



Adressé à :

ELIA ASSET S.A.
Boulevard de L'Empereur, 20
1000 Bruxelles

BOUCLE DU HAINAUT - RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES

Demande de révision du Plan de
secteur

PHASE 1

MARS 2026

Personne de contact :

Pierre-Yves ANCION
Directeur d'études
Tél. +32 (0)2 738 78 73
py.ancion@stratec.eu



ACCÉLÉRER LE DÉVELOPPEMENT DURABLE DES TERRITOIRES

Contenu du RIE

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Chapitre 1 : Introduction

Chapitre 2 : Description du projet de révision du Plan de secteur

Chapitre 3 : Analyse des besoins

Chapitre 4 : Analyse des options technologiques

Chapitre 5 : Compatibilité des objectifs du projet de révision du Plan de secteur au regard de l'article D.I.1 du CoDT et d'autres plans et programmes pertinents

Chapitre 6 : Identification des alternatives au projet de révision de plan de secteur

PHASE 2 : ANALYSE TERRITORIALE GLOBALE ET ÉVALUATION DES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES DU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR ET DE SES ALTERNATIVES

PARTIE 1 :

Chapitre 1 : Caractéristiques humaines et environnementales actuelles du territoire concerné et évolution probable

PARTIE 2A :

Chapitre 2 : Evaluation des incidences environnementales probables de la mise en œuvre du projet de révision et de ses alternatives

2.1 : Méthodologie d'analyse

2.2 : Urbanisme, biens matériels et patrimoniaux

2.3 : Paysage

PARTIE 2B :

2.4 : Population et domaines social et économique

2.5 : Mobilité, transports et autres infrastructures

2.6 : Champs électromagnétiques

2.7 : Bruits et vibrations

2.8 : Faune, flore et biodiversité

2.9 : Géologie et pédologie

2.10 : Hydrologie et hydrogéologie

2.11 : Energie et climat

2.12 : Qualité de l'air

PARTIE 3 :

Chapitre 3 : Synthèse des incidences, des recommandations et suivi de la mise en œuvre du projet de révision

Chapitre 4 : Description de la méthode d'évaluation et difficultés rencontrées

ATLAS CARTOGRAPHIQUE

RECUEIL DES ANNEXES

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| LEXIQUE _____ | 12 |
| LISTE DES ACRONYMES _____ | 14 |
| PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES _____ | 16 |
| 1. INTRODUCTION _____ | 17 |
| 1.1. OBJET GÉNÉRAL DU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR _____ | 17 |
| 1.2. RAPPEL DE LA PROCÉDURE DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR _____ | 17 |
| 1.3. ACTEURS DE LA RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR _____ | 21 |
| 1.3.1. Décideur _____ | 21 |
| 1.3.2. Initiateur de la demande _____ | 21 |
| 1.3.3. Auteur du rapport sur les incidences environnementales _____ | 22 |
| 1.4. OBJECTIFS ET CONTENU DU PRÉSENT RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES _____ | 24 |
| 1.5. CONTRAINTES POTENTIELLES RELEVÉES PAR L'ARRÊTÉ ADOPTANT LE PROJET DE PLAN _____ | 25 |
| 2. DESCRIPTION DU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR _____ | 25 |
| 2.1. OBJET DE LA RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR _____ | 25 |
| 2.1.1. Etudes préalables ayant conduit à la détermination du projet de périmètre de réservation _____ | 26 |
| 2.1.1.a. Etudes sur la nécessité et sur les technologies du projet _____ | 26 |
| 2.1.1.b. Etudes de tracé _____ | 29 |
| 2.1.2. Localisation du projet de périmètre de réservation _____ | 30 |
| 2.1.3. Situation cadastrale _____ | 36 |
| 2.1.4. Affectations au Plan de secteur _____ | 37 |
| 2.2. OBJECTIFS DE LA RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR _____ | 37 |
| 2.2.1. Justification en lien avec le contexte énergétique et climatique international, national et régional _____ | 38 |
| 2.2.1.a. Contexte international _____ | 38 |
| 2.2.1.b. Contexte national _____ | 39 |
| 2.2.1.c. Contexte régional _____ | 39 |
| 2.2.1.d. Objectifs du projet Boucle du Hainaut relatifs au contexte énergétique et climatique _____ | 40 |
| 2.2.2. Justification en lien avec le contexte économique _____ | 43 |
| 2.3. DESCRIPTION DU PROJET SOUS-JACENT DE LIGNE AÉRIENNE 380 kV _____ | 44 |
| 2.3.1. Formes et caractéristiques des installations projetées _____ | 47 |
| 2.3.2. Charge nominale et charge annuelle moyenne _____ | 51 |
| 2.4. DESCRIPTION DU CHANTIER DU PROJET SOUS-JACENT DE LIGNE AÉRIENNE 380 kV _____ | 51 |
| 2.4.1. Phasage de chantier _____ | 51 |
| 2.4.1.a. Travaux de préparation _____ | 51 |
| 2.4.1.b. Travaux de génie civil _____ | 52 |
| 2.4.1.c. Assemblage et montage du pylône _____ | 53 |
| 2.4.1.d. Tirage des conducteurs _____ | 53 |
| 2.4.1.e. Mise en service de la ligne _____ | 54 |
| 2.4.1.f. Travaux de démobilitation _____ | 54 |
| 2.4.1.g. Etats des lieux de sortie et indemnités des éventuels dégâts _____ | 55 |
| 2.4.2. Chantier et surplomb en zone boisée _____ | 55 |
| 2.4.3. Engins de chantier _____ | 56 |
| 3. ANALYSE DES BESOINS _____ | 57 |
| 3.1. PRÉAMBULE _____ | 57 |
| 3.2. LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE EUROPÉEN ET BELGE _____ | 58 |
| 3.2.1. Présentation générale du réseau _____ | 58 |
| 3.2.2. L'équilibre production – consommation et planification du réseau _____ | 61 |
| 3.2.3. Le critère N-1 _____ | 61 |
| 3.3. ÉVOLUTIONS DU SECTEUR ÉNERGÉTIQUE _____ | 62 |
| 3.3.1. Objectifs climatiques _____ | 62 |
| 3.3.1.a. Electrification de la société _____ | 62 |
| 3.3.1.b. Augmentation de la production d'énergies renouvelables _____ | 66 |
| 3.3.2. Prolongation du nucléaire _____ | 71 |
| 3.4. FAIBLESSES DU RÉSEAU JUSTIFIANT LE PROJET BOUCLE DU HAINAUT _____ | 72 |
| 3.4.1. Saturation de la Liaison Horta-Mercator _____ | 72 |
| 3.4.1.a. Flux ouest-est existants _____ | 72 |
| 3.4.1.b. Flux ouest-est projetés _____ | 73 |
| 3.4.1.c. Impact de la prolongation du nucléaire _____ | 77 |

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

| | |
|--|------------|
| 3.4.1.d. Conclusion relative à la faiblesse du réseau | 79 |
| 3.4.2. Maillage insuffisant du backbone belge et européen | 80 |
| 3.4.3. Saturation du réseau 150 kV dans le Hainaut | 82 |
| 3.5. EVOLUTION PROBABLE SI LE PROJET N'EST PAS MIS EN ŒUVRE | 88 |
| 3.6. CONCLUSION CONCERNANT LES BESOINS DU PROJET | 89 |
| 4. ANALYSE DES OPTIONS TECHNOLOGIQUES | 91 |
| 4.1. PRÉAMBULE | 91 |
| 4.2. LES TECHNOLOGIES EXISTANTES | 92 |
| 4.3. DÉCLINAISON DES TECHNOLOGIES EN CONFIGURATIONS ADAPTÉES AU PROJET BOUCLE DU HAINAUT | 95 |
| 4.4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES, ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES | 96 |
| 4.4.1. Exclusions techniques | 96 |
| 4.4.2. Caractéristiques techniques | 99 |
| 4.4.3. Caractéristiques économiques | 101 |
| 4.4.4. Caractéristiques environnementales | 102 |
| 4.4.5. Synthèse des principales caractéristiques | 105 |
| 4.5. CHOIX DE LA TECHNOLOGIE | 109 |
| 4.5.1. Choix entre les technologies HVAC ou HVDC | 110 |
| 4.5.2. Choix des technologies HVAC | 111 |
| 4.6. LIAISON HYBRIDE AÉRO-SOUTERRAINE | 112 |
| 4.6.1. Caractéristiques techniques, économiques et environnementales d'une liaison aéro-souterraine HVAC | 112 |
| 4.6.2. Distance maximale d'enfouissement | 113 |
| 4.7. ANALYSE DE LA PERTINENCE DE LA TENSION DE LA LIAISON BOUCLE DU HAINAUT | 116 |
| 4.8. ANALYSE DE LA PERTINENCE DE LA CAPACITÉ DE LA LIAISON BOUCLE DU HAINAUT | 119 |
| 4.9. CHOIX DES POSTES D'EXTRÉMITÉ DE LA NOUVELLE LIAISON AC | 121 |
| 4.10. CONCLUSION RELATIVE AUX OPTIONS TECHNOLOGIQUES | 122 |
| 5. COMPATIBILITÉ DES OBJECTIFS DU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR AU REGARD DE L'ARTICLE D.I.1 DU CoDT ET D'AUTRES PLANS ET PROGRAMMES PERTINENTS | 124 |
| 5.1. LIENS AVEC D'AUTRES PLANS ET PROGRAMMES | 124 |
| 5.1.1. A l'échelle européenne | 124 |
| 5.1.1.a. Union européenne - Clean Energy Package | 124 |
| 5.1.2. A l'échelle nationale | 124 |
| 5.1.2.a. Plan National intégré Energie Climat Belge 2021-2030 | 124 |
| 5.1.2.b. Accord de Gouvernement Fédéral (DPF) | 125 |
| 5.1.3. A l'échelle régionale | 125 |
| 5.1.3.a. Schéma de Développement du Territoire (SDT) | 125 |
| 5.1.3.b. Plan air climat énergie à l'horizon 2030 (PACE 2030) | 127 |
| 5.1.3.c. Déclaration de Politique Régionale (DPR) | 127 |
| 5.1.3.d. Contribution wallonne au Plan national Energie Climat 2030 | 127 |
| 5.1.3.e. Troisième stratégie wallonne de développement durable (SWDD) | 128 |
| 5.1.3.f. Plan wallon environnement – santé 2025-2030 (ENVleS) | 128 |
| 5.1.4. A l'échelle locale | 130 |
| 5.1.4.a. Plan d'action en faveur de l'énergie durable et du climat (PAEDC) et la Convention des maires | 130 |
| 5.2. JUSTIFICATION DU PROJET DE PLAN AU REGARD DE L'ARTICLE D.I.1 DU CoDT | 130 |
| 6. IDENTIFICATION DES ALTERNATIVES AU PROJET DE RÉVISION DE PLAN DE SECTEUR | 134 |
| 6.1. INTRODUCTION | 134 |
| 6.2. TRANSCRIPTION SPATIALE DES GRANDES OPTIONS RÉGIONALES | 134 |
| 6.3. RECHERCHE ET PRÉSENTATION D'ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES AU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR | 134 |
| 6.3.1. Alternative aéro souterraine | 135 |
| 6.3.2. Analyse de la contre-proposition de REVOLHT | 135 |
| 6.3.2.a. Recherche d'alternatives technologiques | 135 |
| 6.3.2.b. Présentation du concept alternatif de REVOLHT en HVDC | 136 |
| 6.3.2.c. Dialogue entre Elia et REVOLHT | 138 |
| 6.3.2.d. Conclusion sur la contre-proposition de REVOLHT | 155 |
| 6.3.3. Analyse de l'alternative de liaison par câbles via le réseau navigable | 157 |
| 6.4. ANALYSE DE L'ALTERNATIVE PLANOLOGIQUE VISANT L'INSCRIPTION DE LA LIGNE 380kV EN PLACE DES LIGNES EXISTANTES 150kV | 158 |
| 6.4.1. Analyse de la mise en œuvre technique | 164 |
| 6.4.2. Analyse des incidences environnementales | 168 |

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

| | |
|--|------------|
| 6.4.3. Analyse de l'impact sur la stabilité du réseau | 179 |
| 6.4.4. Analyse de l'impact sur les délais de mise en œuvre et les coûts | 179 |
| 6.4.5. Conclusion sur l'analyse de l'alternative planologique | 180 |
| 6.5. ANALYSE DE LA PERTINENCE DE LA LOCALISATION DES COMPOSANTES (POINTS DE RACCORDEMENTS) DU PROJET DE RÉVISION DE PLAN DE SECTEUR | 181 |
| 6.6. RECHERCHE ET PRÉSENTATION D'ALTERNATIVES DE LOCALISATION AU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR | 182 |
| 6.6.1. Construction du réseau d'alternatives | 182 |
| 6.6.2. Quantification des contraintes environnementales | 185 |
| 6.6.3. Sélection des meilleurs itinéraires et des tronçons alternatifs y afférents | 195 |
| 6.6.3.a. Exemple d'analyse détaillée d'itinéraires | 196 |
| 6.6.3.b. Analyse de la sensibilité aux facteurs de pondération | 198 |
| 6.6.3.c. Le réseau de tronçons alternatifs étudiés | 210 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Alternative REVOLHT (source : Alternative technologique proposée par l'asbl REVOLHT) | 28 |
| Figure 2 : Schéma du projet de périmètre de réservation (source du fond de plan : ESRI - world-topographic-map) | 31 |
| Figure 3: Localisation du périmètre de réservation sur la carte administrative (source fond de plan : IGN - Geo.be) | 32 |
| Figure 4 : Projet de périmètre de réservation : tronçons I à V (au nord) | 33 |
| Figure 5 : Projet de périmètre de réservation : tronçons VI à X (au sud) | 34 |
| Figure 6: Carte du réseau 380 kV et 220 kV en Belgique (source : https://boucleduhainaut.be/) | 41 |
| Figure 7 : Description d'un pylône et de ses composants (source : Dossier de base) | 45 |
| Figure 8 : Pylône d'alignement (source : Elia) | 46 |
| Figure 9 : Pylône d'angle (source : Elia) | 46 |
| Figure 10 : Pylône d'arrêt (source : Elia) | 47 |
| Figure 11 : Pylône d'extrémité (source : Elia) | 47 |
| Figure 12 : Pylônes portant une ligne de 380 kV compact (à gauche) et de 150 kV (à droite) | 48 |
| Figure 13 : Modèle de pylônes treillis et tubulaires existants et pays d'exploitation (source : Elia) | 50 |
| Figure 14 : Exemple d'accès en gravier (à gauche) et de portique de protection à droite (source : Elia, Etude d'incidences relative à la démolition et reconstruction de la ligne haute tension de 150 kV entre Gouy et Oisquercq, 2017) | 52 |
| Figure 15 : Assemblage et montage d'un pylône treillis (source : Elia) | 53 |
| Figure 16 : Poulies de tirage (à gauche) et poulies fixées aux consoles d'un pylône (à droite) (source : Etude d'incidences relative à la démolition et reconstruction de la ligne haute tension de 150 kV entre Gouy et Oisquercq, 2017) | 53 |
| Figure 17 : Installation de la corde dans les poulies de tirage par hélicoptère (source : Etude d'incidences relative à la démolition et reconstruction de la ligne haute tension de 150 kV entre Gouy et Oisquercq, 2017) | 54 |
| Figure 18 : Tireuse et freineuse utilisées pour la mise en place du câble | 54 |
| Figure 19 : Distances de sécurité nécessaires entre les arbres et les conducteurs d'une ligne aérienne (Source : Elia) | 55 |
| Figure 20 : Localisation de la Belgique au sein du réseau électrique européen (source : Entso-E) | 59 |
| Figure 21: Carte du réseau 380 kV et 220 kV (source : Plan fédéral de développement 2024-2034) | 60 |
| Figure 22: Évolution du secteur énergétique pour l'objectif de neutralité carbone (source : Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2024-2034) | 63 |
| Figure 23 : Evolution des ventes de systèmes de chauffage 2020-2024 (source : Febeg, 2024. <i>Résumé des statistiques annuelles sectorielles</i>) | 64 |
| Figure 24: Evolution du nombre de voitures particulières selon le carburant 2014-2024 en Belgique (source : Statbel) | 64 |
| Figure 25: Consommation finale d'énergie en 2024 en Belgique par secteur en Mtep (source : SPF Economie, 2025. Belgian Energy Data Overview – Édition juin 2025) | 65 |
| Figure 26: Projection de la consommation annuelle d'électricité (source : Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036) | 66 |
| Figure 27: Production d'électricité issue de sources renouvelables en Belgique en TWh (source : Febeg, 2024. Statistiques électricité) | 67 |
| Figure 28: Evolution supposée de la puissance de production photovoltaïque (à gauche) et éolienne terrestre (à droite) selon plusieurs scénarios pour la Belgique (source: Elia - Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036) | 67 |
| Figure 29: Parcs éoliens belges existants en mer du Nord (source : Elia, 2020. Communiqué de presse du vendredi 29 mai 2020 : 'Raccordement réussi du dernier parc éolien offshore à la prise électrique en mer du Nord') | 68 |
| Figure 30 : Développement projeté de la production éolienne offshore et de l'île énergétique Princesse Elisabeth (source : Elia) | 69 |
| Figure 31: Evolution supposée de la puissance de production éolienne offshore selon plusieurs scénarios pour la Belgique (source : Elia - Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036) | 70 |
| Figure 32: Répartition de la production d'énergie renouvelable en Europe (source : Elia - Plan de Développement Fédéral 2024-2034) | 71 |
| Figure 33: Projets de développement du réseau haute tension belge d'ici 2040 (Elia - Plan de Développement Fédéral 2024-2034) | 71 |

Figure 34 : Flux transitant entre les régions ouest et est via la liaison Horta-Mercator en 2024 (source : Renseignements fournis par Elia) 73

Figure 35: Projections à l’horizon 2033 des flux d’ouest en est (source : Elia, 2025) 75

Figure 36: Projections à l’horizon 2040 des flux d’ouest en est. (source : Elia)..... 76

Figure 37: Bilan (2019) et projections des importations et des exportations sur l’ensemble des interconnexions de la Belgique à l’horizon 2025, 2030 et 2040 (source : Renseignements fournis par Elia dans le cadre de l’analyse des experts indépendants) 77

Figure 38 : Simulation des flux ouest-est en fonction des différents scénarios nucléaires (source : Elia, 2025)..... 78

Figure 39 : Réseau de transport existant entre les postes d’Avelgem et de Courcelles (source : Elia)82

Figure 40: Somme (asynchrone) des pointes de puissance individuelles 2020 des grands acteurs industriels et économiques raccordés au réseau Elia (à tous niveaux de tension de 380kV à 30kV), par zone électrique (source : Elia) 83

Figure 41: Situation de consommation dans le Hainaut (en haut) et à l’ouest du Hainaut (en bas) en 2020 (source : Elia 2021, Renseignements fournis à l’experte Bekolo) 84

Figure 42: Evolution attendue dans le Hainaut à l’horizon 2030 du total de la charge à un même instant (synchrone) sur le réseau 150kV uniquement, pour tous acteurs confondus (secteur résidentiel compris). (Source : Elia) 85

Figure 43 : Demande de raccordement client par région (source : Elia) 86

Figure 44 : Capacité du réseau pour les consommateurs à l’horizon 2027 (Date de consultation : 28/08/25, source : <https://www.elia.be/fr/clients/raccordement/capacite-d-accueil-du-reseau>) 86

Figure 45: Situation de consommation dans le Hainaut (en haut) et à l’ouest du Hainaut (en bas) avec l’ajout de la Boucle du Hainaut (source : Elia 2021, renseignements fournis à l’experte Bekolo) 87

Figure 46 : Description d’un pylône et de ses composants (source photo : Elia) 93

Figure 47 : Illustration des technologies de liaisons aériennes (à gauche), de câbles souterrains (au centre) et de GIL (à droite). (Source : Etude technologique, Elia, février 2019). 94

Figure 48 : Configuration parallèle de 3 connexions HVDC de 2GW (source : Elia) 96

Figure 49 : Options technologiques évaluées dans le cadre du projet Boucle du Hainaut. (Source : Etude technologique, Elia, février 2019). 99

Figure 50 : Illustration de la redistribution naturelle pour les systèmes AC et du risque de surcharge des lignes AC en cas de système hybride AC/DC. Hypothèse : capacité de chaque élément =3GW (source : Elia, présenté dans le cadre du dialogue avec REVOLHT) 100

Figure 51 : Coûts d’investissement des technologies estimés pour une liaison de 75 km de long (Source : Etude technologique, Elia, février 2019). 102

Figure 52 : Estimation du coût d’investissement des technologies pour une liaison de 88km de long (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d’une étude des coûts au Royaume-Uni) 102

Figure 53 : Exemple de zone de chantier pour une pose souterraine ici de 4 ternes 380 kV- 4GW sur la liaison Stevin. Cette liaison comprend 4 circuits (12 câbles) alors que la Boucle du Hainaut devrait en compter 6 (18 câbles) (source : Elia 103

Figure 54 : Exemple d’installation de puits d’inspections. Chaque puit mesure environ 2,8m x 2m sur 1,4 m de haut dont +/- 50 cm seront visibles hors sol (source : Elia) 104

Figure 55 : station de conversion AC-DC à Lixhe pour la liaison ALEGrO (1 GW) (source : Google earth et google street map)..... 104

Figure 56 : Poste de transition aérien / souterrain (Source : Etude technologique, Elia, février 2019) 112

Figure 57: Postes 380 kV entre lesquels la liaison pourrait être établie (source : Elia - Dossier de base) 121

Figure 58 : Carte récapitulative des projets à très haute tension sur la période 2024-2034 (source : Plan de développement fédéral 2024-2034) 137

Figure 59 : Schéma du concept alternatif de REVOLHT (proposition 1) (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT) 138

Figure 60 : Schéma unifilaire de la proposition 1 de REVOLHT (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT) 139

Figure 61 : Schéma unifilaire de la proposition 1 de REVOLHT et capacités de transport prévues sur les liaisons (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT) 140

Figure 62 : Proposition 1 de REVOLHT optimisée par Elia (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT) 142

Figure 63 : Proposition 2 de REVOLHT (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT) 143

| | |
|---|-----|
| Figure 64 : Proposition 2 de REVOLHT optimisée par Elia (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)..... | 145 |
| Figure 65 : Illustration de la complexité opérationnelle de la contre-proposition REVOLHT pour le scénario « Global Import » en 2040 (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)..... | 146 |
| Figure 66 : Illustration de la distribution des flux pour le scénario « Global Import » en 2040 pour la solution Elia Boucle du Hainaut (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)..... | 147 |
| Figure 67 : Délais de mise en œuvre estimés pour la Boucle du Hainaut et la contre-proposition (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)..... | 154 |
| Figure 68 : Contre-proposition de tracé via le réseau des voies navigables (source fond de plan : Openstreetmap)..... | 158 |
| Figure 69 : Tracés “projetés” inscrits au plan de secteur (source : Walonmap)..... | 160 |
| Figure 70 : Tracés “existants” inscrits au plan de secteur (source : Walonmap)..... | 161 |
| Figure 71 : Itinéraires suivant les tracés “existants” et “projetés” inscrits au plan de secteur..... | 163 |
| Figure 72 : Illustration de la complexité technique à reconstruire les pylônes en lieu et place des pylônes existants..... | 167 |
| Figure 73 : Contraintes environnementales des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation (PRE= Périmètre de reconnaissance économique)..... | 169 |
| Figure 74 : Contraintes environnementales des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation – Zoom sur la zone entre les postes de Chièvres et de Courcelles (PRE= Périmètre de reconnaissance économique)..... | 170 |
| Figure 75 : Comparaison des contraintes environnementales (en ha) des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation entre les postes de Chièvres et de Courcelles..... | 171 |
| Figure 76 : Comparaison du gabarit d’un petit pylône 150 kV (angle 20 GON – hauteur 37 m) et moyen pylône 150kV (hauteur 48m) et de pylônes 380kV aux caractéristiques similaires (hauteur 58 et 54m) (source :Elia)..... | 173 |
| Figure 77 : Illustration de la complexité technique à contourner les postes de transformation..... | 174 |
| Figure 78: Alternatives étudiées dans le dossier de base (source : dossier de base)..... | 182 |
| Figure 79: Alternatives issues de la consultation publique (source : INDIVILLE)..... | 183 |
| Figure 80 : Réseau des alternatives..... | 185 |
| Figure 81: Exemple de tronçon du réseau d'alternatives..... | 194 |
| Figure 82: Tronçons retenus et non retenus suite à la première analyse quantitative..... | 196 |
| Figure 83: Itinéraire alternatifs au Nord et au Sud du fuseau central qui permettent de comparer les différentes contraintes pour l’environnement..... | 197 |
| Figure 84: Comparaison des contraintes sur les différents itinéraires illustrés à la figure précédente..... | 198 |
| Figure 85 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant les thématiques urbanisme et patrimoine..... | 199 |
| Figure 86 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que les thématiques Urbanisme et Patrimoine..... | 200 |
| Figure 87 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant la thématique Agriculture..... | 201 |
| Figure 88 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que la thématique agriculture..... | 202 |
| Figure 89 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant les thématiques champs électromagnétiques et bruits et vibrations..... | 203 |
| Figure 90 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que les thématiques Champs électromagnétiques et Bruits et vibrations..... | 204 |
| Figure 91 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant la thématique Paysage..... | 205 |
| Figure 92 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que la thématique paysage..... | 206 |
| Figure 93 : Tronçons composants les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant les thématiques faune, flore et biodiversité..... | 207 |
| Figure 94 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que les thématiques Faune, flore et biodiversité..... | 208 |
| Figure 95 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que le principe de regroupement des infrastructures..... | 209 |
| Figure 96: Les 40 tronçons retenus après analyse multicritères..... | 210 |

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : Plans de secteurs concernés par la demande de révision | 31 |
| Tableau 2: Coordonnées des points stratégiques du périmètre de réservation (en Lambert 2008)..... | 32 |
| Tableau 3 : Description détaillée des 10 tronçons (I à X) du périmètre de réservation (source : Dossier de base)..... | 35 |
| Tableau 4 : Affectations au plan de secteur (source : Walonmap) | 37 |
| Tableau 5 : Niveaux de fiabilité relatifs aux lignes de transport électrique | 47 |
| Tableau 6 : Evolution de la puissance installée à l'Ouest actuelle, à l'horizon 2030 et future (source : Elia)..... | 74 |
| Tableau 7 : Principales caractéristiques des technologies envisageables | 106 |
| Tableau 8 : Evaluation de la capacité brute de la liaison Boucle du Hainaut | 119 |
| Tableau 9 : Coûts de mise en œuvre estimés, en millions d'euros, pour les scénarios (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT) | 148 |
| Tableau 10 : Coût des liaisons et équipements associés (sources : Plans de développement du réseau allemand et français, étude des coûts aux Royaume-Uni)..... | 149 |
| Tableau 11 : Estimation des coûts matériels majeurs de la liaison pour le projet Boucle du Hainaut aérien, en millions d'euros (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni)..... | 150 |
| Tableau 12 : Estimation des coûts matériels majeurs de la liaison pour le projet Boucle du Hainaut aérien avec 8km d'enfouissement, en millions d'euros (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni)..... | 150 |
| Tableau 13 : Estimation des coûts matériels majeurs de la contre-proposition issue du dialogue entre Elia et REVOLHT, en millions d'euros (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni) | 151 |
| Tableau 14 : Estimations des coûts de maintenance pour les différents scénarios, en millions d'euros/an (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni) | 152 |
| Tableau 15 : Estimations des pertes réseau des scénarios, en GWh/an (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)..... | 152 |
| Tableau 16 : Synthèse comparative de la solution Boucle du Hainaut en courant alternatif avec la contre-proposition HVDC de REVOLHT issue du dialogue constructif | 156 |
| Tableau 17 : Evaluation de la durée de vie restante des lignes 150kV concernées..... | 165 |
| Tableau 18 : Comparaison des contraintes environnementales des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation entre les postes de Chièvres et de Courcelles | 170 |
| Tableau 19 : Comparaison des incidences en situation existante et en cas de mise en œuvre de l'alternative 150 kV | 177 |
| Tableau 20 : Catégorie de contraintes et pondération | 187 |
| Tableau 21: Méthode de calcul pour obtenir le score des (sous-)contraintes | 194 |
| Tableau 22: Exemple de calcul du score total d'un tronçon..... | 195 |

Lexique

| | |
|--------------------------------|---|
| Accès (chantier) | Les accès de chantier relient provisoirement les voiries existantes vers la zone de chantier. |
| Câble (souterrain) | Liaison électrique dont les conducteurs sont enterrés. Dans le cadre du projet Boucle du Hainaut, le terme câble se rapporte à une liaison souterraine de 380 kV et de plusieurs circuits. |
| Câble de garde | Conducteur aérien, nu, mis à la terre à certains ou à tous les supports, disposé généralement au-dessus des conducteurs de phase pour assurer, entre autres, une protection contre les coups de foudre. |
| Canton | Portion de ligne aérienne comprise entre deux pylônes en ancrage. Un canton est généralement constitué de plusieurs portées. |
| Circuit | Voir terme |
| Conducteur | Fil (ou ensemble de fils non isolés les uns des autres), ayant pour rôle de transporter le courant électrique. |
| Console | Composante d'un pylône sur laquelle un conducteur est fixé par l'intermédiaire d'éléments isolants. |
| Courant alternatif | Flux électrique circulant dans un sens puis dans un autre. Le réseau électrique européen (et donc belge) est basé sur le courant alternatif d'une fréquence de 50Hz. Le réseau de transport AC est triphasé, ce qui signifie que chaque circuit comprend trois phases, chacune composée de plusieurs sous-conducteurs. |
| Courant continu | Flux électrique au sein duquel les électrons circulent dans la même direction (du pôle négatif vers le pôle positif). Le réseau DC est biphasé, ce qui signifie que chaque circuit comprend deux phases, chacune composée de plusieurs sous-conducteurs. Ce courant nécessite d'être converti en courant alternatif, via des stations de conversion, dès lors que c'est ce dernier sur lequel se base le réseau européen. |
| Fréquence (courant alternatif) | Mesurée en hertz (Hz), la fréquence représente le nombre de changements de sens effectués par le courant en une seconde. Le réseau électrique européen (et donc belge) est basé sur le courant alternatif d'une fréquence de 50Hz (le courant effectue donc 50 allers-retours par seconde). |
| Isolateur (chaîne d') | Élément permettant de maintenir mécaniquement les conducteurs en garantissant que ces conducteurs soient électriquement isolés des éléments auxquels ils sont accrochés. |
| Ligne (aérienne) | Liaison électrique dont les conducteurs sont maintenus au-dessus du sol au moyen d'isolateurs et de pylônes. Dans le cadre du projet Boucle du Hainaut, le terme ligne se rapporte à une liaison aérienne de 380 kV et de deux ternes. |
| Pertes réseau | Lors du transport de l'électricité, une partie de celle-ci est perdue. Ces pertes sont entre autres dues à la résistance des conducteurs et des équipements haute tension. |

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

| | |
|--------------------|--|
| Phase (électrique) | Un conducteur (ou faisceau de conducteurs) d'une ligne à courant alternatif polyphasé destiné à être sous tension en service normal. |
| Portée | Portion de ligne aérienne comprise entre deux pylônes consécutifs. |
| Puissance active | Puissance qui est transportée par une liaison électrique en courant alternatif vers l'autre extrémité. |
| Puissance réactive | Puissance perdue utilisée pour alimenter la capacité d'une liaison électrique en courant alternatif. |

Liste des acronymes

| | |
|----------|---|
| AC | Alternating current – courant alternatif |
| CEM | Champs Electromagnétiques |
| CoDT | Code du développement territorial |
| COV | Composés Organiques Volatiles |
| CREG | Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz |
| DC | Direct current – courant continu |
| ETS | Emission Trading System |
| EVP | Equivalent Véhicule Particulier |
| GCU | Guide Communal d'Urbanisme |
| GRT | Gestionnaire du Réseau de Transport d'électricité à haute tension |
| GW | Giga Watt, 10 ⁹ watts |
| HVAC | High Voltage Alternating Current |
| HVDC | High Voltage Direct Current |
| HT | Haute Tension |
| kV | Kilovolt, 10 ³ volts |
| LCC | Line Commutated Converters |
| LGV | Ligne ferroviaire à Grande Vitesse |
| Mtep | Mégatonne équivalent pétrole |
| PAE | Parc d'Activité Economique |
| PdS | Plan de Secteur |
| PIP | Périmètre d'Intérêt Paysager |
| PRE | Périmètre de Reconnaissance Economique |
| RGIE | Règlement Général sur les Installations Electriques |
| RIE | Rapport sur les Incidences Environnementales |
| RIP | Réunion d'Information Préalable |
| RUP | Ruimtelijke UitvoeringsPlan |
| SDC | Schéma de Développement Communal |
| SDT | Schéma de Développement du Territoire |
| SER | Source d'Energie Renouvelable |
| SGIB | Site de Grand Intérêt Biologique |
| SPW ARNE | SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement |

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

SPW TLPE SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Énergie

STEP Station d'épuration

VSC Voltage Source Converters

**PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE
SES ALTERNATIVES**

1. INTRODUCTION

1.1. Objet général du projet de révision du Plan de secteur

Le projet de révision du Plan de secteur adopté par le Ministre de l'Aménagement du territoire le 19 mai 2023 et faisant l'objet du présent rapport sur les incidences environnementales porte sur l'inscription d'un périmètre de réservation d'une infrastructure principale de transport d'électricité. L'infrastructure principale de transport d'électricité concernée par le projet de révision correspond à la partie wallonne d'une nouvelle liaison électrique à installer entre le poste électrique d'Avelgem et le poste électrique de Courcelles, projet nommé « Boucle du Hainaut »¹. Selon le dossier de base joint à la demande de révision du plan de secteur, il s'agit d'une liaison aérienne en courant alternatif d'un niveau de tension de 380 kV et d'une capacité de transport de 2 x 3 GW.

Le périmètre de réservation en projet présente une longueur de 84,8 km et une largeur de 200 m. Par périmètre de réservation, on entend la partie de territoire qui réserve les espaces nécessaires à la réalisation, la protection ou le maintien de l'infrastructure concernée. Aucune modification d'affectation n'est projetée – le périmètre de réservation se posant en surimpression aux affectations actuelles du Plan de secteur.

L'inscription d'un périmètre de réservation est une opération déterminante, car elle permet l'implantation d'une telle infrastructure à l'intérieur de ce périmètre. Elle définit donc le périmètre dans lequel devra, le cas échéant, s'inscrire la future infrastructure et détermine, par voie de conséquence, les zones qui seront potentiellement soumises aux incidences de cette infrastructure.

1.2. Rappel de la procédure de révision du Plan de secteur

Procédure en Région wallonne :

Selon le CoDT, la procédure applicable en cas de révision du Plan de secteur demandée par une personne physique ou morale, privée ou publique, est la suivante :

- Un dossier de demande de révision du Plan de secteur doit être introduit auprès du Ministre de l'Aménagement du territoire. Il doit contenir :
 - Un dossier de base qui comporte :
 - la justification de la révision projetée du Plan de secteur au regard de l'article D.I.1 ;
 - le périmètre concerné ;
 - la situation existante de fait et de droit ;
 - un rapport justificatif des alternatives examinées et non retenues, compte tenu notamment des besoins auxquels répond la révision projetée, des disponibilités foncières en zones destinées à l'urbanisation et de leur accessibilité ;
 - une ou plusieurs propositions d'avant-projet établies au 1/10 000e ;

¹ Il convient de noter que la Boucle du Hainaut s'implanterait dans le prolongement de la liaison dite « Ventilus » qui a pour but de relier la côte belge à Avelgem. La procédure équivalente à la révision de plan de secteur en Flandre s'est achevée avec l'approbation du plan par le Gouvernement flamand le 26 janvier 2024.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

- le cas échéant, des propositions de compensations visées à l'article D.II.45, § 3 ;
- les éventuelles prescriptions supplémentaires ;
- le cas échéant, le plan ou le projet de plan d'expropriation ;
- le cas échéant, la liste des schémas de développement pluricommunaux ou communaux et guides communaux à élaborer, à réviser ou à abroger, en tout ou en partie ;
- Les éventuels courriers recueillis à la suite de la réunion d'information préalable (RIP), comportant
 - des observations et suggestions concernant le projet de révision du Plan de secteur;
 - les points particuliers et alternatives raisonnables à prendre en compte lors de la réalisation du RIE ;
- l'avis de la commission communale si elle existe ;
- la délibération du conseil communal ;
- le cas échéant, une demande d'exemption d'évaluation des incidences sur l'environnement et sa justification.
- Le Ministre de l'Aménagement du territoire demande avis au Fonctionnaire délégué au Pôle Aménagement du territoire, au Pôle Environnement et aux personnes ou instances qu'il juge utile de consulter. Leur avis est rendu dans les 60 jours de la demande sinon ils sont réputés favorables.
- Dans les 90 jours de la réception de la demande, le Ministre de l'Aménagement du territoire :
 - décide la révision du Plan de secteur,
 - adopte le projet de révision,
 - le cas échéant, arrête provisoirement les compensations,
 - décide de le soumettre à l'évaluation des incidences sur l'environnement ou en décide l'exemption.

Si le Ministre de l'Aménagement du territoire n'a pas répondu dans les 90 jours, la personne ayant fait la demande peut lui adresser un rappel. Si ce dernier ne répond pas dans les 60 jours de ce rappel, la demande est réputée refusée.

- En cas de décision favorable, le Ministre de l'Aménagement du territoire détermine le contenu du RIE, après consultation de diverses instances.
- Ensuite, l'auteur d'étude désigné à cette fin par l'initiateur de la révision élabore le RIE.
- Le Ministre de l'Aménagement du territoire soumet, pour avis, le projet de plan et le RIE : aux personnes ou instances qu'il juge nécessaire de consulter et au SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (SPW ARNE) s'il a été consulté. A nouveau, si les avis ne sont pas rendus dans les 60 jours de la demande, ils sont réputés favorables (art. D.II.49).
- Sur base du RIE et des avis reçus, le Ministre de l'Aménagement du territoire peut décider d'approuver une alternative en tant que projet de plan s'il estime que cette alternative est de nature à mieux répondre aux objectifs poursuivis.
- Une fois que le projet de modification de Plan de secteur est décidé :
 - le projet de plan et le RIE sont transmis aux collèges communaux des communes susceptibles d'être affectées pour y être soumis à enquête publique ;
 - les réclamations, observations et procès-verbaux issus des enquêtes publiques sont transmis au Ministre de l'Aménagement du territoire ;
 - le conseil communal des communes auxquelles s'étend le projet de plan remet son avis dans les 45 jours de la clôture de l'enquête publique (passé les 45 jours, l'avis est réputé favorable) ;
 - le Ministre de l'Aménagement du territoire demande l'avis au Pôle Aménagement du territoire et au Pôle Environnement ;

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

- la modification du Plan de secteur est adoptée définitivement ou refusée dans les 24 mois de l'adoption du projet de plan (délai d'ordre) ;
- le délai de 24 mois est suspendu entre la date de l'envoi de la désignation de l'auteur du RIE et la date de l'envoi du RIE au Gouvernement. Il en va de même pour les éventuels compléments au RIE qui seraient demandés.

Dans le cadre de la présente procédure et compte tenu de la situation sanitaire, il a été fait usage de la possibilité d'organiser la réunion d'information préalable conformément aux dispositions de l'arrêté du Gouvernement wallon de pouvoirs spéciaux n°48 organisant la participation du public en lieu et place de la réunion d'information préalable obligatoire pour certaines révisions du plan de secteur. Ce dispositif, qui implique la mise en ligne d'une présentation vidéo durant minimum deux jours ouvrables, a été mis en œuvre les 24 et 25 septembre 2020.

Le dossier de demande de révision du Plan de secteur a été envoyé le 6 janvier 2021 auprès du Ministre de l'Aménagement du territoire. Par arrêté du 19 mai 2023, le Ministre de l'Aménagement du territoire a décidé de la mise en révision du plan de secteur, adopté le projet de révision, décidé de le soumettre à évaluation des incidences sur l'environnement, y arrêté le projet de contenu du RIE et chargé le Directeur général du SPW TLPE de soumettre ce projet de contenu ainsi que le projet de révision pour avis au pôle « Aménagement du territoire », au pôle « Environnement », au SPW ARNE et aux autorités compétentes de la Région flamande. Par arrêté du 19 juillet 2023, le Ministre de l'Aménagement du territoire a déterminé le contenu du RIE.

