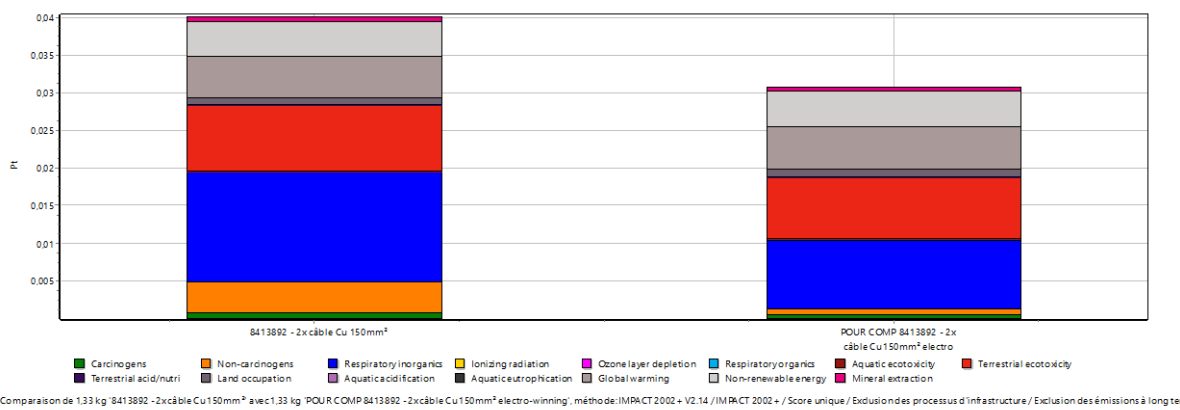


Figure 18: Comparaison de la provenance du cuivre utilisé, IMPACT 2002+ découpé dans les catégories « midpoint »

2.6.1.2. Pistes à l'écoconception

L'impossibilité de continuer les modélisations sur Bilan Produit a limité le cadrage des impacts selon l'ADEME. Sur ce fait, il serait d'abord intéressant de relancer les ACVs sur la plateforme une fois qu'elle soit réparée, afin d'avoir la sortie des impacts selon un organisme national, ainsi que d'obtenir une comparaison entre les résultats sortants de deux logiciels de calcul différents.

Les analyses autour des isolateurs nous proposent un nouveau regard à propos des poids des isolateurs. Ce que l'entreprise pourrait proposer consiste en l'achat des isolateurs plus légers.

L'analyse autour de recyclage du verre joue un rôle principal dans la sensibilisation des agents ; la variation d'impact estimée autour de la fin de vie peut promouvoir des actions qui envisagent la réutilisation, la valorisation et le recyclage des équipements et ainsi établir un lien fort au décret n° 2012-557 relatif à la Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE).

Un autre point à considérer par le département est la fixation d'un ensemble des taux de recyclage ciblés comme stratégie de l'enjeu environnement afin de répondre aux appels de la gestion de déchets de l'entreprise, et d'intégrer la politique interne de réduction des impacts. Les résultats de la recherche réalisée sont favorables à la détermination de cet ensemble puisqu'ils font une projection de scénarios possibles.

SNCF Réseau dispose d'une plateforme de gestion des bordereaux des déchets internes nommé IMPACT, qui permet l'accompagnement de la fin de vie des matériaux utilisés par l'entreprise. Une approximation des créateurs de la plateforme peut être bénéfique à CEDD de sorte à pouvoir cibler des taux de recyclage faisables et de projeter un scénario qui envisage l'économie circulaire. Ce possible partenariat peut être également capable de faciliter la diffusion des objectifs du département TE et de promouvoir l'utilisation de la plateforme.

Une nouvelle façon de comparer les composants est explorée sur la dernière analyse – provenance du cuivre. L'utilisation de la méthode « IMPACT 2002+ » permet l'évaluation des impacts sur un score unique : les Ecopoints (Pt.). Ce score est calculé à travers des impacts « midpoints » connus chiffrés et normalisés par an et par personne, sur une moyenne européenne, puis attachés à un facteur de pesage spécifique à chaque catégorie d'impact, joints dans l'*Annexe 17*.

Bien que séduisant, les Ecopoints présentent quelques difficultés, telles que le fait de n'être valable que sur une zone géographique spécifique – l'Europe – et des problèmes d'estimation des flux. L'approche privilégiée consiste à séparer les étapes de l'impact du cycle de vie et de son interprétation ^[2].

L'échelle Ecopoint représente pourtant une possible stratégie de l'entreprise pour évaluer ses produits, étant donné que la comparaison sur un score environnemental unique facilite l'identification des composants les plus impactant. Cette méthode compose ainsi un outil d'aide à la décision, permettant un regard simple sur l'écoconception.

Les dix-sept impacts « midpoint » de la méthode ReCiPe sont rassemblés sur treize catégories sur « IMPACT 2002+ » puis groupés dans quatre catégories principales – santé humaine, qualité de l'écosystème, épuisement de ressources et changement climatique. De ce fait, il n'est pas possible de comparer directement les résultats des deux méthodes.

2.6.2. Sous-Station de Mitry

Les résultats obtenus s'expriment par schéma de traction électrique et par une partie Complément. Leur couplage donne le panorama général d'impact de la sous-station de Mitry sur les trois catégories « endpoint » montré sur la *Figure 19*. En complément, le chiffrage des impacts se figure dans l'*Annexe 19*.

La phase d'installation de la sous-station – chantier – n'est pas considérée dans ces analyses de cycle de vie. Bien que cette phase soit variable suivant les entreprises travaux qui effectuent les chantiers, elle implique de nombreux paramètres dont les engins de travaux, les déplacements en chantier, les déchets et traitements d'eaux générés, qui sont susceptibles de modifier les conclusions de cette étude ^[26].

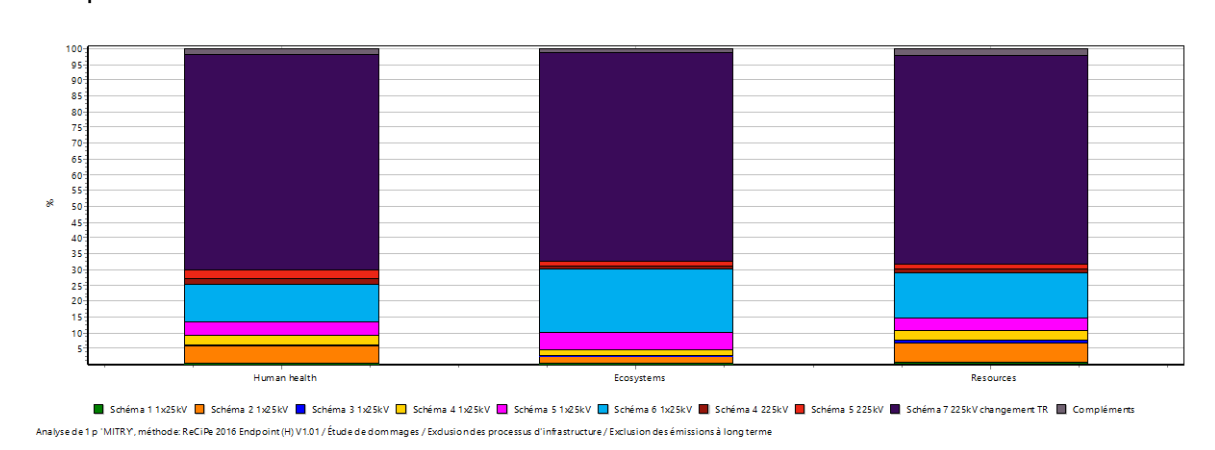


Figure 19: Étude de dommages de la Sous-Station de Mitry, endpoint

La plus grande source d'impact est le schéma 7 en 225 kV et, à partir du réseau d'impact affiché dans l'*Annexe 18* nous identifions le transformateur de puissance (TR) comme étant l'agent principal.

La *Figure 20* affiche l'ACV individuelle du TR d'où l'empreinte du cuivre et de l'aluminium s'excellent à cause de leurs poids estimés à 30 T et à 19 T respectivement, dépassant sur plusieurs catégories les impacts liés aux pertes électriques prévus pour une utilisation de 50 ans – en bleu foncé les pertes de joules et en rose les pertes fer à vide. La destination de ces métaux en fin de vie est facteur crucial à l'écoconception du TR, vu que les hauts taux de recyclage adoptés sont responsables pour les résultats sortants en négatives dans le graphique – en vert et en grise les recyclage associés au cuivre et au aluminium, respectivement – qui vont donc pondérer le cycle de vie.

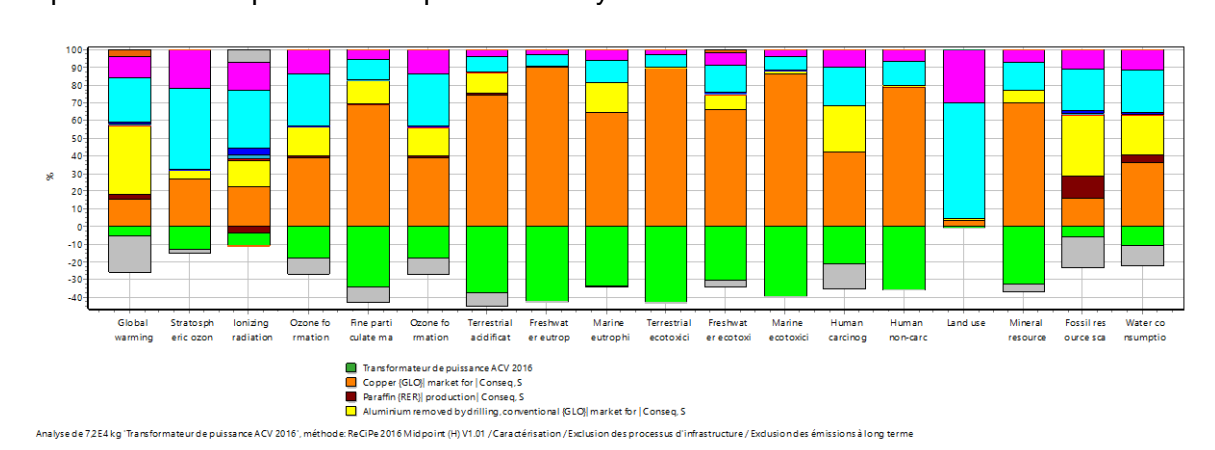


Figure 20: Étude de dommages du Transformateur de Puissance, midpoint

2.6.2.1. Analyses de Sensibilité

Suite à la reprise du *Tableau 6*, les analyses de sensibilité s'expriment ci-dessous.

1. Mitry : comparaison des schémas hors Transformateur de Puissance

La modélisation dans la *Figure 21* illustre la contribution des schémas de la sous-station de Mitry hors le TR selon les catégories d'impact « endpoint ». Le schéma 6 en 1x25 kV ressort ainsi comme le plus impactant grâce au SELF de condensateur y comprise, avec des pertes électriques élevées. À partir de l'arborescence affichée sur SimaPro, il est possible d'attribuer les agents d'impact dans les schémas les plus expressifs :

- La consommation électrique associée au Transformateur de Services Auxiliaires (TSA) pour le schéma 5 en 1x25 kV ;
- Les câblages en cuivre pour le schéma 7 en 225 kV ;
- Les charpentes pour le schéma 2 en 1x25 kV ;
- Les batteries pour les schémas 5 en 225 kV et 6 en 1x25 kV

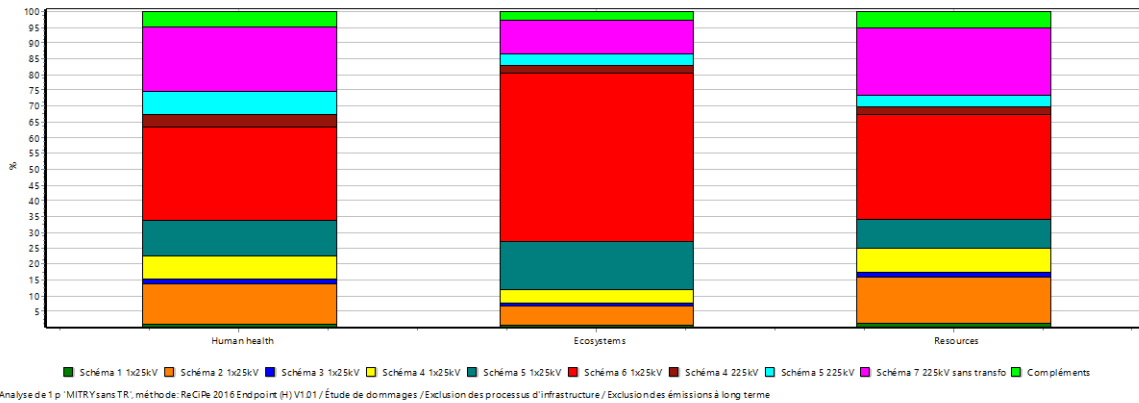


Figure 21: Analyse comparative de Mitry hors le TR, endpoint

2. Transformateur de Puissance : remplacement du cuivre par l'aluminium

Sur la *Figure 22* le TR est comparé avec une modélisation qui remplace le cuivre par l'aluminium. La différence d'impact est remarquable entre les deux et, à l'échelle d'un score unique en Ecopoints, on a une réduction de 26,3% d'impact lié à ce remplacement. Les finalités des deux matériaux sont si divergentes que ce type de changement ne sert qu'au niveau de démonstration d'impact et à la sensibilisation sur les volumes de matière primaire utilisée.

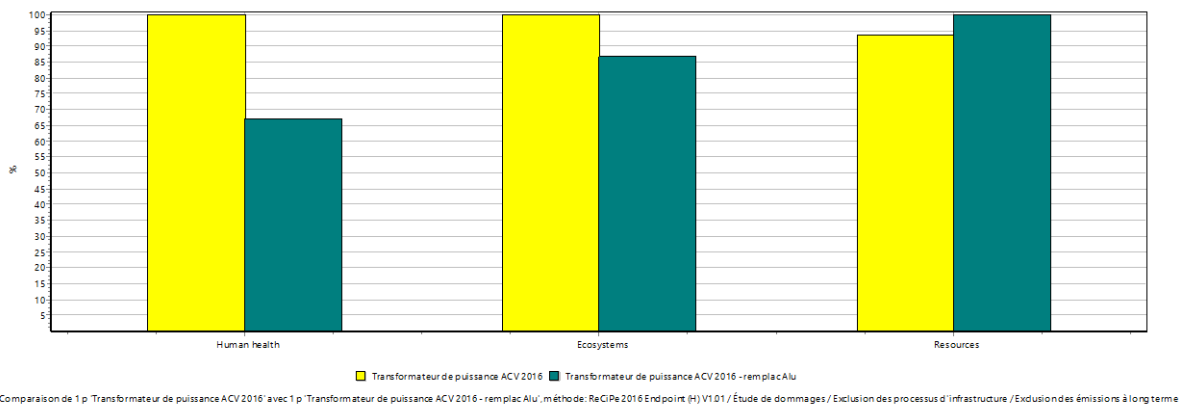


Figure 22: Remplacement du cuivre (en jaune) par l'acier (en vert) dans un Transformateur de Puissance, endpoint

3. Transformateur de Puissance : variation des flux entrants et sortants dans les processus

SimaPro nous propose un transformateur modélisé sur l'inventaire EcoInvent, qui a donc été pris à titre de comparaison avec le TR estimé et modélisé dans ce projet. Pour évaluer les effets des pertes électriques, le TR modélisé sans la phase d'utilisation est analysé. La Figure 23 montre le graphique obtenu sous les catégories d'impact « midpoint ».

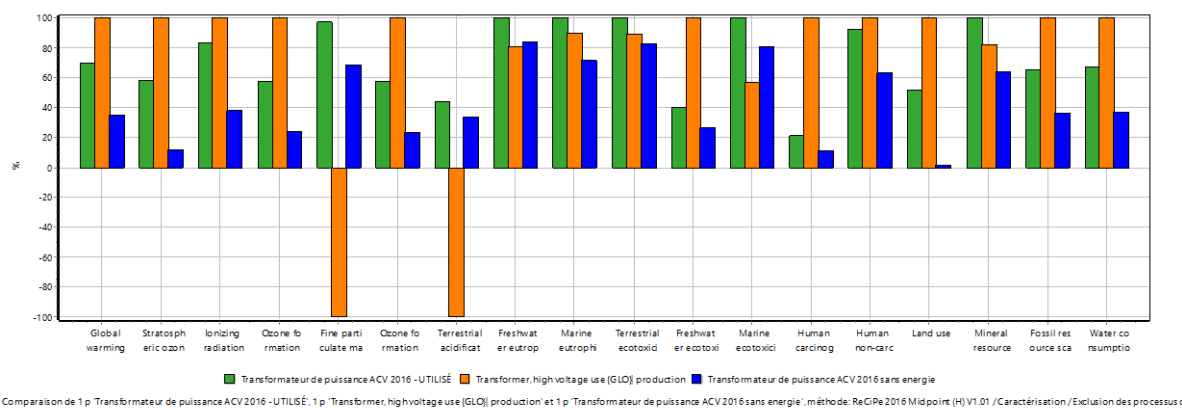


Figure 23: Comparaison midpoint sur la composition d'un Transformateur de Puissance – en vert le TR utilisé, en orange le TR disponible dans l'inventaire de SimaPro et en bleu le TR utilisé sans les pertes électriques

Vu les résultats variables, l'analyse est faite à nouveau à l'aide de la méthode IMPACT 2002+, dont le score environnemental de chaque produit est unifié sur la Figure 24. Le transformateur inventorié sur la base de données EcoInvent se montre légèrement plus impactant que celui modélisé d'après les informations basées sur le fournisseur, ce qui démontre un avantage à l'entreprise.

Il estime, selon ces résultats, que 50,32% des impacts du TR sont causés par les pertes électriques associés à son utilisation pendant 50 ans. En tant que concepteur d'installations fixes de traction électrique, ceci représente un point important de l'écoconception des Sous-Station au département DGII-TE. Outre que l'adoption des critères plus rigoureux au choix de ses composants, les projets qui envisagent l'amélioration de la performance électrique des équipements utilisés figurent comme des facteurs importants de la diminution de l'empreinte environnementale.

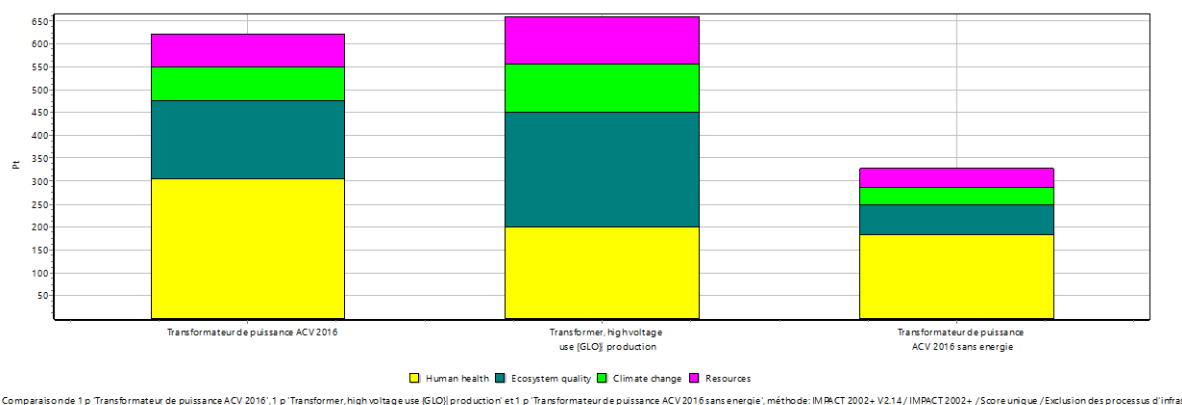
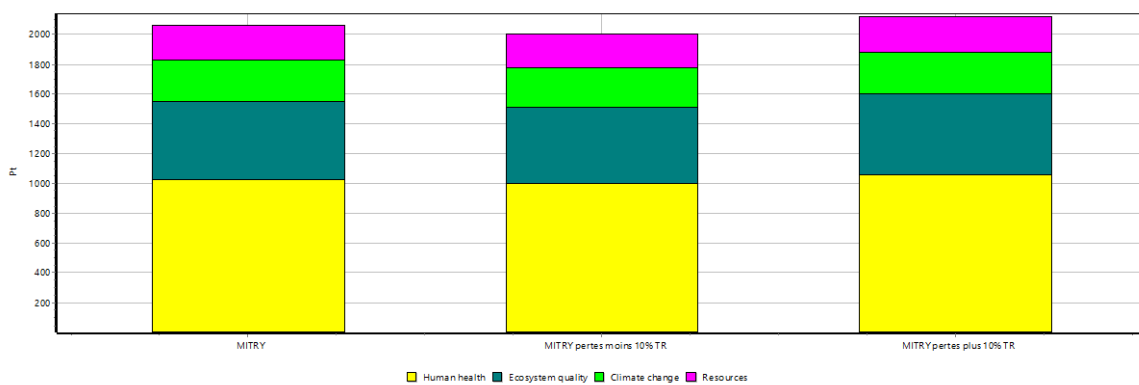


Figure 24: Comparaison en échelle Ecopoint sur la composition d'un Transformateur de Puissance, IMPACT 2002+ - de gauche à droite : TR utilisé, TR disponible dans l'inventaire de SimaPro et TR sans les pertes électriques

Dans les prochaines analyses de sensibilités la méthode IMPACT 2002+ est retenue pour l'évaluation sous score unique des paramètres qui concernent l'optimisation de la consommation d'énergie des équipements puisqu'ils peuvent indiquer un avenir aux futurs projets du DTE.

4. Mitry : Ajout et diminution 10% de pertes générales au TR

À l'aide de la *Figure 25*, les pertes totales liées au TR de la Sous-Station de Mitry varient 10% des pertes joule – lié à la résistance de courant dans un circuit fermé – et des pertes fer à vide – lié aux pertes du circuit ouvert –, ce qui donne une différence de 58,55 Pt. approximatif entre chaque graphique. Sur un total estimé de 2063,59 Pt. à la Sous-Station de Mitry, chaque variation électrique de 10% de la consommation du TR correspond à une variation d'impact de 2,84% approximatif. Combiné à d'autres améliorations prévues au sein du département, une réduction de ces pertes peut être considérée un point de démarche importante à l'écoconception des projets de Sous-Station.