Le 12 juin 2024, Elia a déposé la version finale du rapport sur les incidences environnementales. Le rapport a été jugé incomplet par le Ministre de l'Aménagement du territoire dans un courrier du 10 juillet 2025 listant les informations à fournir afin de compléter le RIE. Les compléments demandés concernent les points suivants :

1. la démonstration que les données exposées dans les chapitres 3, 4 et 6 de la phase 1 du rapport ont été analysées par le chargé d'étude et/ou l'expert externe consulté et l'intégration de cette analyse de données permettant d'aboutir à leur validation.
2. l'intégration des évolutions récentes des politiques énergétiques belge et européenne (évolution relative à l'éolien offshore et des interconnexions avec le Royaume-Uni, à l'île énergétique Princesse Elisabeth et au maintien et développement éventuel du nucléaire) et des travaux de concertation (mise à jour et analyse des nouveaux éléments technologiques et de la nouvelle mouture de la contre-proposition de REVOLHT résultant des travaux de concertation entre les parties).
3. la présentation de plusieurs alternatives de tracé, répondant à une sensibilité accrue à différentes thématiques regroupant les contraintes environnementales. A minima, la présentation du tracé le plus opportun pour les 5 orientations thématiques suivantes : la priorisation du regroupement des infrastructures ; la protection du paysage ; la protection de l'environnement ; la protection des terres agricoles ; la protection de la santé.
4. l'optimisation des aspects didactiques et de vulgarisation du rapport en vue d'assurer la bonne compréhension des enjeux par tous.

Le rapport a dès lors été complété et resoumis au Ministre de l'Aménagement du territoire.

Procédure en Région flamande :

Une portion de la « Boucle du Hainaut » se trouve sur le territoire de la Région flamande, à savoir la section entre le poste d'Avelgem et la frontière régionale. Pour cette portion du tracé, il est nécessaire de réviser le *gewestplan*. Cela implique l'élaboration d'un *ruimtelijk uitvoeringsplan (RUP)*. Tout comme

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

en Wallonie, aucun changement d'affectation n'est prévu. En effet, dans le cas d'une nouvelle ligne à haute tension, un tracé (une ligne et non un couloir à l'instar de la Wallonie) est dessiné par-dessus les affectations existantes. La future ligne à haute tension devra suivre au plus proche cette ligne.

Cette procédure RUP se divise dans le cas ci-présent en plusieurs étapes :

- “*Voorbereidende fase*”: phase préparatoire qui comprend toutes les actions qui se déroulent avant la rédaction de la *startnota* et la *procesnota*, la première étape formelle de la procédure RUP. La procédure RUP étant préparée et accompagnée par une équipe de planification (la “*plantteam*”) (article 2.2.3 du *Vlaamse Codex Ruimtelijke Ordening* (VCRO)), sa constitution est la première étape à réaliser ;
- Rédaction d'une *startnota* et d'une *procesnota* : le contenu de la *startnota* est repris dans le VCRO (article 2.2.4,§2). Elle reprend notamment la description des objectifs, la définition du périmètre concerné par la modification et la description des alternatives qui ont été envisagées par le demandeur. La *procesnota* décrit l'entièreté du processus de planification. Le 7 juillet 2023, le Gouvernement flamand a approuvé la *startnota* ;
- Organisation de la consultation publique et demandes d'avis (premier moment de concertation) : le VCRO prévoit une consultation publique d'au moins 60 jours sur la *startnota* ainsi qu'un moment de participation pour le public. En outre, l'autorité compétente demande l'avis des organes consultatifs énumérés à l'annexe 1 du VCRO sur la *startnota*. La consultation publique pour la partie flamande de la “Boucle du Hainaut” a eu lieu du 22 août au 20 octobre 2023 ;
- Rédaction de la *scopingnota* : celle-ci développe la *startnota* et prend en compte les remarques et avis reçus lors de la phase précédente. La *scopingnota* définit quels aspects géographiques et incidences doivent être étudiés, ainsi que la méthodologie ;
- Rédaction d'un avant-projet de *RUP* (et évaluation des incidences) ainsi que séance plénière ou ronde d'avis : la rédaction du RUP se fait en parallèle et avec l'étude des incidences et éventuelles autres études pertinentes. L'organisation d'une séance plénière est facultative, c'est l'autorité compétente qui décide si elle est nécessaire ou pas. Si aucune réunion plénière n'est organisée, les organes consultatifs concernés ont la possibilité formelle de soumettre leurs avis par écrit avant l'adoption provisoire ;
- Adoption provisoire et rédaction d'un projet de *RUP* : l'autorité compétente adopte provisoirement le RUP. Le contenu minimal d'un *RUP* est repris à l'article 2.2.5 VCRO ;
- Organisation d'une enquête publique (second moment de concertation) : le projet de *RUP* et les résultats de l'étude d'incidences sont soumis à une enquête publique d'une durée de 60 jours ;
- Adoption définitive du RUP et évaluation finale des incidences sur l'environnement : à la suite de l'enquête publique, le dienst Mer évalue préalablement à l'adoption définitive l'étude des incidences. Le plan est modifié le cas échéant et dans les 180 jours après la clôture de l'enquête publique, l'autorité compétente adopte le RUP.

A ce jour, la *scopingnota* est en cours d'élaboration.

Il est à noter que dans le cadre de l'élaboration du présent RIE, le chargé d'étude a collaboré avec le bureau Antea, chargé de l'évaluation environnementale de la portion flamande du projet Boucle du Hainaut.

Il convient de souligner que ni la procédure de révision de plan de secteur wallonne, ni la procédure d'élaboration de RUP flamande ne constituent une autorisation à proprement parler pour la construction

de la ligne électrique aérienne 380kV. Pour obtenir l'autorisation pour la construction de cette infrastructure, de nouvelles procédures seront nécessaires, à savoir une demande de permis d'urbanisme (en Wallonie) et *omgevingsvergunning* (en Flandre) comprenant la préparation d'une étude d'incidences sur l'environnement (EIE en Wallonie, MER en Flandre). La demande de permis est effectuée par l'initiateur (dans le cas présent, Elia).

1.3. Acteurs de la révision du Plan de secteur

1.3.1. DÉCIDEUR

Conformément aux dispositions de l'article D.II.48 du CoDT, lorsqu'une demande de révision du Plan de secteur porte sur l'inscription du tracé d'une infrastructure de transport d'énergie principale ou du périmètre de réservation qui en tient lieu, elle peut être décidée par le Gouvernement (ou le Ministre de l'Aménagement du territoire sur délégation) à la demande d'une personne physique ou morale, privée ou publique.

Le décideur est donc le Ministre ayant l'aménagement du territoire dans ses attributions.

1.3.2. INITIATEUR DE LA DEMANDE

L'initiateur du projet de révision du Plan de secteur est la société anonyme Elia Asset dont les coordonnées sont reprises ci-dessous :

Siège social :

Boulevard de l'Empereur 20,
B-1000 BRUXELLES, Belgique
Site web: <https://www.elia.be/>



Personnes de contact :

Loïc Biot
E-Mail: Loic.Biot@elia.be

Elia est l'unique gestionnaire du réseau de transport d'électricité à haute tension belge (GRT) désigné comme tel par arrêté ministériel du 13 janvier 2020 pris en exécution de l'article 10 de la loi du 29 avril 1999 relative à l'organisation du marché de l'électricité (dite « loi électricité ») pour une durée de vingt ans à dater du 31 décembre 2019². Le régulateur fédéral, la CREG, contrôle le respect par le gestionnaire du réseau et les entreprises d'électricité des obligations qui leur incombent en vertu de la loi électricité³ et de ses arrêtés d'exécution, ainsi que des autres dispositions législatives et réglementaires applicables pour le marché de l'électricité. En tant que GRT, Elia a le devoir de remplir

² À noter que par un arrêté ministériel du 13 septembre 2002 Elia System Operator a été désignée comme l'unique gestionnaire du réseau de transport d'électricité à haute tension (GRT). Cette désignation a été prolongée par un arrêté ministériel du 6 mai 2019, publié au Moniteur belge du 16 mai 2019, pour une nouvelle période de vingt ans dès le 17 septembre 2022. L'activité de GRT de Elia System Operator a toutefois été transférée dans Elia Transmission Belgium en date du 31 décembre 2019 dans le cadre d'une réorganisation visant à scinder les activités dites régulées belges des activités non régulées/régulées à l'étranger aux fins d'éviter tout risque de subsides croisés.

³ Loi relative à l'organisation du marché de l'électricité, 29 avril 1999.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

diverses missions de service public qui lui sont imposées par l'article 8 de la loi électricité, notamment offrir à la communauté et aux acteurs économiques du pays un réseau électrique sûr, fiable et efficace.

1.3.3. AUTEUR DU RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES

La réalisation du présent rapport a été confiée au bureau d'études STRATEC.

Siège social :

STRATEC S.A.
Avenue A. Lacomblé 69-71 boîte 8
Bruxelles 1030
Tél. : +32 (0)2 735 09 95
E-Mail: stratec@stratec.eu
Site web: www.stratec.eu



Personnes de contact :

Pierre-Yves Ancion
Tél. : +32 (0)2 738 78 73
E-Mail: py.ancion@stratec.eu

STRATEC dispose de l'agrément pour l'élaboration ou la révision du schéma de développement pluricommunal et du schéma de développement communal. STRATEC est également agréé comme auteur d'études d'incidences en Région wallonne pour les catégories suivantes :

- Catégorie 1 : Aménagement du territoire, urbanisme, activités commerciales et de loisirs
- Catégorie 2 : Projets d'infrastructure, transport et communications
- Catégorie 4 : Processus industriels relatifs à l'énergie
- Catégorie 5 : Processus industriels de transformation de matières
- Catégorie 7 : Gestion de l'eau
- Catégorie 8 : Permis liés à l'exploitation agricole

Tous ces agréments sont valides jusqu'au 14/10/2028.

Dans le cadre de cette étude, STRATEC a fait appel au bureau d'études SGS BELGIUM, en sous-traitance. STRATEC a opéré un contrôle sur les analyses réalisées par le bureau SGS BELGIUM et assume *in fine* la validité de tous les éléments figurant dans le présent rapport.

Siège social :

SGS Belgium S.A.
Parc Créalys, Rue Phocas Lejeune 4
Les Isnes, Gembloux 5032
Tél +32 81 715 160
www.sgs.be



Personnes de contact :

Delphine Coulon
Tél. : +32 (0) 476 863 461
E-Mail: delphine.coulon@sgs.com

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Nom et formation des personnes ayant participé à la rédaction du RIE

| | |
|------------------------------|---|
| Pierre-Yves Ancion (Stratec) | Bioingénieur spécialisé en aménagement du territoire et docteur en sciences environnementales |
| Lise Goetghebuer (Stratec) | Bioingénieure spécialisée en science et technologie de l'environnement et docteur en sciences environnementales |
| Thibaud Stephan (Stratec) | Licencié en Sciences de la terre et de l'univers, en Aménagement du paysage et Urbaniste. |
| Louise Lemaire (Stratec) | Géographe spécialisée dans l'analyse de données géographiques |
| Clothilde Feugeas (Stratec) | Architecture et ingénieure généraliste spécialisée dans les domaines de l'urbanisme et de l'environnement |
| Léon Deharbe (Stratec) | Ingénieur du génie civil |
| Geroges Fuchs | Master en économie |
| Pauline Quittelier | Ingénieur de gestion |
| Delphine Coulon (SGS) | Ingénieure agronome en sciences du sol |
| Ludovic Grégoire (SGS) | Géologue - Ornithologue |
| Thibaud Leroy (SGS) | Géographe – Acousticien |
| Olivier Bodart (SGS) | Bioingénieur chimiste spécialisé en sciences environnementales |
| Eric Buffet (SGS) | Géologue spécialisé en sciences environnementales |

1.4. Objectifs et contenu du présent rapport sur les incidences environnementales

L'article D.VIII.31 du CoDT soumet à évaluation des incidences sur l'environnement les projets de révision du Plan de secteur. L'article D.VIII.33 du CoDT prévoit plus précisément la rédaction d'un rapport sur les incidences environnementales (RIE) dont le contenu est déterminé par le Ministre de l'Aménagement du territoire, sur la base notamment du contenu minimum fixé à l'article D.VIII.33, § 3 et des consultations visées à l'article D.VIII.33, § 4. L'article D.VIII.34 prévoit qu'en cas de révision du Plan de secteur d'initiative d'une personne physique ou morale, privée ou publique, cette personne désigne l'auteur du RIE. Conformément à l'article D.I.11 du CoDT, cet auteur, qui peut être récusé par le Gouvernement, doit disposer de deux agréments :

- l'agrément octroyé en application du Livre Ier du Code de l'Environnement (pour la réalisation d'étude d'incidences sur l'environnement) ;
- l'agrément octroyé pour l'élaboration ou la révision du schéma de développement pluricommunal et du schéma de développement communal.

Le présent rapport contient les informations visées dans l'arrêté ministériel du 19 juillet 2023. Il a pour objectif d'identifier, de décrire et d'évaluer les incidences probables de l'inscription du périmètre de réservation projeté et de la possible implantation d'une infrastructure de transport d'énergie en son sein sur les différents domaines environnementaux (y compris sur le cadre de vie des riverains), sociaux et économiques. Le rapport identifie, décrit et évalue également des alternatives raisonnables à l'inscription de ce périmètre de réservation, compte tenu des objectifs poursuivis et du champ d'application géographique du projet de révision, eu égard aux effets environnementaux, sociaux, et économiques. Le cas échéant, il identifie, à travers des recommandations, les mesures qui devront être envisagées afin d'éviter, de réduire ou encore de compenser ces incidences.

Le RIE, de par ses analyses, conclusions et recommandations, permettra à la population, aux autorités et aux acteurs concernés par le projet, d'évaluer les enjeux et conséquences le plus en amont possible de la réalisation du projet de nouvelle liaison électrique, s'il échet.

Le RIE s'articule en 2 phases. La **Phase 1** comprend l'introduction (**Chapitre 1**) et la description du projet de révision du Plan de secteur (**Chapitre 2**). Cette phase comprend également l'analyse critique, par le chargé d'étude, de la nécessité du projet de liaison électrique (**Chapitre 3**) et de la pertinence du choix technologique pour celle-ci (**Chapitre 4**) ainsi que l'analyse de la compatibilité des objectifs du projet au regard de l'article D.I.1 du CoDT et d'autres plans et programmes (**Chapitre 5**). La Phase 1 décrit ensuite les alternatives raisonnables à l'inscription de ce périmètre de réservation (**Chapitre 6**). La **Phase 2** présente l'analyse territoriale globale, c'est-à-dire l'analyse de la situation de droit et de fait du territoire concerné (**Chapitre 1, repris en Phase 2 Partie 1**) et l'évaluation des incidences environnementales du projet de révision du plan de secteur et de ses alternatives (**Chapitre 2, repris en Phase 2 Partie 2**). La phase 2 présente enfin une synthèse des incidences, des recommandations et des interactions entre celles-ci (**Chapitre 3, repris en Phase 2 Partie 3**) ainsi qu'un relevé des difficultés rencontrées dans le cadre de l'étude (**Chapitre 4, repris en Phase 2 Partie 3**). Le RIE s'accompagne également d'un résumé non technique.

Conformément au cahier des charges fixant le contenu du RIE, Le pôle « Environnement », le pôle « Aménagement du territoire » et les Commissions communales d'aménagement du territoire et de mobilité (CCATM) des communes concernées (Celles, Frasnes-lez-Anvaing, Leuze-en-Hainaut, Ath, Chièvres, Brugelette, Lens, Soignies, Braine-le-Comte, Ecaussinnes, Seneffe, Pont-à-Celles et Courcelles auxquelles ont été ajoutées dans un deuxième temps Silly, Jurbise, Le Roeulx et Manage)

ont été tenus informés de l'évolution des analyses préalables et du rapport sur les incidences environnementales. L'ensemble des avis émis par ces instances et CCATM ont été pris en compte dans l'élaboration du RIE.

1.5. Contraintes potentielles relevées par l'arrêté adoptant le projet de Plan

Le périmètre de réservation présente une longueur de 84,8 km et une largeur de 200 m. Compte tenu de l'importance des superficies concernées par le périmètre de réservation, de nombreuses contraintes potentielles ont été relevées par l'arrêté ministériel à la suite de l'analyse de la situation de droit et de fait qui y est faite ainsi que dans les différents avis réceptionnés au cours de la procédure (réunion d'information préalable, conseils communaux, commissions consultatives communales d'aménagement du territoire et de mobilité, fonctionnaires délégués, Pôles Aménagement du territoire, Pôle Environnement, et toutes autres personnes et instances consultées).

L'arrêté du 19 mai 2023 adoptant le projet de révision reprend ces contraintes. Les contraintes principales relevées par le Ministre dans l'arrêté concernent notamment :

- La présence de zones d'habitat et d'habitat à caractère rural, de terrains agricoles, de sites classés, d'arbres remarquables, de site Natura 2000, de périmètres d'intérêt paysager, etc. au sein et à proximité du périmètre ;
- La compatibilité du projet avec la préservation du milieu naturel et paysager ;
- La comptabilité du projet avec la protection de l'intégrité physique des personnes et des animaux face aux risques naturels et technologiques ;
- Les répercussions économiques et sociales sur le tourisme, les loisirs, l'agriculture, la valeur immobilière des biens, etc. ;
- La compatibilité du projet avec la présence d'infrastructures sensibles ;
- La compatibilité du projet avec les textes réglementaires et planologiques ;
- Les développements futurs du réseau permis par la nouvelle ligne ;
- L'atteinte des objectifs principaux du projet (repris dans le dossier de base) ;
- La pertinence de la technologie et du tracé de la liaison électrique du projet ;
- L'absence de précisions concernant les compensations financières ;
- L'implication des citoyens, communes, fédérations agricoles, etc. dans le suivi des études ;
- La nécessité de tenir compte des spécificités techniques locales ;
- Etc.

2. DESCRIPTION DU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR

2.1. Objet de la révision du Plan de secteur

L'objet de la révision du Plan de secteur porte sur l'inscription d'un périmètre de réservation d'une infrastructure principale de transport d'électricité correspondant à la partie wallonne du projet Boucle du Hainaut, entre la frontière régionale (commune de Mont-de-l'Enclus) à proximité du poste électrique d'Avelgem et le poste électrique de Courcelles. Selon le dossier de base joint à la demande de révision du plan de secteur, ce projet de révision vise à établir une nouvelle liaison électrique aérienne en courant alternatif d'un niveau de tension de 380 kV et d'une capacité de transport de 2 x 3 GW.

2.1.1. ETUDES PRÉALABLES AYANT CONDUIT À LA DÉTERMINATION DU PROJET DE PÉRIMÈTRE DE RÉSERVATION

Le périmètre de réservation projeté a été déterminé par l'initiateur de la révision et adopté par le Ministre de l'Aménagement du territoire sur base de plusieurs études préalables, qui sont brièvement synthétisées ci-après.

2.1.1.a. ETUDES SUR LA NÉCESSITÉ ET SUR LES TECHNOLOGIES DU PROJET

Les études technologiques et avis d'experts mentionnés ci-dessous sont repris en Annexes 1 à 8.

1^{ère} Etude technologique, Elia, février 2019 (Annexe 1)

En février 2019, Elia a réalisé une première étude technologique afin de comparer les différentes technologies disponibles et applicables au projet de nouvelle liaison électrique. Le tracé n'étant à ce moment pas encore fixé, l'étude a été réalisée sur base d'une liaison d'une longueur de 50 à 100 km et d'une capacité de 6 GW. L'étude a fait l'objet d'échanges avec un groupe de pilotage composé d'experts du monde académique, chargés de remettre un avis formel une fois celle-ci terminée.

En résumé, 5 options technologiques ont été comparées :

- Ligne aérienne AC⁴ ;
- Liaison souterraine AC ;
- AC-GIL⁵ ;
- Ligne aérienne DC⁶ ;
- Liaison souterraine DC.

L'analyse de chaque technologie a été faite selon des critères techniques (maturité, impact sur la fiabilité du réseau, intégration avec le réseau existant, nombre de circuits), économiques (coûts d'investissement, de maintenance et liés aux pertes énergétiques sur le réseau) et environnementaux (occupation du sol, impacts visuels, bruit, champs magnétiques, émissions de gaz à effet de serre).

Les résultats de l'analyse ont conclu que la technologie ligne aérienne AC était, sur le plan technique et économique, la plus appropriée et la plus adéquate pour le projet Boucle du Hainaut. Compte tenu de la longueur de la liaison et de la capacité nécessaire, toutes les autres options technologiques s'accompagnaient en effet d'une plus grande complexité, incertitude et/ou risque technique. De plus, au niveau économique, la ligne aérienne AC représente la solution la plus économique tant pour les coûts d'investissement que pour les coûts de maintenance et les coûts liés aux pertes réseau (avec une différence de coût significative). L'étude décrit également les incidences sur l'environnement de chacune des technologies envisagées (sans y associer une évaluation de la « meilleure » technologie).

Il ressort cependant de cette analyse que le choix de la technologie ligne aérienne AC pourrait s'accompagner d'une partie souterraine (câble AC) d'une longueur maximale de 8km.

A l'issue de cette étude, le groupe de pilotage académique a estimé qu'il était justifié d'opter pour une ligne aérienne AC et qu'il était réaliste de considérer une longueur maximale d'enfouissement de 8km. L'avis de ce groupe de pilotage est repris en **Annexe 2**.

⁴ AC, *Alternating current*, fait référence au courant alternatif, qui est un flux électrique circulant dans un sens puis dans un autre. La fréquence du **courant alternatif** est mesurée en hertz (Hz). Elle représente le nombre de changements de sens effectués par le courant en une seconde. En Europe, la fréquence est de 50Hz, le courant effectue donc 50 allers-retours par seconde.

⁵ Le GIL (Gas Insulated transmission Lines) se compose de tubes remplis de gaz isolants, disposés dans un tunnel.

⁶ DC, *Direct current*, fait référence au courant continu au sein duquel les électrons circulent dans la même direction (du pôle négatif vers le pôle positif).

2^{ème} étude technologique, Bureau d'études Mott MacDonald mandaté par Elia, mars 2019 (Annexe 3)

Une deuxième étude technologique a été menée en parallèle à la première par le bureau d'études Mott MacDonald. Cette étude présente également plusieurs technologies envisageables pour le projet (lignes aériennes AC et DC, liaisons souterraines AC et DC et AC-GIL) ainsi qu'un benchmark de leur utilisation au sein de projets d'envergure similaire afin de déterminer les principales tendances à travers l'Europe. L'analyse a montré que la grande majorité des infrastructures existantes étaient assurées par des lignes aériennes AC. Ces lignes sont complétées par un câble AC souterrain lorsque la ligne aérienne n'est pas possible ou présentait des incidences environnementales jugées trop importantes (exemple : traversée de rivière ou d'estuaire de plus d'un kilomètre, de zone urbaine dense ou d'une zone d'intérêt environnemental élevé).

Evaluation de la nécessité d'une nouvelle liaison et du choix technologique, réalisée par Jing Dai EIRL, consultant indépendant, décembre 2020 et janvier 2021 (Annexe 4)

Une troisième étude, demandée par le ministre de l'Aménagement et du Territoire Willy Borsus, a été menée par un consultant indépendant. L'auteur s'y prononce concernant la nécessité d'une nouvelle liaison et le choix technologique d'Elia (ligne aérienne AC, choix résultant de la 1^{ère} étude technologique). L'auteur y présente une critique de besoins de la liaison et de l'étude technologique réalisée par Elia. Même s'il identifie quelques imprécisions, l'auteur confirme la conclusion générale des différentes études réalisées par Elia. En effet, il partage l'avis qu'il est nécessaire de construire une nouvelle liaison entre Avelgem et Courcelles d'une capacité de 6 GW à une tension de 380 kV afin de remédier aux effets de goulot d'étranglement sur la ligne existante entre Horta et Mercator, dans le contexte des futurs projets de renforcement du réseau et des parcs éoliens offshore. Selon lui, la ligne aérienne AC s'avère la plus adaptée pour répondre aux besoins, d'un point de vue technico-économique. Il rappelle également les limites techniques, les effets négatifs sur l'environnement (tranchée de grande taille, etc.), les limitations de repiquages et les coûts importants qu'accompagneraient l'enfouissement de la nouvelle ligne.

Contre-expertise sur la nécessité d'une nouvelle liaison et du choix technologique réalisée par Menelika Bekolo Mekomba, consultante indépendante, septembre 2021 (Annexe 5)

Le ministre Willy Borsus a souhaité contre-expertiser l'étude de Jing Dai EIRL et ses conclusions auprès d'un second expert. Dès lors, une contre-analyse des différentes études technologiques publiées jusqu'alors a été menée par Menelika Bekolo Mekomba.

Sur la question des besoins, l'auteur de l'étude considère la création d'une nouvelle liaison justifiée au regard du cadre scientifique et des simulations de comportement du réseau national (compte tenu de l'injection de puissance et de la consommation attendues) et a validé le choix d'Avelgem et de Courcelles comme postes d'extrémité. L'auteur précise que cette liaison additionnelle permettra de former, avec la liaison existante Horta-Mercator, une boucle permettant la stabilité et la fiabilité du réseau pour les horizons 2030 et 2040 au minimum.

Concernant le choix technologique pour le projet de ligne, l'étude exclut les possibilités de liaison en HVDC (tant aérien que souterrain) et d'enfouissement sur l'ensemble du tracé. Les options envisageables demeurent la liaison aérienne AC et la liaison aéro-souterraine AC (considérant une limite d'enfouissement de 8 km). Si le choix entre ces deux technologies est une question de compromis technico-économiques et environnementaux, l'auteur estime que la solution complètement aérienne est celle qui répond le mieux aux standards de comportement de réseau attendus et est la plus économique.

En conclusion, les résultats de la contre-expertise rejoignent donc ceux des études précédemment réalisées.

Alternative technologique proposée par l’asbl REVOLHT (Annexe 6)

Cette proposition d’alternative est détaillée au point 6.3.2.

REVOLHT est une asbl porte-parole des habitants s’opposant au projet Boucle du Hainaut. Ce groupement citoyen a publié un rapport⁷ proposant notamment une alternative technologique. Plutôt qu’une ligne aérienne AC, REVOLHT propose une technologie en courant continu (DC) en enfouissement, et ce à l’échelle de l’ensemble du tracé des projets Ventilus et Boucle du Hainaut entre les postes de Stevin et de Courcelles (environ 150 km) (Figure 1).

En effet, l’augmentation projetée de la capacité de transit d’ouest en est du pays s’articule à travers deux projets :

- Projet Ventilus : reliant les postes de Stevin et Avelgem par une liaison aérienne d’une capacité de 6GW ;
- Projet Boucle du Hainaut : reliant les postes d’Avelgem et de Courcelles par une liaison aérienne d’une capacité de 6GW.

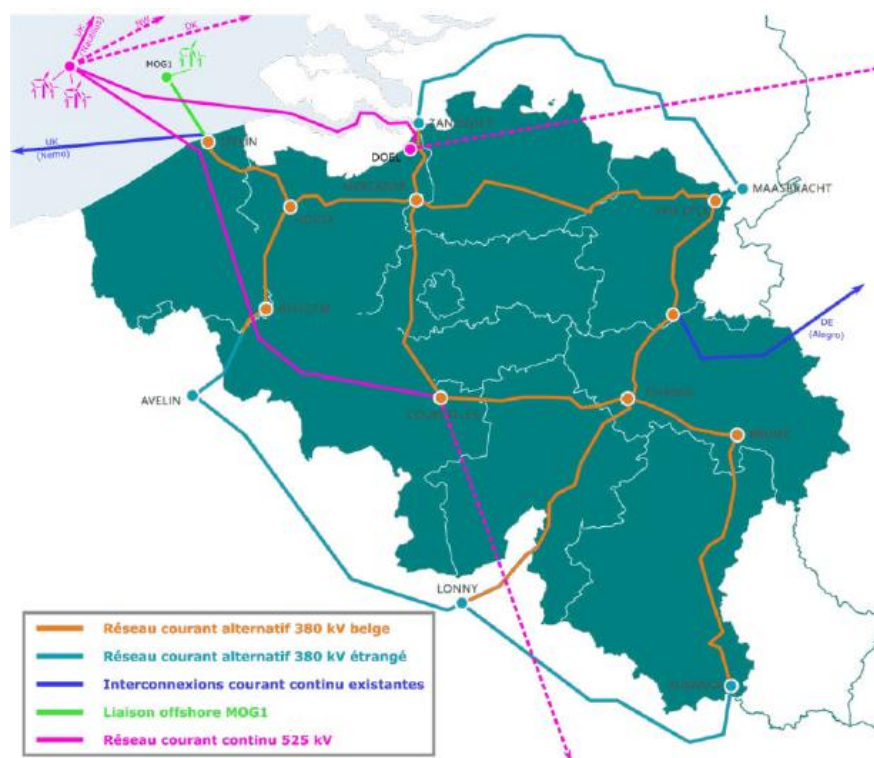


Figure 1 : Alternative REVOLHT (source : Alternative technologique proposée par l’asbl REVOLHT)

Selon REVOLHT, une telle liaison pourrait être enterrée sous voirie, dans les RAVEL, dans les bandes d’arrêts d’urgence d’autoroute, les chemins de halage, etc. et permettrait d’atténuer les incidences environnementales de ces deux projets.

⁷ <https://www.revolht.be/>, <https://www.revolht.be/documents/dossier-technique/Contre-expertise%20REVOLHT%20-%20REV30052022.pdf>

Deux alternatives technologiques principales résultent de la contre-proposition de REVOLHT :

- une solution HVDC point à point : c'est à dire une liaison s'intégrant dans le réseau maillé AC actuel belge et comprenant donc une station de conversion AC-DC à chaque extrémité ;
- un réseau maillé HVDC en Belgique : c'est-à-dire une liaison HVDC reliant plusieurs stations de conversion AC-DC. Cela permet de diminuer le nombre de station de conversion (par rapport à un système point-à-point). Le système est alors dit multi-terminal.

Ces deux alternatives technologiques ont été analysées par une équipe de chercheurs de l'UMons afin de se prononcer sur leur faisabilité technique et financière (**Annexe 7**). Cette étude a premièrement conclu que la technologie par réseau maillé HVDC comportait trop d'incertitudes liées au faible retour d'expérience sur les configurations multi-terminales HVDC maillées, jugeant cette alternative trop ambitieuse. En revanche, bien que plus couteuse que les technologies en courant alternatif HVAC, l'alternative HVDC a été jugée potentiellement envisageable en point par point moyennant des études complémentaires détaillées afin d'éclairer certains points d'attention.

La consultante indépendante Menelika Bekolo Mekomba a ensuite été interrogée sur la faisabilité de cette alternative technologique. Le 1^{er} février 2022, l'experte s'est prononcée devant la commission de l'économie, de l'aménagement du territoire et de l'agriculture du Parlement de Wallonie et a estimé ce concept non pertinent⁸.

Suite aux élections régionales de juin 2024, le nouveau Gouvernement wallon a publié sa déclaration de politique régionale et, concernant le projet Boucle du Hainaut, mentionne que « *Le Gouvernement veillera à l'instauration d'un dialogue constructif entre toutes les parties prenantes portant sur les solutions techniques et économiques envisageables* ». De décembre 2024 à avril 2025, un dialogue a dès lors eu lieu entre REVOLHT et Elia (sous l'égide de l'administration régionale) portant sur les solutions techniques et économiques envisageables. Ce dialogue visait notamment à améliorer la contre-proposition de REVOLHT sur le plan technique et d'en estimer le coût et les délais de mise en œuvre.

Il est à noter qu'au même titre que le projet Boucle du Hainaut, la technologie retenue pour le projet Ventilus a fait l'objet d'une consultation scientifique visant à en vérifier la pertinence. Cette analyse a entre autres été réalisée par le professeur Dirk Westermann, qui a validé que la technologie aérienne AC était justifiée (**Annexe 8**).

L'alternative REVOLHT, les raisons du positionnement de l'experte Bekolo ainsi que la description et l'analyse des éléments avancés durant le dialogue ayant eu lieu entre Elia et REVOLHT sont détaillés au point 6.3.2 de la phase 1 du présent rapport.

2.1.1.b. ETUDES DE TRACÉ

Entre 2018 et 2020, Elia a mené différentes études internes, avec comme objectif de déterminer les postes d'extrémité du projet de ligne aérienne 380kV entre le nord-ouest et le centre du pays. Les possibilités de raccordement ont d'abord été comparées sur base des impacts attendus par rapport au réseau 380 kV existant. Sous cet angle, le choix fut de considérer la mise en place d'une liaison entre les postes d'Avelgem et de Courcelles. Ce choix réside dans le fait que ces postes constituent tous deux un nœud majeur du réseau 380 kV du pays et que le poste de Courcelles présente des opportunités de synergies avec les réseaux 150 et 70 kV et donc de renforcement du réseau local.

⁸ Contenu de la séance publique de commission de l'économie, de l'aménagement du territoire et de l'agriculture. https://nautilus.parlement-wallon.be/Archives/2021_2022/CRIC/cric113.pdf, page 38

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Les alternatives à cette option pour établir une liaison entre l'ouest et le centre du pays consiste à mettre en place un nouveau poste 380 kV, à procéder à l'extension d'un poste existant, ou encore à raccorder un autre point du réseau 380kV. Selon les études menées par Elia, ces alternatives nécessitent des évolutions complémentaires sur le réseau, les rendant moins pertinentes que l'option de liaison retenue, sous l'angle des impacts attendus sur le réseau existant. L'option de liaison ne présentait par ailleurs pas de contre-indication environnementale ni planologique, aucune alternative n'est apparue plus adéquate.

Une fois les postes d'Avelgem et de Courcelles identifiés, le tracé pour le projet de ligne aérienne a été déterminé. Pour ce faire, le bureau d'études CSD ingénieurs a, dans le cadre du dossier de base réalisé une analyse passant en revue l'ensemble des possibilités de tracé de ligne aérienne à haute tension entre les postes d'Avelgem et de Courcelles. L'analyse a été réalisée cartographiquement selon les opportunités (infrastructures existantes, tracé inscrit au Plan de secteur) et contraintes (aéroport et terrains militaires, industrie SEVESO, éoliennes, impétrants majeurs, zones d'habitat, zones d'intérêt paysager et écologique) du territoire. L'analyse a conduit à l'identification de six tracés envisageables. Les contraintes et opportunités des tracés obtenus ont été comparées afin d'établir le tracé du projet de liaison. Les tracés non retenus, constituent les différentes alternatives présentées dans le cadre du dossier de base.

Si un tracé a été établi à l'issue de cette étude, ce dernier a encore fait l'objet de modifications locales suite aux nombreuses phases de discussion et d'analyse ayant eu lieu a posteriori et ce, dans un souci de limiter les contraintes rencontrées au niveau local, comme les passages au-dessus ou à proximité immédiate d'éléments d'intérêt patrimonial, noyaux d'habitat, de zones d'intérêt biologique et paysager, etc.

Il est à noter que le présent rapport comprend une analyse critique du besoin de nouvelle liaison et du choix technologique pour celle-ci (chapitres 3 et 4 de la phase 1), comprenant notamment une analyse du choix des postes d'extrémité (point 4.9 de la phase 1).

2.1.2. LOCALISATION DU PROJET DE PÉRIMÈTRE DE RÉSERVATION

Les cartes routières et topographiques, orthophotoplans et les affectations au plan de secteur de l'ensemble du périmètre sont reprises dans l'**atlas cartographique**.

A l'issue de ces diverses études préalables, le projet de périmètre de réservation devant permettre la mise en œuvre potentielle d'une ligne à haute tension a été défini et présenté dans le dossier de base déposé par courrier daté du 4 janvier et reçu au cabinet du Ministre de l'Aménagement du territoire le 6 janvier 2021.

Le projet de périmètre présente une longueur totale de 84,8 km et une largeur de 200 m (avec 2 secteurs particuliers où cette largeur est supérieure, dans des zones de changement de direction). Il s'inscrit sur 14 communes de la Région wallonne dans la province de Hainaut, à savoir : Mont-de-l'Enclus, Celles, Frasnes-Lez-Anvaing, Leuze en Hainaut, Ath, Chièvres, Brugelette, Lens, Soignies, Braine-le-Comte, Ecaussinnes, Seneffe, Pont-à-Celles, Courcelles. Une description plus précise avec les lieux-dits et les principales rues concernées est reprise au chapitre traitant de l'urbanisme de la phase 2 du présent rapport.

Au niveau du territoire, sur les 30 premiers kilomètres depuis la frontière régionale, le projet de périmètre de réservation suit une ligne haute tension existante de 150 kV jusqu'à la ligne de chemin de fer n°1

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

(ligne TGV Halle – Esplechin) à hauteur de Tongre-Notre-Dame⁹. Il longe alors la ligne TGV vers le nord-est sur 8,6 km jusqu'au nord de Attre (commune de Brugelette) et bifurque vers le sud-est pour longer, sur 4 km, une liaison électrique 70 kV existante entre la gare TGV d'Ath et Lens. Le projet de périmètre de réservation quitte la zone de la liaison 70 kV à hauteur de Gages et bifurque vers l'est pour rejoindre la N57 qu'il longe sur 18 km en passant au nord de Soignies jusqu'à rejoindre l'autoroute E19 à hauteur de Familleureux. Il longe ensuite l'autoroute E19 (et une ligne haute tension existante de 150 kV) pour rejoindre la ligne haute tension existante de 380 kV reliant les postes de Bruegel et Courcelles. Le périmètre la longe vers le sud-est sur environ 7 km pour finalement rejoindre le poste de Courcelles.

La localisation générale du projet de périmètre de réservation est illustrée à la figure ci-dessous.

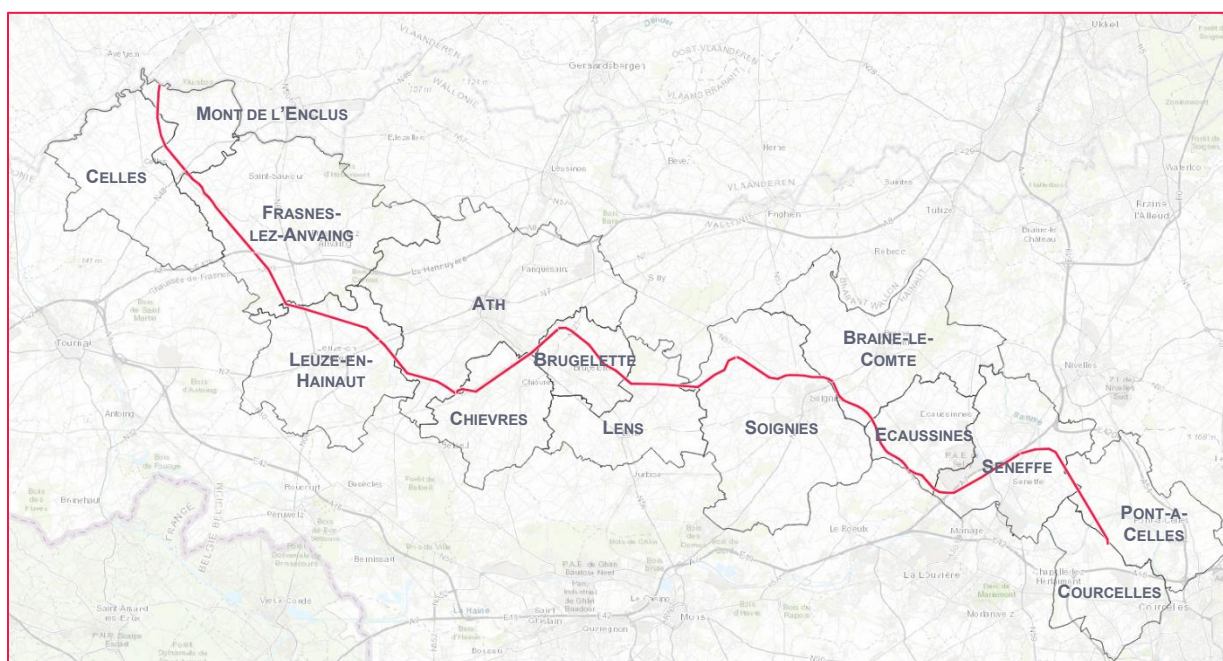


Figure 2 : Schéma du projet de périmètre de réservation (source du fond de plan : ESRI - world-topographic-map)

Le projet de périmètre de réservation concerne cinq secteurs d'aménagement :

Tableau 1 : Plans de secteurs concernés par la demande de révision

| Plan de secteur | Approbation |
|------------------------|--|
| Tournai-Leuze-Peruwelz | Arrêté royal du 24/07/1981 |
| Ath-Lessines-Enghien | Arrêté de l'Exécutif régional wallon du 17/07/1986 |
| Mons-Borinage | Arrêté de l'Exécutif régional wallon du 9/11/1983 |
| La Louvière-Soignies | Arrêté de l'Exécutif régional wallon du 9/07/1987 |
| Charleroi | Arrêté royal du 10/09/1979 |

La figure ci-après reprend les numéros de planche IGN traversée par le périmètre de réservation, à savoir les numéros 29, 37, 38, 39 et 46.