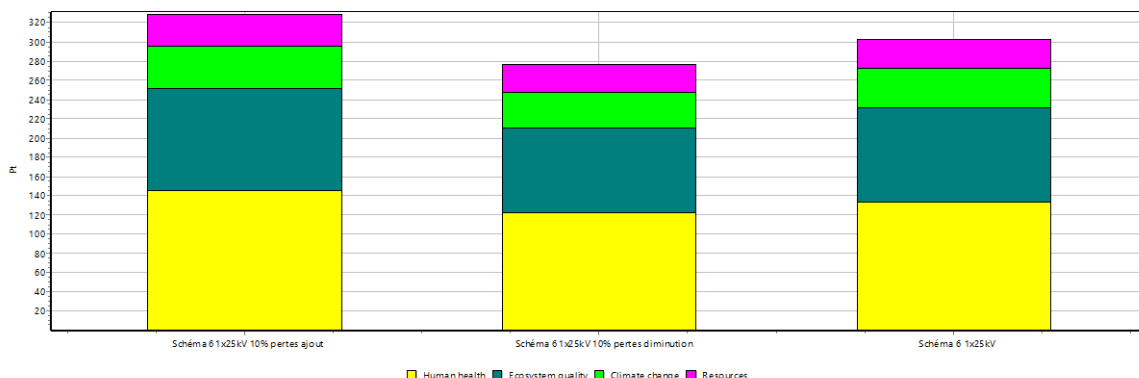


Comparaison de 1 p 'MITRY', 1 p 'MITRY pertes moins 10% TR' et 1 p 'MITRY pertes plus 10% TR', méthode: IMPACT 2002+ V2.14 / IMPACT 2002+ / Score unique / Exclusion des processus d'infrastructure / Exclusion des émissions à long terme

Figure 25: Variation des pertes électriques du TR sur la Sous-Station de Mitry – de gauche à droite : scénario original, scénario avec 10% des pertes enlevées et scénario avec 10% des pertes ajoutées

5. Schéma 6 1x25 kV : Variation de la consommation électrique de la SELF de condensateurs

La *Figure 26* évalue l'impact des pertes électriques liées au SELF de condensateur compris dans le schéma 6 en 25 kV qui donne 25,83 Pt. de différence entre chaque graphique. Sur un total estimé de 302,97 Pt. attribué au schéma 6, chaque variation électrique de 10% correspond à une variation d'impact de 8,53% approximativement, ce qui peut indiquer une démarche bienvenue au sein du DTE.



Comparaison de 1 p 'Schéma 6 1x25kV 10% pertes ajout', 1 p 'Schéma 6 1x25kV 10% pertes diminution' et 1 p 'Schéma 6 1x25kV', méthode: IMPACT 2002+ V2.14 / IMPACT 2002+ / Score unique / Exclusion des processus d'infrastructure / Exclusion des émissions à long terme

Figure 26: Variation des pertes électriques de la SELF de condensateur sur la Sous-Station de Mitry, en Ecopoints – de gauche à droite : scénario avec 10% des pertes ajoutées, scénario avec 10% des pertes enlevées et scénario original

6. Schéma 5 1x25 kV : Consommation électrique des services auxiliaires

La Figure 27 analyse deux scénarios alternatifs pour la consommation électrique d'un TSA, partie intégrante du schéma 5 en 25 kV. Sur un score unique, les résultats indiquent une augmentation d'impact de 73,46% du scénario original pour une consommation doublée d'énergie. Pour une diminution de 20% sur la consommation originale calculée, les impacts se réduisent en 14,69%.

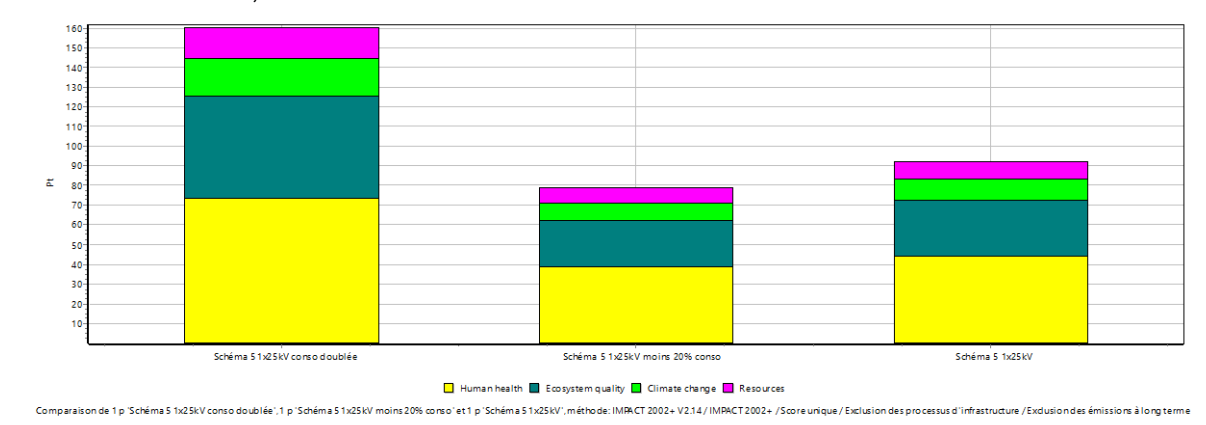


Figure 27: Variation de la consommation électrique d'un TSA dans le Schéma 5 1x25 kV, en Ecopoints – de gauche à droite : scénario avec consommation électrique doublée, scénario avec 20% de la consommation enlevée et scénario original

7. Dalle de Retournement TR : Variation taux de recyclage béton

Afin d'évaluer la destination en fin de vie du béton sur le cycle de vie d'une Sous-Station, l'influence des taux de recyclage pour la dalle de retournement du TR est analysée dans la Figure 28, en écopoints. La dalle représente environ 20% de la masse totale des composants réalisés en béton dans le projet de Mitry, dont l'impact sur le cycle de vie varie 3,05% à chaque 10% de matériau recyclé. Sur un poids estimé de 320,6 T de béton, la variation des écopoints sur Mitry pour la partie Génie Civil est décrite dans le Tableau 7.

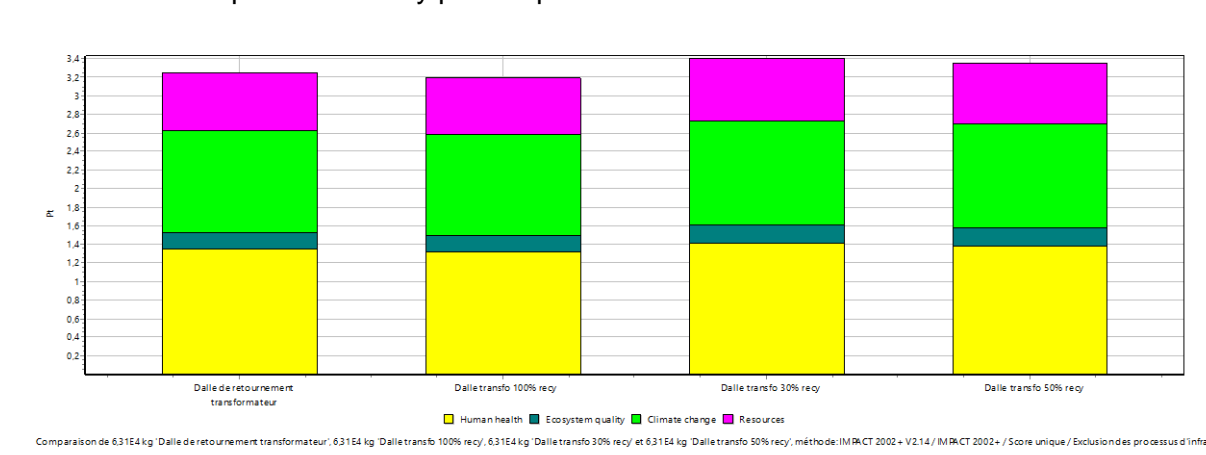


Figure 28: Variation du taux de recyclage de béton pour une dalle de retournement, en Ecopoints – de gauche à droite : scénario original avec 80% de recyclage, scénario avec 100% de recyclage, scénario avec 30% de recyclage, et scénario avec 50% de recyclage

Variation Béton	Taux de Recyclage			
	80% hypothétique	100%	30%	50%
Score unique (Pt.)	16,510	16,200	17,285	16,975

Tableau 7: Variation du taux de recyclage de béton estimé à la Sous-Station de Mitry, en Ecopoints

Sur un score total de 2063,59 Pts, cette variation est peu expressive toutefois relevant à la quantification, transport et destination de déchets en fin de vie.

2.6.2.2. Pistes à l'écoconception

Les analyses autour du transformateur de puissance nous sensibilisent sur les quantités de métaux compris dans une sous-station. En tant que concepteur des installations fixes de traction électrique, le département DGII-TE peut donc, dans sa sphère d'influence, améliorer les performances environnementales de ses sous-stations par la maîtrise de ses matières premières. Soit lors de la phase de conception, en choisissant des matériaux de meilleure qualité environnementale mais surtout en réduisant la taille et/ou volume des matières utilisées. Soit durant la phase de production, en améliorant les procédés de fabrication – moins énergivore, moins de génération de fumées, moins de processus unitaire. Soit en fin de vie de la sous-station, en favorisant les filières de recyclage pour les équipements utilisés [26]. La fixation des taux de recyclage à cibler par le département se montre une fois encore valable aux EALES.

D'après les analyses de sensibilité autour de la phase d'utilisation, le *Tableau 8* résume les variations d'impact en fonction de la consommation électrique. Il accentue le besoin des recherches et du re-design des schémas qui envisagent la performance électrique des équipements.

Composant	Variation utilisation	Variation d'impact (Pt.)
TR - pertes joules	10% de la consommation électrique	40,38
TR - pertes fer à vide	10% de la consommation électrique	18,17
SELF	10% de la consommation électrique	25,83
TSA	10% de la consommation électrique	6,79

Tableau 8: Résumé des contributions d'impact selon la variation de la consommation électrique

En ce qui concerne l'intégration des résultats dans LEA, le logiciel utilise uniquement avec le chiffrage des coûts dont le couplage des impacts mesurés dans des unités de référence distinctes de l'Euro (€) posera un défi au département. De ce fait, l'utilisation des Ecopoints s'avère comme une possible solution temporaire, vu que les quatre catégories principales liées à la méthode IMPACT 2002+ sont aussi celles d'intérêt à l'intégration sur le logiciel, utilisant les Ecopoints comme unité unique. Si le projet était retenu, il serait intéressant pour une prochaine étude d'étudier la faisabilité de la conversion de ces Ecopoints dans des coûts réelles à l'entreprise, de mode à standardiser l'unité en Euro. Il s'agit aussi d'une démarche autour du thème Coût du Cycle de Vie – ou LCC de l'anglais Life Cycle Cost – qui pose des avantages économiques et environnementaux pour une entreprise et qui est aussi étroite à l'écoconception.

Une nouvelle mise à jour sur SimaPro prévoit aussi l'ajout d'une méthode LCC à la configuration de calcul, ce qui pourrait aussi aider l'assemblage des impacts sur une unité commune et économique. Vu que l'intérêt du Département est de partir sur une démarche LCC, relancer les modélisations sur cette méthode serait plutôt simple et faisable. Par contre, la réussite dépendrait de l'ajout des données plus concises autour des ouvrages, maintenance, valorisation des déchets et consommation de l'eau et d'énergie, vu l'influence des hypothèses faites sur ce rapport.

3. IMPRESSIONS PERSONNELLES

Certaines difficultés tout au long du stage ont repoussé son aboutissement, surtout pendant les premiers mois. Le sujet de stage m'a pourtant mis en relation avec plusieurs sections du DTE, à leur tour très réceptives à l'idée de l'écoconception, qui m'ont ainsi orienté à la recherche des documents et à la récolte des données, fondamentales dans la composition de l'ICV.

Initialement la modélisation de la sous-station était préméditée sur Bilan Produit vu la simplicité de rentrée des données, mais la mise à jour non évidente de la plateforme nous a obligé à changer le plan, ce qui m'a apporté un peu d'insécurité par rapport à la quantité de travail qui m'avait été désigné et sur un logiciel qui ne m'étais pas familier. J'ai donc intensifié ma vitesse de travail en pensant que je n'aurai pas le temps de développer la recherche jusqu'à la fin donc sur plusieurs semaines je me suis surchargée. Par conséquent, j'ai vite avancé sur mon planning.

En ce qui concerne LEA, il s'agit d'un logiciel qui ne travaille qu'avec une PU de référence en Euro. Même après avoir exporté les données comme prévu, sa procédure d'intégration sort de mon domaine de connaissance et aussi ma période de stage, donc malheureusement je ne pourrai pas voir les résultats étant diffusés dessus.

À la construction des résultats on note le changement sur la méthode utilisée. La découverte des Ecopoints a constitué une partie très importante aux analyses de sensibilité faites sur ce rapport et je conseillerai de continuer à les utiliser comme outil à l'écoconception.

Dernièrement, je conclus que l'expérience au sein de la section CEDD2 fut vraiment enrichissante à mon développement professionnel. J'ai pu travailler avec autonomie couplée à l'expertise d'une équipe bien préparée, dont le support m'a dirigé vers un travail bien mené.

CONCLUSION

D'après l'indicateur réalisé – *Tableau 1* – ce projet s'évalue sur une réussite « *très haut* » en regardant le planning fait.

Description de tâche	Progrès		Septembre	Août	Juillet	Juin	Mai	Avril
Soutenance	75%	<i>plan</i>	16	0	0	0	0	0
		<i>fait</i>	0	10	0	2	0	0
Rédaction rapport de stage	100%	<i>plan</i>	13	18	13	8	4	0
		<i>fait</i>	6	8	36	6	0	0
Intégration LEA	100%	<i>plan</i>	8	19	7	0	0	0
		<i>fait</i>	0	10	21	0	3	0
Modélisation sur logiciel de calcul	100%	<i>plan</i>	0	4	24	17	1	0
		<i>fait</i>	0	0	15	26	5	0
Collecte des données	100%	<i>plan</i>	0	0	2	13	19	8
		<i>fait</i>	0	0	0	8	22	12
Choix des composants pour les ACVs	100%	<i>plan</i>	0	0	0	0	0	14
		<i>fait</i>	0	0	0	1	4	9
Lancement du projet	100%	<i>plan</i>	0	0	0	0	0	11
		<i>fait</i>	0	0	0	0	0	11
98,17% TRÈS HAUT	Σ	<i>plan</i>	37	41	46	38	24	33
		<i>fait</i>	6	28	72	43	34	32

Tableau 9: L'avancement du projet sur le planning projeté

D'après le *Tableau 9*: L'avancement du projet sur le planning projeté, la mission de stage a été accomplie et tous les étapes ont été développées avant les délais prévus.

Nous soulignons le rôle essentiel des analyses de sensibilité à la discussion autour des possibles démarches durables de l'entreprise, ce qui répond à l'élaboration des pistes d'écoconception et à son tour, aux appels à l'économie circulaire.

La *Figure 29*: Résumé des éco-pistes selon la fa reprend les sujets de discussion autour des pistes à l'écoconception et sa faisabilité par le Département. D'après elle, l'emploi des Ecopoints s'impose comme outil précieux à la sortie des estimations chiffrées facilitant la comparaison, la projection et la diffusion des scénarios d'impact. Il indique ainsi son adoption par le pôle CEDD de sorte à servir à l'écoconception des produits de la traction électrique au sein du DTE.

Outre les écopoints, les analyses faites autour de la fin de vie des matériaux montrent que la fixation d'un ensemble de taux de recyclage peut aussi contribuer aux prochaines cibles d'engagement environnementales de l'entreprise, réduisant ses empreintes.

Malgré le champ d'étude limité par rapport aux plusieurs produits du DTE, le projet s'insère comme le début d'une base de données environnementale et sa continuité est fondamentale au couplage des « coûts environnementaux » aux « coûts économiques ». Sur une plus large échelle de travail, cette base de données aura une grande valeur ajoutée pour les projets de traction électrique de l'entreprise, passible de reconnaissance externe et de certification environnementale.

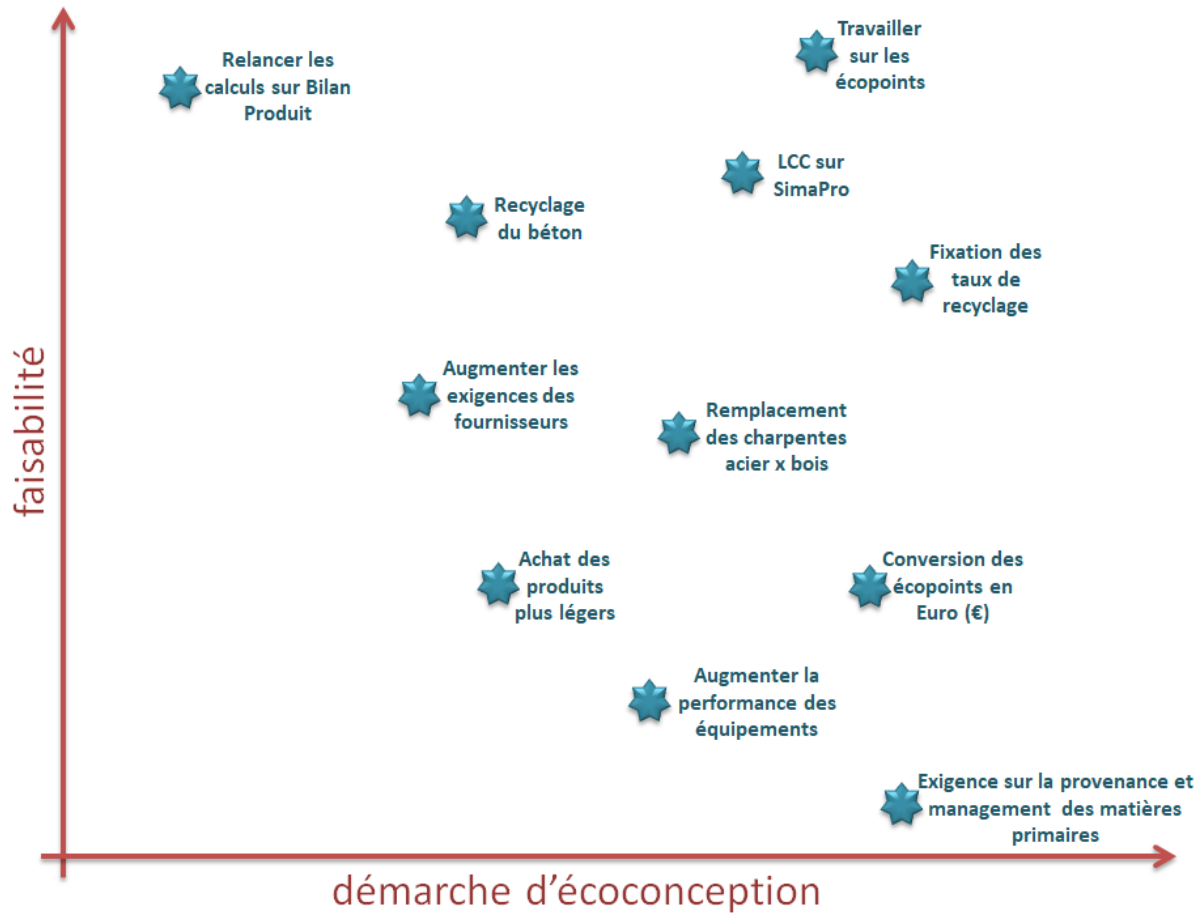


Figure 29: Résumé des éco-pistes selon la facilité de mise en place dans le DTE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ADEME**, « Comment réalise-t-on une ACV ? », 14 Août 2014, <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv>
- [2] **DUNCAN Marvin** « Lignes directrices de l'OCDE relatives aux pratiques exemplaires concernant les centres de ressources biologiques », Rapport Scientifique de l'OCDE, 2009, 36 pages.
- [3] **ECO-CONCEPTION**, « Analyse du Cycle de Vie (ACV) », <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>
- [4] **ECOINVENT**, « The ecoinvent Database », 2017, <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>
- [5] **FOUDRIN Édouard** « Principes généraux pour l'affichage environnemental des produits de grand consommation », *ADEME 2016*, 57 pages.
- [6] **HAUSCHILD Michael** « Life Cycle Assessment », Springer-Verlag 2018, 1183 pages.
- [7] **HUIJBREGTS Mark** « ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level », *Springer-Verlag 2016*, 10 pages.
- [8] **IRALDO Fabio** « Life-Cycle Costing (LCC) calculation », Présentation de Webinar, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, 2015.
- [9] **JOLLIET Olivier** « Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan », Presse polytechniques et universitaires romandes, 253 pages.
- [10] **LEVY-ABEGNOLI Quentin** « Les systèmes d'indicateurs en entreprise : leur rôle dans une stratégie de développement durable à différentes échelles », Thèse professionnelle, ISIGE, Paris, 2018.
- [11] **LOISEAU Eléonore**, « Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux liés aux usages de l'eau », Synthèse Technique, ENGREF, Montpellier, 2010.
- [12] **MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE**, « Feuille de route économie circulaire (FREC) », 07 Février 2019, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/feuille-route-economie-circulaire-frec>
- [13] **MUNDY Jo** « The green guide explained », *BRE Centre for Sustainable Products*, 2015, 46 pages.
- [14] **NF EN ISO 14040** « Management environnemental : Analyse du cycle de vie – Principes et Cadre », *norme française de 2006*, 36 pages.
- [15] **NF EN ISO 14044** « Management environnemental : Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices », *norme française de 2006*, 36 pages.
- [16] **RIVM**, « LCIA : the ReCiPe model », 02 Novembre 2018, <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- [17] **SIMAPRO**, « About SimaPro », <https://simapro.com/about/>
- [18] **SNCF**, « Document d'application : Notions de Caténaire », 2007, 103 pages.
- [19] **SNCF**, « Enjeux et engagements sociétaux », *Bilan RSE 2012*, 56 pages.
- [20] **SNCF**, « Qui sommes-nous ? », <https://www.sncf.com/fr/groupe/profil-et-chiffres-cles/portrait-entreprise/qui-sommes-nous>
- [21] **SNCF Réseau**, « Rapport de gestion intégré comptes consolidés SNCF Réseau », *Rapport financier SNCF Réseau 2017*, 2017, 52 pages.
- [22] **SNCF Réseau, I&P**, « Catalogue Produits Caténaires », *Édition 2017*, 48 pages.
- [23] **SNCF Réseau, I&P-TE**, « IP-TE, l'énergie de vos réussites », *Présentation Générale IP-TE 2016*, 51 pages.
- [24] **SNCF Réseau, I&P-TE CEDD**, « Économie circulaire 3D : Feuille de route développement durable », *Dossier COMEX 2013*, 46 pages.
- [25] **SNCF Réseau, I&P-TE CEDD**, « Feuille de route développement durable d'I&P-TE », 2016, 12 pages.
- [26] **SNCF Réseau, I&P-TE CEDD**, « Maîtrise des rejets et émissions : Évaluation simplifiée des impacts environnementaux de la sous-station de Mitry-Mory », *Rapport d'étude SNCF Réseau 2016*, 27 pages.