⁹ Il est à noter que cette ligne aérienne 150 kV arrive en fin de vie et qu'Elia a obtenu toutes les autorisations nécessaires à son remplacement par une liaison souterraine à court termes.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

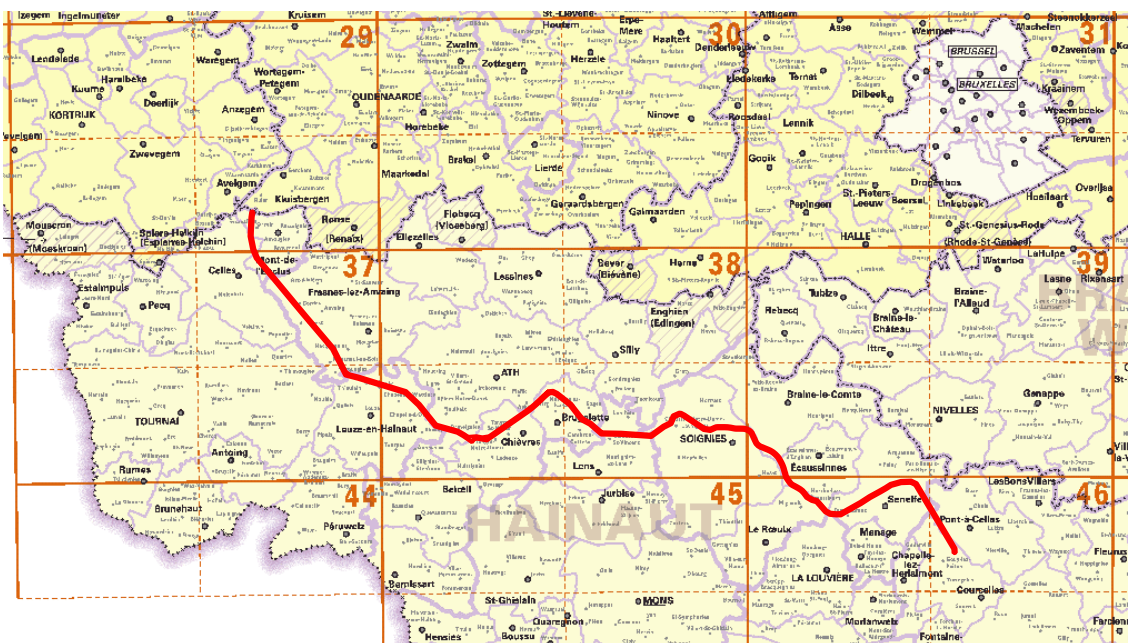


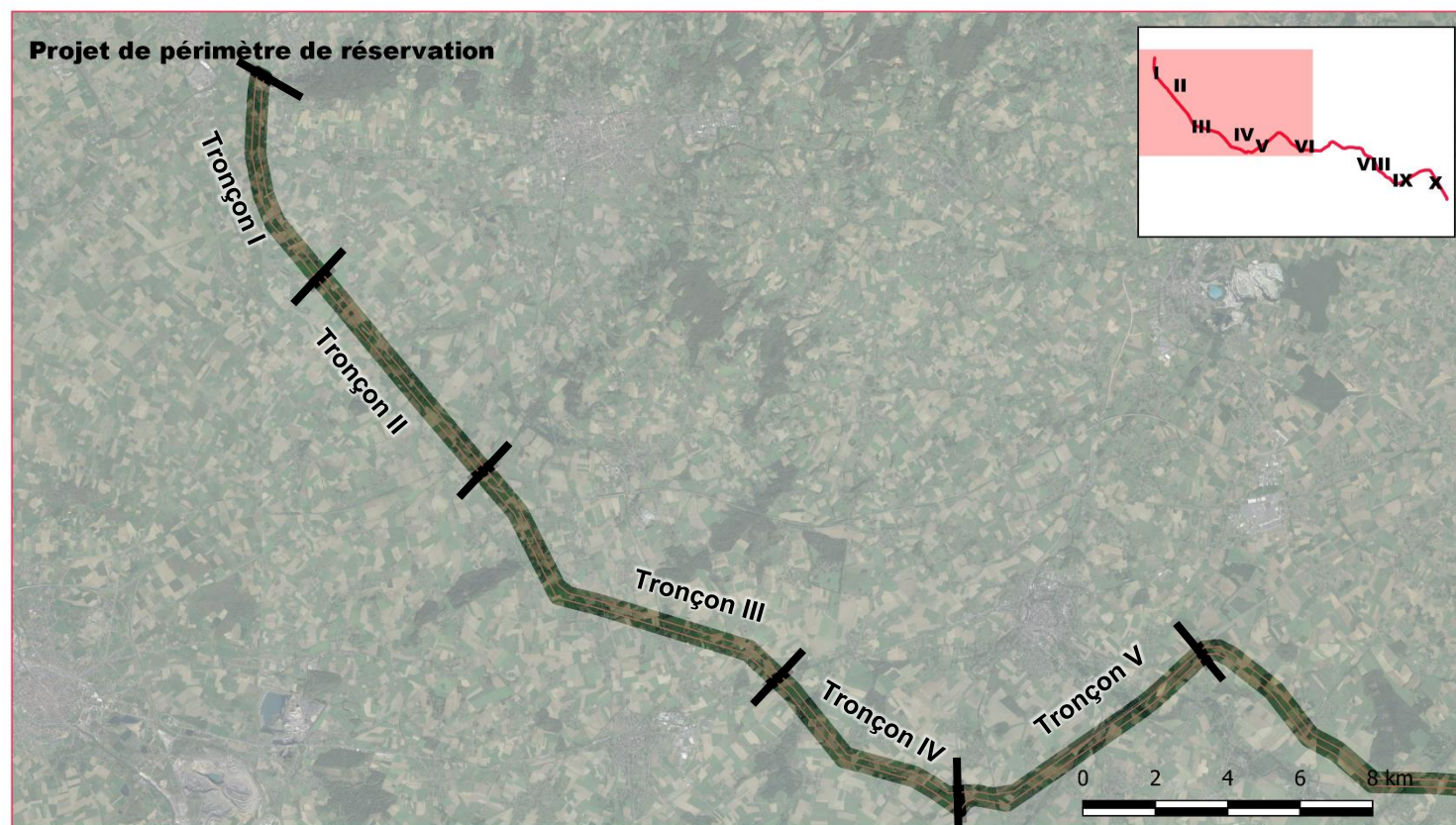
Figure 3: Localisation du périmètre de réservation sur la carte administrative (source fond de plan : IGN - Geo.be)

Il n'est pas pertinent de relever les coordonnées Lambert de chaque point sur l'entièreté du tracé. Néanmoins, les coordonnées du poste d'Avelgem (point de départ de la liaison projetée), du point à la frontière entre la Flandre et la Région Wallonne ainsi que du poste de Courcelles (point d'arrivée de la ligne) sont reprises dans le tableau suivant.

Tableau 2: Coordonnées des points stratégiques du périmètre de réservation (en Lambert 2008)

| Point | X | Y |
|---------------------|-----------|-----------|
| Poste d'Avelgem | 586565.47 | 663936.14 |
| Point frontière | 586711.36 | 661645.44 |
| Poste de Courcelles | 648505.98 | 631533.89 |

Afin de faciliter son analyse, le projet de périmètre de réservation est scindé en 10 tronçons repris sur les figures suivantes, qui ont une longueur comprise entre 6 et 12 km. Ils sont par ailleurs décrits dans le tableau suivant.



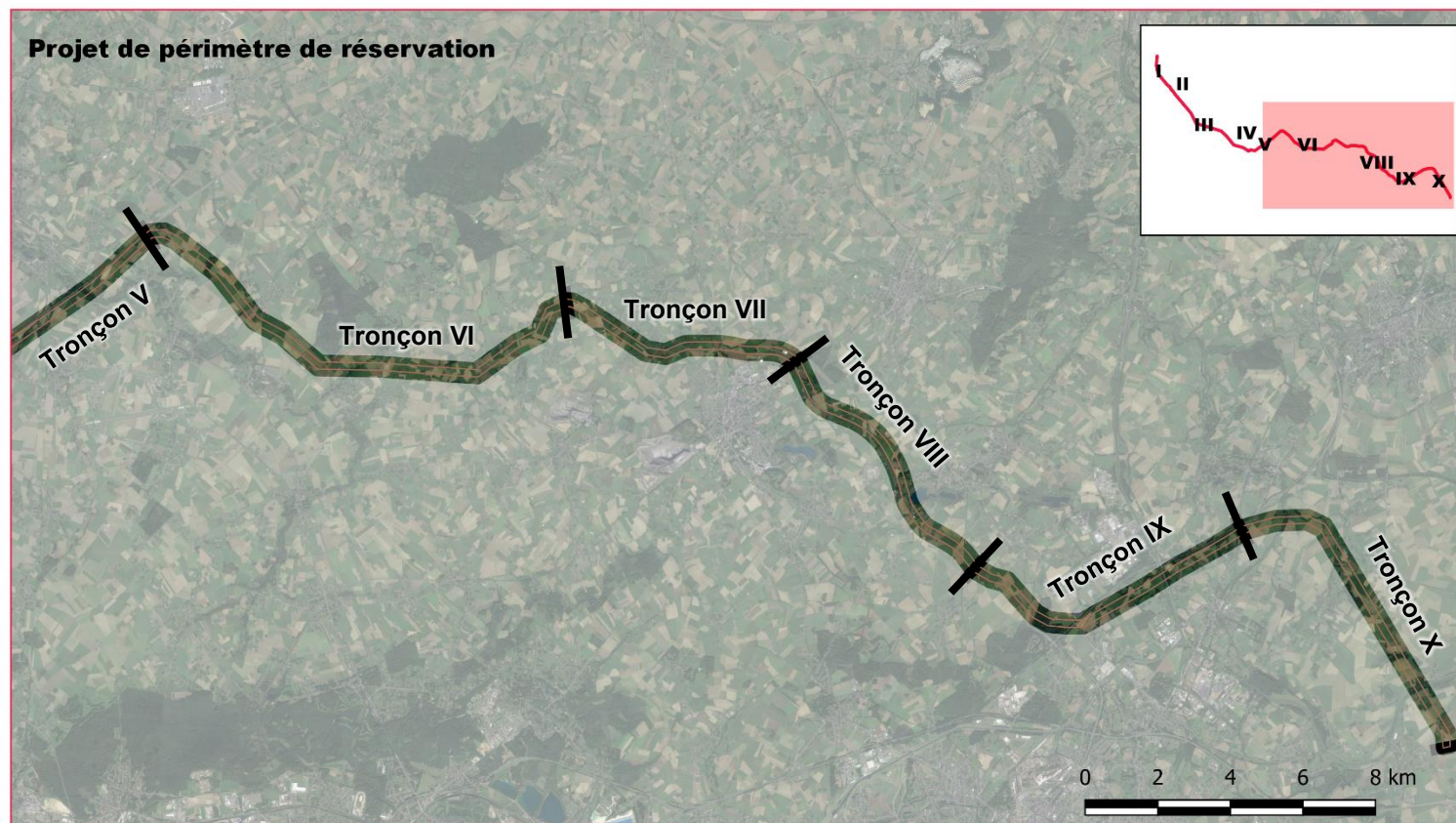
RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES RELATIF A LA REVISION DU PLAN DE SECTEUR – BOUCLE DU HAINAUT

■ Limites tronçons

DEMANDEUR
ELIA ASSET S.A.
Boulevard de L'Empereur, 20
1000 Bruxelles

CHARGES D'ETUDE
Bureaux d'études **stratéc** & **SGS**
Av. Adolphe Lacombé 69-71 bte 8
1030 Bruxelles

Figure 4 : Projet de périmètre de réservation : tronçons I à V (au nord)



RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES RELATIF A LA REVISION DU PLAN DE SECTEUR – BOUCLE DU HAINAUT

■ Limites tronçons

DEMANDEUR
ELIA ASSET S.A.
Boulevard de L'Empereur, 20
1000 Bruxelles

CHARGES D'ETUDE
Bureaux d'études **stratéc** & **SGS**
Av. Adolphe Lacombé 69-71 bte 8
1030 Bruxelles

Figure 5 : Projet de périmètre de réservation : tronçons VI à X (au sud)

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Tableau 3 : Description détaillée des 10 tronçons (I à X) du périmètre de réservation (source : Dossier de base)

| Tronçon | Longueur [km] | Communes concernées et longueur traversée | Description |
|---------|---------------|--|---|
| I | 6,12 | Mont-de-l'Enclus (3,98 km) Celles (2,15 km) | Suit la ligne haute tension existante de 150 kV vers le sud depuis la limite régionale Traverse la rue de l'Alouette (habitations) Traverse la rue des Courbes (habitations) Traverse la Rhosnes Traverse la rue du Noir Mouton (habitations) Traverse la rue d'Anseroeul (habitations) Traverse le chemin d'Hollaye (habitations) Croise la N48 |
| II | 6,96 | Mont-de-l'Enclus (0,40 km) Frasnes-Lez-Anvaing (6,56 km) | Continue de suivre la ligne haute tension existante de 150 kV (avec un redressement toutefois autour de la rue Beauregard afin de coller au tracé inscrit au le Plan de Secteur) Passe à proximité du village de Cordes et travers le ruisseau de Cordes Traverse la Petite Rhosnes Croise la E429 à 2 km à l'ouest de la sortie « 31-Frasnes » |
| III | 10,64 | Frasnes-Lez-Anvaing (3,92 km) Leuze-En-Hainaut (6,73 km) | Continue de suivre de la ligne haute tension existante de 150 kV Traverse la N529 Traverse le ruisseau de Monceau Intersecte une autre ligne 150kV à la limite Frasnes-Lez-Anvaing et Leuze-En-Hainaut Continue vers l'est le long de la ligne haute tension existante de 150 kV Croise la N60 Passe à proximité du village de Grandmetz Traverse le ruisseau de la Croix de Fer Arrive à la Dendre Occidentale |
| IV | 6,29 | Leuze-En-Hainaut (1,61 km) Ath (4,68 km) | Continue de suivre la ligne haute tension existante de 150 kV Traverse la Dendre Occidentale Traverse la N7 Traverse la rue d'Andricourt (habitations) Traverse le ruisseau Secours de la Dendre Traverse le ruisseau du Tardin et la rue du Chapitre (habitations) Traverse la N527 et passe à proximité d'Autrepepe (habitations) |
| V | 8,13 | Ath (1,21 km) Chièvres (5,21 km) Brugelette (1,72 km) | Traverse la ligne TGV n°1 puis la longe vers le nord-est Passe à proximité de Tongres Saint-Martin (habitations) Traverse le canal Ath-Blaton Traverse la Hunelle Traverse la N56 Traverse la Dendre Orientale |
| VI | 13,77 | Brugelette (5,63 km) Lens (3,76 km) Soignies (4,38 km) | Croise une ligne 70kV existante Quitte la ligne de TGV et pars vers le sud-est Traverse la N525 Traverse la N523 Traverse le ruisseau de Gages Traverse le ruisseau des Viviers |
| VII | 6,83 | Soignies (6,16 km) Braine-Le-Comte (0,68 km) | Longe la N57 (distance de 200-300m) |

| Tronçon | Longueur [km] | Communes concernées et longueur traversée | Description |
|---------|---------------|--|---|
| | | | Traverse le ruisseau du Ruez et de la Gageole Traverse la N57 au niveau du rond permettant le contournement de Soignies Longe ensuite la N57 (contournement de Soignies) Traverse le ruisseau de Lorette Croise la N55 Traverse la Senne Croise la N6 |
| VIII | 7,87 | Braine-Le-Comte (3,69 km) Ecaussines (4,19 km) | Continue à suivre la N57 Traverse le ruisseau de la Cafenière Traverse la ligne de chemin de fer 96 Croise une ligne 70 kV existante Traverse la rue de Restaumont (habitations) Traverse la rue des Croisettes (habitations) Traverse le ruisseau de la Sansuyère Croise le ruisseau de Mignault |
| IX | 8,59 | Ecaussines (2,17 km) Seneffe (6,43 km) | S'écarter de la N57 Traverse le nord du Bois de Courrière Traverse l'E19 Croise une ligne haute tension existante de 150 kV Traverse le ruisseau de la Senette Longe l'E19 et une ligne haute tension existante de 150 kV Croise la N27 |
| X | 9,30 | Seneffe (4,26 km) Pont-à-Celles (4,75 km) Courcelles (0,29 km) | Traverse le canal Charleroi-Bruxelles Croise une ligne haute tension existante de 150 kV Longe une ligne haute tension existante de 380 kV Traverse le ruisseau de Renissart Croise des lignes haute tension existantes de 150 et 70 kV Traverse le canal Bruxelles Charleroi Traverse la rue Saint Antoine (habitations) Arrivée au poste de Courcelles |

2.1.3. SITUATION CADASTRALE

La révision du Plan de secteur porte sur l'inscription d'un périmètre de réservation en surimpression aux zones traversées en vue de réserver les espaces nécessaires à la réalisation d'une infrastructure de transport d'électricité.

Le périmètre de réservation couvre majoritairement des parcelles cadastrales privées et quelques éléments de domaine publics. Elia n'est pas propriétaire de ces parcelles. Dans le cadre de l'implantation effective des pylônes de la nouvelle liaison électrique aérienne dans ce périmètre de réservation, Elia entamera les procédures nécessaires en vue de l'obtention d'une déclaration d'utilité publique conformément à la loi du 10 mars 1925 sur les distributions d'énergie électrique afin de se voir conférer une servitude légale d'utilité publique sur les parcelles privées susmentionnées ainsi que des négociations auprès des propriétaires desdites parcelles pour acquérir un droit réel contractuel sur les superficies strictement nécessaires.

2.1.4. AFFECTATIONS AU PLAN DE SECTEUR

Le projet de périmètre de réservation comprend un peu plus de 1700 hectares, dont plus de 90% sont repris en zone agricole au plan de secteur. Près de 5% du périmètre concerne des zones forestières et d'espaces verts.

Le tableau suivant détaille les affectations au Plan de secteur par tronçon.

Tableau 4 : Affectations au plan de secteur (source : Walonmap)

| Affectation | Tronçons | | | | | | | | | | Total (ha) | % |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | | |
| Agricole | 106,6 | 137,7 | 204,5 | 127,9 | 148,0 | 271,1 | 120,0 | 141,7 | 132,4 | 158,9 | 1548,7 | 91,0% |
| Forestière | | | 2,8 | 0,9 | 4,6 | 3,5 | | | 22,0 | 13,5 | 47,3 | 2,8% |
| Espaces verts | 3,5 | | 0,4 | 0,4 | 9,3 | 0,6 | | 1,0 | 7,7 | 9,4 | 32,1 | 1,9% |
| Habitat à caractère rural | 12,8 | 1,1 | 5,9 | 0,5 | 2,1 | | | 2,5 | 0,4 | 2,6 | 27,9 | 1,6% |
| Activité économique mixte | | | | | | 0,3 | 17,1 | | | | 17,5 | 1,0% |
| Dépendance d'extraction | | | | | | | | 9,3 | | | 9,3 | 0,5% |
| Parc | | | | | | | | | 7,2 | | 7,2 | 0,4% |
| Services publics et équipements communautaires | | | | | 4,5 | | | | | | 4,6 | 0,3% |
| Plan d'eau | | | | 0,1 | 1,3 | | | 0,4 | 0,6 | 1,8 | 4,2 | 0,2% |
| Habitat | | | | | | | | 2,2 | 0,2 | | 2,4 | 0,1% |
| Non affecté ("zone blanche") | | | | | | | | | 0,7 | | 0,7 | 0,04% |
| Activité économique industrielle | | | | | | | | | 0,6 | | 0,6 | 0,04% |
| Total (ha) | 122,8 | 138,9 | 213,5 | 129,7 | 169,8 | 275,5 | 137,1 | 157,0 | 171,8 | 186,2 | 1702,3 | |

Comme mentionné dans le point précédent, la demande porte sur l'ajout d'un périmètre de réservation en surimpression aux affectations actuelles du plan de secteur, aucune modification d'affectation n'est donc prévue.

2.2. Objectifs de la révision du Plan de secteur

Selon le dossier de base joint à la demande de révision du Plan de secteur, le projet de révision vise l'inscription d'un périmètre de réservation qui permettra la réalisation d'une infrastructure qui rencontrera simultanément les objectifs suivants :

- Assurer l'accès compétitif et abordable à l'électricité ;
- Augmenter la capacité d'accueil des énergies renouvelables (et donc augmenter la part d'énergie verte dans la consommation électrique belge et wallonne) ;
- Soutenir l'attractivité économique de la Wallonie, plus spécifiquement dans le Hainaut ;
- Fiabiliser l'approvisionnement électrique pour les consommateurs.

Toujours selon le dossier de base, l'infrastructure principale de transport d'électricité concernée par le projet de révision correspond à la partie wallonne d'une nouvelle liaison électrique aérienne en courant alternatif d'un niveau de tension de 380 kV et d'une capacité de transport de 2 x 3 GW, entre le poste électrique d'Avelgem et le poste électrique de Courcelles. Ce projet de nouvelle liaison se nomme Boucle du Hainaut.

La justification de la nécessité du projet de liaison électrique est brièvement exposée ci-après au regard du contexte énergétique et économique. Les éléments de cette justification sont majoritairement issus du dossier de base réalisé par Elia. L'analyse critique, par le chargé d'étude, des besoins invoqués et de la technologie retenue par Elia est respectivement réalisée aux chapitres 3 et 4 de la Phase 1 du présent rapport.

2.2.1. JUSTIFICATION EN LIEN AVEC LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ET CLIMATIQUE INTERNATIONAL, NATIONAL ET RÉGIONAL

2.2.1.a. CONTEXTE INTERNATIONAL

La transition énergétique a été amorcée de manière irréversible à la suite de décisions politiques internationales, européennes et nationales en réponse à des études scientifiques liées au réchauffement de la planète dû aux émissions de gaz à effet de serre.

La convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), signée le 9 mai 1992 à New York¹⁰, vise à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.

Initié en décembre 2015, l'Accord de Paris¹¹ préconise de limiter le réchauffement de la terre à 1,5 degré par rapport à l'époque préindustrielle. Depuis, l'Union Européenne a décidé d'être un acteur majeur de la transition énergétique qui en découle. Le 20 novembre 2016, la Commission européenne a publié son « Clean Energy Package » lequel vise à atteindre les objectifs de l'Union européenne fixés par l'Accord de Paris. Le « Clean Energy Package » initié en 2016 a été finalisé en 2019 par l'adoption par le Conseil et le Parlement européen de huit actes législatifs. Dans le cadre du « Clean Energy Package », l'Union européenne s'est fixé les objectifs suivants à l'horizon 2030 :

- réduction d'au moins 40 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990^{12,13} ;
- part d'énergie produite à partir de sources renouvelables d'au moins 32% de la consommation finale brute de l'UE¹⁴;
- amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 32,5 %¹⁵.

En décembre 2019, la Commission Européenne présentait le European Green Deal consistant en un ensemble de mesures qui devrait permettre aux citoyens et aux entreprises de l'UE de profiter d'une transition écologique durable. A travers le Green Deal, l'Europe s'est fixé l'objectif de devenir le premier continent neutre sur le plan climatique d'ici 2050. Pour optimiser l'atteinte des objectifs du Green Deal, la commission européenne a lancé le programme Fit-for-55 qui regroupe plusieurs propositions législatives devant permettre de réduire les émissions de CO₂ de 55% d'ici 2030.

¹⁰ Loi du 11 mai 1995 portant approbation à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, et les annexes I et II, faites à New York le 9 mai 1992; décret de la Région wallonne du 16 février 1995 portant approbation de la convention-cadre des Nations-unies sur les changements climatiques, faite à New York le 9 mai 1992. Approuvée par la Communauté européenne par la décision 94/69/CE du 15 décembre 1993 du Conseil concernant la conclusion de la convention-cadre sur les changements climatiques JO L 33, 7 février 1994, p. 11.

¹¹ Décision FCCC/CP/2015/L.9.

¹² Cadre d'action de l'Union européenne en matière de climat et d'énergie à l'horizon 2030 adopté en octobre 2014.

¹³ L'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre a été réparti entre les États membres par le Règlement n° 2018/842 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif aux réductions annuelles contraignantes des émissions de gaz à effet de serre par les États membres de 2021 à 2030 contribuant à l'action pour le climat afin de respecter les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris et modifiant le règlement (UE) n° 525/2013 (« Règlement n°2018/842 »). A la suite de ce Règlement, la Belgique est tenue de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 35 % pour 2030.

¹⁴ Directive 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables.

¹⁵ Directive 2018/2002 du 11 décembre 2018 modifiant la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique.

En 2022, suite à l'invasion de l'Ukraine par la Russie et face aux difficultés et aux perturbations du marché mondial de l'énergie qui en résultent, la Commission européenne a adopté le Plan REPowerEU. Ce Plan vise à rendre l'Europe indépendante des combustibles fossiles russes d'ici à 2027 et à accélérer la transition écologique. Il repose sur les trois piliers suivants :

- réaliser des économies d'énergie ;
- produire une énergie propre ;
- diversifier nos sources d'approvisionnement en énergie.

Parmi les mesures du Plan se trouve notamment l'ambition de faire passer de 40 % à 45 % l'objectif de l'UE à l'horizon 2030 en matière d'énergies renouvelables (déjà revu à la hausse en juillet 2021, de 32 à 40%).

2.2.1.b. CONTEXTE NATIONAL

Pour atteindre les objectifs issus de l'Accord de Paris et fixés par l'Union européenne, les quatre Ministres de l'Énergie en Belgique ont conclu en 2017 le « Pacte énergétique interfédéral belge, une vision commune pour la transition ». Ce pacte a été transformé en un plan d'exécution assorti de mesures concrètes : le projet de « Plan National intégré Energie Climat Belge 2021-2030 » (« PNEC Belge »), adopté le 18 décembre 2019. Ce dernier définit les objectifs énergétiques et climatiques suivants¹⁶ :

- Garantir une énergie sûre, durable et abordable. Viser un optimum entre efficacité environnementale, économique et sociale ;
- Placer le citoyen au cœur du système énergétique. Permettre et même encourager les citoyens et les entreprises à opérer les choix qui se révéleront les plus efficaces et efficients pour atteindre collectivement les objectifs par le biais de la participation et de l'information ;
- Maîtriser les coûts du système à un niveau abordable pour les petits et les grands consommateurs. La transition énergétique implique des coûts à tous les niveaux, mais l'immobilisme coûterait encore plus cher. La transition offre également des opportunités économiques à tous les niveaux. Une attention particulière sera accordée à l'accessibilité économique et à la compétitivité des entreprises, ainsi qu'aux consommateurs vulnérables ;
- Assurer la participation et la cohérence d'action de tous les niveaux de pouvoir. L'attention est portée à la concertation, à la cohérence entre les niveaux de compétence, à l'inclusion et à la communication pour obtenir un résultat positif.

Le PNEC Belge comprend les actions des quatre gouvernements fédéral et régionaux et doit faire en sorte que la Belgique réduise ses émissions de gaz à effet de serre de 35 % en 2030 (par rapport à 2005 pour les secteurs non –ETS) et que la part de la consommation belge en énergie provenant des énergies renouvelables atteigne 18,3 %¹⁷.

2.2.1.c. CONTEXTE RÉGIONAL

Le PNEC Belge synthétise le Plan wallon Energie Climat (la contribution wallonne au projet de ce plan). La contribution de la Région wallonne aux objectifs belges en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre est fixée à -37% en 2030 par rapport à 2005. En ce qui concerne la production d'énergie renouvelable, la Région wallonne prévoit un objectif de 37 % d'électricité renouvelable en

¹⁶ Plan national intégré Energie Climat belge 2021-2030, p. 14.

¹⁷ Plan national intégré Energie Climat belge 2021-2030, p. 14 et 15.

2030 et de 24,7 % de chaleur renouvelable. Pour ce faire, la Région wallonne s'est notamment fixé les objectifs suivants en termes d'évolution des réseaux¹⁸ :

- Maximiser la capacité d'accueil des infrastructures (pour les outils de production et les outils flexibles) et la synchronicité en visant l'optimisation du bien-être collectif du système électrique dans son ensemble ;
- Garantir un niveau de prix de l'énergie compétitif par rapport aux pays concurrents.

En outre, le 28 septembre 2017, le Parlement de Wallonie a adopté une résolution relative à la mise en œuvre d'une politique wallonne du climat¹⁹. Le préambule précise qu'un bilan énergétique provisoire a été établi en 2014 selon lequel la Wallonie a atteint une part de renouvelable de 10,8%, dont 3,1 % d'électricité, 6,5% de chaleur et 1,2% de transport et que des efforts doivent encore être fournis pour atteindre l'objectif de 13 % en 2020. Cette résolution démontre la volonté wallonne de mettre sur pied une politique wallonne du climat à long terme, cohérente avec celles des autres entités belges.

À la suite des élections régionales de juin 2024, le nouveau Gouvernement wallon a reconnu l'importance du projet Boucle du Hainaut en l'inscrivant dans sa déclaration de politique régionale sous les termes suivants : « *Au vu de l'enjeu stratégique de réindustrialisation de la Wallonie et singulièrement de création d'emplois en Hainaut, la Boucle du Hainaut sera concrétisée, sous toute réserve des procédures en cours. Le Gouvernement veillera à l'instauration d'un dialogue constructif entre toutes les parties prenantes portant sur les solutions techniques et économiques envisageables. Il veillera également à ce que les technologies choisies répondent au mieux aux enjeux industriels, de santé publique et d'impact environnemental. Le projet devra respecter les règles et recommandations internationales et du Conseil Supérieur de la santé, notamment en matière de nuisances électromagnétiques.* ».²⁰

2.2.1.d. OBJECTIFS DU PROJET BOUCLE DU HAINAUT RELATIFS AU CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ET CLIMATIQUE

Les objectifs climatiques sont le moteur de la transition énergétique. Les enjeux de cette transition impliquent une mutation du réseau électrique actuel liée à une transformation fondamentale du parc de production et à la modification de la consommation énergétique dans le but de décarboniser le système électrique.

Dans ce contexte énergétique et climatique, les objectifs fixés à l'échelle européenne, nationale et régionale impliquent un renforcement du réseau électrique belge, en particulier en lien avec :

- l'augmentation de la production d'énergies renouvelables et l'évolution du contexte énergétique en mer du Nord ;
- l'augmentation des quantités d'énergies transportées à travers le réseau belge suite à l'intégration croissante du marché européen et l'augmentation corrélative des opportunités d'importation et d'exportation d'énergie.

En effet, la Belgique prévoit une augmentation jusqu'à 3,5 GW de sa capacité de production électrique à partir d'éoliennes en mer du Nord (à travers le développement d'une île énergétique dans la zone Princesse Elisabeth) ainsi que la réalisation d'une seconde interconnexion avec le Royaume-Uni (projet Nautilus). A terme, la Belgique disposera donc de 5,8 GW de capacité de production en mer du Nord. A plus long terme, d'autres évolutions sont attendues en mer du Nord, telles qu'une nouvelle

¹⁸ Plan wallon Energie-Climat, p. 48.

¹⁹ Parl. wall., session 2017-2018, 886/9.

²⁰ Déclaration de politique Wallonie 2024-2029, p.70.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

interconnexion avec le Danemark raccordée à la zone Princesse Elisabeth (projet TritonLink) et des ambitions offshore supplémentaires jusque 8 GW au total sont à l'étude. Ces quantités croissantes d'énergies renouvelables devront être injectées sur le réseau de transport afin d'être acheminées vers les consommateurs, sans congestion. Or, cette production accrue d'énergies renouvelables est en corrélation avec une augmentation significative de la volatilité des flux d'énergies. En effet, les énergies renouvelables ayant comme caractéristiques de ne pas être produites de manière contrôlée et continue dans le temps, les flux d'électricité injectés sur le réseau seront plus volatiles qu'aujourd'hui.

Actuellement, une seule liaison 380 kV existe entre l'Ouest et le centre de la Belgique, la liaison Stevin - Horta (Zomergem) - Mercator (Bazel), d'une capacité de 2 x 3 GW (Figure 6). Cette liaison assure notamment le transport d'électricité en provenance des parcs éoliens belges en mer du Nord, de la France et du Royaume Uni vers le centre du pays.

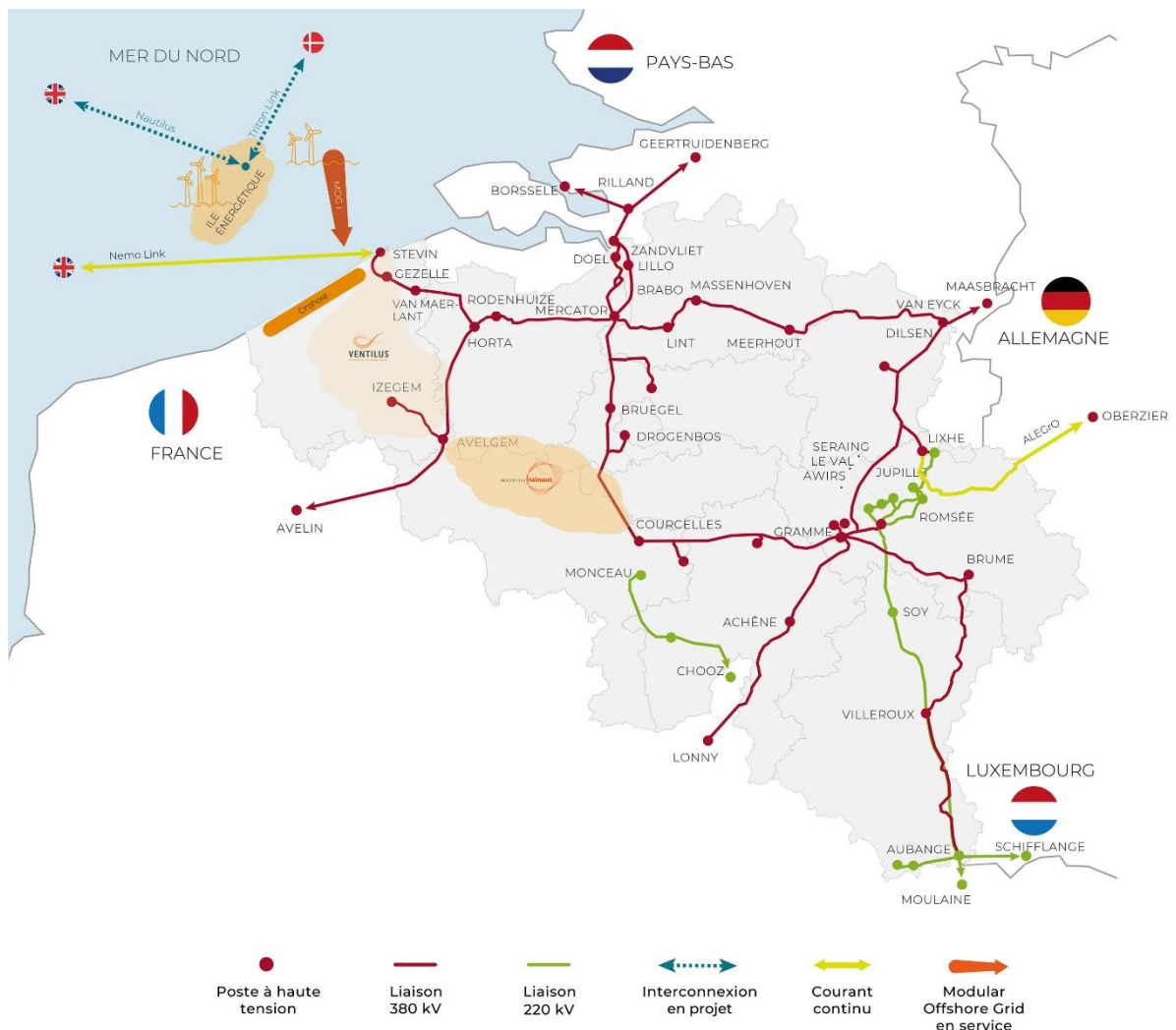


Figure 6: Carte du réseau 380 kV et 220 kV en Belgique (source : <https://boucleduhainaut.be/>)

Cette situation permet actuellement au flux transitant par la liaison de ne dépasser sa capacité que de manière ponctuelle compte tenu du volume de la production d'énergie venant des parcs éoliens situés en mer du Nord et du fait que l'import du Royaume-Uni, de la France, des Pays-Bas reste limité de par la capacité des autres lignes existantes (hors réseau Elia). A plus long terme, cette capacité sera en revanche insuffisante. Au vu des ambitions en matière d'intensification des échanges internationaux et de production d'énergies renouvelables, l'ouest du territoire national connaîtra de plus grands besoins

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

en matière de capacité d'accueil. Les simulations de marché et de réseau²¹ indiquent la liaison Avelgem–Mercator constitue déjà un goulot d'étranglement sur le réseau 380kV belge, et que d'ici 2030 cette saturation sera observée pendant près de 50 % de l'année.

Afin d'éviter cette saturation, l'augmentation de la capacité de transit d'ouest en est du pays s'articule à travers deux projets (Figure 6) :

- Projet Ventilus : reliant les postes de Stevin et Avelgem par une liaison aérienne d'une capacité de 6 GW ;
- Projet Boucle du Hainaut : reliant les postes d'Avelgem et de Courcelles par une liaison aérienne d'une capacité de 6 GW.

Le projet Ventilus prend place en région flamande et consiste à créer une maille dans le réseau entre les postes de Stevin, Horta et Avelgem, soulageant ainsi la section Stevin-Horta et dans une moindre mesure la section Horta-Avelgem.

Le projet Boucle du Hainaut prend quant à lui place à cheval entre les deux régions (2,8 km en Flandre et 84,8 km en Wallonie) et permet de créer une maille entre les postes de Horta, Mercator, Courcelles et Avelgem. Il soulage ainsi la section Horta-Mercator et dans une moindre mesure les sections Horta-Avelgem et Mercator-Courcelles.

Ces deux projets sont donc indépendants dans le sens où chacun est nécessaire pour soulager une liaison différente : Stevin-Horta pour Ventilus et Horta-Mercator pour la Boucle du Hainaut. Ces nouvelles connexions, en proposant une solution alternative de transit de l'électricité par le Sud, permettront en outre de faciliter l'entretien du réseau national dès lors qu'une interruption de liaison sur Stevin Horta pour Ventilus ou sur Horta-Mercator pour la Boucle du Hainaut n'entraînera plus une diminution de la capacité d'échange commercial.

Les deux projets concourent néanmoins un objectif commun de couvrir la capacité d'accueil nécessaire pour poursuivre le développement de la production d'énergie renouvelable en mer du Nord et en région côtière. Pour répondre au mieux à ces futurs besoins, il a été estimé qu'une capacité de 9 GW était nécessaire entre l'Ouest et le centre du pays. La capacité de transport des liaisons Ventilus et Boucle du Hainaut devra donc être d'au moins 6 GW (2 x 3 GW), ce qui garantit une capacité minimale de 3 GW lorsqu'un des éléments de la liaison est en maintenance ou en panne (situation N-1).

Ces projets d'infrastructures prennent place au sein d'un large programme de fiabilisation du réseau de transport d'électricité belge nommé « Future Grid ». Le Plan fédéral 2020-2030 de développement du réseau de transport d'électricité prévoyait déjà la réalisation d'ici 2030 au plus tard des projets Boucle du Hainaut et Ventilus. Le Plan fédéral 2024-2034 décrit ces projets comme liaisons offrant une capacité d'accueil supplémentaire indispensable, permettant de créer un réseau 380 kV maillé robuste et en prévoit la réalisation pour la période 2028-2030.

Selon les estimations, l'augmentation de la capacité de production en mer du Nord jusqu'à 8 GW et l'interconnexion avec le Danemark n'engendreront pas de besoins en capacité de transport supplémentaires à ceux offerts par la Boucle du Hainaut et Ventilus. A terme, il n'y aura donc pas de renforcement ni de dédoublement nécessaire de ces liaisons aériennes telles qu'actuellement projetées. Boucle du Hainaut et Ventilus sont par contre un préalable indispensable à la réalisation de tous ces projets d'augmentation de capacité de production en mer du Nord et d'interconnexion avec le

²¹ Réalisé par Elia sur base de la projection du mix énergétique belge en 2030 réalisée avec les hypothèses et modèles de réseau publiés par l'ENTSO-E dans le cadre du TYNDP 2018. <https://tyndp.entsoe.eu/>.

Danemark. Ceux-ci ne font, dès lors, que renforcer et même accélérer le besoin de la Boucle du Hainaut. En conclusion, le réseau électrique belge haute tension doit être renforcé et adapté afin de pouvoir répondre entre autres aux objectifs énergétiques et climatiques fixés par la Belgique.

2.2.2. JUSTIFICATION EN LIEN AVEC LE CONTEXTE ÉCONOMIQUE

La création d'un marché intégré de l'énergie à l'échelle européenne représente un enjeu majeur pour l'Union Européenne et ses Etats Membres, afin que ceux-ci puissent bénéficier de la convergence des prix qui en découlent. Selon Elia, la réalisation des projets transfrontaliers et de l'île Princesse Elisabeth tels que prévus dans le Plan Fédéral 2024-2034 (projets pour lesquels la Boucle du Hainaut est jugée essentielle) apportent des avantages socio-économiques qui renforcent le bien-être de la société belge et européenne. Par exemple, ils ont un effet direct sur le prix de gros annuel moyen de l'électricité en Belgique (-10 à -15 euro par MWh par rapport à la situation future dans laquelle ces projets ne se réaliseraient pas). Il existe également des bénéfices indirects grâce à la réduction significative des émissions de CO₂ (estimés à 1 000 à 1 500 millions d'euros par an).

Le « Clean Energy Package » vise à rendre possible ce marché européen intégré et à ce que les réseaux internes des Etats membres ne puissent être limitants pour une intégration complète du marché européen de l'énergie. Pour ce faire, il est prévu d'appliquer des pénalités financières importantes au gestionnaire de réseau de transport (GRT)/Pays dont le réseau interne présente des goulots d'étranglements. En effet, s'il n'y a pas assez de capacité de transport entre deux pays, il y aura une différence dans le prix du marché de l'électricité entre eux. Le pays dont le prix du marché est le plus bas voudra exporter de l'électricité vers le pays dont le prix du marché est le plus élevé, mais sera limité dans sa démarche par le goulot d'étranglement ou la congestion de la capacité de transport à la frontière. Le pays dont le prix du marché est le plus élevé est donc contraint de produire de l'électricité plus chère sur son propre territoire.

En l'absence de réalisation de la Boucle du Hainaut, le goulot que présentera à terme la ligne Avelgem-Mercator constituera donc une perte financière. La limitation des flux risque d'impacter le fonctionnement du marché belge et européen, de limiter l'accès aux énergies renouvelables et d'entraîner une augmentation des coûts de *redispatching*. En effet, le maintien de l'équilibre du réseau nécessitera de procéder au « redéploiement » des flux d'électricité sur le réseau, c'est-à-dire à la réduction de la production à un endroit déterminé en amont du goulot d'étranglement et à la compensation de cette réduction par une augmentation égale de production à un autre endroit en aval de ce goulot. Ces augmentations et réductions de production doivent respectivement être subsidiées et indemnisées par le gestionnaire du réseau et ces coûts sont *in fine* répercutés sur l'ensemble des consommateurs d'électricité.

Par ailleurs, au niveau régional, l'ouest du Hainaut ne bénéficie à l'heure actuelle, d'aucune injection électrique 380kV et s'appuie sur les injections 150kV de Ruien et Gouy-Lez-Piéton. Selon Elia, le réseau 150 kV arrive à saturation et ne permettra plus, sans renforcement, d'assurer l'équilibre entre la consommation et la production d'électricité. Une telle situation entraînerait des conséquences sur le développement de l'activité économique de la région, qui perdrait en attractivité, faisant diminuer les investissements sur ce territoire. De plus, cela remettrait en cause les plans d'électrification industriels et ralentirait la région dans les objectifs de réduction d'empreinte carbone.

Le projet Boucle du Hainaut a pour but d'éviter ces coûts à la société, de répondre aux besoins en capacité de transport supplémentaires et d'atténuer la divergence des prix prévue en facilitant le flux d'électricité entre la Belgique et les pays voisins.

2.3. Description du projet sous-jacent de ligne aérienne 380 kV

Une ligne aérienne est principalement composée de pylônes et de (sous-)conducteurs. Les lignes électriques doivent toujours être conformes aux normes définies par le Règlement général sur les installations électriques (RGIE) ainsi qu'à la norme européenne EN50341.

La figure ci-dessous présente les différents éléments d'une liaison aérienne à haute tension sur un pylône. Les pylônes sont les supports dont la partie supérieure soutient mécaniquement les conducteurs sur des consoles par l'intermédiaire d'isolateurs. Le support isolant est situé entre les conducteurs et les pylônes, afin d'isoler électriquement les conducteurs, sous tension, et les pylônes, hors tension. Chaque voie électrique (de trois phases chacune) s'appelle un terne (ou circuit). Deux ternes sont représentés sur la figure ci-dessous (à gauche et à droite du pylône).

Le réseau à haute tension en courant alternatif est triphasé. Chaque terne comporte donc 3 phases, elles-mêmes décomposées en un ou plusieurs sous-conducteurs : sur la figure, chaque console porte une phase.

La distance entre les phases et la longueur des isolateurs sont déterminées par le niveau de tension de la liaison. Plus les niveaux de tension sont élevés, plus les distances doivent être importantes pour garantir l'isolation électrique d'une phase par rapport à l'autre et d'une phase par rapport à la masse, et donc l'opérabilité de la liaison.

Enfin, le câble le plus haut est le câble de garde qui sert à protéger les conducteurs de phase contre la foudre et à évacuer son énergie vers la terre via la structure métallique du pylône. Il peut également avoir une fonction de communication lorsqu'il est équipé de fibres optiques. Une ligne 380 kV est équipée de 2 câbles de garde, dont 1 avec fibres optiques.

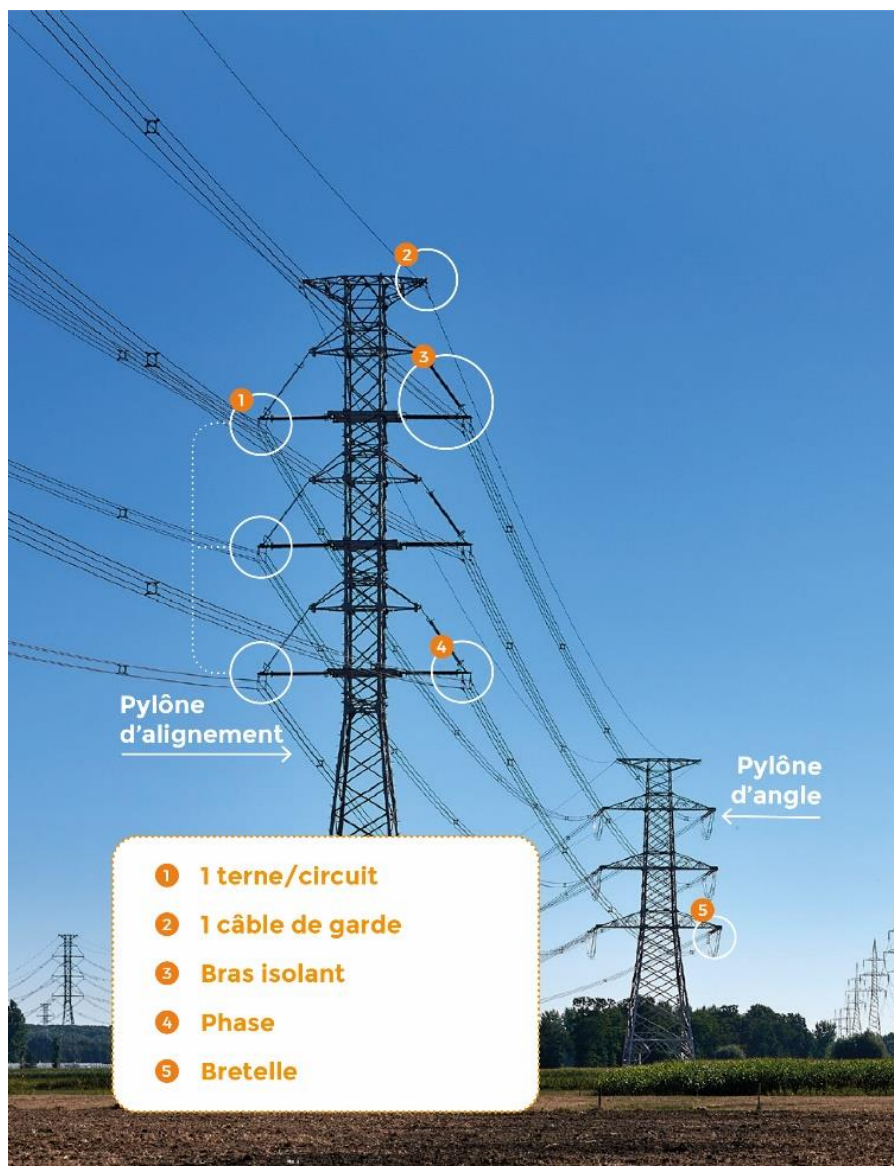


Figure 7 : Description d'un pylône et de ses composants (source : Dossier de base)

Les pylônes sont généralement espacés les uns des autres de 320 à 480 m, avec portée moyenne maximale de 400 m. La hauteur des conducteurs par rapport au sol dépend de l'endroit où on se situe dans la portée et de l'occupation du sol et est soumise à des normes et prescriptions légales. La flèche (différence de hauteur du conducteur au point le plus bas et la droite fictive reliant les 2 points d'accrochage du conducteur à hauteur des pylônes encadrants) présente des variations qui sont fonction de la température du conducteur. Plus le courant circulant dans les conducteurs est important, plus la température des conducteurs et donc la flèche augmentent. La température de l'air environnant influence également la température du conducteur.

La hauteur des pylônes est déterminée par la distance d'éloignement minimale à respecter entre les conducteurs et les éléments qu'ils surplombent (voir point 2.4.2) ainsi que les limites de champs électriques fixées par le RGIE (livre 3, prescrivant la distance d'éloignement minimale à respecter en tout temps par les conducteurs aériens vis-à-vis des objets et de l'environnement avoisinants). Cette distance varie selon le type d'objet ou d'environnement (champ, route, etc.).

Il existe plusieurs types de pylônes le long d'une ligne, énumérés ci-dessous selon leur fonction :

- **Pylônes d'alignements** : pylônes alignés pour lesquelles la ligne ne présente pas ou peu ($2.7^\circ = 3$ gons) d'angle. Ces pylônes sont dimensionnés en fonction des forces des conducteurs alignés, y compris la charge de vent et givre exercée sur les conducteurs ;

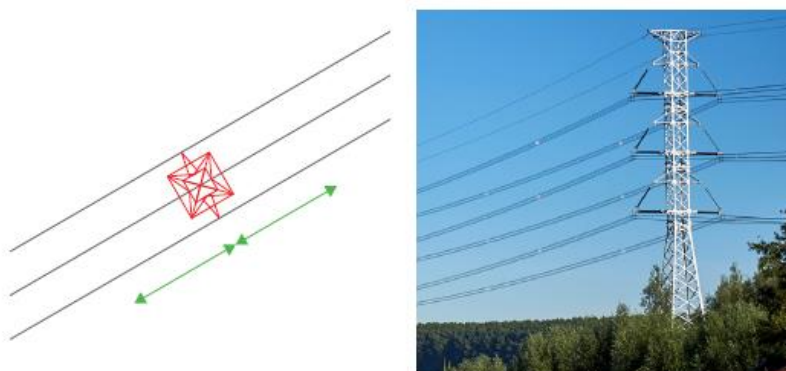


Figure 8 : Pylône d'alignement (source : Elia)

- **Pylônes d'angles** : pylônes pour lesquels la ligne présente un angle. Ceux-ci sont plus robustes que les pylônes d'alignement classiques, car ils doivent résister à une plus grande force de traction latérale exercée par les conducteurs. Il convient de préciser que les angles d'une ligne peuvent être, si nécessaire, décomposés en plusieurs angles, de maximum $27^\circ = 30$ gons), pour réaliser une courbe fluide ;

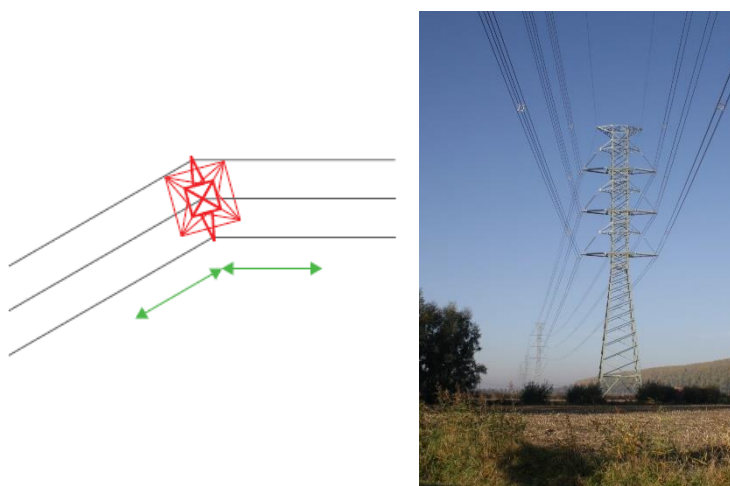


Figure 9 : Pylône d'angle (source : Elia)

- **Pylônes d'arrêt** : pylônes ayant pour fonction de maintenir tous les conducteurs d'un côté du pylône en cas de rupture accidentelle de tous les conducteurs situés de l'autre côté du pylône. Les pylônes d'arrêt sont principalement utilisés pour sécuriser les croisements de voies ferrées ou de routes principales, ou pour empêcher un effet de cascade (ou domino) lorsque, par exemple, un pylône d'alignement tombe. En moyenne, un pylône d'arrêt est prévu approximativement tous les 4 kilomètres ;

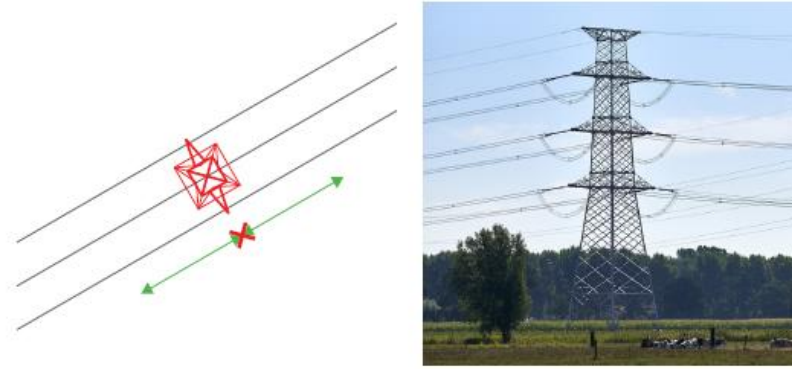


Figure 10 : Pylône d'arrêt (source : Elia)

- **Pylônes d'extrémité** : pylônes situés à l'arrivée de la ligne aérienne dans un poste. Ceux-ci présentent une résistance suffisante pour pouvoir supporter les forces de traction permanentes de l'ensemble des conducteurs dans une seule direction (contrairement à un pylône d'arrêt où les conducteurs ne peuvent être supportés dans une seule direction qu'en cas d'incident). Un pylône d'extrémité est 20 % plus résistant qu'un pylône d'arrêt.



Figure 11 : Pylône d'extrémité (source : Elia)

2.3.1. FORMES ET CARACTÉRISTIQUES DES INSTALLATIONS PROJETÉES

Les pylônes sont prévus pour répondre au niveau de fiabilité prescrit par la norme européenne EN50341, ce qui correspond au niveau de fiabilité le plus sévère. Le niveau 3 est le niveau de fiabilité appliqué au projet Boucle du Hainaut.

Tableau 5 : Niveaux de fiabilité relatifs aux lignes de transport électrique

| Niveau de fiabilité | 1 | 2 | 3 |
|---|----|-----|-----|
| T, période de retour des charges climatiques limites, en années | 50 | 150 | 500 |

Les pylônes présenteront une hauteur d'environ 50 m à 60 m et seront espacés de 320 à 480 m, en respectant une portée moyenne maximale de 400 m. Chacun d'eux sera équipé de :

- 2 ternes (ou circuits) de trois phases comportant chacune 4 conducteurs de 707 mm², de 3,24 cm de diamètre, d'alliage aluminium et de couleur grise ;
- 1 câble de garde de 298 mm², de 2,24 cm de diamètre, d'alliage aluminium et de couleur grise ;

- 1 câble de garde de 281 mm², de 2,22 cm de diamètre, d'alliage aluminium, de couleur grise et équipé de fibres optiques pour la communication entre postes.

Il existe plusieurs pylônes envisageables pour la mise en œuvre d'un projet comme celui-ci. Les principaux modèles en application à l'échelle industrielle sont énumérés ci-dessous.

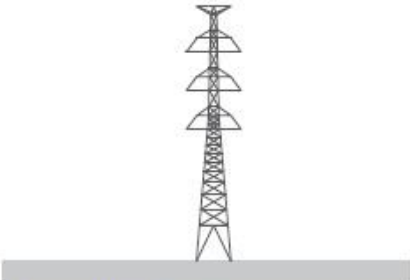
Les **pylônes en treillis** sont les plus courants en Belgique, et ce, sous la forme du « pylône classique ». À l'occasion du projet Stevin, un « pylône en treillis compact à bras isolants » a également été réalisé pour la première fois en Belgique. Celui-ci a été optimisé en termes de hauteur, de largeur et de champs électromagnétiques. Comparé au pylône 380 kV classique, celui-ci est plus petit et possède approximativement la silhouette d'un pylône portant une ligne haute tension de 150 kV classique. La figure ci-dessous permet de comparer géométriquement ces deux types de pylônes.



Figure 12 : Pylônes portant une ligne de 380 kV compact (à gauche) et de 150 kV (à droite)

Une seconde option réside dans l'implantation de **pylônes tubulaires** monopodes ou bipodes, constitués d'un ou deux fûts cylindriques auxquels sont fixées les consoles. Les pylônes tubulaires existent en béton, en métal ou dans une combinaison de ces deux matériaux. Des prototypes en matériau composite existent également.

Les principaux modèles de pylônes utilisés à travers le monde sont repris ci-dessous.



Pylône compact, Belgique



Pylône double drapeau, Belgique



Compactline, Allemagne



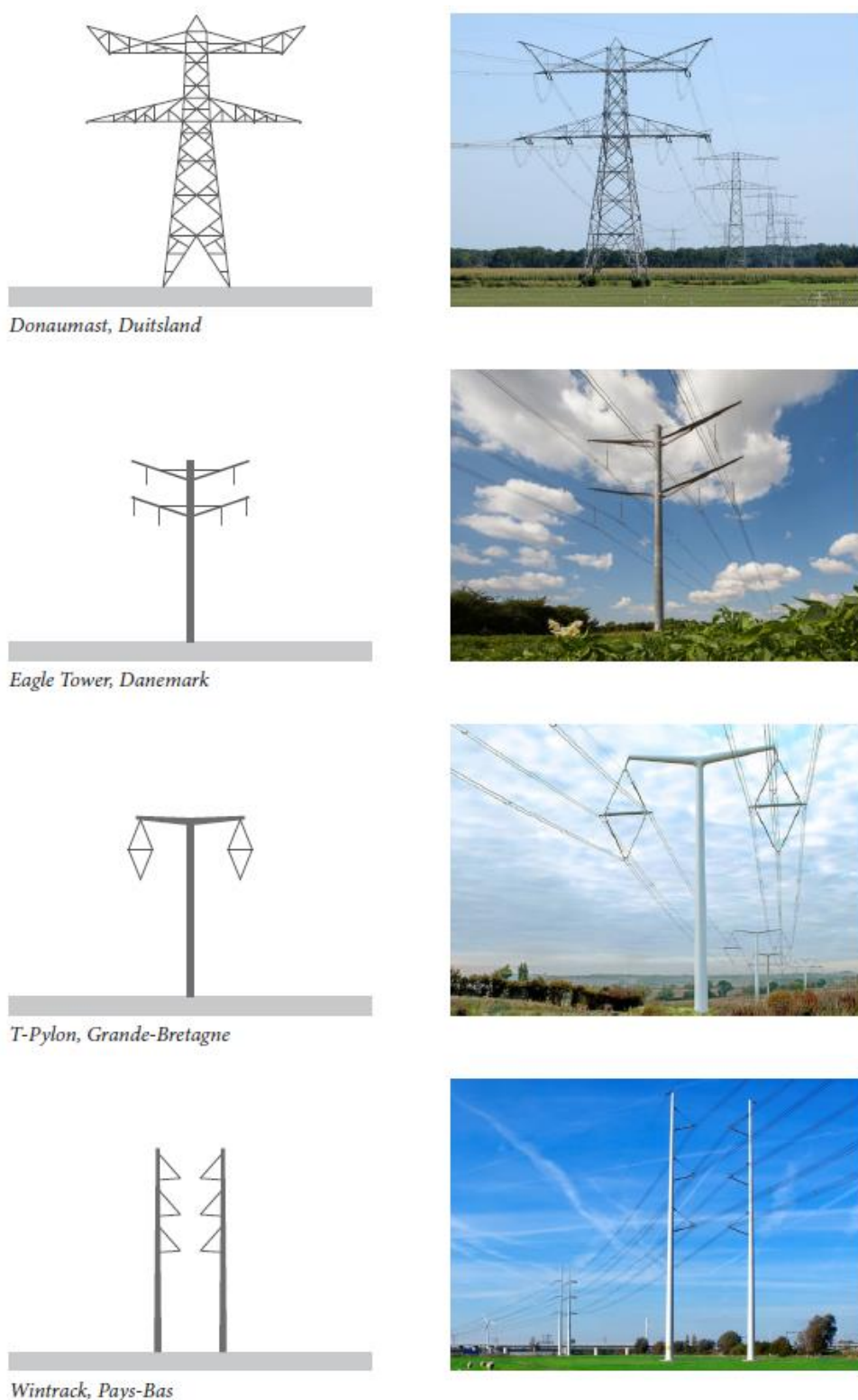


Figure 13 : Modèle de pylônes treillis et tubulaires existants et pays d'exploitation (source : Elia)

Afin de répondre aux mieux aux critères et normes de sécurité, de fiabilité et d'exploitabilité imposés en Belgique et exigés par Elia, le choix généralement fait par Elia pour ce type de liaison est le pylône compact, déjà utilisé sur notre territoire.

Parmi les modèles de pylônes envisageables pour le projet Boucle du Hainaut, les pylônes en treillis compacts et Wintrack présentent une zone de champs magnétiques plus étroite que tous les autres types et sont adaptés pour être utilisés dans des régions densément bâties. En effet, si les autres modèles présentent une hauteur généralement plus faible, ils comprennent une zone de conducteurs et une zone de champ magnétique beaucoup plus larges. Par conséquent, dans le cadre du présent rapport, seuls les modèles en treillis compact seront considérés. Le choix définitif concernant le type de pylônes pour le projet fera toutefois l'objet d'études ultérieures telles que l'étude d'incidences associée à la future demande de permis d'urbanisme pour la construction de la ligne haute tension.

2.3.2. CHARGE NOMINALE ET CHARGE ANNUELLE MOYENNE

Comme détaillé au point 2.2.1.d, il a été estimé qu'une capacité de 9 GW était nécessaire entre l'ouest et le centre du pays. La capacité de transport de la liaison Boucle du Hainaut devra donc être d'au moins 6 GW (2 x 3 GW), ce qui garantit une capacité minimale de 3 GW lorsqu'un des éléments de la liaison est en maintenance ou en panne (situation N-1). La charge circulant dans la liaison projetée n'est toutefois pas atteinte en permanence. On distingue ainsi :

- La charge nominale : C'est la charge maximum pour laquelle la liaison a été dimensionnée et donc susceptible d'y circuler en permanence indépendamment de la structure réelle du réseau. Dans la réalité, elle ne sera atteinte qu'en situation exceptionnelle et temporaire (défaut sur une autre ligne) et pour autant que la structure du réseau le permette ;
- La charge annuelle moyenne : C'est la charge annuelle non dépassée pendant 50 % du temps, compte tenu des charges du réseau qui varient d'heure en heure et suivant les saisons. Dans le cas du présent projet, elle a été considérée comme valant 35 % du courant nominal. C'est cette valeur qu'il convient de prendre en compte pour déterminer les champs relatifs à une exposition de longue durée. La charge annuelle moyenne de 35% considérée résulte des charges attendues aux horizons 2035 et 2040 (respectivement de 27% et 31%) et de la prise en compte d'une marge d'erreur²².

2.4. Description du chantier du projet sous-jacent de ligne aérienne 380 kV

2.4.1. PHASAGE DE CHANTIER

La mise en place d'une nouvelle infrastructure de transport d'électricité de cette envergure est réalisée par cantons de 3 à 4 km comprenant une dizaine de pylônes. Pour chacun d'eux, le phasage général se déroule comme suit :

2.4.1.a. TRAVAUX DE PRÉPARATION

²² Il est à noter que cette charge est plus importante que ce qui a été considéré dans le cadre des études relatives à la ligne Ventilus. Cela est dû au fait que la Boucle du Hainaut supportera en plus les flux en provenance des échanges avec la France (liaison Avelin-Avelgem).

Il est également à noter que dans le cadre du dossier de base, c'est un courant moyen annuel de 25% qui avait été considéré. Les études menées depuis le dépôt de celui-ci ont néanmoins permis de définir de façon plus fiable la courbe de charge sur la liaison et d'affiner la valeur 35%.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Les travaux de préparation comprennent la mise en place des accès carrossables, de portiques de protection et des zones de chantier au pied des pylônes projetés.

Cette phase dure 2 mois par canton.

Mise en place des accès

Les accès sont réalisés depuis les voiries existantes vers la zone d'installation des nouveaux pylônes. Leur longueur dépend de la distance entre la zone de chantier et la route existante la plus proche permettant le transport du matériel nécessaire. Les accès sont soit constitués de tôles de roulage, soit de gravier. En cas d'accès en gravier, ceux-ci sont généralement mis en place en excavant 40 cm de sol sur une largeur de 5 m et en recouvrant ensuite ce sol mis à nu d'une couche de géotextile puis de gravier. Les couches excavées sont stockées sur le côté de l'accès tout au long du chantier. Les accès en tôles ne nécessitent pas de préparation du sol, à l'exception de quelques nivellements ponctuels en cas d'irrégularités du sol.

Mise en place des portiques de protection

Afin de garantir la sécurité des utilisateurs du réseau de voirie en cas de chute accidentelle de conducteur durant le chantier, des portiques de protection sont placés aux croisements (ou zones de communication) entre des infrastructures (voiries routières, chemins de fer, canaux) et la ligne projetée. Ceux-ci sont généralement constitués de 2 poteaux en bois verticaux (ou plus, en fonction de la largeur à protéger) plantés dans le sol ou fixés par des blocs de béton et surplombés d'un montant en bois horizontal (ou plus, en fonction de la largeur à protéger) fixé au sommet.



Figure 14 : Exemple d'accès en gravier (à gauche) et de portique de protection à droite (source : Elia, Etude d'incidences relative à la démolition et reconstruction de la ligne haute tension de 150 kV entre Gouy et Oisquercq, 2017)

Mise en place des zones de chantier

Une zone de chantier est aménagée au pied de chaque pylône projeté et consiste en une superficie d'environ 50 x 50m de tôles, qui permettra la stabilité des engins de chantier lors du montage du pylône.

De telles zones sont également prévues aux emplacements des tireuses-freineuses.

2.4.1.b. TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL

Durant cette phase de chantier, le terrassement et le coulage des fondations des pylônes projetés sont réalisés.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Cette phase dure 1 mois par pylône et 4 mois par canton.

2.4.1.c. ASSEMBLAGE ET MONTAGE DU PYLÔNE

Au cours de cette phase, l'assemblage mécanique des composants des pylônes est réalisé au sol. Ces derniers sont ensuite montés à l'aide d'une grue.

Cette phase dure 1 mois par pylône et 4 mois par canton.



Figure 15 : Assemblage et montage d'un pylône treillis (source : Elia)

2.4.1.d. TIRAGE DES CONDUCTEURS

Les conducteurs sont tirés et fixés aux pylônes lors de cette phase. Pour ce faire, des poulies de tirage sont placées sur les consoles des pylônes.



Figure 16 : Poulies de tirage (à gauche) et poulies fixées aux consoles d'un pylône (à droite) (source : Etude d'incidences relative à la démolition et reconstruction de la ligne haute tension de 150 kV entre Gouy et Oisquercq, 2017)

Ensuite, une corde est guidée dans la poulie des consoles à équiper. Cette opération est répétée pour chaque conducteur et est réalisée à pied (un homme monte et descend le long d'un pylône) ou par hélicoptère ou drone.



Figure 17 : Installation de la corde dans les poulies de tirage par hélicoptère (source : Etude d'incidences relative à la démolition et reconstruction de la ligne haute tension de 150 kV entre Gouy et Oisquercq, 2017)

Les cordes tirées sont raccordées à une câblette en acier. Une tireuse, située à l'avant du canton en construction, tire alors la corde pour mettre en place la câblette. Une freineuse, située en fin de canton permet de réguler la tension dans la câblette durant cette opération. Cette opération sera réitérée pour remplacer la câblette par les conducteurs. Les conducteurs seront finalement fixés aux chaînes d'isolateurs.



Figure 18 : Tireuse et freineuse utilisées pour la mise en place du câble

Cette phase dure 2 mois pour l'ensemble d'un canton.

2.4.1.e. MISE EN SERVICE DE LA LIGNE

Lorsque la construction de la ligne est complètement terminée, elle fait ensuite l'objet d'une vérification générale et de sécurité avant sa mise en service industrielle.

2.4.1.f. TRAVAUX DE DÉMOBILISATION

Les portiques, accès et zones de chantier sont démontés dès que la construction d'un canton est terminée.

2.4.1.g. ETATS DES LIEUX DE SORTIE ET INDEMNISATIONS DES ÉVENTUELS DÉGÂTS

Un état des lieux de sortie permet de constater les éventuels dégâts engendrés par les travaux par rapport à l'état des lieux d'entrée. Dans la mesure du possible une restauration des zones impactées a lieu. Dans le cas contraire, les propriétaires et/ou exploitants sont indemnisés.

L'ensemble de ces étapes a lieu de manière séquentielle pour chaque pylône, mais elles se déroulent de façon simultanée pour plusieurs pylônes au cours du chantier global pour un canton. La durée de chantier par canton entier est d'environ 12 mois. Le chantier se déroule également simultanément pour plusieurs cantons de sorte que la durée totale du chantier pour la mise en œuvre du projet de ligne aérienne est estimée à environ 3 ans.

L'essentiel des interventions de chantier a lieu sur les zones d'implantation de pylône. Il n'y a pas d'intervention entre deux pylônes à l'exception de la mise en place et démontage des protections et du tirage des conducteurs.

2.4.2. CHANTIER ET SURPLOMB EN ZONE BOISÉE

En cas d'implantation d'une ligne ou d'un pylône et donc d'une zone de chantier en zone boisée, des élagages importants ainsi que des coupes étagées voire à blanc sont réalisés. Il en est de même pour les accès pendant la phase de chantier.

Lors du surplomb d'une zone forestière par la ligne, une distance de sécurité entre les arbres et les conducteurs doit être maintenue. Comme l'illustre la figure ci-dessous, pour une ligne de 380 kV, ces distances sont respectivement de 7,5 m à la verticale et 17 m à l'horizontale par rapport à l'axe des conducteurs. Selon la hauteur des arbres et leur distance par rapport à la ligne, des élagages plus ou moins importants peuvent être nécessaires.

Tableau simplifié des valeurs indicatives

| | RGIE | | Pratique | | | |
|--------------|---|--|-------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| | | | Verticale (V1) (en mètres) | | Horizontale (H2) (en mètres) | |
| | D _L zone à risque en mètres | D _V zone de proximité en mètres | Cu | AMS; Alac | Cu | AMS; Alac |
| ligne 70 kV | 0,75 | 1,75 | 3 | 4,5 | 7 | 8 |
| ligne 150 kV | 1,20 | 3,20 | 4,5 | 6 | 8,5 | 13 |
| ligne 220 kV | 1,60 | 3,60 | | 6,5 | | 16 |
| ligne 380 kV | 2,50 | 4,50 | | 7,5 | | 17 |

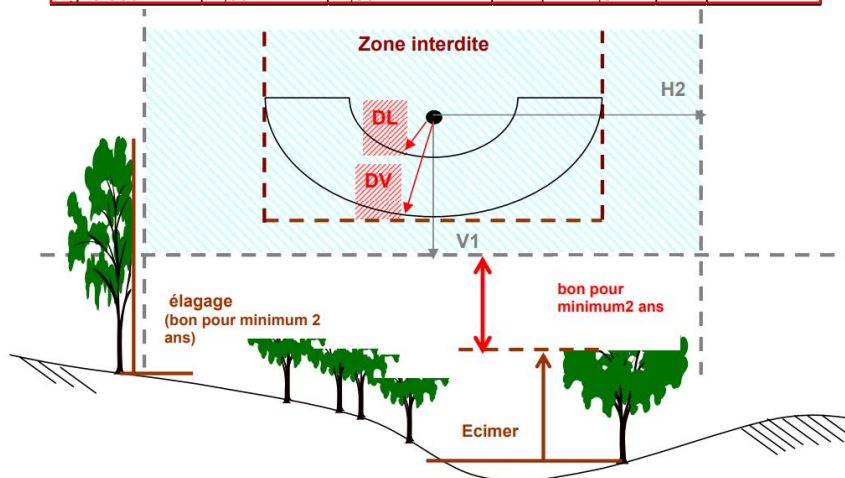


Figure 19 : Distances de sécurité nécessaires entre les arbres et les conducteurs d'une ligne aérienne (Source : Elia)

2.4.3. ENGINES DE CHANTIER

Les engins de chantier utilisés pour ce type de chantier sont les suivants :

- Pelleteuses pour les terrassements et le creusement des fondations ;
- Machines pour réalisation des pieux de fondation ;
- Camion-toupie pour l'acheminement du béton des fondations sur site ;
- Camion de type « convoi exceptionnel » conventionnel pour l'acheminement de certains matériels et engins de chantier ainsi que pour le transport de certains types de pylônes ;
- Grues de levage afin de monter les pylônes (capacité de 80 - 200 tonnes en fonction du pylône et des accès) ;
- Tireuses-freineuses afin de tirer les conducteurs ;
- Nacelles afin d'accéder aux pylônes et aux isolateurs ;
- Véhicules utilitaires, camions, camionnettes, etc.

3. ANALYSE DES BESOINS

3.1. Préambule

Le projet Boucle du Hainaut prévoit la création d'une nouvelle liaison électrique d'un niveau de tension de 380 kV et d'une capacité de transport de 6 GW entre les postes d'Avelgem et de Courcelles.

Le dossier de base expose les 4 objectifs principaux suivants pour le projet Boucle du Hainaut :

- 1 Fiabiliser l'approvisionnement électrique pour les consommateurs ;
- 2 Augmenter la capacité d'accueil des énergies renouvelables ;
- 3 Soutenir l'attractivité économique de la Wallonie, plus spécifiquement dans le Hainaut ;
- 4 Assurer l'accès compétitif et abordable à l'électricité.

Les éléments de justification d'Elia d'un point de vue du contexte énergétique, climatique et économique ont été présentés au point 2.2 de la phase 1 du rapport. Ce chapitre vise à vérifier la pertinence des besoins auxquels doit répondre le projet, il décrit d'abord le réseau électrique belge et présente les principes fondamentaux de son fonctionnement et développement. Le chapitre rappelle ensuite les différents objectifs climatiques et présente les changements qu'ils impliquent pour le secteur énergétique. Enfin, il identifie les faiblesses du réseau électrique belge en lien avec le projet Boucle du Hainaut et vérifie les besoins du projet.

Ce chapitre a principalement été rédigé sur base des documents suivants :

- Plan de développement fédéral 2024-2034. Elia, 2023²³ ;
- Adequacy and flexibility study for Belgium 2024-2034. Elia, 2023²⁴ ;
- Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036. Elia, 2025²⁵ ;
- Avis sur la nécessité d'une nouvelle liaison à 380 kV entre Avelgem et Courcelles et synthèse pour le grand public. Jing Dai, janvier 2021 (**Annexe 4**) ;
- Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai. Menelika Bekolo Mekomba, septembre 2021 (**Annexe 5**).

Dans le cadre de la présente analyse des besoins, le bureau d'études s'est adjoint le soutien technique d'un expert externe, le professeur Pierre Henneaux, dont le CV est repris en **Annexe 10**.

Chargé de cours à l'École polytechnique de Bruxelles (ULB), Pierre Henneaux est un spécialiste des systèmes électriques et de leur fiabilité. Ingénieur civil de formation, il a obtenu son doctorat en Sciences de l'Ingénieur et Technologie à l'ULB en 2013, avec une thèse sur l'évaluation probabiliste du risque de black-out dans les réseaux électriques. Il a également été chercheur postdoctoral à l'Université de Washington à Seattle. Ses travaux portent sur la modélisation, la gestion des risques et la fiabilité des systèmes électriques. Il enseigne plusieurs cours au génie électrique et aux réseaux électriques. Il est membre actif de l'IEEE et de CIGRE, contribuant à divers groupes de travail internationaux. Il a réalisé plusieurs études pour les pouvoirs publics européens et belges (Commission Européenne, EIB, ACER,

²³ <https://www.elia.be/fr/infrastructure-et-projets/plans-investissements/plan-de-developpement-federal-2024-2034>

²⁴ <https://www.elia.be/en/electricity-market-and-system/adequacy/adequacy-studies>

²⁵ <https://www.elia.be/en/electricity-market-and-system/adequacy/adequacy-studies>

CREG) sur le développement du réseau électrique, sur les marchés de l'électricité et sur la gestion des congestions au sein du réseau de transport.

Son analyse technique permettant de valider le contenu de ce chapitre a été intégrée au texte sous la forme d'encadrés insérés à la suite des paragraphes tirant des conclusions relatives aux besoins du projet.

3.2. Le réseau électrique européen et belge

3.2.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU RÉSEAU

Les réseaux électriques sont un ensemble d'infrastructures électriques transportant l'énergie électrique des sites de production vers les sites de consommation.