- [27] **SNCF Réseau, I&P-TE CEDD**, « Maitrise des rejets et émissions : Évaluation simplifiée des impacts environnementaux des caténaires 1500 V et 25 kV », *Rapport d'étude SNCF Réseau 2016*, 2016, 42 pages.
- [28] **WBDG, National Institute of Standards and Technology**, « Life-Cycle Cost Analysis », 19 Septembre 2016, <https://www.wbdg.org/resources/life-cycle-cost-analysis-lcca>

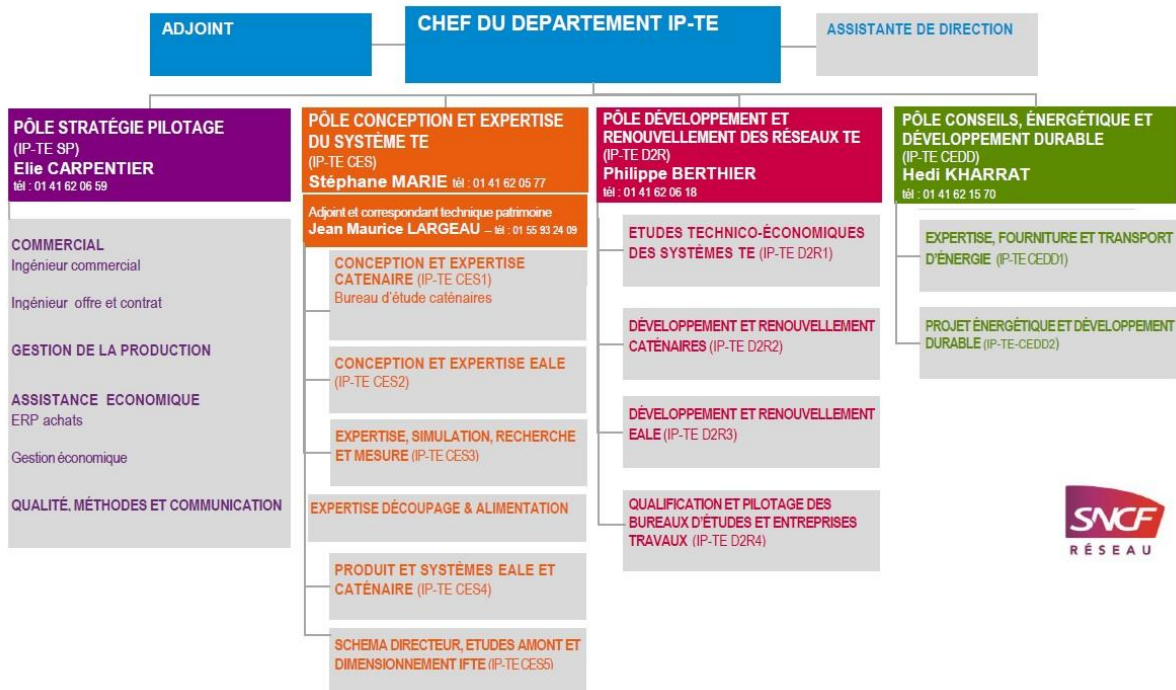
ANNEXES

<i>Annexe 1: Tableau de normes et références ISO</i>	52
<i>Annexe 2: Structure des pôles à la DGII DTE</i>	52
<i>Annexe 3: Méthodologie ACV selon l'ISO 14040</i>	53
<i>Annexe 4: Catégories et classification des impacts selon Bilan Produit</i>	53
<i>Annexe 5: Assemblage des catégories d'impact midpoint dans les catégories de dommage endpoint</i>	54
<i>Annexe 6: La réseau électrifié française - SNCF Réseau, 2016</i>	54
<i>Annexe 7: Comparaison de la composition des caténaires sous différentes tensions</i>	55
<i>Annexe 8: Les avantages et les inconvénients des caténaires en 1500 V et en 25 kV</i>	55
<i>Annexe 9: Planning de travail</i>	56
<i>Annexe 10: Schéma Unifilaire de Mitry</i>	57
<i>Annexe 11: Extrait de l'ICV du schéma 7, 225 kV de la Sous Station de Mitry</i>	58
<i>Annexe 12: Présentation du logiciel SimaPro</i>	59
<i>Annexe 13: Table de conversion de données récoltées aux données adoptées sur SimaPro</i>	59
<i>Annexe 14: Assemblage complet de Mitry sur SimaPro</i>	60
<i>Annexe 15: Extrait du tableau de résultats à l'intégration sur LEA pour le projet caténaire</i>	61
<i>Annexe 16: Ensemble d'hypothèses autour des poteaux modélisés en bois</i>	61
<i>Annexe 17: Facteurs de pesage et normalisation du score Ecopoint</i>	62
<i>Annexe 18: Réseau d'impact de la Sous-Station de Mitry</i>	62
<i>Annexe 19: Chiffrage des impacts de la Sous-Station de Mitry</i>	63

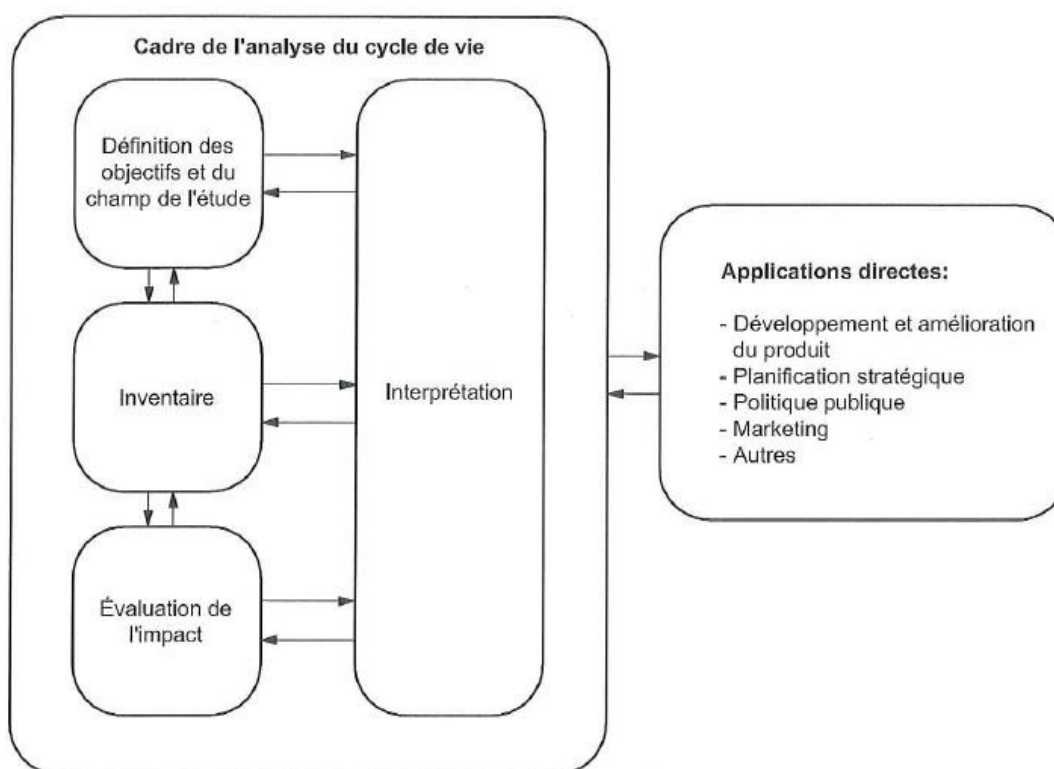
Annexe 1: Tableau de normes et références ISO

NORME	Définition
ISO 260000	publiée en 2010, l'ISO26000 présente des lignes directrices sur le management de la RSE. Elle ne se prête pas à la certification
ISO14040-14044	Publié en 2006, les ISO 14040 à 14044 traitent des études d'analyse du cycle de vie et des études d'inventaire du cycle de vie

Annexe 2: Structure des pôles à la DGII DTE - SNCF Réseau, 2018



Annexe 3: Méthodologie ACV selon l'ISO 14040 - ISO14040, 2006



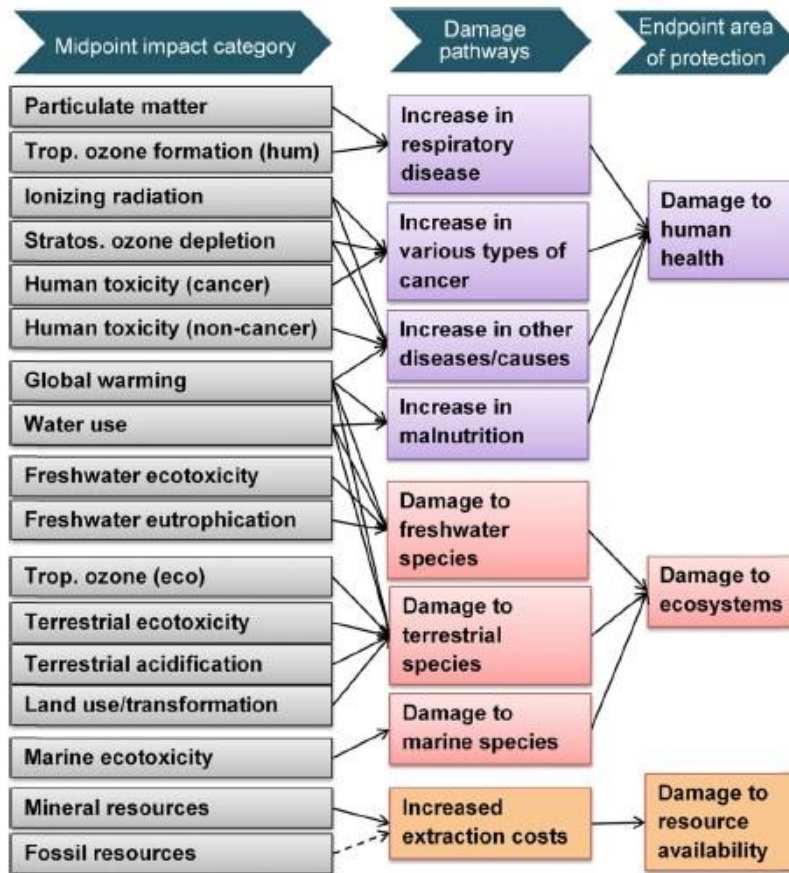
Annexe 4: Catégories et classification des impacts selon Bilan Produit – ADEME, 2016

Impact category	Recommended default LCIA method	Indicator	Classification	Commentaire	Proposition de traduction
Climate change	Baseline model of 100 years of the IPCC	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	I		Changement climatique
Ozone depletion	Steady-state ODPs 1999 as in WMO assessment	Ozone Depletion Potential (ODP)	I		Destruction de la couche d'ozone
Human toxicity, cancer effects	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	II/III		Toxicité humaine (avec effets cancérigènes)
Human toxicity, non-cancer effects	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	II/III		Toxicité humaine (sans effets cancérigènes)
Particulate matter/Respiratory inorganics	RiskPoll model (Rabl and Spadaro, 2004) and Greco et al 2007	Intake fraction for fine particles (kg PM2.5-eq/kg)	I		Émissions de particules inorganiques
Ionising radiation, human health	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischke et al, 2000)	Human exposure efficiency relative to U	II		Radiations ionisantes (santé humaine)
Photochemical ozone formation	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe	Tropospheric ozone concentration increase	II		Pollution photochimique