Le réseau de transport d'électricité européen connecte les réseaux nationaux des états membres de l'Union européenne. Pour rappel, la création d'un marché intégré de l'énergie à l'échelle européenne représente un enjeu majeur pour l'Union Européenne et ses Etats Membres, permettant aux consommateurs de profiter des avantages économiques d'un marché unique de l'énergie (convergence des prix notamment), en assurant la sécurité de l'approvisionnement et en stimulant le processus de décarbonation. Le « Clean Energy Package » vise à rendre possible ce marché européen intégré et à ce que les réseaux internes des Etats membres ne puissent être limitants pour une intégration complète du marché européen de l'énergie. La figure suivante présente la situation de la Belgique au sein du réseau électrique européen.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES



Figure 20 : Localisation de la Belgique au sein du réseau électrique européen (source : Entso-E)

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Au sein du réseau européen, le réseau de transport d'électricité belge est composé de différents niveaux de tension : 30kV, 36kV, 70kV, 110kV, 150 kV, 220 kV et 380 kV. A courant égal, plus le niveau de tension est élevé, plus la quantité d'énergie pouvant être transportée est grande. Le réseau électrique 380 kV, le niveau de tension le plus élevé du backbone (réseau de transport principal), est considéré comme la colonne vertébrale du réseau dès lors qu'il permet d'acheminer un flux important d'énergie en limitant les pertes énergétiques dans les installations de transport. Les liaisons présentant un niveau de tension 150kV et inférieur servent à transporter l'électricité vers les principaux points de consommation. Ensuite, les gestionnaires de réseau de distribution s'occupent de la faire parvenir aux utilisateurs à des tensions plus basses.

Les réseaux de transport électriques assurent également les interconnexions avec le réseau de transport européen. Le réseau de transport belge possède plusieurs interconnexions avec l'Allemagne, la France, les Pays-Bas, le Luxembourg et le Royaume-Uni. Ces interconnexions permettent l'échange de flux marchés en importation et exportation afin de sécuriser l'approvisionnement et d'accéder à des prix compétitifs (convergence des prix).

Le réseau est également connecté avec les parcs éoliens offshore situés en mer de Nord et permet le rapatriement de cette énergie renouvelable sur le continent.

La Figure 21 présente un aperçu du réseau de transport haute tension 380 kV et 220 kV belge.

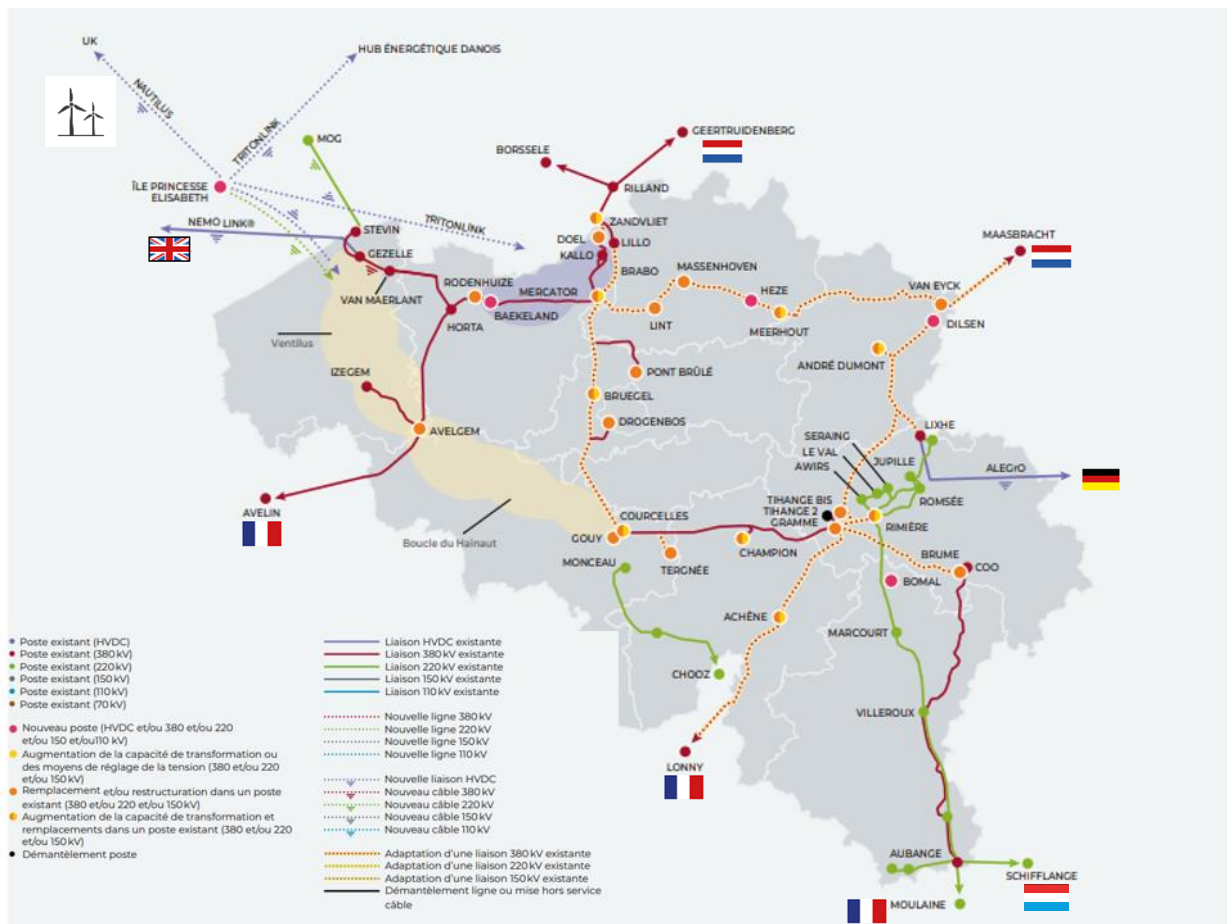


Figure 21: Carte du réseau 380 kV et 220 kV (source : Plan fédéral de développement 2024-2034)

3.2.2. L'ÉQUILIBRE PRODUCTION – CONSOMMATION ET PLANIFICATION DU RÉSEAU

Le bon fonctionnement du système électrique nécessite un équilibre entre la production et la consommation à tout instant²⁶. Ainsi, si la demande en électricité augmente, il faut produire plus d'électricité et celle-ci est acheminée par le réseau de transport aux points de consommation. La nécessité du maintien de cet équilibre implique que le réseau de transport doit être capable de répondre aux plus fortes demandes, même si elles ne surviennent que quelques fois dans l'année.

L'équilibre production – consommation du système à tout instant est indispensable à sa fiabilité. Le paramètre permettant de vérifier cet équilibre est la fréquence du réseau. Pour être fiable, c'est-à-dire pour garantir la fourniture d'électricité aux consommateurs, le système doit respecter une valeur fixe de fréquence²⁷, qui est de 50 Hz en Europe. Si l'équilibre se rompt alors la fréquence s'écarte de cette valeur, ce qui entraînerait des déconnexions d'infrastructures majeures, engendrant une panne d'électricité pour une partie voire l'entièreté du territoire en cas de black-out généralisé.

Afin de s'assurer de l'équilibre du système sur le long terme, une planification du réseau de transport est mise en place par Elia. La planification du réseau vise à développer le réseau selon les prédictions de besoins et de productions futurs, dans l'objectif qu'il soit toujours en mesure d'alimenter les besoins en fonction de la production à un horizon de temps donné. En effet, le développement de projets d'infrastructures étant long (conception, obtention des autorisations, chantier et mise en fonctionnement), le développement du réseau nécessite d'anticiper ce qui est à venir sur base de nombreuses simulations et d'hypothèses de consommation et de production. Ces différentes simulations sont appliquées au réseau existant afin d'observer si celui-ci respecte les paramètres techniques (fréquence, tension, limites thermiques, etc.) permettant d'éviter la surcharge et la déconnexion des infrastructures. En fonction des risques observés sur la fiabilité du réseau existant et selon des critères de conception, il peut alors être décidé d'ajouter ou de renforcer des liaisons pour qu'il reste fiable et robuste.

3.2.3. LE CRITÈRE N-1

Le critère N-1 est un critère de conception devant être respecté lors du développement du réseau électrique, il s'agit d'une imposition européenne²⁸. La situation N-1 équivaut à la perte d'un élément de transport ou de production sur un réseau électrique due à un incident ou des opérations de maintenance. Un réseau robuste doit être capable de supporter cette perte et de garantir à tout moment la sécurité de l'approvisionnement. Cela signifie un maintien des paramètres techniques dans les marges fixées sans quoi cela peut déclencher des déconnexions en cascade pouvant potentiellement conduire à une perte totale du réseau électrique interne ou à des incidents sur d'autres réseaux interconnectés.

En cas de perte d'un élément de transport, le réseau doit donc être en mesure de transporter l'électricité par un chemin alternatif et de maintenir l'alimentation des points de consommation.

²⁶ à moins que le stockage de l'énergie ne soit prévu sur le réseau électrique.

²⁷ Mesurée en hertz (Hz), la fréquence représente le nombre de changements de sens effectués par le courant en une seconde. Le réseau électrique européen (et donc belge) est basé sur le courant alternatif d'une fréquence de 50Hz (le courant effectue donc 50 allers-retours par seconde).

²⁸ Règlement (UE) 2017/1485 de la commission du 2 août 2017 établissant une ligne directrice sur la gestion du réseau de transport de l'électricité. Article 32.

3.3. Evolutions du secteur énergétique

3.3.1. OBJECTIFS CLIMATIQUES

À la lumière des études scientifiques traitant du réchauffement climatique et des émissions de gaz à effet de serre, des objectifs ont été fixés aux échelles internationales et nationales. En particulier, les Parties à l'Accord de Paris se sont engagées à limiter l'augmentation de la température à 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle. Suite à cet accord, l'Europe s'est fixé, à travers le Green Deal, l'objectif de devenir le premier continent neutre sur le plan climatique d'ici 2050. La Commission européenne a ensuite publié son « Clean Energy Package » fixant notamment les objectifs suivants à l'horizon 2030 :

- La réduction d'au moins 40% des émissions de gaz à effet de serre ;
- La part d'énergie produite à partir de sources renouvelables d'au moins 32% de la consommation finale brute de l'UE ;
- L'amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 32,5%.

En 2022, suite à l'invasion de l'Ukraine par la Russie et face aux difficultés et aux perturbations du marché mondial de l'énergie qui en résultent, la Commission européenne a adopté le Plan REPowerEU. Ce Plan vise à rendre l'Europe indépendante des combustibles fossiles russes d'ici à 2027 et à accélérer la transition écologique en augmentant à 45 % l'objectif de l'UE à l'horizon 2030 en matière d'énergies renouvelables.

A l'échelle nationale, le Plan National intégré Energie Climat Belge 2021-2030 (« PNEC Belge ») comprend les actions des quatre gouvernements fédéral et régionaux et doit faire en sorte que la Belgique réduise ses émissions de gaz à effet de serre de 35 % en 2030 (par rapport à 2005 pour les secteurs non –ETS²⁹) et que la part de la consommation belge en énergie provenant des énergies renouvelables atteigne 18,3 %.

La transition énergétique qu'impose l'atteinte de ces objectifs nécessite d'importantes modifications du secteur énergétique. Elle implique d'une part l'électrification de la société en vue de diminuer les émissions de gaz à effet de serre issues de la consommation d'énergies fossiles et d'autre part, l'augmentation de la production d'énergie renouvelable. Initiée en réponse aux divers enjeux et objectifs climatiques, la transition énergétique s'est vue accélérée en raison de la crise géopolitique et de l'augmentation du prix de l'énergie qui en a résulté.

3.3.1.a. ELECTRIFICATION DE LA SOCIÉTÉ

La Figure 22 illustre les tendances majeures nécessaires au secteur énergétique pour atteindre l'objectif de neutralité carbone.

Les objectifs de diminution d'émissions de gaz à effet de serre nécessitent de diminuer la consommation d'énergies fossiles. Dans ce contexte, l'électrification de la société consiste à remplacer les énergies fossiles par de l'électricité produite de la manière la plus propre possible, et donc à partir de sources d'énergie renouvelable (SER). A la lumière des objectifs climatiques précités, les tendances relatives à la consommation énergétique comprennent donc une augmentation importante de la part de l'électricité et de l'énergie renouvelable dans le mix énergétique.

En parallèle, une tendance à la réduction de la consommation d'énergie globale est également attendue. Cette baisse s'explique d'une part par la sobriété énergétique et d'autre part par l'amélioration de

²⁹ ETS=Emission Trading System. Les secteurs non-ETS sont les secteurs qui ne sont pas concernés par le système d'échange de quotas d'émissions de GES de l'Union européenne (transport, bâtiments, agriculture, déchets...)

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

l'efficacité énergétique. En effet, pour de nombreuses applications finales, l'utilisation de l'électricité comme vecteur énergétique entraîne une efficacité énergétique beaucoup plus élevée que l'utilisation d'autres sources de vecteurs énergétiques. En remplaçant les vecteurs énergétiques classiques par l'électricité, il est possible de réduire globalement la consommation d'énergie.

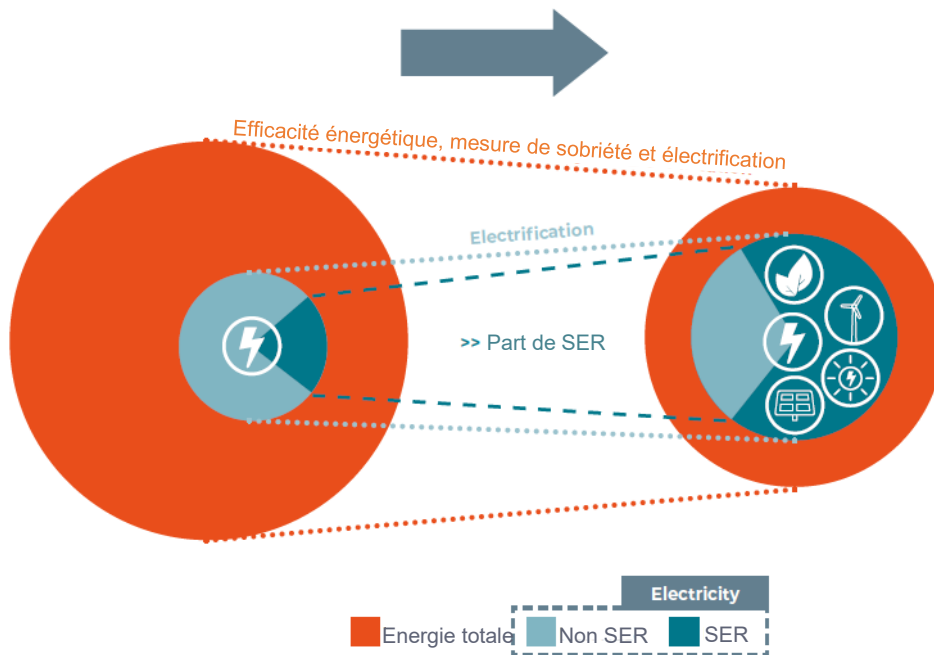


Figure 22: Évolution du secteur énergétique pour l'objectif de neutralité carbone (source : Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2024-2034)

L'électrification s'est vue accélérée par la crise climatique et énergétique. En particulier, une forte augmentation de l'électrification des secteurs résidentiel (chauffage), de la mobilité et industriel est attendue dans les années à venir.

L'électrification du **secteur résidentiel** et sa transition vers des énergies plus durables concernent principalement le chauffage des bâtiments par pompes à chaleur. À l'échelle européenne, la vente de pompes à chaleur a augmenté pour atteindre un pic en 2022 (+38% entre 2021 et 2022, +60% en Belgique), résultant de l'interdiction progressive de systèmes de chauffage à base d'énergies fossiles dans les nouveaux bâtiments (voire même dans les existants comme en Allemagne ou aux Pays-Bas). En 2024, les ventes européennes ont fortement diminué (-23% entre 2023 et 2024, -52% en Belgique), en raison d'une diminution du coût du kilowattheure de gaz, inférieur à celui de l'électricité (inchangé), ce qui rend l'utilisation de pompes à chaleur moins intéressante au niveau financier. En 2025, la dynamique semble s'inverser à nouveau, avec une progression de 16% des ventes durant le premier semestre 2025 par rapport à la même période en 2024. Afin de maintenir cette tendance, le Gouvernement fédéral met en œuvre des incitants financiers favorables à l'électricité et aux combustibles neutres et défavorables aux combustibles fossiles : augmentation de 6 à 21% de la TVA pour les chaudières à gaz, diminution de la TVA de 21 à 6% pour les pompes à chaleur dans les bâtiments de moins de 10 ans. De plus, la nouvelle taxe carbone européenne ETS2 rendra les combustibles fossiles plus onéreux dès 2027³⁰. Une poursuite de cette hausse des ventes est attendue dès lors que les différentes régions belges ont toutes un plan Air-Climat-Énergie qui vise à interdire

³⁰ <https://www.lecho.be/monargent/analyse/energie/les-ventes-de-pompes-a-chaleur-bondissent-de-16-en-belgique/10620433.html>

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

progressivement les systèmes de chauffage basés sur des sources non renouvelables telles que la chaudière à mazout ou le chauffage au gaz non renouvelable.

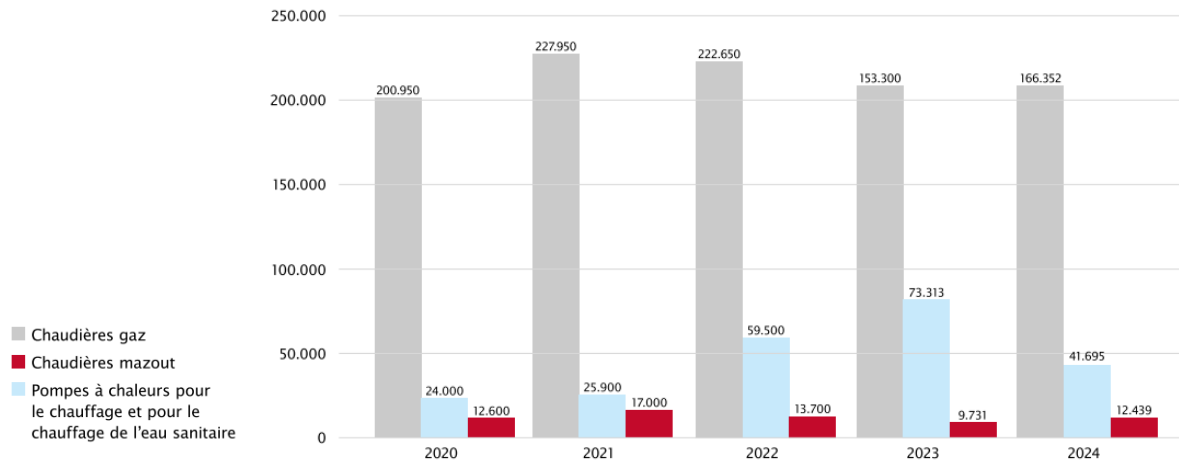


Figure 23 : Evolution des ventes de systèmes de chauffage 2020-2024 (source : Febeg. 2024. *Résumé des statistiques annuelles sectorielles*)

L'électrification **de la mobilité** se manifeste par une croissance continue du nombre de voitures particulières hybrides et électriques (Figure 24), mais également par une augmentation des véhicules utilitaires, des poids lourds et des bus. En Europe, l'interdiction définitive de la vente de voitures à essence ou diesel à partir de 2035³¹ aura un impact significatif sur l'essor des véhicules électriques.

En Belgique, l'évolution des politiques liées aux voitures de société devrait également contribuer à cette croissance. La progression du nombre de voitures électriques y est plus rapide que dans l'ensemble de l'Union européenne, principalement en raison des incitants fiscaux avantageux pour les véhicules de société. D'après les estimations d'Elia, la consommation électrique des véhicules augmenterait de **2,5 TWh en 2025 à 14,5 TWh en 2035**, soit une multiplication par près de six en dix ans.

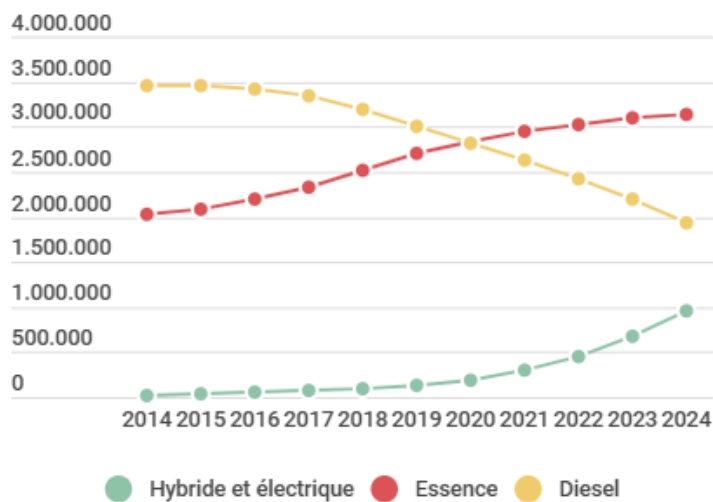


Figure 24: Evolution du nombre de voitures particulières selon le carburant 2014-2024 en Belgique (source : Statbel)

³¹ Règlement (UE) 2023/851 du Parlement Européen et du Conseil du 19 avril 2023

Le **secteur industriel** représente une part importante de la consommation énergétique d'un pays. En Belgique, le secteur représente plus d'un quart de la consommation finale en 2024 (Figure 25). Secteur dépendant fortement des énergies fossiles, l'industrie cherche désormais des alternatives plus durables, parmi lesquelles figure l'électrification de différents processus industriels. Il est attendu que la part d'électricité dans la consommation finale totale de l'industrie augmente de 21,5% en 2022 à 28,5% en 2030 dans le monde³². Selon une étude d'Elia³³, d'ici 2030, la consommation électrique du secteur industriel belge devrait augmenter de 40 à 50%.

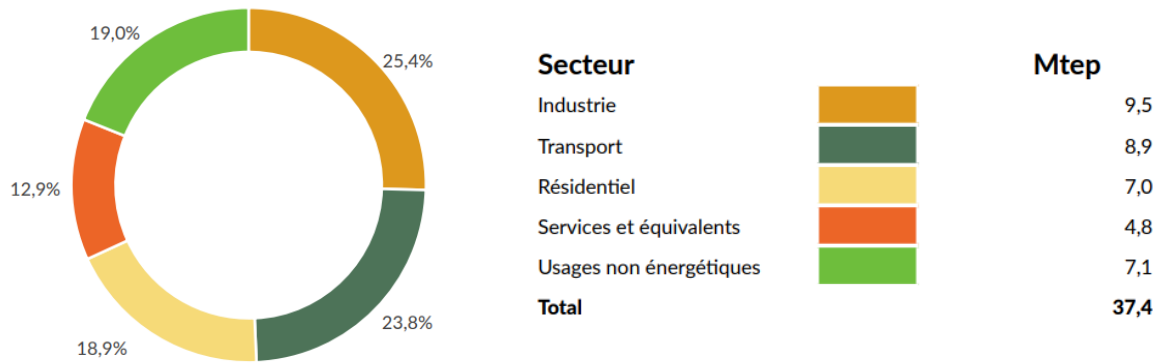


Figure 25: Consommation finale d'énergie en 2024 en Belgique par secteur en Mtep³⁴ (source : SPF Economie, 2025. Belgian Energy Data Overview – Édition juin 2025)

En conclusion, il est attendu que l'électrification de la société augmente considérablement dans les prochaines années. D'après les prédictions d'Elia réalisées dans le cadre de l'étude d'adéquation 2026-2036 sur base des différentes politiques mises en œuvre pour ces secteurs, l'augmentation de la consommation d'électricité sera due principalement à l'électrification de l'industrie et à l'augmentation des data centers, puis à celle de la mobilité et dans une moindre mesure à celle des systèmes de chauffage (Figure 26).

³² Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036

³³ *Powering Industry towards net zero*

https://issuu.com/eliagroup/docs/powering_industry_towards_net_zero?fr=sNThIMjU0MTU1OTg

³⁴ Mtep = Mégatonne (10⁶ tonnes) d'équivalent pétrole

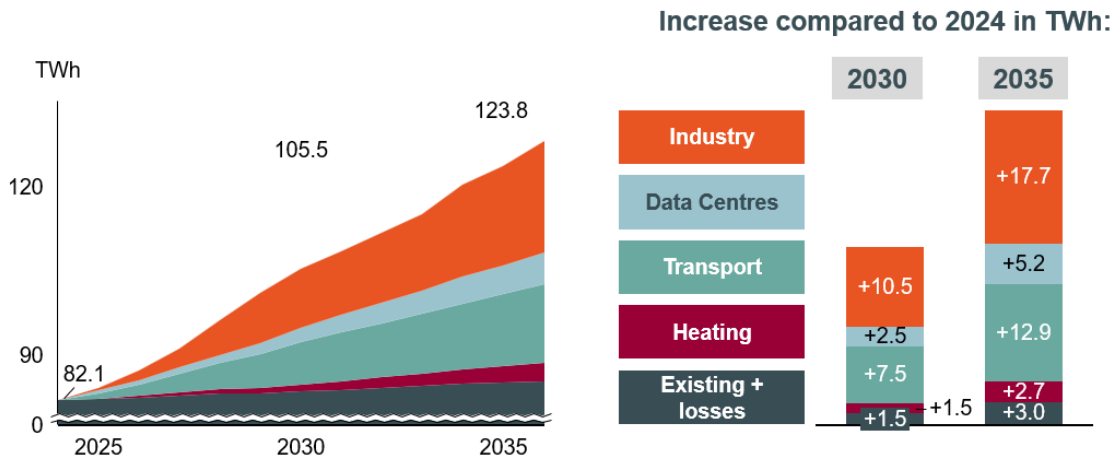


Figure 26: Projection de la consommation annuelle d'électricité (source : Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036)

3.3.1.b. AUGMENTATION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les évolutions du réseau décrites dans ce chapitre sont celles prévues dans le Plan Fédéral de Développement d'Elia, fixant les futurs projets d'investissement sur le réseau électrique. Ce Plan est établi en collaboration avec la Direction générale de l'Énergie et le Bureau fédéral du Plan ainsi qu'en bonne entente avec le régulateur fédéral (CREG) et le cabinet de la ministre fédérale de l'Énergie. Le plan actuellement en vigueur a été approuvé par la ministre de l'Énergie en 2023 et porte sur la période 2024-2034.

Un passage de l'énergie fossile aux énergies renouvelables est un élément essentiel pour atteindre les objectifs climatiques. Dans son Plan National Énergie-Climat (PNEC), la Belgique se fixe l'objectif d'augmenter la part de la consommation en énergie provenant des énergies renouvelables à 21,7% à l'horizon 2030. Cet objectif est le résultat de la somme des contributions de l'état fédéral et de chaque région. Dans sa stratégie long terme³⁵, le Parlement wallon vise l'objectif d'atteindre 100% d'énergie renouvelable dans la consommation finale d'énergie wallonne.

Le graphique suivant présente le détail de l'évolution de la production d'électricité renouvelable en Belgique entre 2010 et 2024. Cette production est en constante augmentation depuis 10 ans (à l'exception d'une légère baisse en 2016, 2021 et 2024 par rapport à l'année précédente). Les principales sources d'énergie sont l'éolien (on- et offshore) et le solaire.

³⁵ La Stratégie à long terme pour la Wallonie "Vers une Wallonie climatiquement neutre en 2050", approuvée par le Gouvernement wallon le 05/12/2019

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

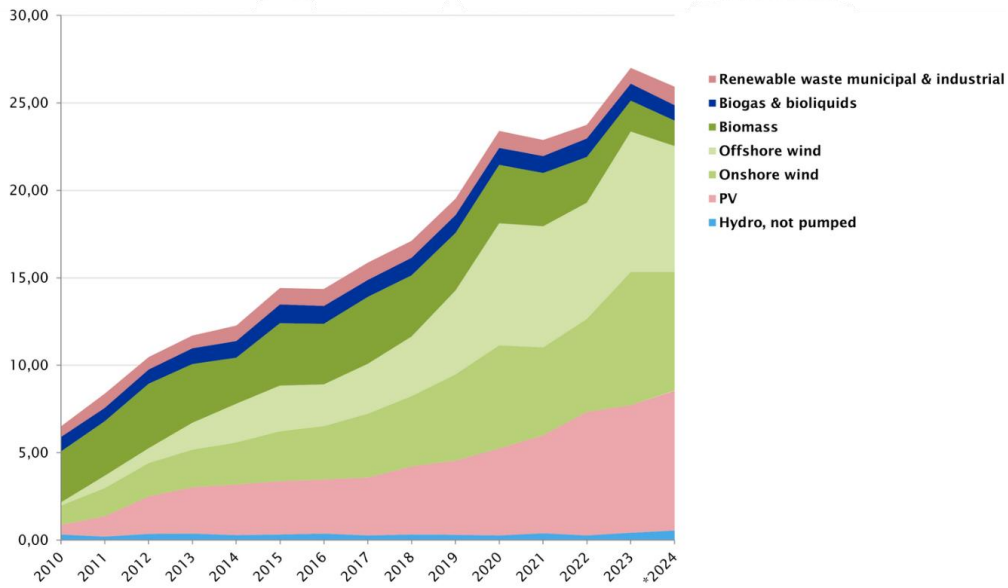


Figure 27: Production d'électricité issue de sources renouvelables en Belgique en TWh (source : Febeg, 2024. Statistiques électricité)

Afin d'augmenter la part de la consommation en énergie provenant des énergies renouvelables, la Belgique a pour projet de continuer à augmenter sa production tant sur terre qu'en mer. Sur terre, si la Belgique met en place son Plan National Energie-Climat, l'étude d'adéquation 2026-2036 prévoit, selon le scénario « Established Policies » (ligne bleue sur les graphiques ci-dessous) une croissance pour l'énergie solaire de 11 GW en 2024 à environ 20,9 GW en 2035 et pour l'énergie éolienne onshore d'approximativement 3,4 GW en 2024 à plus de 7,6 GW en 2035 (Figure 28).

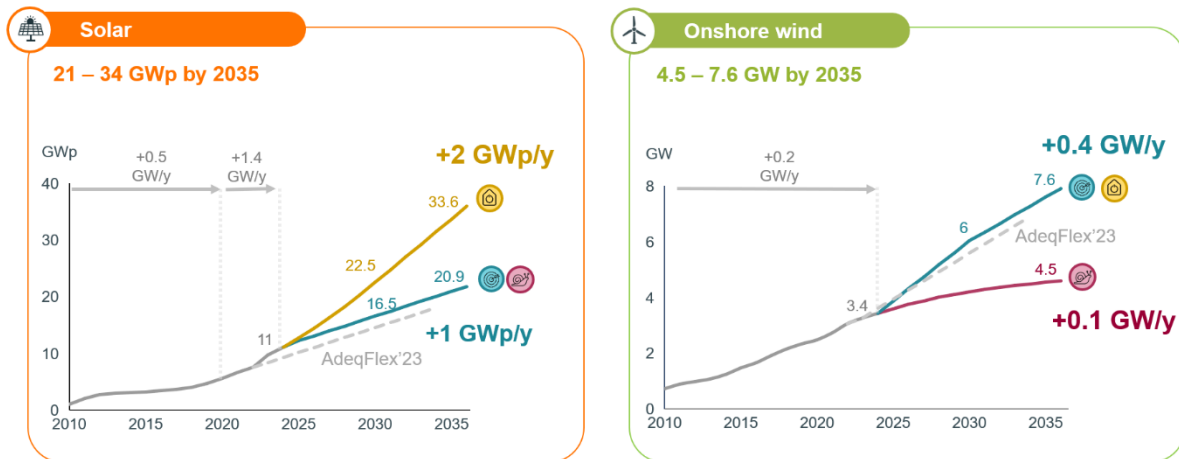


Figure 28: Evolution supposée de la puissance de production photovoltaïque (à gauche) et éolienne terrestre (à droite) selon plusieurs scénarios pour la Belgique (source: Elia - Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036)

En plus des éoliennes réparties sur son territoire terrestre, la Belgique compte 9 parcs éoliens en mer du Nord avec une puissance de production combinée de 2,3 GW. Quatre d'entre eux (Rentel, Northwester 2, Mermaid et Seastar) sont reliés à une plateforme de raccordement (appelée Offshore Switchyard -OSY) en mer faisant partie du projet Modular Offshore Grid (MOG-I) et étant fonctionnelle

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

depuis septembre 2019. L'électricité produite par ces quatre parcs est acheminée vers la terre ferme, au poste de Stevin, via des câbles sous-marins communs (Figure 29).

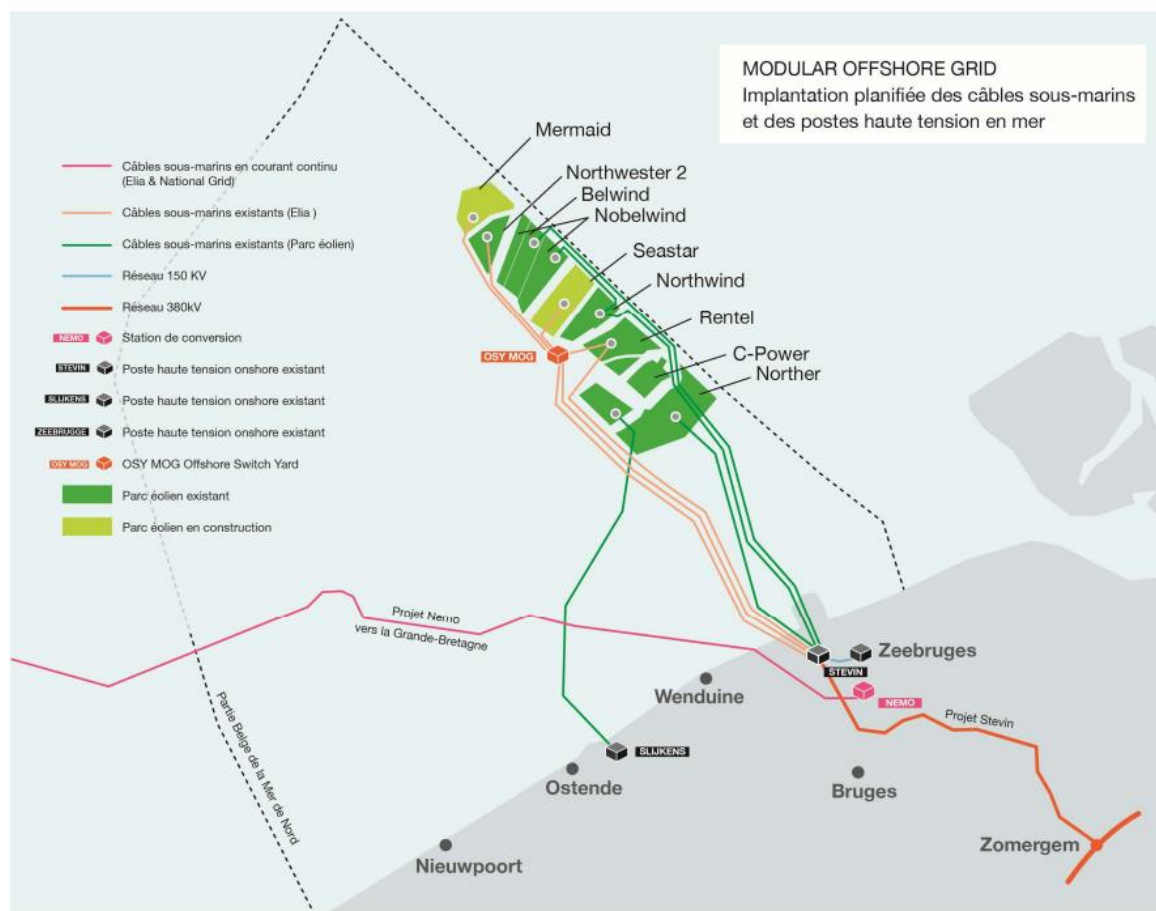


Figure 29: Parcs éoliens belges existants en mer du Nord (source : Elia, 2020. Communiqué de presse du vendredi 29 mai 2020 : ‘Raccordement réussi du dernier parc éolien offshore à la prise électrique en mer du Nord’)

En ce qui concerne le développement du parc éolien en mer du Nord, une seconde zone de parcs éoliens (nommée PEZ *Princess Elisabeth Zone*) permettant une puissance maximale de production de 3,5 GW va être créée. Celle-ci sera reliée au réseau par une île énergétique artificielle, l’île Princesse Elisabeth (MOG-II) qui servira comme «hub énergétique» pouvant également intégrer des interconnexions hybrides (Nautilus et TritonLink). Il est prévu d’y utiliser une combinaison des technologies AC et DC pour raccorder la nouvelle capacité éolienne et acheminer l’énergie vers la côte : 2,1 GW en AC pour les parcs éoliens PEZ I et PEZ II³⁶ et 1,4 GW en DC, connexion hybride, pour le parc éolien PEZ III et la liaison Nautilus vers le Royaume-Uni (Figure 30).

³⁶ Selon le Plan Fédéral de Développement d’Elia, la mise en œuvre de la PEZ I nécessite que le projet Ventilus soit réalisé, et celle de la PEZ II nécessite la Boucle du Hainaut, sans quoi le rapatriement et la distribution de l’électricité offshore produite par ces zones ne sera pas assurée.

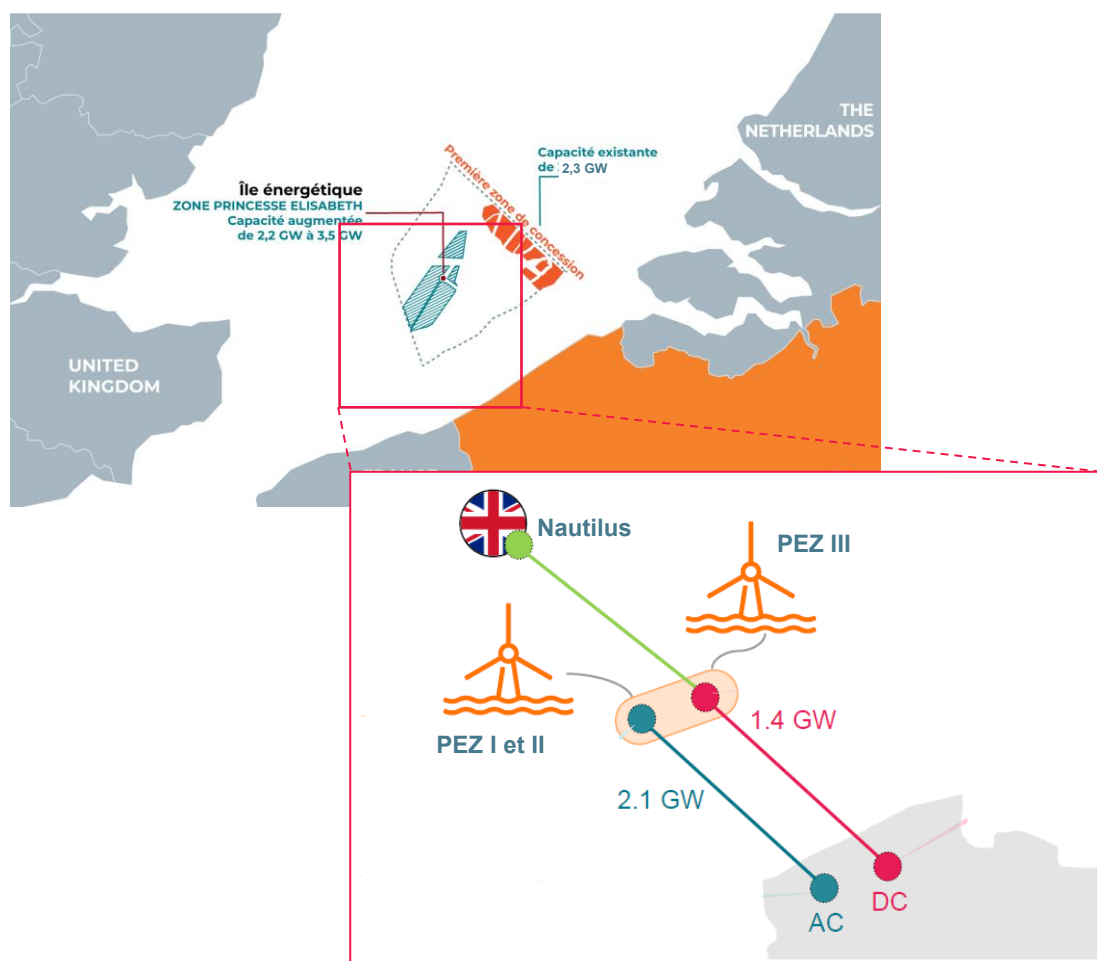


Figure 30 : Développement projeté de la production éolienne offshore et de l'île énergétique Princesse Elisabeth (source : Elia)

Le calendrier initial prévoyait une mise en service progressive des 3 parcs éoliens PEZ à l'horizon 2030 pour atteindre une capacité de production d'énergie éolienne en mer de 5,8 GW. Toutefois, suite à une forte augmentation des coûts de construction, le Gouvernement fédéral a décidé d'ajuster le calendrier du projet de l'île Princesse Elisabeth³⁷³⁸ et le développement de la PEZ. Les décisions visent à :

- Poursuivre l'installation de la partie AC de l'île Princesse Elisabeth, incluant les deux parcs éoliens associés (PEZ I et II), pour une puissance totale de 2,1 GW ;
- Suspendre temporairement la partie DC, en raison du contexte économique actuel (hausse excessive des coûts des convertisseurs HVDC) ;
- Réaliser des études d'alternatives technologiques pour la liaison Nautilus (notamment une connexion point à point au lieu d'une configuration hybride).
- Analyser la possibilité d'augmenter la capacité de raccordement de l'île en AC jusqu'à 3,5 GW afin de raccorder également en AC les 1,4GW (ou une partie de ceux-ci) initialement prévus en DC.