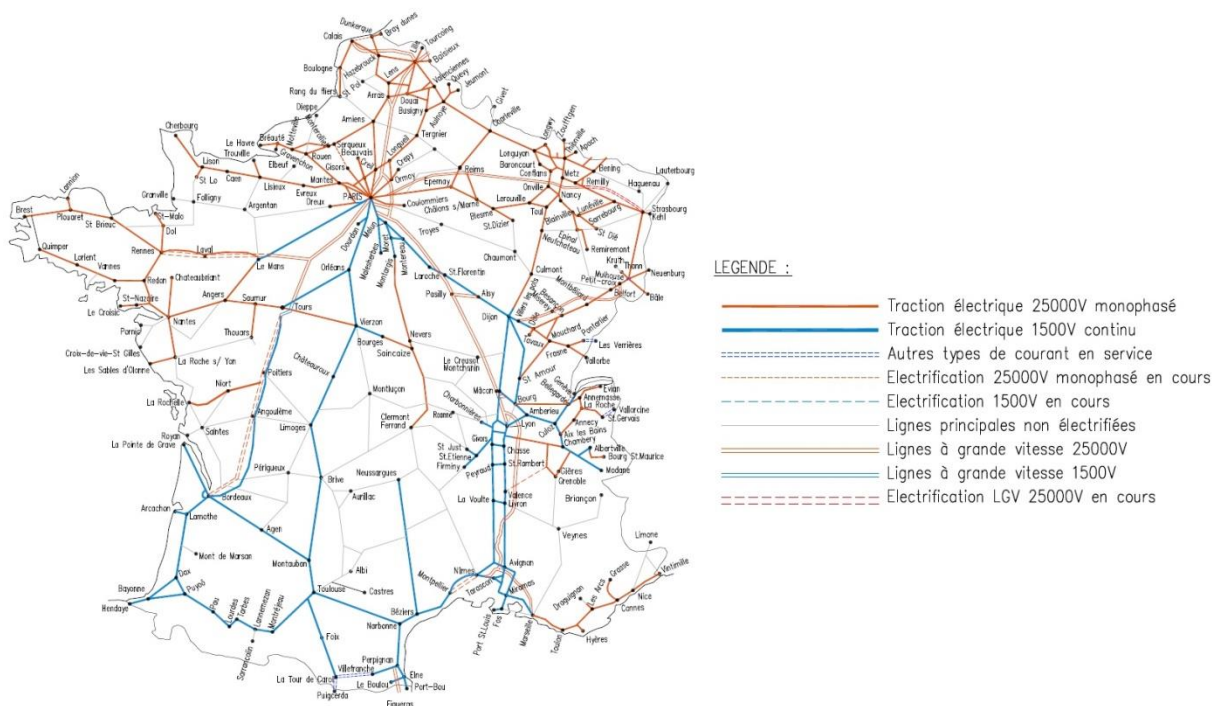
Impact category	Recommended default LCIA method	Indicator	Classification	Commentaire	Proposition de traduction
Acidification	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	Accumulated Exceedance (AE)	II		Acidification
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	Accumulated Exceedance (AE)	II		Eutrophisation terrestre
Eutrophication, aquatic (freshwater)	EUTREND model (Struijs et al, 2009b) as implemented in ReCiPe	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	II	Eutrophisation par excès de phosphate Déclinaison « Hierarchist » dans ReCiPe	Eutrophisation aquatique (eaux douces)
Eutrophication, aquatic (marine)	EUTREND model (Struijs et al, 2009b) as implemented in ReCiPe	Fractions of nutrients reaching marine end compartment (N)	II	Eutrophisation par excès de nitrate Déclinaison « Hierarchist » dans ReCiPe	Eutrophisation aquatique (eaux marines)
Ecotoxicity (freshwater)	USEtox model, (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	II/III		Ecotoxicité (eaux douces)
Resource depletion, mineral, fossil and renewable ^a	CML 2002 (Guinée et al., 2002)	Scarcity	II	Déclinaison « Réserve base » (van Oers et al., 2002) de CML 2002 »	Épuisement des ressources naturelles non renouvelables

^a Depletion of renewable resources is included in the analysis but none of the analysed methods is mature for recommendation.

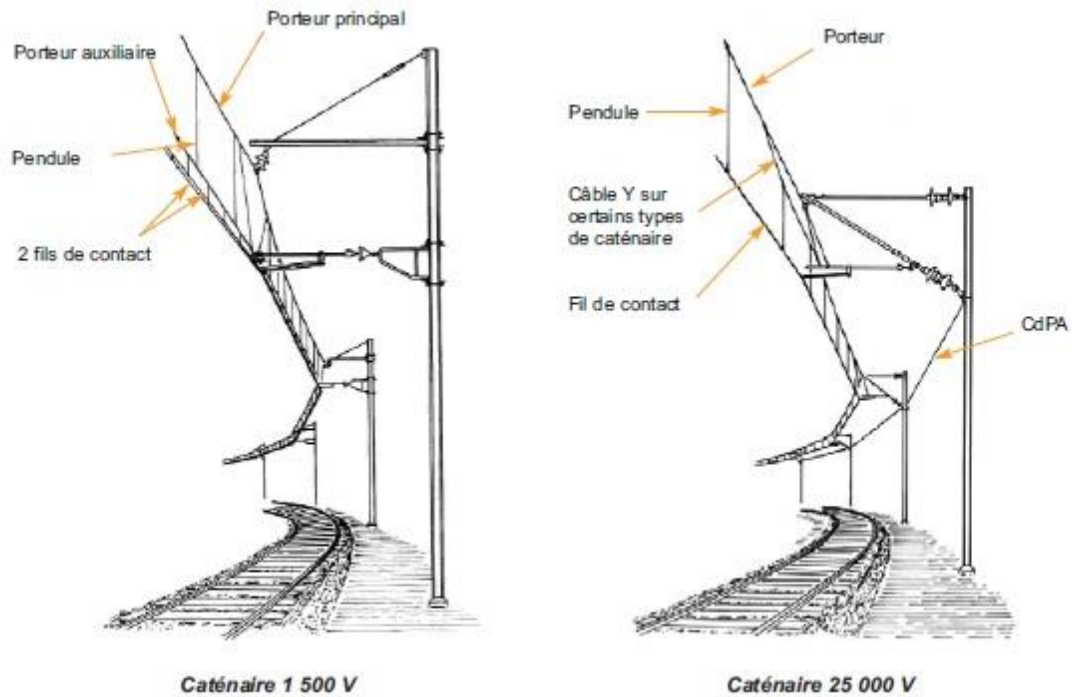
Annexe 5: Assemblage des catégories d'impact *midpoint* dans les catégories de dommage *endpoint* - HUIJBREGTS *et al.*, 2016



Annexe 6: La réseau électrifié française - SNCF Réseau, 2016



Annexe 7: Comparaison de la composition des caténaires sous différentes tensions – SNCF Réseau, 2007



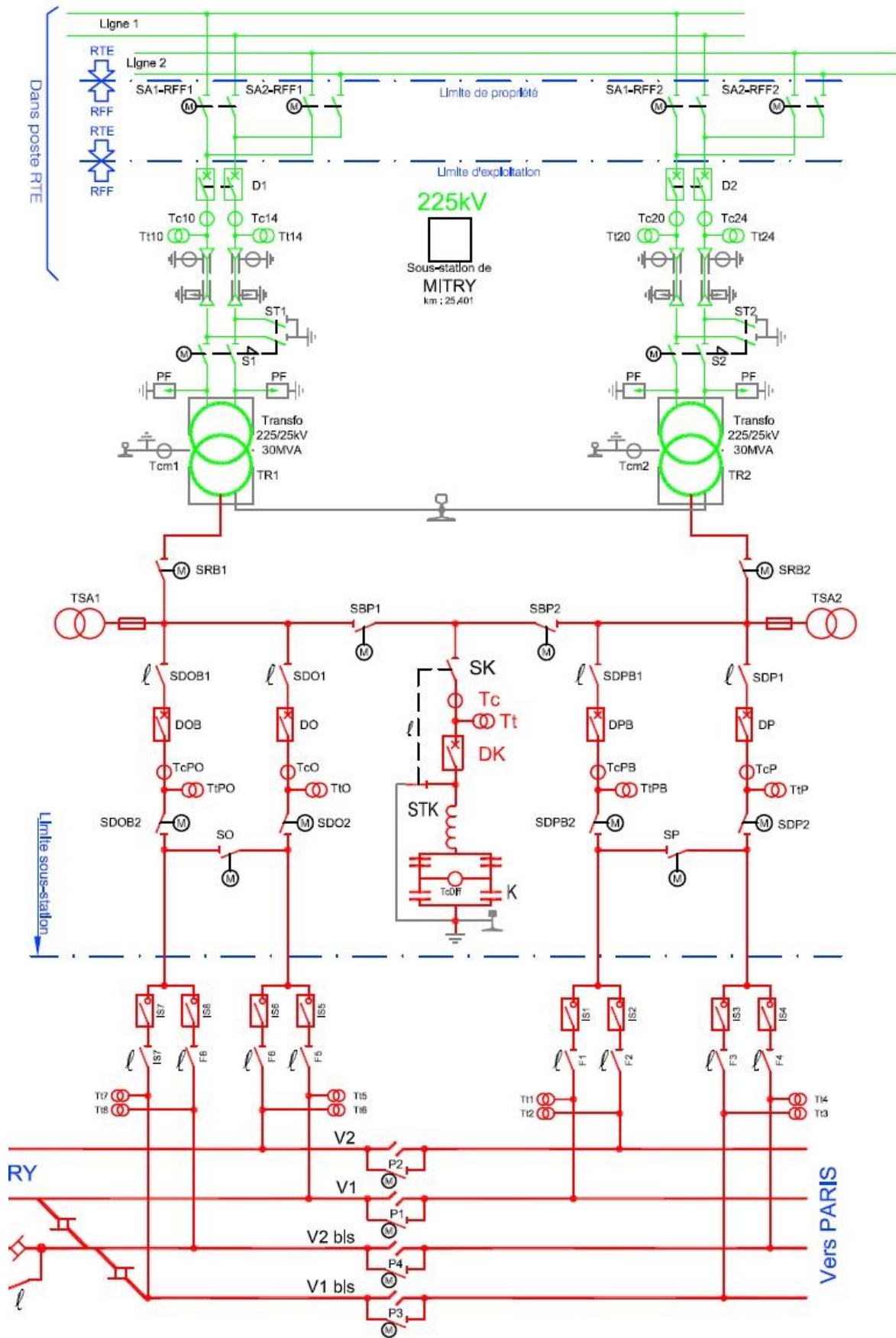
Annexe 8: Les avantages et les inconvénients des caténaires en 1500 V et en 25 kV - SNCF Réseau, 2007

	1 500 V	25 000 V
Avantages.	<ul style="list-style-type: none"> engins moteurs simples et robustes, isolement des caténaires facile à obtenir, possibilité d'effectuer des travaux de maintenance sous tension. 	<ul style="list-style-type: none"> utilisation du courant industriel du réseau à haute tension, alimentation par des sous-stations espacées de 50 à 70km, des distances supérieures sont atteintes avec les montages 2 fois 25 000 V, caténaire de faible section à rendement égal à une installation 1 500V.
Inconvénients.	<ul style="list-style-type: none"> sous-stations de conversion du courant nombreuses et complexes, (espacées de 8 à 25 km suivant l'importance du trafic et le profil de la ligne), lignes caténaires de grosse section de cuivre (300 à 1 000 mm²), immunisation des tiers contre les effets nocifs du courant continu dans les circuits enterrés (phénomène d'électrolyse). 	<ul style="list-style-type: none"> induction électromagnétique et influence électrique sur les installations voisines, interdiction de tout travail sur ou à proximité de pièces sous tension, nécessité de convertir le courant à bord des engins moteurs.

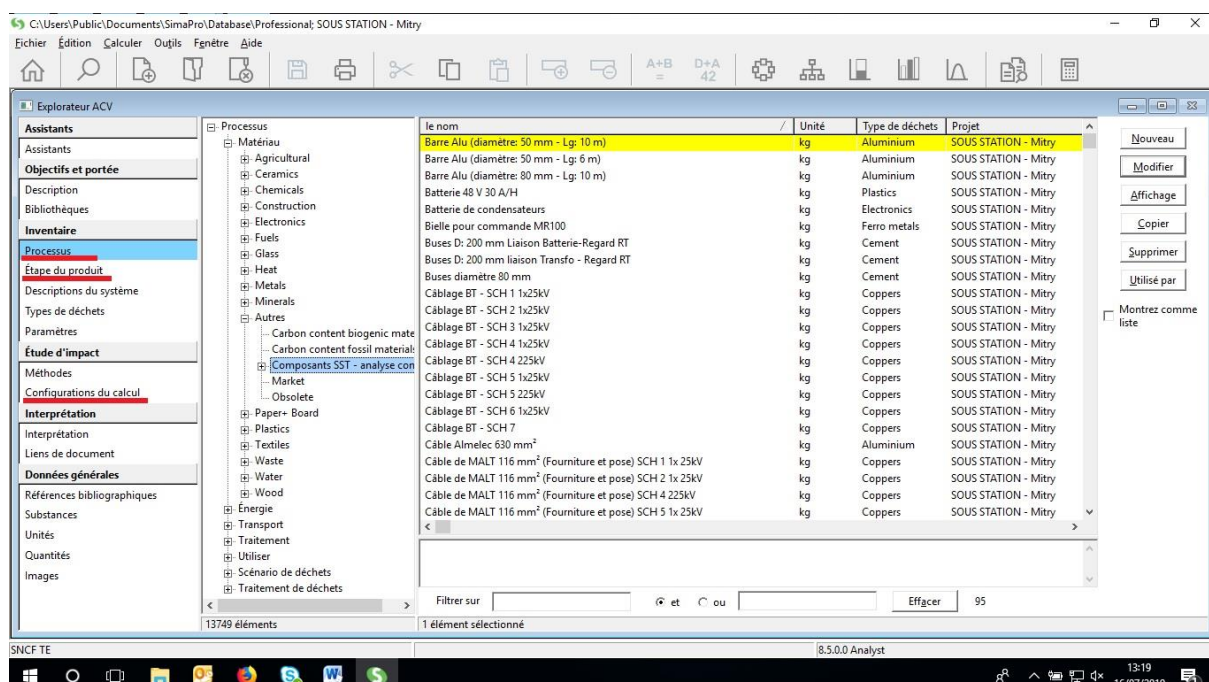
Annexe 9: Planning de travail

	September 2019					August 2019					July 2019					June 2019					May 2019					April 2019				
Task description	23	16	9	2	2	26	19	12	5	5	29	22	15	8	1	24	17	10	3	3	27	20	13	6	6	29	22	15	8	1
Soutenance	5	5	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rédaction rapport de stage	3	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Intégration LEA	3	5	5	5	5	5	5	5	4	4	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Modélisation sur logiciel de calcul								1	3	4	4	5	5	5	5	5	5	4	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Collecte des données														1	1	2	2	4	5	5	5	5	5	4	4	3	3	2	0	0
Choix des composants pour les ACVs																										4	5	5	0	0
Lancement du projet																														
Z	5	8	12	12	10	10	10	10	11	9	10	9	9	9	9	9	9	10	10	10	8	7	5	4	4	7	8	8	5	5
working hour	21	35	35	35	35	35	35	28	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	28	28	35	35	28	28	28	28	35	35	35	35
working week	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
working days	3	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	5	4	4	4	4	5	5	5

Annexe 10: Schéma Unifilaire de Mitry - SNCF Réseau, 2013



Annexe 12: Présentation du logiciel SimaPro



Annexe 13: Table de conversion de données récoltées aux données adoptées sur SimaPro

Distribution récolté	Distribution adoptée sur SimaPro
Distribution en bateau	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for Conseq, S
Distribution en camion	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {GLO} market for Conseq, S
Utilisation d'énergie récoltée	Utilisation d'énergie adoptée sur SimaPro
Pertes électriques de HT	Electricity, high voltage {FR} market for Conseq, S
Matériau/Procédé récolté	Matériau/Procédé adopté sur SimaPro
Acier TS 34-1	Chromium steel pipe {GLO} market for
Acier 100HV	Steel, unalloyed + Zinc coat, pieces {GLO} market for Conseq, S
Acier S235JR, galvanisé à chaud	Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for Conseq, S
Aciers C22	Ferronickel, 25% Ni alloy {GLO} market for Conseq, S
Acier inox A2-70 ou A4-70 ou A4-80	Iron-nickel-chromium alloy {GLO} market for Conseq, S
Acier inox Cr-Ni	Iron-nickel-chromium alloy {GLO} market for Conseq, S
Acier inox X2CrNiMo17-12-2	Iron-nickel-chromium alloy {GLO} market for Conseq, S
Acier inox A5-80, résistance à la rupture	Reinforcing steel {GLO} market for Conseq, S
Acier inox X10CrNi18-8	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for Conseq, S
Acier X10CrNi18-10	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for Conseq, S
Aluminium écroui	Aluminium removed by milling, average {GLO} market for Conseq, S
Aluminium moulé	Aluminium removed by milling, average {GLO} market for Conseq, S
Aluminium forgé	Aluminium removed by drilling, conventional {GLO} market for Conseq, S
Al-Acier / moulée par gravité en coquille	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Conseq, S
Al.Mg 30-2,5	Aluminium alloy, AlMg3 {GLO} market for Conseq, S
Al EN AW-Al Mg4	Aluminium alloy, AlMg3 {GLO} + [Galvanisé à chaud et coudé] Welding, arc, aluminium {RER} processing Conseq, S et Zinc coat, pieces {RER} zinc coating, pieces Conseq, S
Béton, massif caténaire	Concrete, 35MPa {GLO} market for Conseq, S

Béton, dalles SST	Concrete, sole plate and foundation {RoW} market for Conseq, S
Béton, pour caniveaux	Fibre cement facing tile, small format {GLO} market for Conseq, S
Béton, pour Buses et massifs	Concrete, normal {RoW} market for Conseq, S
Bronze	Bronze {GLO} market for Conseq, S
Bronze, câble	Bronze {GLO} + Wire drawing, copper {RER} processing Conseq, S
Céramique, émaillé	Sanitary ceramics {GLO} market for + Enamelling {GLO} market for Conseq, S
Composant Electronique Actif	Electronic component, active, unspecified {GLO} market for Conseq, S
Composite	Glass fibre {GLO} market for + Epoxy resin insulator, SiO2 {GLO} market for Conseq, S
Cuivre	Copper {GLO} market for Conseq, S
Cuivre, câble	Copper {GLO} + Wire drawing, copper {RER} processing Conseq, S
CuAl10Fe2 C-GM moulées par gravité en coquille	Copper {GLO} + Aluminium removed by drilling, conventional {GLO} + Pig iron {GLO} + Casting, bronze {RoW} processing Conseq, S
Fontes	Cast iron {GLO} market for Conseq, S
Galvanisation à chaud	Zinc coat, pieces {GLO} market for Conseq, S
Huile de lubrification	Lubricating oil {GLO} market for Conseq, S
Laiton	Brass {RoW} market for brass Conseq, S
NBR	Synthetic rubber {GLO} market for Conseq, S
Huile minéral/ Paraffine	Paraffin {RER} production Conseq, S
Plastique	Polycarbonate {GLO} market for Conseq, S
Polyéthylène / PEHD	Polyethylene, high density, granulate, recycled {Europe without Switzerland} market for Conseq, S
PVC noir	Polyvinylidenchloride, granulate {GLO} market for Conseq, S
Résine époxy	Epoxy resin {GLO} market for epoxy resin Conseq, S
SF6	Sulfur hexafluoride, liquid {RER} production Conseq, S
Silicone	Silicone product {GLO} market for Conseq, S
Soudage	Welding, arc, steel {RER} processing Conseq, S
Verre trempé	Flat glass, coated {GLO} market for + Tempering, flat glass {GLO} market for Conseq, S
ZnO ₂	Zinc oxide {RER} production Conseq, S

Annexe 14: Assemblage complet de Mitry sur SimaPro

le nom
ACV MITRY avec compléments

Commentaire

Fonction de calcul

- Réseau
- Arborecence
- Analyser
- Comparer
- Analyse d'incertitude

Méthode
ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.01

Produit	Quantité	Unité	Projet
Schéma 1 1x25kV	1	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 2 1x25kV	4	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 3 1x25kV	2	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 4 1x25kV	4	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 5 1x25kV	1	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 6 1x25kV	1	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 4 225kV	2	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 5 225kV	1	p	SOUS STATION - Mitry
Schéma 7 225kV changement TR	2	p	SOUS STATION - Mitry
Compléments	1	p	SOUS STATION - Mitry

Bibliothèque actuelle
Ecoinvent 3 - consequential - system

Suffixe
Conseq, S

Annexe 15: Extrait du tableau de résultats à l'intégration sur LEA pour le projet caténaire

composants	symbole	poids (kg)	Global Warming	Human health	Ecosystems	Resources
			PU DE REFERENCE kg CO2 eq	PU DE REFERENCE DALY	PU DE REFERENCE specier.yr	PU DE REFERENCE USD2013
boulon H M18-75/42, 1 écrou H, percé	1601724	0,271	2,11	4,14248E-06	7,0081E-09	0,140656681
boulon H M18-100/42, 1 écrou H, percé	1601784	0,332	2,5863121	5,07492E-06	8,58557E-09	0,17231745
boulon H M16-40/40	1604772	0,130	0,64224811	1,2944E-05	1,45747E-08	0,07181214
boulon H M16-50/38	1604806	0,150	0,741055511	1,49353E-05	1,6817E-08	0,082860162
boulon H M16-55/38, 1 écrou H	1604837	0,014	0,069165181	1,39397E-06	1,56958E-09	0,007733615
vis H, M10-45/45	1630686	0,035	0,156734949	3,45735E-06	3,88146E-09	0,017559949
vis H, M12-40/40	1630741	0,062	0,27764476	6,12446E-06	6,87573E-09	0,031106195
vis H, M12-45/45	1630899	0,040	0,179125655	3,95126E-06	4,43595E-09	0,020068513
rondelle M12	1680152	0,008	0,0360036	7,91192E-07	8,88855E-10	0,004037018
rondelle plate M14	1680156	0,006	0,03006605	6,12486E-07	6,74354E-10	0,003116792
rondelle M14	1680322	0,012	0,018731479	1,29989E-08	2,80468E-11	0,001040657
rondelle M16	1680324	0,014	0,022129974	1,62492E-08	3,44601E-11	0,001233675
goupille fendue 3,2x25-A	1697264	0,001	0,00450045	9,8899E-08	1,11107E-10	0,000504627
goupille fendue 5x36-A	1697342	0,001	0,00450045	9,8899E-08	1,11107E-10	0,000504627
axe d'articulation avec tête de 14-45, type B	1742818	0,065	0,292529248	6,42843E-06	7,22195E-09	0,03280077
axe d'articulation avec tête 8-40	1757657	0,020	0,090008998	1,97798E-06	2,22214E-09	0,010092545
axe d'articulation avec tête de 10-40, type B	1757682	0,030	0,135013496	2,96697E-06	3,33321E-09	0,015138817
axe d'articulation avec tête de 12-40, type B	1757687	0,050	0,2250225	4,94495E-06	5,55535E-09	0,025231362
axe d'articulation avec tête de 12-75, type B	1757694	0,075	0,337533739	7,41742E-06	8,33302E-09	0,037847043
axe d'articulation avec tête de 16-50, type B	1757703	0,100	0,232622832	4,68684E-07	6,65106E-10	0,018624116
axe d'articulation avec tête de 16-60, type B	1757710	0,108	0,251231969	5,06177E-07	7,18312E-10	0,020113946
câble inox 37,92mm²	3682411	0,345	0,415705238	1,37985E-05	1,52294E-08	0,068399132
câble 25mm² de section protégé par une gaine de plomb	8401785	0,267	1,252803646	1,69301E-05	2,9561E-08	0,11125964
câble Cu 145,8mm²	8411605	1,290	6,052871349	8,17969E-05	1,42823E-07	0,53754656
câble Cu 262mm² (ligne ou alimentation)	8411620	2,313	10,85294045	0,000146664	2,56085E-07	0,96383369
pendule rond 38,48mm²	8413854	0,342	3,131184076	4,32239E-05	7,53858E-08	0,27385682
fil rond caténaire normale 1500V, 104mm²	8413862	0,920	4,316776451	5,83358E-05	1,01858E-07	0,38336654
FIL DE CONTACT câble Cu 107mm²	8413887	0,951	16,22402186	0,000137205	2,79004E-07	1,3014899
FIL DE CONTACT 2x câble Cu 150mm²	8413892	1,334	118,6940823	0,000410666	1,29064E-06	8,5142703
pendule en câble bronze 12mm², avec embouts à cosse	8414200	0,110	1,365766139	1,9264E-05	3,26963E-08	0,14193132
câble porteur bronze 65mm²	8414210	0,590	3,730234819	5,17897E-05	8,79819E-08	0,39026851
conducteur protégé	8414211	1,130	7,005612093	9,89289E-05	1,67898E-07	0,72766067
conducteur protégé 116mm²	8414215	1,730	10,72540617	0,000151457	2,57048E-07	1,1140292
câble porteur bronze 116mm²	8414240	1,050	6,63855356	9,21681E-05	1,56578E-07	0,69454566
conducteur de protection aérien 93,3mm²	8416742	0,445	2,523650476	4,8825E-06	9,401E-09	0,1314787
câble Al. Ac 288mm²	8416775	1,117	8,636629054	1,66495E-05	3,36589E-08	0,42466671
contreplaqué	8800054	2,000	4,307547113	7,7268E-06	1,0331E-08	0,32681904
tige filetée de 16-400/100	8800224	0,780	1,822838162	3,67432E-06	5,22101E-09	0,14562482
tige filetée M22 350/100	8800268	1,380	3,210195141	6,46783E-06	9,17847E-09	0,2570128
etrier de 10x50x65	8800738	0,100	0,223807028	3,17098E-07	5,43209E-10	0,016501779
etrier de 10x50x60	8802150	0,130	1,277043932	4,78491E-06	7,8667E-09	0,12582722
etrier de 10x27x55	8802426	0,102	0,217404703	3,05888E-07	5,23729E-10	0,016233793
chapeau de serrage à 2 étriers	8802495	0,065	0,58532114	1,13186E-06	2,34649E-09	0,024859007
ens. Coquillage à chape avec dispositif de verrouillage n	8802525	0,540	0,874506325	1,5744E-06	1,58752E-09	0,05370346
etrier de 12x36x65	8802544	0,140	0,29839861	4,19847E-07	7,18844E-10	0,022281677