³⁷ [Île énergétique : une gestion saine pour garantir l'avenir énergétique sans faire exploser la facture des consommateurs | Mathieu Bihet](#)

³⁸ [Un cadre sain et concurrentiel pour le développement de l'éolien offshore | Mathieu Bihet](#)

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Malgré le report d'une partie des projets offshore et la réalisation d'études d'alternatives, notamment concernant la partie DC de l'île et Nautilus, le Gouvernement reconnaît les bénéfices qu'ils représentent pour le réseau et continue de soutenir leur développement³⁹. L'objectif à terme reste donc d'atteindre une puissance de 3,5 GW, nécessitant une capacité d'accueil importante sur la côte.

Le développement des projets offshore portera donc dans un premier temps la production d'énergie éolienne en mer à 4,4 GW à l'horizon 2032 et à 5,8 GW à plus long terme (calendrier incertain à ce stade) (Figure 31).

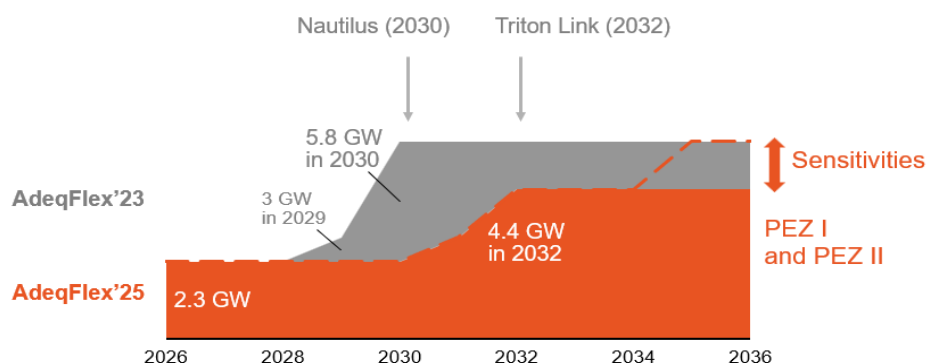


Figure 31: Evolution supposée de la puissance de production éolienne offshore selon plusieurs scénarios pour la Belgique (source : Elia - Elia - Adequacy and flexibility study for Belgium 2026-2036)

En complément aux projets de développements éoliens et solaires, la Belgique cherche également à déployer de nouvelles interconnexions avec d'autres pays européens. Cela est nécessaire, car la Belgique fait partie des pays avec un potentiel de production à partir d'énergie renouvelable relativement faible. Même avec une très forte croissance de la production d'énergie renouvelable sur le territoire belge, selon les scénarios du Plan de Développement fédéral, la production nationale d'énergie renouvelable ne pourra couvrir que la moitié de la consommation électrique. Ainsi, si le pays veut atteindre son objectif de décarbonisation, il est primordial qu'il s'associe avec les pays excédentaires en production tels que les pays nordiques (Figure 32). Pour cela, il est prévu de renforcer les axes Gramme – Achène-Lonny (FR) à l'horizon 2030-2032, et Van Eyck – Maasbracht (NL) à l'horizon 2032-2034. Il est également planifié de développer une nouvelle interconnexion avec le Royaume-Uni (Nautilus), le Danemark (TritonLink) et l'Allemagne (DE-BEII, interconnexion à l'étude). Ces projets sont attendus entre 2030 et 2038.

³⁹ [Accord gouvernemental-Bart De Wever fr.pdf](#) page 90-91

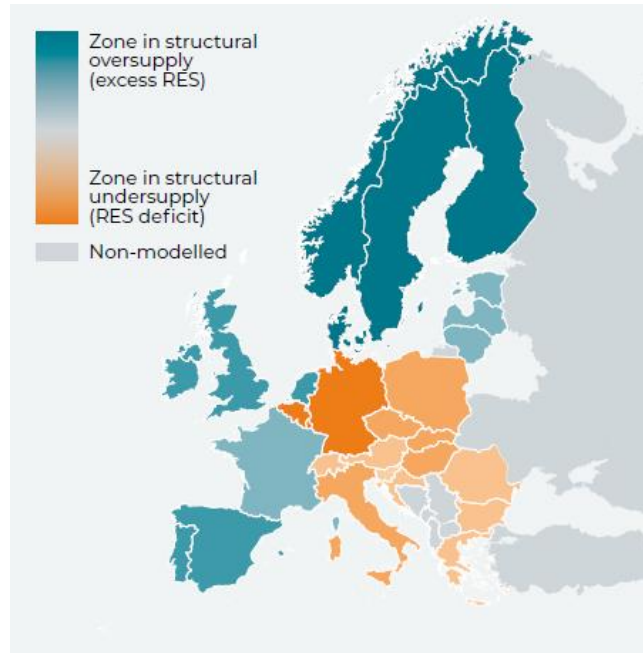


Figure 32: Répartition de la production d'énergie renouvelable en Europe (source : Elia - Plan de Développement Fédéral 2024-2034)

La figure ci-dessous présente un aperçu des projets de développements du réseau de transport d'électricité belge.

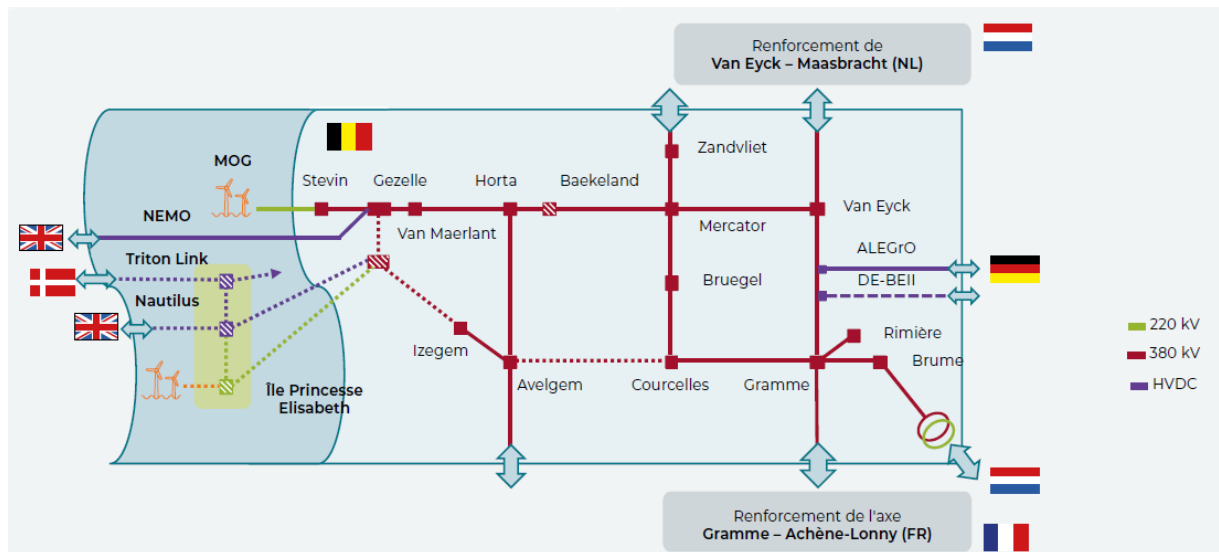


Figure 33: Projets de développement du réseau haute tension belge d'ici 2040 (Elia - Plan de Développement Fédéral 2024-2034)

3.3.2. PROLONGATION DU NUCLÉAIRE

En raison de préoccupations concernant l'approvisionnement énergétique de la Belgique au-delà de 2025, le Gouvernement belge a décidé de ne pas mettre pleinement en œuvre la sortie du nucléaire votée en 2003 et prévue en 2025 et de maintenir en service les réacteurs nucléaires de Doel 4 et de Tihange 3 permettant une production de 2 GW jusqu'en 2035.

Dans l'accord de Gouvernement fédéral⁴⁰, le Gouvernement annonce viser *une part d'énergie nucléaire de 4 gigawatts dans notre mix électrique. Pour garantir une énergie de base zéro carbone dans notre pays, le gouvernement lancera donc à court terme un programme ambitieux pour relancer l'industrie nucléaire en Belgique et construire de nouveaux réacteurs nucléaires. Le gouvernement s'engage à court terme, à prolonger la capacité existante et, à long terme, à investir dans la construction de nouvelles capacités.*

Avis du Professeur Henneaux

Les hypothèses décrites dans cette section pour estimer l'évolution de la production et de la consommation au sein du réseau électrique belge correspondent essentiellement aux hypothèses adoptées par Elia dans le cadre de l'étude « Adequacy and flexibility study for Belgium – 2026-2036 ». Je les juge crédibles et je considère qu'elles constituent une base de travail solide. En effet, elles sont cohérentes avec les objectifs du PNEC belge, elles sont issues d'un processus incluant une consultation publique, et elles sont cohérentes (bien que légèrement différentes) avec la dernière version des scénarios européens développés conjointement par ENTSO-E et ENTSG dans le cadre de leurs plans décennaux de développement du réseau (TYNDP). Toutefois, ces hypothèses apparaissent relativement ambitieuses en ce qui concerne le déploiement des énergies renouvelables (EnR). Bien qu'elles reflètent les orientations politiques en matière de décarbonation, leur mise en œuvre pourrait se heurter à des contraintes locales, telles que l'intégration locale dans les réseaux et d'obtention de permis. Ce point a d'ailleurs été soulevé par la FEBEG lors de la consultation publique organisée par Elia en particulier en ce qui concerne l'éolien terrestre. D'autres scénarios de référence sont moins ambitieux. C'est le cas du EU Reference Scenario 2020, mais qui a les inconvénients d'être plus ancien et d'avoir sous-estimé la capacité EnR renouvelable en 2025. Par ailleurs, une éventuelle présence future accrue du nucléaire pourrait atténuer les besoins en EnR. Ces éléments doivent être pris en compte dans l'interprétation des flux au sein du réseau belge.

3.4. Faiblesses du réseau justifiant le projet Boucle du Hainaut

3.4.1. SATURATION DE LA LIAISON HORTA-MERCATOR

La liaison Horta-Mercator est l'unique liaison du réseau belge reliant l'ouest au centre du pays. A elle seule, cette liaison assure le transport de l'électricité provenant des parcs éoliens en mer et des interconnexions ouest (France et Grande-Bretagne) vers le centre du pays. Cette liaison est composée de deux circuits avec chacun une capacité de 3 GW, soit une capacité totale de 6 GW (et une capacité de 3 GW en situation N-1).

3.4.1.a. FLUX OUEST-EST EXISTANTS

Les figures ci-dessous présentent les flux transitant entre les régions ouest et est (centre) via la liaison Horta-Mercator, mesurés en 2024 (Figure 34).

⁴⁰ [Accord gouvernemental-Bart De Wever fr.pdf](#) page 89-90

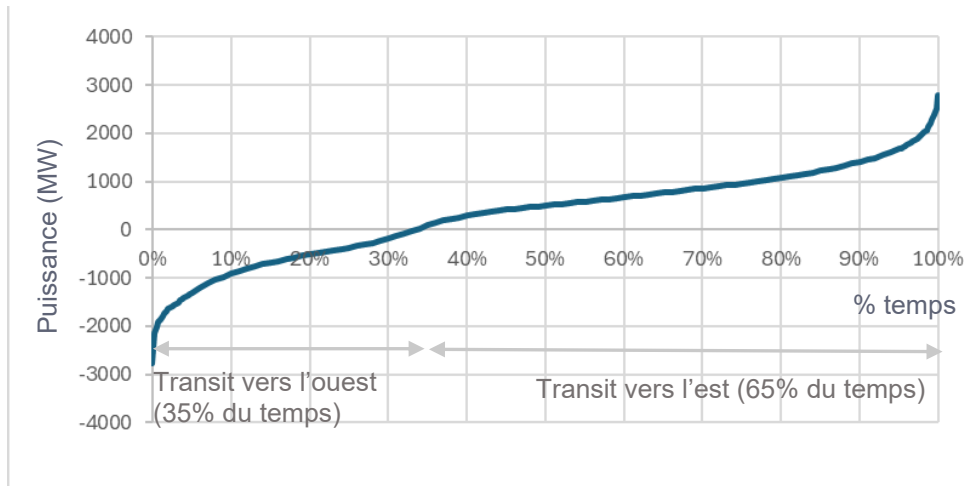


Figure 34 : Flux transitant entre les régions ouest et est via la liaison Horta-Mercator en 2024 (source : Renseignements fournis par Elia)

En 2024, le transit est à 65% du temps dans la direction est (vers le centre). Des pics sont observés, dans les deux directions, à presque 3 GW (correspondant à la capacité en N-1 de la liaison).

3.4.1.b. FLUX OUEST-EST PROJÉTÉS

Compte tenu de l'ensemble des projets d'installations de production dans la région ouest du pays et de l'augmentation des interconnexions (énumérées au point 3.3.1.b), une augmentation importante des flux transitant par la liaison Horta-Mercator est attendue. Le tableau suivant expose les puissances actuelles de chacun de ces projets en comparaison aux puissances attendues à l'horizon 2033 (horizon de mise en service du projet Boucle du Hainaut).

Tableau 6 : Evolution de la puissance installée à l’Ouest actuelle, à l’horizon 2030 et future (source : Elia)

| | Puissance actuelle 2025 (GW) | Puissance planifiée 2033 (GW) | Puissance planifiée future (GW) |
|--|--|----------------------------------|------------------------------------|
| NEMO – Interconnexions BE-UK | 1 | 1 | 1 |
| Avelin-Avelgem - Interconnexion BE-FR | 3,5 (mise en service effectuée en 2023) | 3,5 | 3,5 |
| Productions éoliennes offshore actuellement en service (MOG-I) | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| Île Princesse Elisabeth MOG II – PEZ I | / | 0,7 | 0,7 |
| Île Princesse Elisabeth MOG II – PEZ II | / | 1,4 | 1,4 |
| Île Princesse Elisabeth MOG II – PEZ III | / | / | 0 à 1,4 ⁴¹ |
| Interconnexion BE-UK Nautilus | / | / | 1,4 |
| Potentiel onshore (éoliennes / batteries) | / | / | 0,6 |
| Total (GW) | 6,8 | 8,9 | 10,9 à 12,3 |

Ainsi, une augmentation de la puissance installée à l’ouest du pays d’environ 6,8 GW à 8,9 GW est attendue d’ici à 2033 et puis de 10,9 à 12,3 GW dans le futur (horizon temporel plus incertain, en raison de la décision politique de mettre en pause la partie HVDC de l’île Princesse Elisabeth). A cela, s’ajoutent les perspectives de production locales (Hainaut et Flandre). Néanmoins, cela constitue un maximum et l’ensemble de cette puissance n’est jamais rencontrée au même moment. Afin d’estimer les besoins en capacité de transmission entre l’ouest et le centre du pays, des prévisions des flux sont réalisées en tenant compte de la logique de marché⁴².

Les prévisions des flux d’ouest en est à l’horizon 2033 (Figure 35) ont été réalisées sur base des dernières décisions politiques (concernant le changement de calendrier de MOG-II et la prolongation du nucléaire de 2GW). Elles montrent un dépassement de la capacité en N-1 de 3GW durant près de 45% du temps (situation de saturation) ainsi que l’atteinte de pics autour de 7GW, la liaison Horta-Mercator sera dès lors un goulot d’étranglement. Par ailleurs, des dépassements de cette limite sont déjà attendus aux horizons 2027, 2029 et 2030, sur des durées plus courtes (moins de 10% du temps).

⁴¹ La réalisation de Nautilus est envisagée sous deux formes principales : soit en connexion hybride via l’île Princesse Elisabeth, soit en point to point. Dans le cas de la connexion hybride, l’électricité sera rapatriée vers la côte via la même liaison que la PEZ III, et n’augmentera donc pas la puissance maximale installée à l’ouest (cas 0 GW). Dans le cas d’une connexion point to point, la liaison aura une capacité de 1,4 GW, ce qui augmente la capacité installée à l’ouest (cas 1,4 GW).

⁴² Il existe notamment une relation inverse entre les importations en provenance de la France et les importations nettes en provenance de la Flandre occidentale.

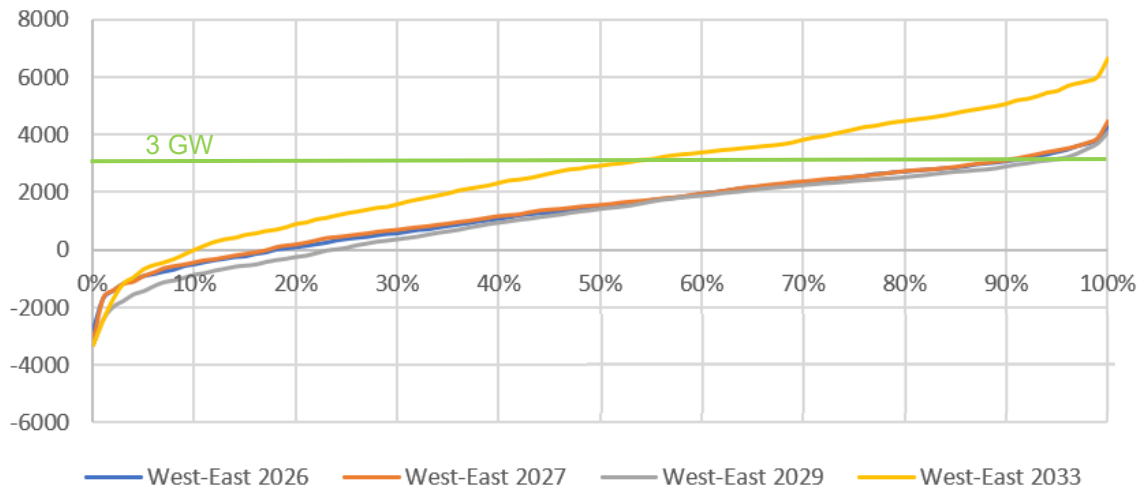


Figure 35: Projections à l'horizon 2033 des flux d'ouest en est (source : Elia, 2025)

Les prévisions à l'horizon 2040 sont présentées à la Figure 36. Elles se basent sur deux scénarios de charge sur le réseau issus du TYNDP2024 (le Plan de développement européen publié tous les deux ans) :

- eProsumers : scénario s'appuyant sur les études nationales les plus ambitieuses en matière d'électrification ;
- Global Import : scénario dépendant davantage de l'utilisation de molécules vertes pour le transport d'électricité (hydrogène). Il s'appuie sur les études nationales les moins électrifiées.

Ces deux scénarios représentent deux visions possibles de la transition énergétique et il est probable que la réalité se situe entre les deux, en fonction des choix politiques à venir.

Ces projections révèlent que pour près de 85% du temps, le flux va de l'ouest vers l'est. Pendant plus de 50% du temps, le flux est supérieur à 3GW (situation de saturation en N-1) et pour environ 10% du temps, le flux est supérieur à 6 GW, et pourrait atteindre des pics autour de 8 à 9 GW.

Il convient de noter que ces projections ne tiennent pas compte des récentes modifications de développement du secteur énergétique (notamment relatives aux modifications du calendrier de l'île énergétique Princesse Elisabeth et de la prolongation du nucléaire de 2GW). Néanmoins, ces modifications n'impactent pas significativement les flux ouest-est à l'horizon 2040. En effet, les modifications du calendrier de l'île ne changent pas les capacités projetées à long terme pour la zone offshore et le point 3.4.1.c analysant l'influence du nucléaire sur le flux ouest-est montre que celui-ci est très limité.

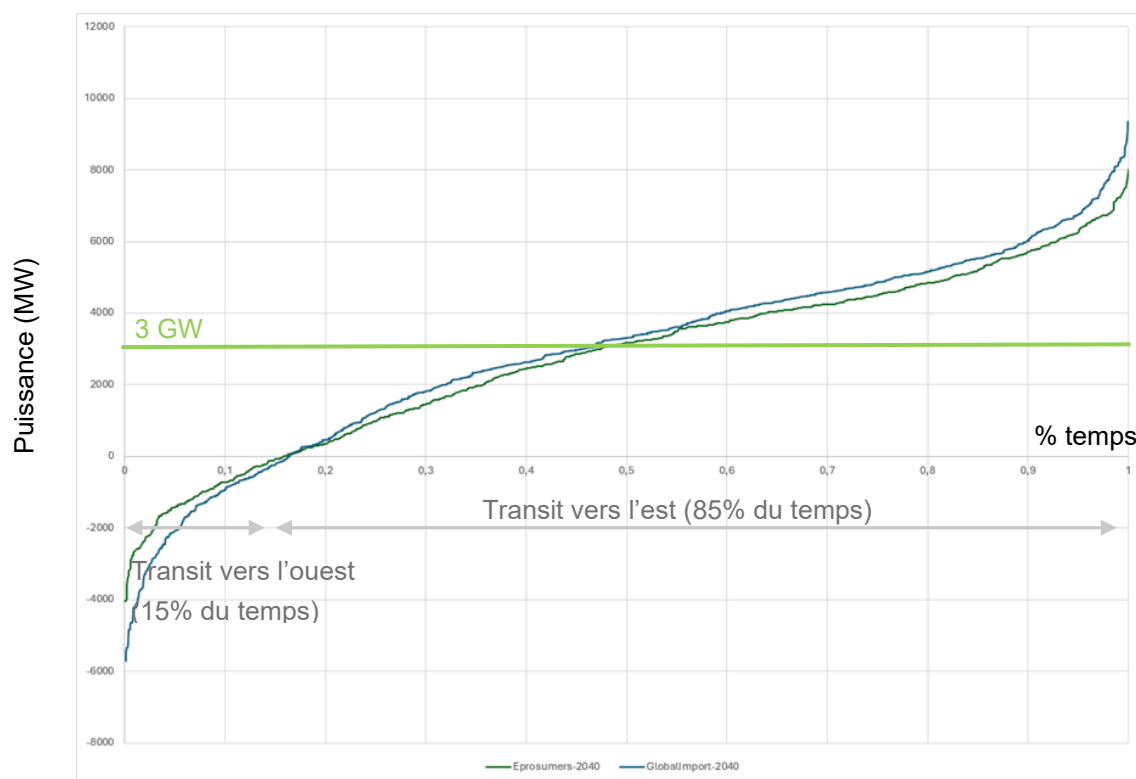


Figure 36: Projections à l'horizon 2040 des flux d'ouest en est. (source : Elia)

De plus, les interconnexions ouest (Nemo, Nautilus, Avelin-Avelgem) sont actuellement à plus de 60% du temps sollicitées en import (donc injectant des flux dans le réseau belge). Les différents scénarios de prédictions d'importations et d'exportations sur l'ensemble des interconnexions de la Belgique à l'horizon 2030 et 2040 montrent que le pays importera de la puissance entre 50 et 80% du temps et que celle-ci sera supérieure à 6 GW durant au moins 10% du temps (Figure 37). Compte tenu du fait que les importations sont principalement réalisées à travers les interconnexions ouest du pays, il apparaît que la liaison Horta-Mercator n'est pas suffisante pour assurer ce transit.

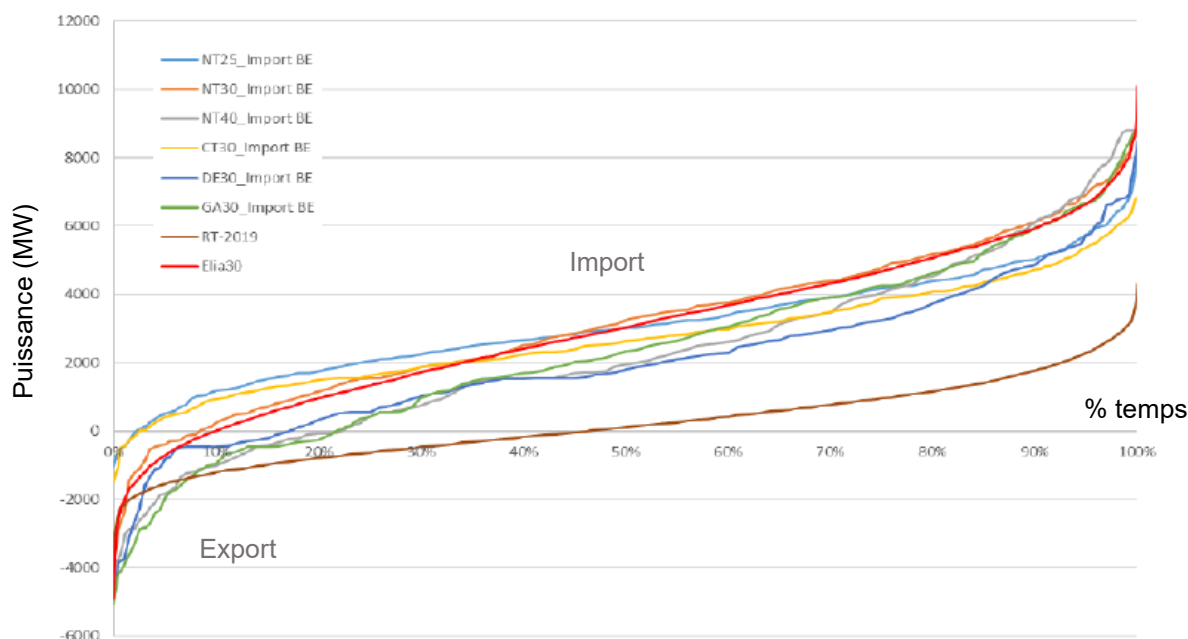


Figure 37: Bilan (2019) et projections des importations et des exportations sur l'ensemble des interconnexions de la Belgique à l'horizon 2025, 2030 et 2040 (source : Renseignements fournis par Elia dans le cadre de l'analyse des experts indépendants)

En conclusion, selon les projections, le besoin en capacité de transmission entre l'ouest et le centre du pays augmentera :

- à 7 GW à l'horizon 2033 ;
- à 9 GW (dans les cas les plus exceptionnels) tenant compte des évolutions futures.

Ces capacités doivent être assurées en situation N-1.

De telles augmentations, appliquées au réseau actuel (c'est-à-dire sans le projet Boucle du Hainaut) aura pour effet de détériorer davantage le transit sur la liaison Horta-Mercator accentuant l'effet de goulot d'étranglement sur le réseau et les coûts de *redispatching*. Le *redispatching* correspond au redéploiement des flux d'électricité sur le réseau, c'est-à-dire à la réduction de la production à un endroit déterminé en amont du goulot d'étranglement et à la compensation de cette réduction par une augmentation égale de production à un autre endroit en aval de ce goulot. Ces augmentations et réductions de production doivent respectivement être financées et indemnisées par le gestionnaire du réseau et ces coûts sont *in fine* répercutés sur l'ensemble des consommateurs d'électricité.

3.4.1.c. IMPACT DE LA PROLONGATION DU NUCLÉAIRE

Il est également nécessaire d'évaluer l'impact des décisions relatives à la prolongation du nucléaire sur les flux ouest-est du réseau électrique. Pour cela, des projections ont été réalisées pour quatre scénarios envisagés pour 2033, allant de 2 GW à 4 GW de capacité nucléaire, soit la capacité maximale atteignable par la Belgique si un accord est trouvé avec le propriétaire/exploitant.

Trois scénarios principaux ont été modélisés :

- **Scénario actuel décidé** à 2 GW : prolongation de Doel 4 et Tihange 3, les deux réacteurs les plus récents.

- **Scénario à 3 GW** : deux options sont possibles, via la prolongation d'un réacteur à Tihange ou de deux réacteurs à Doel. Deux simulations distinctes ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de chaque configuration sur le flux ouest-est.
- **Scénario à 4 GW** : prolongation de tous les réacteurs encore disponibles, soit 2 GW à Tihange et 2 GW à Doel.

Les résultats montrent que l'influence du nucléaire sur le flux ouest-est reste très limitée lors de périodes de forte charge (Figure 38).

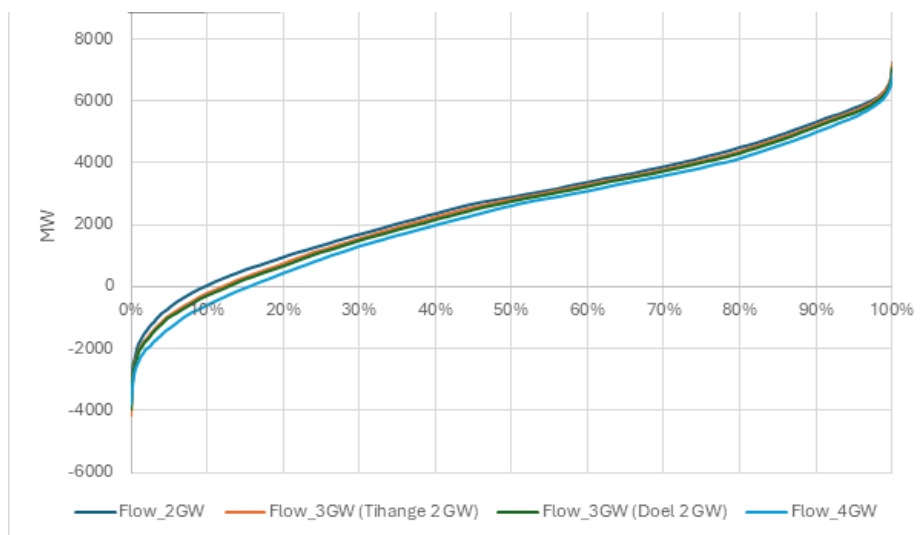


Figure 38 : Simulation des flux ouest-est en fonction des différents scénarios nucléaires (source : Elia, 2025)

L'accord de Gouvernement mentionne la possibilité d'atteindre les 4 GW de puissance nucléaire via la prolongation autant que possible des réacteurs existants, tant que la sécurité est suffisante, et puis de construire soit de nouveaux réacteurs nucléaires, soit des SMR (Small Modular Reactors). Concernant le nouveau nucléaire ou les SMR, aucun projet concret n'étant en cours, il est difficile d'en estimer l'impact sur le flux ouest-est. Leur localisation future pourrait soit améliorer, soit aggraver ce flux, mais au vu des projections réalisées, l'impact restera limité⁴³.

Pour le nucléaire existant, une prolongation hypothétique supplémentaire à Tihange ou Doel aurait donc un impact faible sur les flux ouest-est ne remettant pas en question les besoins de transit.

⁴³ Il faut également rappeler que le réseau devra être capable d'assurer la transition entre le nucléaire existant et le nouveau nucléaire, pendant probablement plusieurs années. En effet, les délais de construction pour des projets de grands réacteurs de type EPR dépassent généralement 10 ans, et la maturité technologique des SMR n'est pas encore totalement atteinte. Il existe donc un risque réel que ces nouvelles capacités ne soient pas disponibles à temps pour compenser la fermeture progressive des centrales actuelles.

3.4.1.d. CONCLUSION RELATIVE À LA FAIBLESSE DU RÉSEAU

L'ensemble des éléments présentés impliquent que l'ajout d'une liaison additionnelle est nécessaire. Le projet Boucle du Hainaut prévoit une liaison de 6GW répartis en 2 circuits (afin de garantir le N-1).

Avis du Professeur Henneaux

Bien que le calcul des flux en 2033 montrés à la Figure 35 se base sur les hypothèses décrites à la section 1.3, le calcul des flux à l'horizon 2040 montrés à la Figure 36 et la Figure 37 se base sur les scénarios du TYNDP 2024. Ces scénarios présentent une certaine cohérence avec les données de la section 1.3, mais il convient de noter que la correspondance n'est pas directe, en particulier en ce qui concerne la présence de centrales nucléaires au-delà de 2035⁴⁴. Néanmoins, les scénarios retenus sont pertinents, bien qu'à nouveau ambitieux en ce qui concerne le développement des énergies renouvelables (e.g., 26 GW de PV en 2040 pour le scénario NT, mais 35 GW pour les scénarios DE et GA). L'approche globale utilisée pour estimer les flux est judicieuse, mais elle repose sur l'hypothèse implicite d'une absence de congestion dans les niveaux de tension inférieurs, ce qui suppose que tout le surplus de la production PV distribuée par rapport à la consommation locale est injectée dans le réseau de transport. Par ailleurs, le manque de précisions sur le réseau de référence et sur les contraintes de flux prises en compte, ainsi que l'absence de décomposition des flux (entre flux internes, importations/exportations, flux de transit et flux de bouclage) réduit la compréhension de l'origine des flux et, par conséquent, l'évaluation de la pertinence d'un renforcement du réseau belge. Néanmoins, il semble raisonnable d'anticiper des flux supplémentaires de plusieurs GW sur l'axe ouest-centre, ce qui rend nécessaire un renforcement significatif du réseau. Notons que la liaison existante Horta-Mercator est constituée de deux ternes de 3 GW, soit une capacité brute de 6 GW et une capacité nette⁴⁵ d'environ 3 GW (en négligeant l'impact des chemins parallèles en 150 kV).

Afin de limiter les coûts élevés liés au redispatch et de réduire l'écrêtage des sources d'énergie renouvelable (EnR), il est nécessaire de prévoir une capacité nette supplémentaire de plusieurs gigawatts, en tenant compte des contraintes de sécurité du réseau (dont le critère N-1).

Les analyses quantitatives montrées de la Figure 35 à la Figure 38 suggèrent une valeur raisonnable de l'ordre de 3-4 GW supplémentaires : à ce niveau, le corridor ouest-centre ne serait que très faiblement congestionné à l'horizon 2033 pour les différents scénarios, et que moyennement congestionné à l'horizon 2040 (de quelques % à maximum 10% du temps, selon la capacité nette exacte et le scénario). En revanche, viser a priori une capacité nette totale de 8-9 GW (donc une augmentation nette de 5-6 GW) correspond à une absence quasi totale de congestion, ce qui pourrait ne pas être économiquement optimal si le surcoût engendré par une augmentation de la capacité nette de 5-6 GW par rapport à 3-4 GW ne pouvait être compensé par les gains liés à la réduction du redispatch et de l'écrêtage des sources d'énergie renouvelable que cette augmentation supplémentaire permettrait d'éviter. Les analyses complémentaires fournies par Elia, ainsi qu'une analyse personnelle simplifiée

⁴⁴ Notons que la Figure 38 donne des variantes avec une présence plus importante des centrales nucléaires, mais pour l'horizon 2033 uniquement.

⁴⁵ Nous distinguons la « capacité nette » d'un renforcement du réseau de sa « capacité brute ». La capacité nette peut être définie le flux de puissance supplémentaire qui peut transiter en tenant compte des limites de sécurité d'exploitation en situation normale et après contingence simple (critère de sécurité N-1). La capacité brute peut être définie comme la capacité thermique totale apportée par le renforcement. Par exemple, si deux zones qui ne sont pas initialement connectées sont interconnectées par une ligne à double circuit et que chaque circuit a une capacité thermique de 3 GW, la capacité brute est de 6 GW (somme des capacités thermiques), tandis que la capacité nette ne sera que de 3 GW si aucune surcharge n'est admise après une contingence simple.

sur base de la Figure 36 et la Figure 37 permettent d'estimer un coût de redispatch de l'ordre de quelques dizaines de M€/an à l'horizon 2040 pour une augmentation de la capacité nette de 3 GW et de l'ordre de la dizaine de M€/an pour une augmentation de la capacité nette de 4 GW⁴⁶. Dans ce contexte, et en considérant les limites des scénarios utilisés, une planification visant une augmentation d'au moins 3-4 GW de capacité nette à l'horizon 2040 (pour atteindre un total d'au moins 6-7 GW de capacité nette) semble être une décision raisonnable et robuste face aux incertitudes.

L'augmentation de la capacité nette du corridor Ouest–Centre ne correspond pas directement à une augmentation équivalente de la capacité brute. Bien que l'ajout d'un circuit de 3 GW puisse théoriquement accroître la capacité nette de 3 GW dans un scénario de flux parfaitement équilibrés entre le nouveau circuit et la liaison existante Horta-Mercator, cette hypothèse ne reflète pas la réalité du réseau, où les flux sont inégalement répartis entre les différentes liaisons. Ainsi, l'ajout d'un seul circuit de 3 GW entraînerait une augmentation de capacité nette inférieure à 3 GW (même si des mesures sont prises pour bien équilibrer les flux). De même, l'ajout de deux circuits de 3 GW conduira à une augmentation de la capacité nette inférieure à 6 GW, bien qu'une exploitation intelligente du réseau (et la possibilité de faibles surcharges temporaires après contingence) pourra permettre une augmentation significativement supérieure à 3 GW.

Compte tenu de la longue durée de vie des lignes aériennes, qui s'étend sur plusieurs décennies (typiquement au moins 50 ans), il est essentiel d'opter pour une solution robuste et pérenne. Les besoins identifiés indiquent une nécessité d'augmenter la capacité nette d'au moins 3-4 GW. Toutefois, il convient de ne pas traduire directement à ce stade ce besoin en une augmentation de la capacité brute de 6 GW en considérant le critère de sécurité N-1 car un autre chemin parallèle existe déjà, et cela reviendrait à postuler a priori le choix d'une technologie. La traduction de ce besoin d'augmentation de la capacité nette en capacité(s) brute(s) doit reposer sur une analyse multicritère approfondie (en ce compris des calculs détaillés d'écoulement de la charge dans le réseau et une analyse économique du surcoût du renforcement pour arriver à cette capacité brute au regard des gains liés à la réduction du redispatch et de l'écrêtage des sources d'énergie renouvelable).

Le professeur Henneaux estime donc qu'une augmentation de minimum 3 à 4 GW nette est justifiée et nécessaire. Le professeur Henneaux recommande d'estimer l'optimum économique permettant de limiter les coûts du renforcement et du redispatching. Cet optimum économique étant fortement dépendant de la technologie choisie pour la liaison, il est abordé à la suite du chapitre relatif aux options technologiques (Paragraphe 0).

3.4.2. MAILLAGE INSUFFISANT DU BACKBONE BELGE ET EUROPÉEN

Entre les parties ouest et est, le backbone de transport belge est un réseau en arborescence dès lors qu'il n'est pas maillé entre ces deux zones (Figure 21). En effet, il n'existe qu'une seule liaison entre les postes Mercator (est) et Horta (ouest). La réflexion qui existe pour la Belgique est également applicable à l'échelle européenne, où la liaison Horta-Mercator constitue également une liaison importante en

⁴⁶ Cela peut être comparé à la différence de coût entre une ligne 380 kV simple terre et double terre, que j'estime à environ 100-150 M€ sur 85 km.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Europe étant donné qu'elle est l'unique liaison après la liaison d'interconnexion entre la France (Avelin) et la Belgique (Avelgem).

La sécurité des réseaux en arborescence est moindre dès lors qu'un incident sur une liaison ou sur l'un des deux postes qu'elle relie pourrait causer la coupure d'alimentation de l'ensemble des postes et charges reliés à cette liaison. Pour la liaison Horta-Mercator plus spécifiquement, un incident causant la perte partielle ou totale de la ligne entraînerait la diminution du transit entre la France et la Belgique et la séparation du réseau belge en deux parties. De plus, la perte soudaine de la liaison Horta-Mercator entraînerait un report des échanges sur les autres liaisons d'interconnexion, car la liaison d'interconnexion entre la France (Avelin) et la Belgique (Avelgem) serait aussi inutilisable. Le report serait en partie repris sur la liaison d'interconnexion entre la France (Lonny) et la Belgique (Achêne), mais également sur la liaison d'interconnexion entre la France (Vigy) et l'Allemagne (Ensdorf). Dans le pire des scénarios, un report de flux trop important pourrait entraîner une séparation du système européen. Par le passé, ce type de report non contrôlé a été à l'origine de la panne de courant du 4 novembre 2006 qui a touché le réseau interconnecté européen.

L'installation d'une seconde liaison entre l'ouest et le centre de la Belgique est donc nécessaire. Elle permettra de créer un maillage plus stable et plus robuste qui sera d'autant plus nécessaire au regard de l'évolution attendue du transit de l'ouest vers l'est du pays et de l'Europe. Le maillage permettra aux deux liaisons parallèles de se soutenir mutuellement en cas d'incident ou d'entretien sur le réseau, augmentant la fiabilité et la stabilité de celui-ci.

Avis du Professeur Henneaux

Le renforcement du maillage du réseau de transport à très haute tension (THT), tant au niveau belge qu'europpéen, par la création d'une nouvelle liaison entre l'ouest et le centre du pays, constitue une mesure stratégique pour améliorer la sécurité et la résilience du système électrique européen (et belge). Cette nouvelle infrastructure permettrait une meilleure répartition des flux en cas d'incidents, qu'ils soient simples ou multiples, et contribuerait ainsi à réduire significativement le risque d'événements majeurs tels qu'un blackout. Toutefois, il est important de souligner que cette mesure ne permet pas d'éliminer totalement ce risque, étant donné que le risque zéro n'existe pas (i.e., aucune mesure ne peut éliminer totalement le risque de blackout).

3.4.3. SATURATION DU RÉSEAU 150 kV DANS LE HAINAUT

Le réseau électrique du Hainaut est aujourd’hui composé essentiellement de niveaux de tension de 150 kV et est principalement alimenté par les postes de Gouy-Lez-Piéton (poste 150 kV alimenté par le poste 380 kV de Courcelles) et Ruien (poste 150 kV alimenté par le poste 380 kV d’Avelgem).

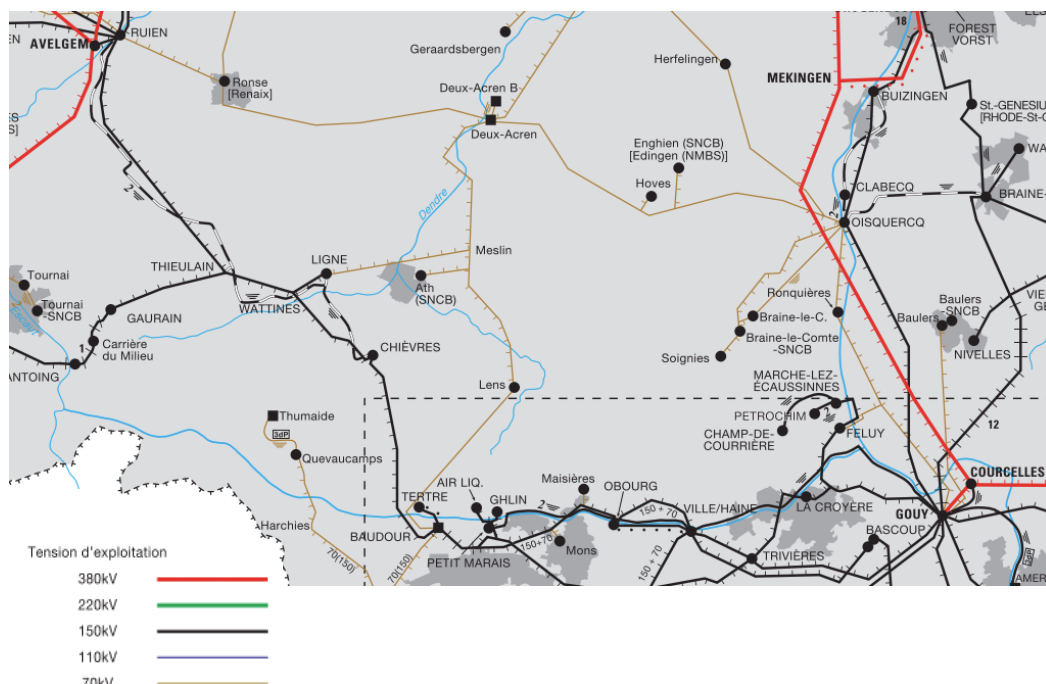


Figure 39 : Réseau de transport existant entre les postes d’Avelgem et de Courcelles (source : Elia)

La zone électrique (à l’échelle des provinces) dans laquelle se trouve le Hainaut est la seconde zone (après celle d’Anvers) la plus consommatrice d’électricité en Belgique (Figure 40), en raison de la présence importante d’acteurs économiques et industriels.

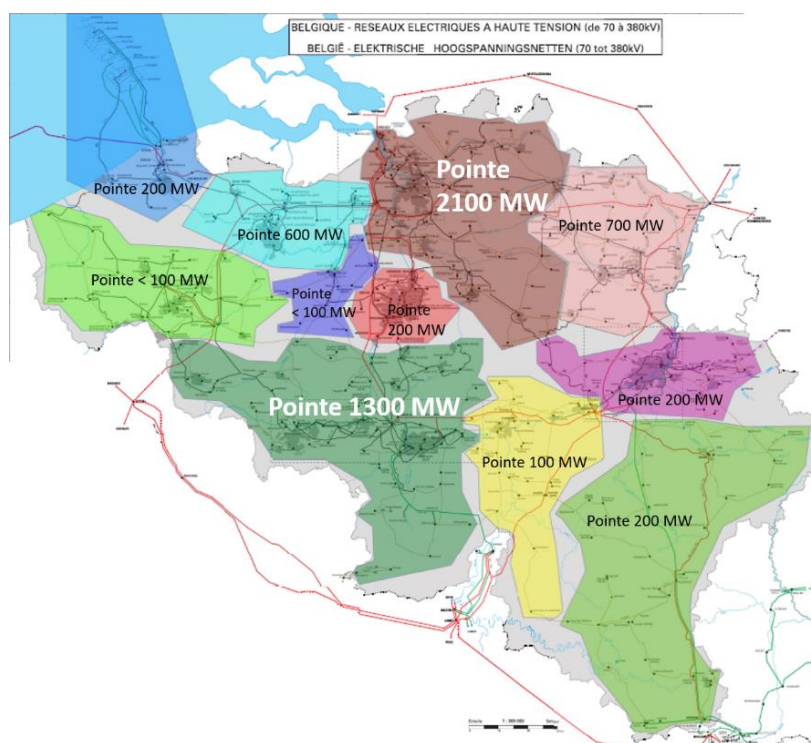


Figure 40: Somme (asynchrone) des pointes de puissance individuelles 2020 des grands acteurs industriels et économiques raccordés au réseau Elia (à tous niveaux de tension de 380kV à 30kV), par zone électrique (source : Elia)

Selon Elia, la charge sur le réseau 150 kV à l’ouest du Hainaut dépasse déjà la capacité du réseau en N-1 en situation actuelle durant 60% du temps (Figure 41) et le réseau 150 kV du Hainaut arrivera à saturation (correspondant à un dépassement de la capacité N-1) à l’horizon de 2030⁴⁷, en raison de l’augmentation de la charge attendue. Cette augmentation de la charge dans la province résulte de l’accroissement de la charge de plusieurs industries qui y sont installées et dont le potentiel d’électrification est important ainsi que de la capacité réservée par les data centers (Figure 42).

⁴⁷Il convient de noter que ces estimations ont été réalisées en 2020. Les observations les plus récentes (étude Adequacy and flexibility study for Belgium 2024-2034) montrent qu’il faut s’attendre à une croissance plus rapide de l’électrification en Belgique que ce qui avait été estimé à l’époque.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

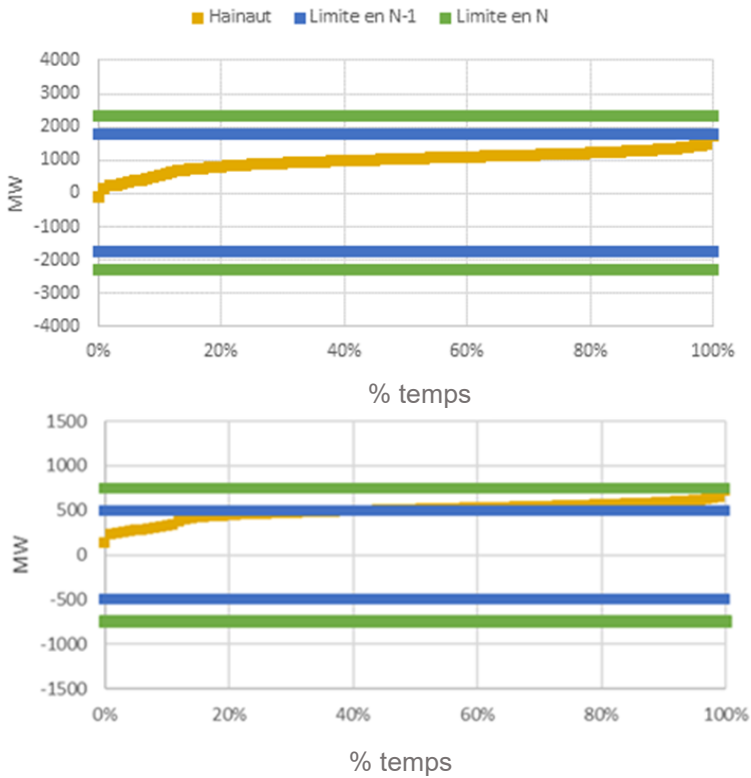


Figure 41: Situation de consommation dans le Hainaut (en haut) et à l'ouest du Hainaut (en bas) en 2020 (source : Elia 2021, Renseignements fournis à l'experte Bekolo)

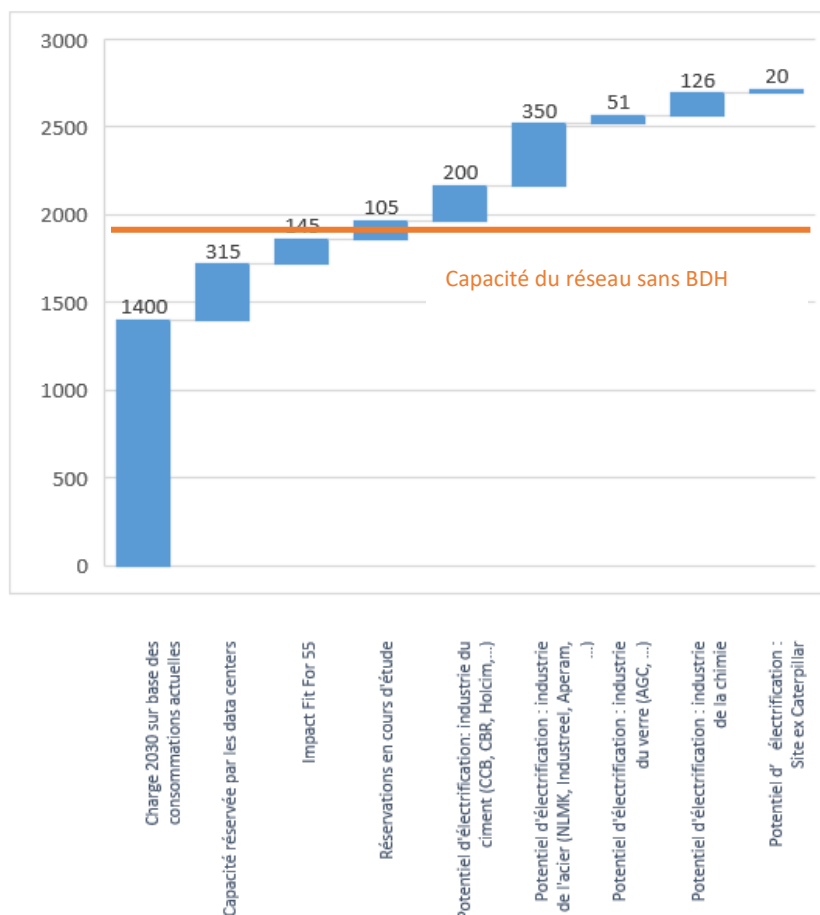


Figure 42: Evolution⁴⁸ attendue dans le Hainaut à l'horizon 2030 du total de la charge à un même instant (synchrone) sur le réseau 150kV uniquement, pour tous acteurs confondus (secteur résidentiel compris). (Source : Elia)

En raison de la forte charge actuelle sur le réseau, les marges de capacités sont restreintes alors que cette région est l'une des plus active de Belgique pour les demandes de raccordements client (Figure 43). Dès lors, la plupart des demandes de raccordement n'est possible qu'en version dite « flexible », c'est-à-dire un raccordement au réseau pour lequel la capacité n'est pas garantie et peut être limitée afin de maintenir le système en sécurité. Un tel raccordement peut impliquer des limitations importantes pour le client, des coûts complémentaires voire une impossibilité de réaliser son investissement.

La Figure 43 présente les demandes de raccordement en attente par région et la Figure 44 expose la capacité d'accueil du Hainaut à l'horizon 2027 et l'absence de possibilité de raccordement sans flexibilité (dits raccordements FLEX).

⁴⁸ Lexique :

- Capacité réservée par les data centers : Capacité prévue dans les contrats de raccordement, mais non encore utilisée.
- Impact Fit for 55 : Croissance moyenne liée à l'objectif de réduction de 55 % des émissions de CO₂ d'ici à 2030, et donc à l'électrification moyenne belge (surtout pour les PME et secteur résidentiel ici). Le Hainaut étant fortement industrialisé et présentant un grand nombre d'entreprises à fort potentiel d'électrification, l'électrification de ces secteurs est ajoutée séparément.
- Réservations en cours d'étude : Demandes de nouveaux raccordements ou de renforcements de raccordements existants récemment étudiés ou en cours d'étude (en attente de décisions de la part des demandeurs).
- Potentiel d'électrification: Augmentation de charge liée à l'électrification, par secteur d'activité industriel présent.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

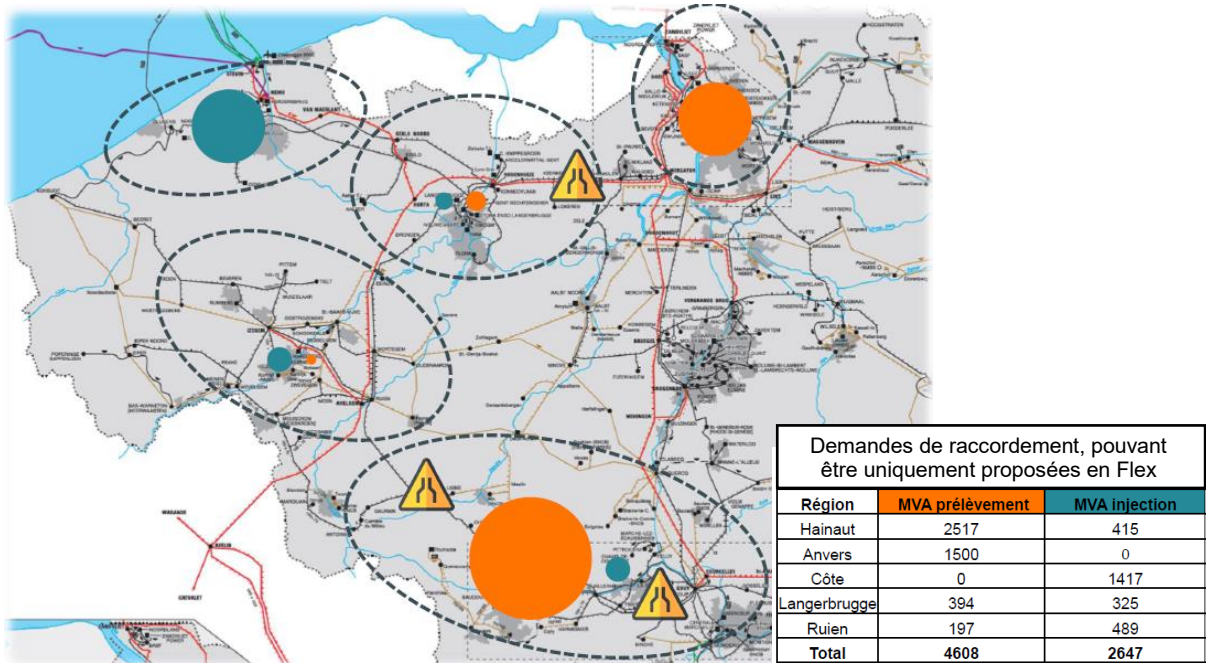


Figure 43 : Demande de raccordement client par région (source : Elia)

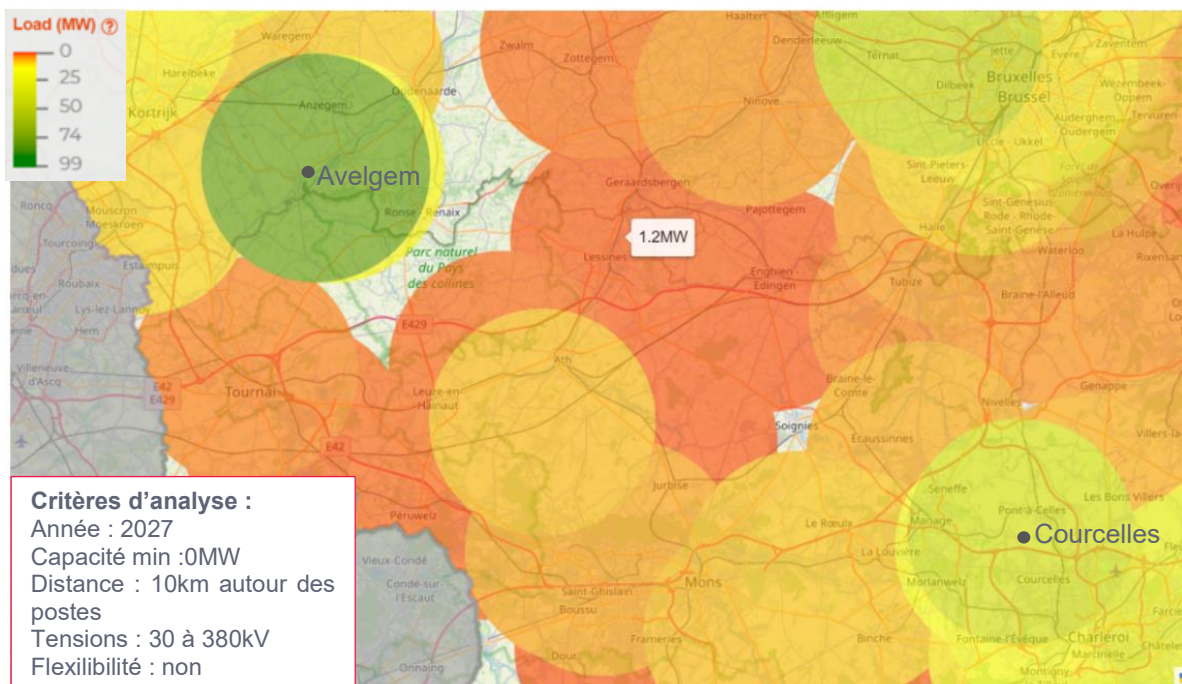


Figure 44 : Capacité du réseau pour les consommateurs à l'horizon 2027 (Date de consultation : 28/08/25, source : <https://www.elia.be/fr/clients/raccordement/capacite-d-accueil-du-reseau>)

Les solutions de raccordement nécessitent donc de raccorder les nouvelles charges à des éléments du réseau (poste ou ligne) éloignés impliquant des longueurs et des coûts de raccordement plus importants. Par conséquent, le raccordement de nouveaux grands acteurs ou le renforcement de raccordements existants prend du temps, coûte cher et ne répond pas aux attentes des acteurs économiques.

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

À terme, compte tenu de l'évolution de la charge attendue, un risque d'impossibilité de raccordement de nouveaux acteurs n'est pas exclu, impactant négativement le développement de l'activité économique de la région et freinant les plans d'électrification industriels.

Pour éviter que le réseau électrique ne soit un frein au développement économique de la province du Hainaut, il est important de le développer en conséquence, en augmentant la capacité de charge via une nouvelle injection sur un poste existant d'un gabarit suffisant ou d'un nouveau poste à créer; ce poste devant être situé à un endroit opportun du réseau. La Boucle du Hainaut permettrait ce renforcement car deux repiquages⁴⁹ (un sur chaque circuit) sont possibles permettant ainsi de créer 2 nouvelles injections. Le corridor de la Boucle du Hainaut proposé dans le dossier de base passe à proximité du poste de Chièvres où une injection est envisagée par Elia. Le passage des flux de transit serait reporté sur cette nouvelle liaison 380 kV au lieu du 150 kV qui pourra jouer son rôle au niveau du transport et de l'alimentation locale et non plus du transit (Figure 45).

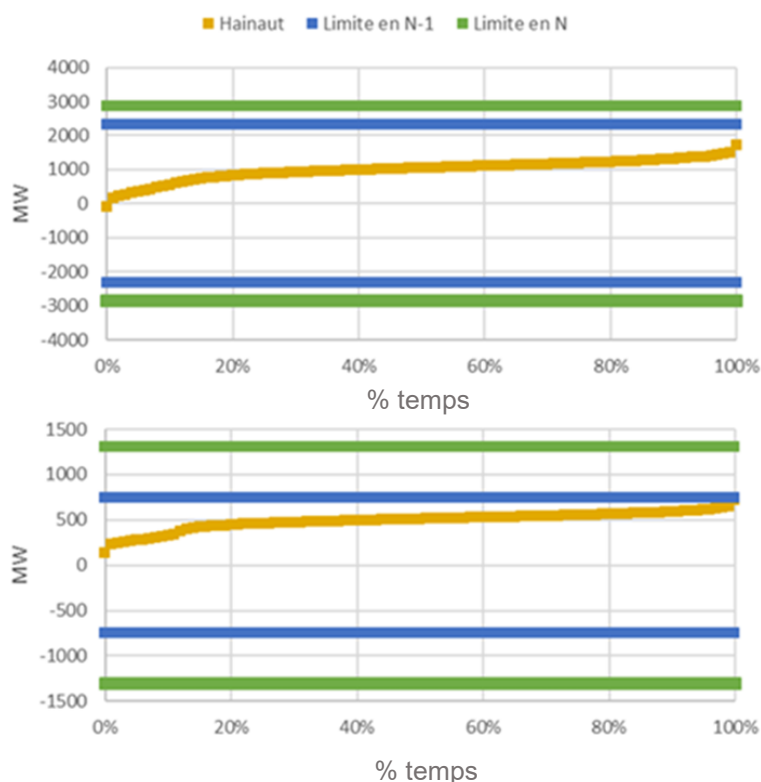


Figure 45: Situation de consommation dans le Hainaut (en haut) et à l'ouest du Hainaut (en bas) avec l'ajout de la Boucle du Hainaut (source : Elia 2021, renseignements fournis à l'experte Bekolo)

Sur base des différentes prédictions de transit et des postes les plus concernés par les risques de surcharges (Ruien, Chièvres, Baudour et Trivières), les experts indépendants Dai et Bekolo⁵⁰ ont confirmé que l'ajout de repiquage par exemple à Chièvres permettrait au réseau 150 kV d'accéder directement au réseau 380 kV et de disposer d'une plus grande marge pour accueillir de nouvelles charges industrielles ou permettre l'augmentation des charges existantes (électrification industrielle),

⁴⁹ Les repiquages sont des injections d'électricité aux réseaux d'un niveau de tension inférieur (les réseaux de distribution locaux).

⁵⁰ Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée aux titres 2.4 de son *Avis sur la nécessité d'une nouvelle liaison à 380 kV entre Avelgem et Courcelles*. Pour Menelika Bekolo, la validation est spécifiée au titre IV.II.2.1 de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

éliminant le risque de goulot d'étranglement attendu (et déjà partiellement observé) dans ce sous-réseau.

Le projet Boucle du Hainaut est donc nécessaire au désengorgement du réseau électrique local et permet de soutenir l'attractivité économique de la Wallonie et plus spécifiquement du Hainaut.

Avis du Professeur Henneaux

Les analyses fournies par Elia montrent une saturation déjà existante du réseau 150 kV (réseau de répartition) dans le Hainaut, et une augmentation du niveau de saturation dans un futur proche. Les problèmes de congestion à l'horizon 2030 ont également été mis en évidence par les calculs réalisés par Menelika Bekolo Mekomba en 2021. Cela est également cohérent avec une analyse qualitative de la situation. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de renforcer le réseau de transport dans la province de Hainaut. Différentes options sont possibles, mais un repiquage d'une ligne à très haute tension sur un poste 150 kV comme Chièvres a l'avantage de limiter le besoin d'autres nouvelles infrastructures.

3.5. Evolution probable si le projet n'est pas mis en œuvre

Au regard des différents éléments justifiant la mise en œuvre du projet Boucle du Hainaut, il est intéressant d'évaluer l'évolution probable de la situation si ce projet n'est pas mis en œuvre.

Tout d'abord, la situation sur la liaison Horta-Mercator serait détériorée et l'axe représenterait un goulot d'étranglement limitant du réseau. Cette saturation aurait pour conséquence principale de limiter l'accès aux énergies renouvelables et d'entraîner une augmentation des coûts de redispatching. En effet, le maintien de l'équilibre du réseau nécessitera de procéder au « redéploiement » des flux d'électricité sur le réseau, c'est-à-dire à la réduction de la production à un endroit déterminé en amont du goulot d'étranglement et à la compensation de cette réduction par une augmentation égale de production à un autre endroit en aval de ce goulot. Ces augmentations et réductions de production doivent respectivement être subsidiées et indemnisées par le gestionnaire du réseau et ces coûts sont *in fine* répercutés sur l'ensemble des consommateurs d'électricité.

De plus, les insuffisances du réseau belge auront également un impact sur le réseau européen. D'une part, parce que le manque de maillage du réseau engendre des risques pour la stabilité du réseau européen, d'autre part parce que cela limite le transport d'électricité à travers les interconnexions avec les pays voisins. Une limitation de ces interconnexions impliquerait des conséquences négatives sur la sécurité d'approvisionnement et sur la cohérence des prix (lié au risque de divergence des prix en cas de transferts complexes entre la Belgique et les pays voisins). Dans ce contexte, le « Clean Energy Package » européen vise à ce que les réseaux internes des Etats membres ne puissent être limitants afin de permettre une intégration complète du marché européen de l'énergie. Pour ce faire, il prévoit d'appliquer des pénalités financières importantes au gestionnaire de réseau de transport (GRT)/Pays dont le réseau interne présente des goulots d'étranglement.

A l'échelle du Hainaut, le non-développement du réseau impliquerait une complexité croissante de la mise en place de nouveaux raccordements voire un risque d'impossibilité de raccordement de nouveaux acteurs. En effet, le Hainaut produit peu d'électricité au regard de ses besoins et est donc importateur d'énergie. La province doit donc disposer des infrastructures suffisantes pour garantir l'approvisionnement de ses ménages, administrations et entreprises. Par ailleurs, le Hainaut profitera,

au même titre que les autres provinces belges, des gains économiques apportés par la liaison haute-tension en termes de réduction des prix de l'énergie permis par le développement des énergies renouvelables (éolien off-shore), mais aussi de réduction des risques lié au prix des énergies carbonées très volatiles (gaz, produits pétroliers).

Différents scénarios envisagent l'évolution de la demande d'électricité pour la Province du Hainaut. Ces scénarios sont produits par Elia sur base de différentes hypothèses, mais également par le Bureau fédéral du Plan (institution publique indépendante d'Elia). Tous ces scénarios prévoient une saturation des capacités d'alimentation électrique de la Province à plus ou moins brève échéance au cours des années 2030 si la capacité du réseau n'est pas significativement augmentée.⁵¹ D'après l'étude Deplasse de 2025, « quel que soit le scénario d'électrification pris en compte, l'ensemble des industries ne pourront plus avoir un accès garanti à l'électricité. Cela crée un risque important pour une province qui comprend 47% des industries wallonnes sous conventions carbonées. »⁵²

La saturation du réseau de 150 kV entraînera à terme des conséquences sur le développement de l'activité économique de la région qui perdra en attractivité et en compétitivité, faisant diminuer les investissements sur le territoire. En effet, le lien entre consommation énergétique et croissance économique est depuis longtemps établi,⁵³ ainsi que le lien entre croissance économique et emploi.

Cela aura un impact sur les emplois et sur les risques de délocalisation des entreprises ne pouvant pas accéder à l'énergie nécessaire pour assurer ou développer leur activité, mais plus probablement par le renoncement à de nouveaux investissements. De surcroît cela remettrait en cause les plans d'électrification industriels et ralentirait la région dans les objectifs de réduction d'empreinte carbone. L'impossibilité de déployer les moyens de production et les industries liés à l'électrification représente ainsi un coût d'opportunité important⁵⁴.

Ces risques réels sont actuellement observés aux Pays-Bas, où le gouvernement a été pris au dépourvu par la croissance rapide des flux d'énergie éolienne et photovoltaïque et la demande électrique en hausse. En conséquence, le raccordement au réseau a été mis à l'arrêt dans les provinces néerlandaises du Brabant septentrional et du Limbourg, ces problèmes pouvant persister jusqu'en 2030.

3.6. Conclusion concernant les besoins du projet

Dans un contexte d'augmentation de l'électrification de la société et de la production d'énergies renouvelables, il est important de dimensionner correctement le réseau électrique belge. Pour assurer le déploiement efficace d'un réseau robuste, la structure du réseau doit être maillée, de telle sorte qu'en cas d'incident ou de maintenance affectant une liaison, des chemins électriques alternatifs permettent le maintien du transport d'électricité. C'est grâce à cela que la continuité d'approvisionnement est assurée. En effet, le réseau à haute tension doit assurer une disponibilité permanente de l'électricité pour tous les utilisateurs. Toute interruption dans l'approvisionnement entraîne des conséquences

⁵¹ Ces scénarios sont décrits pour le Hainaut par l'étude d'août 2025 réalisée par le bureau Deplasse pour Elia et disponible en ligne : www.deplasse.com/wp-content/uploads/2025/11/2025_Deplasse_EtudeImpactBoucleDuHainaut.pdf

⁵² La Boucle du Hainaut - Evaluation des impacts socioéconomiques en province du Hainaut, Août 2025, Deplasse & Associés, p. 62

⁵³ Voir par exemple cette analyse de Julien Deleuze dans La Revue de l'Énergie n° 635 – décembre 2017 www.larevuedelenergie.com/wp-content/uploads/2018/05/Energie-et-croissance.pdf

⁵⁴ La Boucle du Hainaut - Evaluation des impacts socioéconomiques en province du Hainaut, Août 2025, Deplasse & Associés, p. 62

immédiates sur l’approvisionnement des gestionnaires de réseau de distribution et des gros consommateurs. En pratique, le réseau n’est indisponible que quelques minutes par an. Cela n’est possible que grâce à la structure du réseau qui est composée de redondance pour chacune des liaisons.

La liaison Horta-Mercator est l’unique liaison entre l’ouest et le centre du pays et présente déjà une saturation impliquant un goulot d’étranglement sur le réseau belge. Selon les différentes prédictions de besoins et de productions futurs, la saturation de la liaison Horta-Mercator sera d’autant plus importante d’ici 2030. Cette situation génère un risque pour la sécurité d’approvisionnement et nécessite donc une liaison additionnelle pour améliorer la fiabilité du réseau électrique belge dans son ensemble, caractérisée par la sécurité d’approvisionnement des consommateurs belge et wallon. C’est l’objet du projet Boucle du Hainaut.

Au terme de la présente analyse, le chargé d’étude conclut **qu’il est nécessaire d’ajouter une liaison permettant de boucler la liaison Horta-Mercator et de réaliser des repiquages dans le Hainaut, en accord avec les conclusions d’Elia et des experts indépendants Bekolo et Dai**. En plus de soulager la liaison Horta-Mercator, cette liaison permettra de rapatrier l’énergie renouvelable produite par les éoliennes offshore contribuant à la décarbonation du réseau belge, de remédier à la saturation attendue sur le réseau 150 kV du Hainaut et de maintenir la cohérence des prix à l’échelle européenne.

Elia prévoit que cette liaison soit réalisée avec une capacité de **6 GW en N et 3GW en N-1**. Comme recommandé par le professeur Henneaux, la pertinence de la capacité proposée peut être vérifiée à travers la recherche d’un optimum économique permettant de limiter les coûts du renforcement et du redispatching. Cet optimum étant dépendant de la technologie choisie pour la liaison, il est abordé à la suite du chapitre relatif aux options technologiques (Paragraphe 0).

Avis du Professeur Henneaux

L’analyse présentée dans ce rapport ainsi que les études sur lesquelles cette analyse s’appuie montrent qu’il y a un besoin d’augmenter significativement la capacité nette de transfert du corridor ouest–centre du réseau de transport belge. Malgré un manque de détails sur l’origine des flux et un manque d’analyses coût-bénéfices de différents niveaux d’augmentation, il semble pertinent de prévoir une augmentation de la capacité nette (en prenant en compte le critère de sécurité N-1) d’au moins 3-4 GW. Il convient cependant de ne pas postuler a priori que cela doit correspondre à une augmentation de la capacité brute de 6 GW (même si analyse multicritère approfondie des différentes options pourra montrer a posteriori que la meilleure option pour assurer une augmentation de capacité nette d’au moins 3-4 GW consistera à augmenter la capacité brute d’environ 6 GW). Par ailleurs, il semble judicieux de coupler ce renforcement du réseau de grand transport à une augmentation de la capacité du réseau de répartition (150 kV) dans la province du Hainaut via une (ou plusieurs) injection(s)/repiquage(s) supplémentaire(s), afin de limiter le développement de nouvelles lignes pour répondre aux problèmes de saturation du réseau dans cette province.

4. ANALYSE DES OPTIONS TECHNOLOGIQUES

4.1. Préambule

La construction d'une nouvelle liaison permettant de boucler la liaison Horta-Mercator et de réaliser des repiquages dans le Hainaut a été jugée nécessaire au regard des besoins analysés dans le chapitre précédent. Le projet Boucle du Hainaut prévoit cette liaison en ligne aérienne AC entre les postes d'Avelgem et de Courcelles avec une capacité de 6 GW en situation N et 3GW en situation N-1.

Le chapitre qui suit présente les technologies existantes pour la réalisation de liaison électrique, et en caractérise les atouts et faiblesses dans le cadre de leur implantation dans le réseau électrique haute tension belge. Il vise à établir les options technologiques envisageables dans le cadre de cette liaison 6GW entre Avelgem et Courcelles et à identifier les éventuelles alternatives raisonnables à la liaison aérienne en courant alternatif retenue par Elia.

Afin de réaliser sa propre analyse, le bureau d'étude s'est notamment basé sur les documents suivants :

- Etude technologique. Elia, Février 2019 (**Annexe 1**) ;
- Avis sur la nécessité et sur le choix technologique de la liaison Boucle du Hainaut et synthèse pour le grand public. Jing Dai, décembre 2020 et janvier 2021 (**Annexe 4**) ;
- Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai. Menelika Bekolo Mekomba, septembre 2021 (**Annexe 5**) ;
- Avis critique sur la contre-proposition de REVOLHT à propos du projet "Boucle du Hainaut". UMon, septembre 2021 (**Annexe 7**).
- Avis d'experts sur le rapport final « Continuation ou redémarrage ? et sur les questions connexes posées par les bourgmestres ». Dirk Westermann, novembre 2022. Document rédigé dans le cadre du choix technologique du projet Ventilus. (**Annexe 8**) ;
- Présentations et PV des échanges du dialogue ayant eu lieu entre Elia et REVOLHT entre décembre 2024 et avril 2025 (Synthèse reprise en **Annexe 9**).

Afin de compléter les études citées ci-avant et valider le contenu de la présente analyse, le bureau d'études s'est adjoint le soutien technique d'un expert externe : le professeur Roberto Benato dont le CV est repris en **Annexe 10**.

Roberto Benato est né à Venise, en Italie, en 1970. Il a obtenu un diplôme en génie électrique de l'université de Padoue en 1995 et un doctorat en analyse des systèmes électriques en 1999 avec une thèse intitulée "Advanced matrix algorithms for the steady-state and dynamic power system analysis" (algorithmes matriciels avancés pour l'analyse des systèmes électriques stables et dynamiques). En 2002, il a été nommé professeur adjoint, en 2010 professeur associé et en 2021 professeur titulaire au sein du groupe des systèmes électriques du département d'ingénierie industrielle de l'université de Padoue.

Ses principaux domaines de recherche sont l'analyse des multiconducteurs et, plus généralement, la transmission de l'énergie électrique. Roberto Benato est auteur et co-auteur d'environ 250 articles scientifiques, de 6 brochures techniques du Cigré (Conseil international des grands réseaux électriques), d'une norme IEEE (IEEE Std C37.122.4™-2016 Guide for Application and User Guide for Gas-Insulated Transmission Lines, Rated 72.5 kV and Above) et de 10 livres dont :

- "EHV AC undergrounding electrical power" (pub. SPRINGER),
- "Basics of Power Systems Transmission" (pub. Amazon KDP),
- "La trasmissione dell'energia nelle reti elettriche di potenza" (pub. Amazon KDP),
- "Impianti elettrici" (pub. Wolters Kluwer)
- "Esercizi di sistemi elettrici per l'energia" (pub. Libreria Progetto).
- "Electrical Power Systems Calculations" (published by Amazon KDP),
- "Esercizi di impianti elettrici" (published by Amazon KDP).

En outre, en 2005, il a été nommé membre du comité IEEE PES Substations ; en particulier, K0 GIS Subcommittee, K2 TF1 Tutorial on GIS/GIL/SF6 et K3 TF1 GIL Application Guide.

En 2014, il a été nommé membre de l'IEC TC 120 "Electrical Energy Storage (EES) Systems" dans le WG 4 "Environmental issues of EES systems". En 2015, il a été nommé membre de l'IEC TC 115 "High Voltage Direct Current (HVDC) transmission for DC voltages above 100 kV" et de l'IEC TC 122 "UHV AC transmission systems". Depuis 1996, Roberto Benato est également membre de l'AEIT.

Roberto Benato est rédacteur en chef adjoint de la revue IET Generation, Transmission and Distribution et rédacteur en chef adjoint de la revue IEEE Trans. On Power Delivery.

En 2017, R. Benato a été élevé au grade de IEEE SENIOR MEMBER et en 2018 au grade de Cigré DISTINGUISHED MEMBER.

Il dispose donc d'une solide expérience dans les domaines technologiques suivants : lignes aériennes en courant alternatif et continu, Gas Insulated Lines (GIL), courant continu (HVDC) et câbles souterrains / sous-marins en courant alternatif.

Le professeur Roberto Benato a été consulté de multiples fois au cours de la rédaction du présent chapitre (septembre 2023, avril 2024, septembre 2025). Il a validé le contenu et l'analyse réalisée par le chargé d'étude relative aux options technologiques du projet Boucle du Hainaut. Son analyse technique permettant de valider le contenu de ce chapitre a été intégrée au texte sous la forme d'encadrés insérés à la suite des paragraphes tirant des conclusions relatives à la technologie du projet.