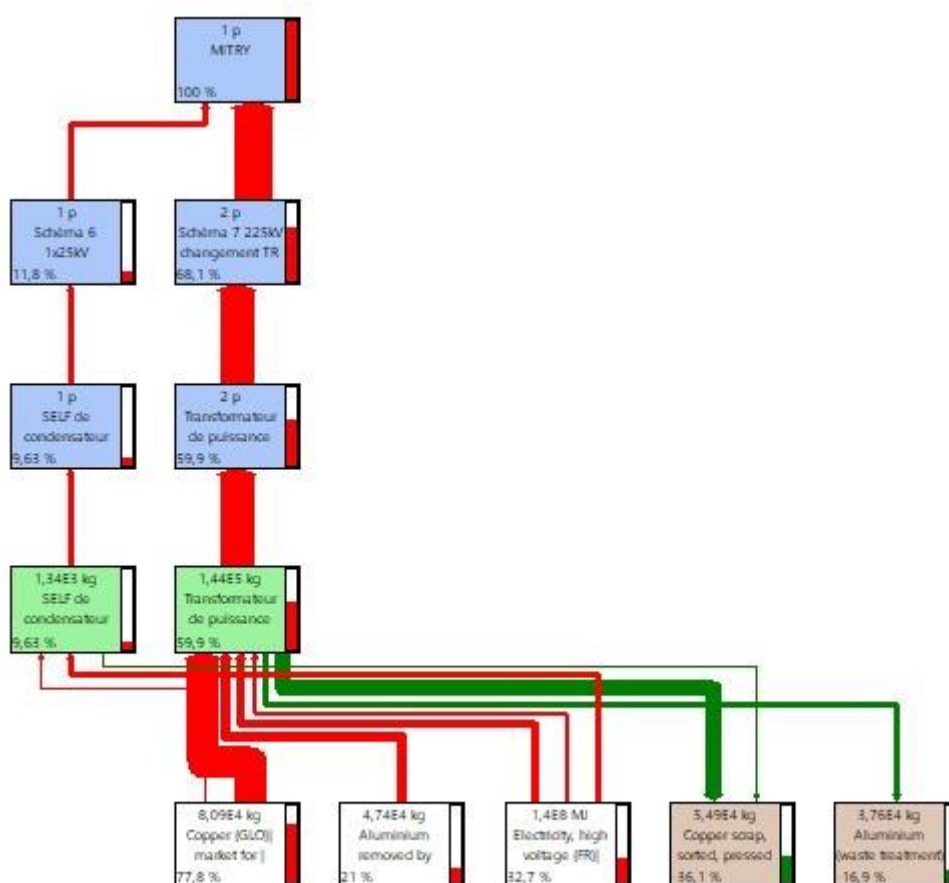
Annexe 16: Ensemble d'hypothèses autour des poteaux modélisés en bois

Types de poteau		Matériau sur SimaPro			
Azobé		Roundwood, azobe from sustainable forest management, under bark {GLO}			
Meranti		Roundwood, meranti from sustainable forest management, under bark {GLO}			
Eucalyptus		Roundwood, eucalyptus ssp. from sustainable forest management, under bark {GLO}			
Traitement surface		Wood cladding, softwood {RoW} production Conseq, S			
Spécifications					
Hauteur (m)	9,15	vol (m3)	5,75	Section (cm)	20x20
surface (m²)	densité (kg/m³)	poids (kg)	parcours (km)	fin de vie adoptée	
1,8300	1120,00 - hypothétique	6438,82	650,00 - hypothétique	90% incinération avec génération de l'énergie	

Annexe 17: Facteurs de pesage et normalisation du score Ecopoint – BRE Centre for Sur Sustainable Products, 2015

BRE Impact Categories	Units	Normalisation factor	Weighting factor
Climate change	kg CO ₂ eq. (100 yr)	12,300	21.6
Water extraction	m ³ water extracted (gross)	377	11.7
Mineral resource extraction	Tonnes of mineral extracted	24.4	9.8
Stratospheric ozone depletion	kg CFC-11 eq.	0.217	9.1
Human toxicity	kg 1,4 dichlorobenzene (1,4-DB) eq.	19,700	8.6
Ecotoxicity to fresh water	kg 1,4 dichlorobenzene (1,4-DB) eq.	1,320	8.6
Nuclear waste (higher level)	mm ³ high level waste	23,700	8.2
Ecotoxicity to land	kg 1,4 dichlorobenzene (1,4-DB) eq.	123	8.0
Waste disposal	Tonnes of solid waste	3.75	7.7
Fossil fuel depletion	MJ	273,000	3.3
Eutrophication	kg phosphate (PO ₄) eq.	32.5	3.0
Photochemical ozone creation	kg ethene (C ₂ H ₄) eq.	21.5	0.2
Acidification	kg sulfur dioxide (SO ₂) eq.	71.2	0.05

Annexe 18: Réseau d'impact de la Sous-Station de Mistry



Annexe 19: Chiffrage des impacts de la Sous-Station de Mityr

Results:		Étude d'impact										
Méthode:		RecPiPe 2016 Endpoint (H) V1.01										
Indicateur:		Étude de dommages										
Exclure les processus d'infrastructure:		Oui										
Exclure les émissions à long terme:		Oui										
Per/Impact category:		Non										
Sorted on item:		Categorie de dommages										
Categorie de dommages:		Categorie d'Impact										
Human health		Total										
Ecosystems		Schéma 1.1X25KV										
Resources		Schéma 2.1X25KV										
		Schéma 3.1X25KV										
		Schéma 4.1X25KV										
		Schéma 5.1X25KV										
		Schéma 6.1X25KV										
		Schéma 7.225KV										
		Compléments										
Global warming	kg CO2 eq	2.932E+06	1.367E+04	2.052E+05	2.064E+04	9.096E+04	1.190E+05	4.375E+05	4.480E+04	4.447E+04	1.910E+06	4.516E+04
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	5.244E+00	7.174E-03	9.159E-02	1.212E-02	7.322E-02	3.506E-01	1.181E+00	3.584E-02	6.481E-02	3.385E+00	4.249E-02
Ionizing radiation	kga, Co-60 eq	5.538E+03	4.750E+01	2.346E+02	7.656E+01	4.198E+02	2.322E+02	7.862E+02	1.028E+02	7.251E+01	3.367E+03	1.996E+02
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	1.174E+04	3.517E+01	1.716E+02	5.591E+01	2.956E+02	6.069E+02	2.097E+03	1.191E+02	2.086E+02	7.953E+03	1.960E+02
Ozone particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1.139E+04	4.005E+01	5.138E+02	6.448E+01	3.597E+02	5.545E+02	1.204E+03	1.871E+02	3.925E+02	7.843E+03	2.286E+02
Acid formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	1.202E+04	3.584E+01	1.758E+02	5.700E+01	3.022E+02	6.222E+02	2.149E+03	1.216E+02	2.129E+02	8.141E+03	2.007E+02
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	2.368E+04	5.767E+01	3.506E+02	8.944E+01	5.927E+02	1.309E+03	2.091E+03	3.995E+02	9.233E+02	1.741E+04	4.575E+02
Freshwater eutrophication	kg P eq	3.424E+03	1.782E+01	1.719E+02	3.192E+01	1.948E+02	8.493E+01	2.160E+02	5.919E+01	1.399E+02	2.403E+03	1.053E+02
Marine eutrophication	kg N eq	1.108E+02	2.629E-01	3.105E+00	4.670E-01	2.661E+00	3.518E+00	1.173E+01	1.134E+00	2.905E+00	8.226E+01	2.458E+00
Terrestrial ecotoxicity	kg 14-DCB eq	1.685E+08	2.152E+05	6.736E+06	3.672E+05	3.329E+06	4.543E+06	1.217E+07	3.047E+06	7.244E+06	1.252E+08	5.643E+06
Freshwater ecotoxicity	kg 14-DCB eq	7.742E+03	1.073E+02	7.409E+02	1.927E+02	1.029E+03	2.240E+02	8.152E+02	9.033E+01	1.775E+02	4.209E+03	1.560E+02
Marine ecotoxicity	kg 14-DCB eq	7.060E+04	2.795E+02	3.676E+03	4.952E+02	3.096E+03	2.023E+03	5.284E+03	1.214E+03	2.711E+03	4.975E+04	2.076E+03
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB eq	1.240E+05	2.971E+02	1.658E+04	3.889E+02	1.111E+03	4.405E+03	1.790E+04	2.377E+03	2.906E+03	7.508E+04	2.407E+03
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB eq	4.587E+06	8.239E+03	1.629E+05	1.444E+04	1.064E+05	1.577E+05	4.972E+05	6.781E+04	1.539E+05	3.281E+06	1.197E+05
Land use	m2a crop eq	5.897E+06	5.897E+02	1.028E+04	1.037E+03	6.427E+03	1.771E+05	6.712E+05	2.189E+03	3.408E+03	1.575E+06	4.608E+03
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1.298E+05	4.410E+02	1.264E+04	7.469E+02	4.253E+03	5.641E+03	1.506E+04	2.105E+03	3.743E+03	8.194E+04	3.211E+03
Fossil resource scarcity	kg oil eq	6.673E+05	3.610E+03	3.564E+04	5.618E+03	2.461E+04	2.641E+04	9.482E+04	8.771E+03	1.059E+04	4.457E+05	1.154E+04
Water consumption	m3	3.555E+04	1.116E+02	2.795E+03	1.721E+02	8.770E+02	1.362E+03	4.897E+03	5.558E+02	6.583E+02	2.327E+04	8.466E+02