4.2. Les technologies existantes

Les technologies permettant d'établir les liaisons électriques se distinguent entre le courant alternatif et le courant continu :

- Le courant alternatif (AC ou HVAC pour la haute tension) est un flux électrique (électrons) circulant dans un sens puis dans un autre. La fréquence du courant alternatif est mesurée en hertz (Hz). Elle représente le nombre de changements de sens effectués par le courant en une seconde. Le réseau électrique européen (et donc belge) est basé sur le courant alternatif d'une fréquence de 50Hz (le courant effectue donc 50 allers-retours par seconde). Les "autoroutes" européennes de l'électricité fonctionnent en courant alternatif à une tension de 380 kV. Le réseau de transport AC est triphasé, ce qui signifie que chaque circuit comprend trois phases, chacune composée de plusieurs sous-conducteurs ;
- Le courant continu (DC ou HVDC pour la haute tension) est un flux électrique au sein duquel les électrons circulent dans la même direction (du pôle négatif vers le pôle positif). Le réseau DC est biphasé, ce qui signifie que chaque circuit comprend deux phases, chacune composée de plusieurs sous-conducteurs. Ce courant nécessite d'être converti en courant alternatif, via des stations de conversion, dès lors que c'est ce dernier sur lequel se base le réseau européen. Il existe deux types de stations de conversion :

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

- La station LCC (Line Commutated Converter) basée sur les thyristors (type de semi-conducteur). Dans ces stations, le courant DC circule toujours dans une seule direction au travers des liaisons HVDC. Tout changement de direction de la puissance (action fréquemment nécessaire en réseau maillé) nécessite de polariser la tension, c'est-à-dire d'inverser les pôles + et -. La sortie AC d'une station LCC nécessite de passer par un filtre haute tension afin d'éliminer les harmoniques, ces filtres requièrent près de 50% de l'espace nécessaire à ces stations ;
- La station VSC (Voltage Source Converter) basée sur les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Ces stations ne nécessitent pas d'inversion de polarité pour changer la direction de la puissance et peu ou pas de filtre haute tension.

Il n'existe actuellement pas de réseau européen HVDC, de sorte que la tension peut être choisie librement (le maximum actuel est d'environ 525 kV).

Au sein de ces deux types de courant, les options technologiques de transport existantes sont :

- La ligne aérienne ;
- La liaison souterraine ;
- Le Gas Insulated Line (GIL) ;
- Le supraconducteur.

Une **ligne aérienne** est composée de conducteurs aériens soutenus par des pylônes pouvant supporter plusieurs circuits, eux-mêmes composés de plusieurs phases. L'air agit comme isolant entre les conducteurs. Les conducteurs sont regroupés en deux ou trois phases par circuit selon que le courant soit continu ou alternatif (Figure 46 et Figure 47)⁵⁵.

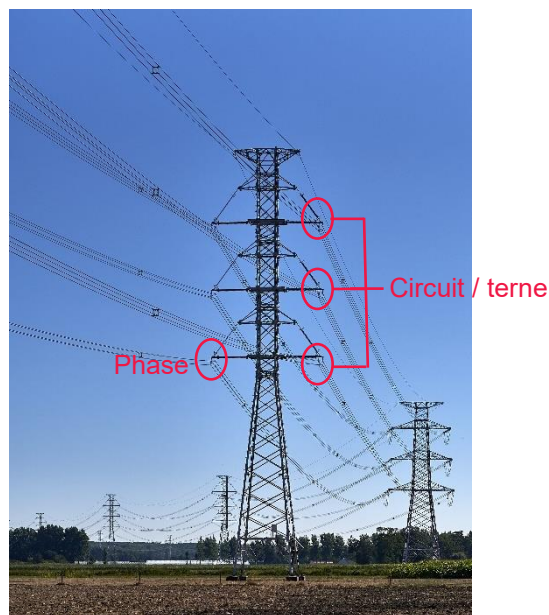


Figure 46 : Description d'un pylône et de ses composants (source photo : Elia)

Une **liaison souterraine** est composée de câbles (Figure 47). Les câbles sont l'équivalent des conducteurs des lignes aériennes, additionnés d'une couche isolante (l'air ne jouant pas le rôle d'isolant, contrairement aux lignes aériennes). Pour le transport au niveau de tension requis (380kV en AC et

⁵⁵ Chaque phase peut être divisée en sous-conducteurs : dans ce cas, la phase est appelée faisceau de conducteurs.

525kV en DC), un câble est nécessaire pour chaque phase électrique. Chaque circuit comprend trois câbles en courant alternatif contre deux en courant continu. Les caractéristiques des câbles souterrains varient selon les courants considérés. En courant alternatif, les pertes au niveau des câbles génèrent de la chaleur qu'il est difficile d'évacuer en souterrain. Or, l'échauffement des câbles détériore leur efficacité, ce qui nécessite d'une part de les éloigner les uns des autres et d'autre part d'y limiter le courant (et donc la puissance). De plus, les câbles AC génèrent une grande quantité d'énergie réactive⁵⁶ devant être compensée. Cette compensation peut être effectuée par des réacteurs shunt⁵⁷, installés le long de la liaison. En courant continu, les câbles DC génèrent moins de chaleur et pas d'énergie réactive. Les câbles peuvent donc être disposés à proximité les uns des autres et la liaison ne nécessite pas de réacteurs shunt.

Le **Gas Insulated Line (GIL)** se compose de tubes remplis de gaz isolants, chacun équipé d'un conducteur et disposés dans un tunnel, enfoui ou en surface (Figure 47). Pour la technologie AC, il y a trois tubes par circuit et deux pour la technologie DC. En AC, cette technologie génère également de l'énergie réactive (en quantité moins importante que la liaison souterraine) et nécessite donc des réacteurs shunt (moins nombreux).

Le **supraconducteur** est un conducteur refroidi à très basse température (environ -200°C) lui conférant une résistance électrique quasi nulle et permettant le transport de grandes quantités d'énergie. Cette technologie est encore en cours de développement.



Figure 47 : Illustration des technologies de liaisons aériennes (à gauche), de câbles souterrains (au centre) et de GIL (à droite). (Source : Etude technologique, Elia, février 2019).

L'option technologique basée sur le transport d'hydrogène n'a pas été retenue dans le cadre du projet. Cette technologie consiste à convertir l'électricité produite en hydrogène, puis à la reconvertir en électricité. Cette technologie est encore en phase conceptuelle. De nombreux défis technologiques et économiques doivent encore être relevés avant que cette technologie puisse jouer un rôle dans le système énergétique. En effet, à ce jour, le transport de l'électricité par l'hydrogène n'est pas préférable en raison des faibles rendements de conversion (rendement d'environ 30%, en comparaison à un rendement de plus de 90% pour le raccordement de l'énergie verte à un réseau électrique). En outre,

⁵⁶ Les câbles souterrains sont capacitifs, ce qui signifie qu'ils occupent une partie de l'énergie transitant par le réseau. L'énergie active est celle qui est transportée par le câble vers l'autre extrémité, l'énergie réactive est l'énergie « perdue » utilisée pour alimenter la capacité des câbles.

⁵⁷ Composant électrique haute-tension qui a pour fonction d'absorber l'énergie réactive (en compensant le comportement capacitif d'un réseau par son comportement inductif) ce qui permet d'augmenter l'énergie active.

cette technologie n'est pas compatible avec la réalisation d'un réseau maillé permettant de limiter les surcharges de la ligne à haute tension Horta-Mercator. Si l'hydrogène en tant que vecteur énergétique a certainement une place importante dans le système énergétique à l'avenir⁵⁸, à court terme, il ne représente pas une alternative crédible pour le projet de la Boucle du Hainaut et n'apparaît pas réalisable dans le délai imparti par la Boucle du Hainaut.

4.3. Déclinaison des technologies en configurations adaptées au projet Boucle du Hainaut

Cette section a pour but de présenter les différentes configurations technologiques basées sur les technologies existantes ou en développement. Cela ne signifie pas qu'elles soient applicables au projet Boucle du Hainaut. La réelle viabilité de ces technologies est détaillée dans les sections suivantes.

Les configurations sont appliquées à une liaison permettant de boucler la liaison Horta-Mercator et de réaliser des repiquages dans le Hainaut, tel que jugé nécessaire dans le chapitre relatif à l'analyse des besoins. Le projet prévoit cette liaison entre les postes d'Avelgem et Courcelles.

L'analyse de configuration réseau différente basée sur d'autres postes d'extrémité, tel que le concept REVOLHT, est réalisée dans le Chapitre 6 dédié aux alternatives du projet.

Dans le cadre du projet Boucle du Hainaut, liaison électrique de 6 GW en situation N et 3 GW en situation N-1, la déclinaison des options technologiques donne lieu aux configurations suivantes :

- **Ligne aérienne AC** : ligne composée de deux circuits de 3 GW chacun (2 x 3 phases, soit 6 conducteurs). Les types de pylônes et de conducteurs peuvent varier, mais l'analyse qui suit considère un conducteur à faisceaux quadruple et des pylônes treillis compacts⁵⁹ ;
- **Liaison souterraine AC** : liaison composée de 6 circuits en parallèle (6 x 3 phases, soit 18 câbles), de plus de 40 réacteurs shunts et de postes intermédiaires (regroupant plusieurs des réacteurs shunts) ;
- **AC-GIL** : liaison composée de 2 circuits (2 x 3 conducteurs, soit 6 tubes) disposés dans un tunnel doté d'un refroidissement et de 3 réacteurs shunt ;
- **Supraconducteur AC** : théorique (en développement), liaison composée de 2 circuits de 3 conducteurs ;
- **Liaison aérienne DC** : ligne aérienne composée de 2 connexions de 3 GW chacun (2 x 2 phases, soit 4 conducteurs), et de 2 stations de conversion VSC 3GW⁶⁰ aux extrémités de la liaison (4 stations au total) ;

⁵⁸ La production d'hydrogène est particulièrement utile si l'hydrogène est consommé directement en tant que produit. La conversion de l'électricité renouvelable en gaz vert pourrait être intéressante, par exemple dans les processus industriels (chimiques) et le secteur des transports. Dans ce cas, la production d'hydrogène peut contribuer à équilibrer le réseau électrique en absorbant les excédents temporaires de production, sans avoir à reconvertir l'hydrogène en électricité. Mais l'hydrogène n'est pas une alternative pour le projet de la Boucle du Hainaut. La technologie en est actuellement au stade de la recherche ou de la phase pilote et ne pourra prouver pleinement son utilité qu'avec des quantités très élevées de ressources renouvelables dans le système électrique. À cet égard, l'électricité et l'hydrogène sont complémentaires dans une solution holistique et ne doivent pas être considérés comme des concurrents pour rendre le système énergétique climatiquement neutre.

⁵⁹ Tel que choisi pour le projet de ligne Stevin à l'issue de nombreuses analyses et optimisations.

⁶⁰ La tension plus élevée obtenue en ligne aérienne DC par rapport au câble souterrain DC permet d'avoir des stations de conversion de 3GW plutôt que 2GW.

- **Liaison souterraine DC** : liaison composée de 3 connexions parallèles de 2GW (3 connexions x 2 phases, soit 6 câbles⁶¹) et 3 stations de conversion VSC de 2GW de chaque côté de la liaison (6 stations au total) ;

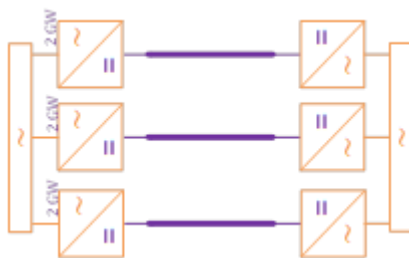


Figure 48 : Configuration parallèle de 3 connexions HVDC de 2GW (source : Elia)

- **DC-GIL** : théorique (en développement), il peut être supposé que 2 circuits (2 x 2 conducteurs, soit 4 tubes) seraient nécessaires ;
- **Supraconducteur DC** : en développement, liaison composée de 2 circuits de 2 conducteurs.

En complément des technologies présentées ci-dessus, il est également à noter qu'un système hybride aéro-souterrain existe avec une ligne aérienne dotée d'enfouissements locaux à travers 3 technologies possibles : le câble DC, le câble AC-GIL ou le câble AC. Ces systèmes sont présentés au point 4.6 de ce document.

4.4. Caractéristiques techniques, économiques et environnementales des solutions technologiques

Dans le cadre de l'étude technologique réalisée par Elia en 2019 (**Annexe 1**), chacune des technologies existantes a été analysée selon 3 catégories de critères :

- Critères techniques : fiabilité (fréquence d'incident) et disponibilité (temps de réparation en cas d'incident), impact sur l'exploitation du réseau, maturité technologique, la possibilité d'ajouter des points de repiquage le long de la liaison ;
- Critères économiques : les coûts d'investissement et d'entretien ainsi que les coûts liés aux pertes sur le réseau ;
- Critères environnementaux : l'occupation du sol (tant en phase de chantier qu'en phase d'exploitation), l'impact visuel et sonore, les champs électromagnétiques et les émissions de gaz à effet de serre.

Les critères techniques, économiques et environnementaux des différentes options technologiques sont synthétisés ci-dessous.

4.4.1. EXCLUSIONS TECHNIQUES

L'analyse technique de l'étude technologique d'Elia a été effectuée pour l'ensemble des technologies présentées. L'analyse visait à vérifier, pour chacune d'elle, qu'elle permette une liaison fonctionnelle,

⁶¹ Le nombre de câbles peut varier en fonction de la topologie du convertisseur et de la puissance des câbles.

fiable, à la disponibilité élevée et à l'impact positif sur l'exploitation du réseau, sans introduire de risques inacceptables.

L'analyse technique a révélé que les technologies **supraconducteurs (AC et DC)** et **DC-GIL** n'étaient pas suffisamment matures. En effet, elles font toutes encore l'objet de recherches en laboratoire, et, si certaines d'entre elles font l'objet de projet pilote, cela concerne soit des distances, soit des puissances et tensions bien moins élevées que ce que prévoit le projet Boucle du Hainaut. Bien que l'AC-GIL soit une technologie mature, il n'existe aucune ligne d'une longueur comparable à celle de la Boucle du Hainaut, la plus longue étant de 3,3 km. Elia a donc jugé que ces technologies n'étaient pas prêtes pour être appliquées au projet et ces technologies ont été exclues des configurations applicables au projet. L'inadéquation de ces technologies a été validée⁶² en 2021 par les experts Jing Dai et Menelika Bekolo dans le cadre de leurs analyses. Le chargé d'étude rejoint ces conclusions et confirme que l'exclusion de ces technologies est justifiée.

L'analyse technique d'Elia a également comparé la pertinence des **stations de conversions LLC et VSC** en courant continu. Il en résulte que l'intégration d'une technologie DC avec station de conversion LCC est complexe dans un réseau maillé, qu'elle rend les repiquages pratiquement impossibles et qu'elle présente davantage de contraintes techniques (impossibilité de fonctionner à faible charge, changement de direction du flux nécessitant une inversion de la polarité de tension, nécessité de filtres haute tension, reconstruction du réseau impossible, de même que l'obligation de réglage de puissance réactive reprise dans le règlement technique belge) que les stations VSC. Elia a dès lors décidé de ne pas considérer les stations LCC pour le projet. Comme validé⁶³ par les experts Jing Dai et Menelika Bekolo, le chargé d'étude considère également que la meilleure adéquation des stations VSC en comparaison aux stations LCC est justifiée.

Avis du Professeur Roberto Benato

Concernant l'AC-GIL :

Bien que l'ENTSO-E ait attribué à l'AC-GIL avec SF₆ un TRL⁶⁴ égal à 9 (signifiant « système réel éprouvé dans un environnement opérationnel » et « commercialisation réussie de la technologie dans l'environnement du réseau européen »), il n'existe pas de retour d'expérience sur les lignes longues, simplement parce que la plus longue ligne AC-GIL mesure 5,7 km (Nantong-Suzhou en Chine). En effet, au cours de la dernière décennie, des installations très importantes ont été réalisées en Chine, dont cette ligne GIL de 1 000 kV (avec du SF₆ pur).

⁶² Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée au Point 4 du titre 2.2 de la *Synthèse pour le grand public*. Pour Menelika Bekolo, au point V.I de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

⁶³ Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée au titre 3.3 de la *Synthèse pour le grand public*. Il convient néanmoins de préciser que l'auteur émet des réserves sur la bonne justification de l'inadéquation des stations LCC au projet. Selon lui, les investissements économiques supplémentaires à réaliser pour pallier les limitations techniques de ce type de station participent fortement à le rendre peu pertinent en comparaison aux stations VSC. L'auteur partage néanmoins les conclusions d'Elia à ce sujet.

Pour Menelika Bekolo, au point V.II.2 de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

⁶⁴ Technology Readiness Level. Le TRL est un indicateur du niveau de maturité de technologies particulières. Il existe neuf niveaux de maturité technologique, le TRL 1 étant le plus bas et le TRL 9 le plus élevé.

En outre, il convient de souligner que le règlement (UE) 2024/573 du Parlement européen et du Conseil du 7 février 2024 sur les gaz à effet de serre fluorés a interdit l'utilisation du SF₆ à partir du 1^{er} janvier 2032, en ce qui concerne les appareillages de commutation électrique à haute tension de plus de 145 kV ou de plus de 50 kA de courant de court-circuit, avec un potentiel de réchauffement global de 1 ou plus. Par conséquent, si le règlement susmentionné était également appliqué aux GIL, cela représenterait une forte limitation d'utilisation pour les GIL à courant alternatif avec SF₆. Il existe une nouvelle génération de GIL appelés câbles à air comprimé (PACs) qui utilisent de l'air comprimé (à environ 10 bars) comme milieu isolant et qui ont des joints plus flexibles. À ma connaissance, il n'existe aucune installation haute tension de ce type (à l'exception du projet pilote Druckluftkabel du réseau ferroviaire suisse), et dans tous les cas, l'ENTSO-E leur a attribué une TRL de 8 en 2025 et à 9 seulement en 2030. Ils ne sont donc pas encore tout à fait au point pour le moment.

Concernant le DC-GIL :

Seuls les DC-GIS (c'est-à-dire Gas Insulated Substations) dont le niveau de maturité technologique (TRL) est de 7 avec SF₆ et de 4-5 sans SF₆ sont actuellement en service. À l'heure actuelle, les DC-GIL n'ont pas encore été mis en œuvre dans les réseaux très haute tension. Les DC-GIL sont en cours de développement et devraient permettre d'atteindre les spécificités techniques considérées pour le projet Boucle du Hainaut à l'avenir. Elles n'existent néanmoins pas actuellement.

Concernant les supraconducteurs (AC et DC) :

Pour les câbles supraconducteurs à haute température (HTS), l'ENTSO-E a attribué au HTS-AC un TRL de 7 et au HTS-DC un TRL de 5, ce qui est absolument insuffisant pour envisager une installation de 6 GW et 88 km de long.

Concernant les stations de conversions LLC et VSC :

Ces deux technologies DC ont atteint une maturité technologique TRL de 9, ce qui signifie qu'elles sont prêtes pour un déploiement à grande échelle. Cependant, leurs domaines d'application optimaux diffèrent. Dans le cadre d'une connexion multi-terminaux (c'est-à-dire plusieurs postes de conversion interconnectés au sein d'un même réseau HVDC), la technologie VSC est effectivement plus adaptée que la technologie LCC. La technologie LCC convient davantage à des liaisons HVDC point à point. Les systèmes HVDC basés sur la technologie VSC offrent plusieurs avantages techniques majeurs à savoir un contrôle plus rapide du flux de puissance active ainsi qu'un meilleur contrôle de la puissance réactive au niveau des deux stations de conversion (ce qui signifie un meilleur soutien de la tension du réseau).

De plus, au sein des VSC, le développement des convertisseurs modulaires à plusieurs niveaux (MMC) - qu'il soit de type demi-pont ou pont complet – est l'avenir du HVDC car il s'agit de la technologie la plus avancée. Enfin, les systèmes HVDC-VSC peuvent être équipés de stratégies de contrôle dites "grid-forming", qui émulent le comportement d'un générateur synchrone au sein du réseau AC.

Au regard de ces éléments, l'exclusion des différentes technologies proposée apparaît justifiée.

4.4.2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Compte tenu des exclusions techniques précitées, les options technologiques pour la mise en œuvre du projet Boucle du Hainaut comprennent les lignes aériennes et les liaisons souterraines en AC ou DC (Figure 49). Les aspects techniques de ces options sont synthétisés ci-dessous.

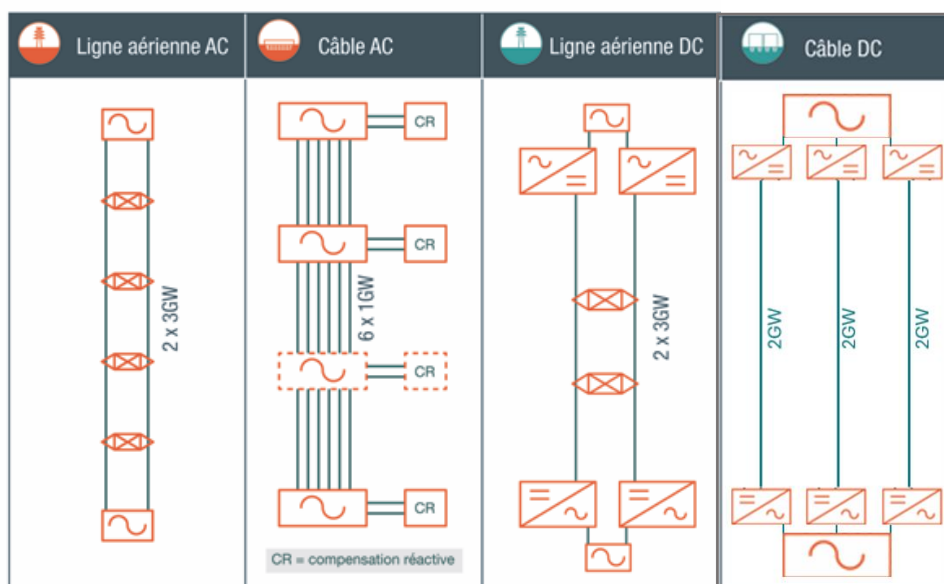


Figure 49 : Options technologiques évaluées dans le cadre du projet Boucle du Hainaut. (Source : Etude technologique, Elia, février 2019).

La technologie de **ligne aérienne AC** se compose d'une ligne aérienne de 2 ternes de 3 GW et deux travées aux extrémités, rassemblant l'appareillage électrique nécessaire au bon fonctionnement de la ligne. La ligne aérienne AC représente un type de liaison très mature utilisé dans le monde entier. Cette technologie est fiable et disponible, elle présente des probabilités de défaillance inférieures aux autres technologies, des probabilités de rupture de pylônes acceptables, un temps de réparation limité (de l'ordre de 24 heures) et des possibilités simples de repiquages. Des repiquages peuvent également être facilement ajoutés après la mise en œuvre de la liaison afin de faire face à l'évolution croissante des besoins en énergie et de l'incertitude sur l'emplacement futurs de ces besoins. Compte tenu du fait que ce type de liaison constitue la majorité du réseau haute tension belge, l'intégration d'une ligne supplémentaire apparaît aisée.

La **liaison souterraine AC** se compose de 6 circuits d'1 GW et est dotée d'une travée aux extrémités de chaque circuit, le long desquels se trouvent des réacteurs shunt pour la compensation de la puissance réactive. Les probabilités de défaillance sont également acceptables (bien que légèrement plus élevés que celles d'une ligne aérienne). En revanche, le temps de réparation est plus long que pour l'aérien (25 jours en moyenne). Compte tenu du nombre de circuits et de la nécessité de réacteurs shunt, ce type de technologie apparaît relativement complexe à mettre en œuvre. De plus, la combinaison des câbles et des réacteurs shunt donne lieu à des phénomènes (tels que des fréquences harmoniques et des phénomènes transitoires) susceptibles de compromettre la stabilité de réseau. L'ensemble de ces contraintes limitent à quelques kilomètres la distance de liaison souterraine AC pouvant être réalisée.

La **ligne aérienne DC** se compose d'une ligne aérienne de 2 circuits de 3 GW et de 2 stations de conversion VSC aux deux extrémités de la liaison. Les probabilités de défaillance et temps de réparation

de la ligne DC sont supposés similaires à une ligne AC auxquelles s’ajoutent ceux relatifs aux stations de conversion (plus élevés).

La **liaison souterraine DC** se compose de 3 connexions de 2 GW et de 3 stations de conversion VSC aux deux extrémités de la liaison. Les probabilités de défaillance et temps de réparation sont supposés similaires à une liaison souterraine AC (néanmoins moindres de par le fait que la liaison ne nécessite que 6 câbles en DC contre 18 en AC, ce qui diminue le risque de défaillance) auxquels s’ajoutent ceux relatifs aux stations de conversion (plus élevés).

D’un point de vue technique, le choix de la technologie de liaison en courant continu (**ligne aérienne DC ou liaison souterraine DC**) n’a pas d’impact spécifique sur l’exploitation du réseau (absence de puissance réactive à compenser, absence d’influence du côté AC des convertisseurs). En revanche, les stations de conversion présentent certaines limites. En particulier, les stations HVDC présentent des risques liés :

- aux contrôles actifs :
 En AC, le flux électrique est déterminé naturellement entre les liaisons. Les lois physiques font que si une liaison devient indisponible, la puissance se redistribue automatiquement vers les autres liaisons, sans qu’une intervention soit nécessaire. En résumé, en AC, les flux suivent naturellement les chemins disponibles.
 En DC, les convertisseurs imposent leur propre point de fonctionnement (tension, courant, puissance) et les lois physiques ne redistribuent pas automatiquement les flux en cas de panne, car le courant dépend directement de la paramétrisation des convertisseurs. En résumé, en DC, il faut un **système de contrôle actif** (communication, algorithmes de répartition de puissance) pour réagir à un incident.
 Dès lors, en cas de défaillance d’une liaison AC en parallèle, la puissance n’est pas automatiquement redistribuée par l’intermédiaire de la liaison DC et une surcharge des lignes AC en parallèle peut survenir (Figure 50).

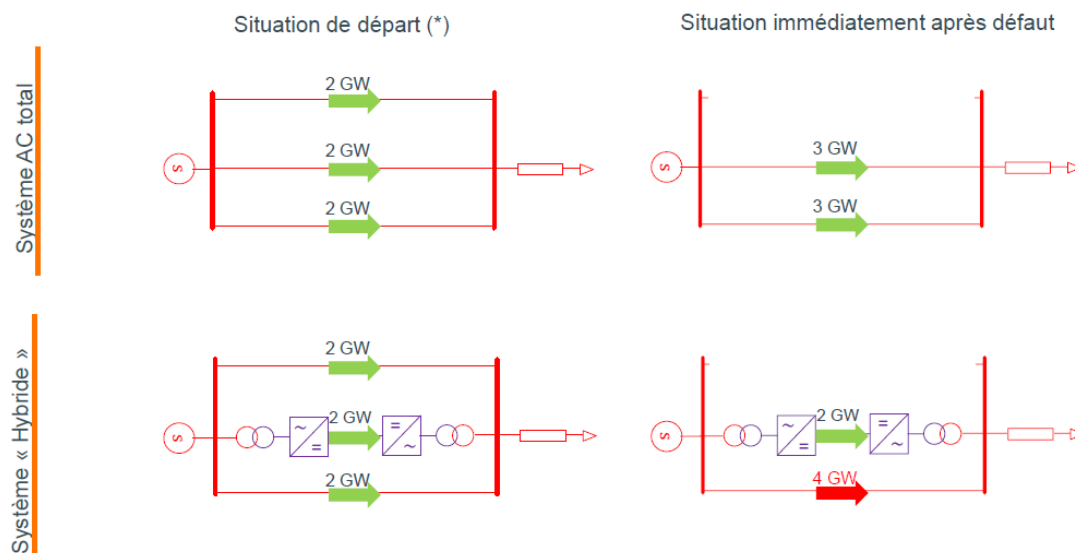


Figure 50 : Illustration de la redistribution naturelle pour les systèmes AC et du risque de surcharge des lignes AC en cas de système hybride AC/DC. Hypothèse : capacité de chaque élément =3GW (source : Elia, présenté dans le cadre du dialogue avec REVOLHT)

Tout dysfonctionnement augmente le risque de surcharge sur les liaisons AC parallèles voire de panne dans le réseau, ce qui met en péril le respect du critère N-1 (c’est-à-dire que le réseau

doit être capable de poursuivre son fonctionnement normal à tout moment en cas de perte d'un élément du réseau suite à un incident) ;

- à de possibles phénomènes de résonance : Les problèmes de résonance liés aux stations HVDC couvrent un spectre large (allant des harmoniques classiques jusqu'aux interactions dynamiques complexes entre convertisseurs et réseau) et détériorent la stabilité du réseau ;
- à une plus grande complexité de reconstruction du réseau en cas d'incident (black-out)⁶⁵. En effet, en AC, la reconstruction s'appuie sur le synchronisme des machines, ce qui permet un redémarrage plus naturel. Des centrales dites de « black-start » relancent la fréquence et la tension, puis d'autres centrales se resynchronisent automatiquement en se raccordant. En DC, cela nécessite une coordination centrale ou distribuée complexe et des communications fiables entre convertisseurs afin de recréer artificiellement un point d'ancrage (tension, référence, répartition de puissance).

De plus, la technologie DC nécessite la mise en place de connexions parallèles pour atteindre les 6 GW, ce qui présente un risque lié à la robustesse et stabilité du réseau. Si les trois liaisons comprennent des conducteurs ou des stations de conversion issus du même fournisseur, il existe un risque de défauts de mode commun, c'est-à-dire une réaction erronée, en raison de la même erreur dans les connexions parallèles, ce qui peut entraîner une perte soudaine de tout le corridor voire impliquer des phénomènes de défaillance en cascade à plus large échelle sur le réseau belge et européen⁶⁶. A l'inverse, si les fournisseurs sont différents (link multi-vendor), le risque de défauts commun est évité, mais cela implique des risques de fonctionnement instable liés aux interopérabilités des systèmes de contrôle des connexions qui doivent être coordonnés et compatibles (il n'existe pas encore de norme permettant de garantir cette interopérabilité et celle-ci n'a pas encore été démontrée à grande échelle). Par ailleurs, il est à noter que le réseau en mer (champs éoliens) et à la côte (liaison HVDC Nemo vers le Royaume-Uni et nouvelles connexions HVDC envisagées) recèlent beaucoup d'électronique de puissance rendant encore plus accrus les risques pour la stabilité dynamique du réseau suite à des interactions indésirables entre cette électronique de puissance et une Boucle du Hainaut en DC.

Enfin, les repiquages le long d'une liaison DC s'avèrent plus complexes à mettre en place. Une station de conversion de type multi-terminal doit être installée à l'extrémité de chaque repiquage. Or, ce type de station manque de maturité et de flexibilité et n'a encore jamais été mis en œuvre sur un projet de l'échelle de la Boucle du Hainaut. Par ailleurs, l'ajout d'un repiquage supplémentaire, non prévu au moment de la création de la liaison, s'avèrerait extrêmement complexe à mettre en œuvre.

4.4.3. CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES

L'analyse technique de l'étude technologique d'Elia a ensuite réalisé une analyse économique des coûts d'investissement et d'entretien ainsi que des coûts liés aux pertes du réseau pour les quatre technologies envisageables, en considérant une ligne comprise entre 50 et 100 km de longueur. Les **coûts d'investissement** pour la mise en place de la ligne sont moins importants pour la ligne aérienne AC. Ces coûts sont 6 fois supérieurs pour une liaison souterraine AC, 9 fois supérieurs pour une ligne aérienne DC et 11 fois supérieurs pour une liaison souterraine DC. Le prix plus élevé pour la technologie DC s'explique par la nécessité de stations de conversion représentant jusqu'à 2/3 du prix total.

La figure ci-dessous présente les estimations réalisées dans le cadre de l'étude comparative des technologies réalisée par Elia. Les montants sont toutefois donnés à titre indicatif dès lors que le prix

⁶⁵ Impossible avec les stations LCC. Plus complexe avec les stations VSC en comparaison à la technologie HVAC.

⁶⁶ Pour des raisons de résilience, les systèmes AC choisissent également différents fournisseurs pour différentes connexions.

d'investissement est fortement dépendant du cours des matériaux et que celui-ci a énormément évolué depuis la réalisation de l'étude (2019).

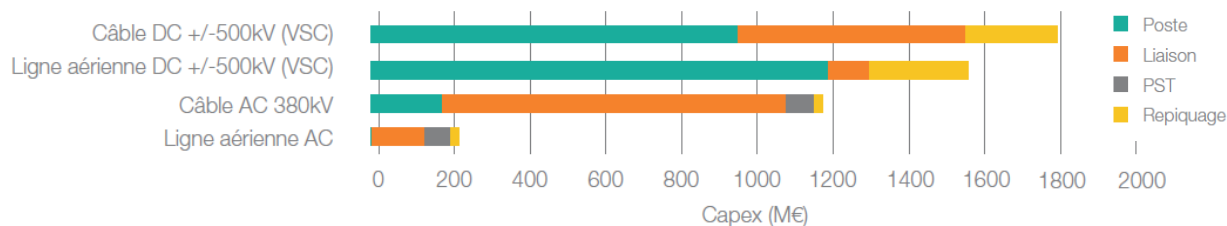


Figure 51 : Coûts d'investissement des technologies estimés pour une liaison de 75 km de long (Source : Etude technologique, Elia, février 2019).

Ces coûts d'investissement ont été réévalués sur base des coûts des liaisons publiés dans le cadre des Plans de développement du réseau allemand (NEP⁶⁷) et français (RTE^{68,69}) ainsi que d'une récente étude de coûts des installations au Royaume-Uni⁷⁰ (ces coûts sont détaillés au chapitre 6, point 6.3.2.c.3).

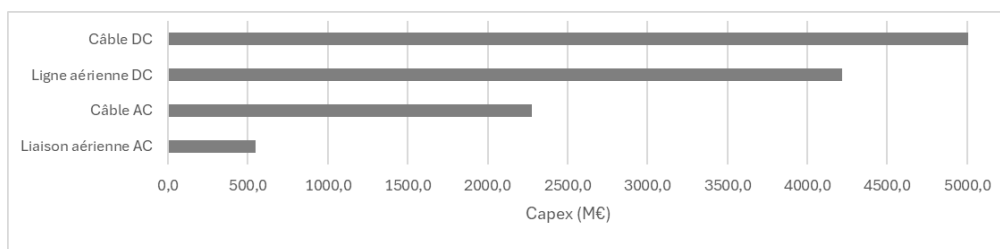


Figure 52 : Estimation du coût d'investissement des technologies pour une liaison de 88km de long (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni)

Cette mise à jour confirme la forte augmentation des prix des équipements depuis 2019 et montre des écarts similaires entre le prix des technologies. En effet, les **coûts d'investissement** pour la mise en place de la ligne sont toujours moins importants pour la ligne aérienne AC et ces coûts sont 4 fois supérieurs pour une liaison souterraine AC, 8 fois supérieurs pour une ligne aérienne DC et 10 fois supérieurs pour une liaison souterraine DC.

La ligne aérienne AC présente également des **coûts d'entretien et des coûts de perte réseau** plus faibles en comparaison aux technologies DC. Les coûts liés aux pertes des câbles AC sont environ deux fois plus faibles que ceux des lignes aériennes AC. Là encore, en raison de la maintenance requise pour les stations de conversion et des pertes qu'elles entraînent, ces coûts sont plus élevés pour les technologies DC.

4.4.4. CARACTÉRISTIQUES ENVIRONNEMENTALES

⁶⁷ https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-03/230321_NEP_Kostenschätzung_NEP2037_2045_V2023_1.Entwurf.pdf

⁶⁸ <https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-03/SDDR2024-volet-etudes-technico-%C3%A9conomiques-doc-B.pdf> (p66)

⁶⁹ <https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-09/2024-09-09-complement-etude-strategies-souterraines.pdf> (p28)

⁷⁰ https://www.theiet.org/media/axwkktkb/100110238_001-rev-j-electricity-transmission-costs-and-characteristics_final-full.pdf

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

Dans le cadre du choix technologique, il est intéressant de considérer les principaux impacts environnementaux des options envisageables.

En termes d'**occupation du sol** en phase chantier, les lignes aériennes occupent des zones de chantier d'environ 50 m sur 50 m autour des pylônes ; tandis que les technologies souterraines AC et DC nécessitent respectivement une zone de 70 m et 64 m de large tout le long du tracé.



Figure 53 : Exemple de zone de chantier pour une pose souterraine ici de 4 ternes 380 kV- 4GW sur la liaison Stevin. Cette liaison comprend 4 circuits (12 câbles) alors que la Boucle du Hainaut devrait en compter 6 (18 câbles) (source : Elia

En phase d'exploitation, les technologies aériennes impliquent une occupation du sol permanente au niveau des pylônes de l'ordre de 20 x 20 m à 30 x 30 m selon le type de fondations devant être mis en œuvre. L'occupation du sol est peu contrainte entre les pylônes.

Pour les technologies souterraines, la contrainte est importante tout au long du tracé car elles ne permettent plus la construction de bâtiment, l'empilage de matériaux et la plantation de végétation à racines profondes sur la zone surplombant les câbles (zone de 18m de large en AC et 12m en DC). Pour les câbles souterrains AC, des puits d'inspection (pour une liaison comprenant 6 circuits comme la Boucle du Hainaut, 9 puits doivent être installés) doivent être installés tous les 800 à 1000 m.



Figure 54 : Exemple d'installation de puits d'inspections. Chaque puit mesure environ 2,8m x 2m sur 1,4 m de haut dont +/- 50 cm seront visibles hors sol (source : Elia)

En technologie DC, les 2 (de 3GW, en aérien, sur 6ha) ou 3 (de 2GW, en souterrain, sur 4ha) stations de conversion par extrémité occupent des superficies importantes représentant un total de 24 ha.



Figure 55 : station de conversion AC-DC à Lixhe pour la liaison ALEGrO (1 GW) (source : Google earth et google street map)

PHASE 1 : INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES ALTERNATIVES

De même, les réacteurs shunt et les postes intermédiaires pour les câbles AC requièrent une superficie permanente d'environ 12 à 33 ha.

L'**impact visuel** des lignes aériennes est similaire en AC et DC (voire légèrement plus important en DC en raison d'une distance minimale plus importante à maintenir entre les conducteurs). Les technologies souterraines ne sont pas visibles en phase d'exploitation, à l'exception des puits d'inspection ainsi que des réacteurs shunt et des postes intermédiaires (regroupant plusieurs réacteurs shunt) pour le câble AC. Les stations de conversion des technologies DC ont également un impact visuel important (hangar de 20m de hauteur et une surface de 4-6 hectares chacun).

Les lignes aériennes peuvent produire des **nuisances sonores** intermittentes via un bruit de crépitement par temps humide, nommé effet couronne. Cet effet est plus important pour les lignes DC qu'AC. Les technologies souterraines AC induisent des nuisances sonores permanentes au niveau des réacteurs shunt tandis que des nuisances permanentes sont également attendues au niveau des stations de conversion en DC (en lien avec le système de refroidissement nécessitant des systèmes de ventilation bruyants).

Les technologies AC produisent des **champs magnétiques** alternatifs, contrairement aux technologies DC (qui n'induisent qu'un champ magnétique continu comparable au champ terrestre). Les câbles AC génèrent des pics plus élevés sur le terrain situé au-dessus du câble, mais l'intensité du champ diminue plus rapidement que dans le cas d'une ligne aérienne AC.

Les pertes électriques dans la liaison sont compensées par une production supplémentaire d'électricité. Ces productions s'accompagnent d'émissions de CO₂. Les pertes, donc les **émissions de gaz à effet de serre**, sont plus importantes pour les technologies DC qu'AC. Les pertes minimales sont obtenues pour la liaison souterraine AC.

4.4.5. SYNTHÈSE DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

Le tableau suivant synthétise les principales caractéristiques techniques, économiques et environnementales des 4 technologies analysées.

Tableau 7 : Principales caractéristiques des technologies envisageables

| | AC | | DC | |
|------------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|
| | Ligne aérienne | Câbles souterrains | Ligne aérienne | Câbles souterrains |
| Caractéristiques techniques | | | | |
| | Ligne aérienne de 2 circuits de 3 GW | Liaison composée de 6 circuits en parallèle | Ligne aérienne de 2 circuits de 3 GW | Liaison composée de 3 circuits de 2GW en parallèle |
| Nombre de circuit pour 6GW | 2 | 6 | 2 | 3 |
| Nombre total de conducteurs | 6 | 18 | 4 | 6 |
| Réacteurs shunt | / | 42 réacteurs shunt pour la compensation de la puissance réactive | / | / |
| Station de conversion | / | / | 4 stations VSC | 6 stations VSC |
| Repiquage | Aisé | Aisé | Non mature (multi-terminaux) | Non mature (multi-terminaux) et impose de fixer le lieu de repiquage dès la conception du design de la ligne. Ne permet qu'un seul repiquage ce qui nécessite à terme de réaliser plus de liaisons pour connecter les différents points de consommation du réseau. |
| Maturité | Technologie mature | Technologie mature mais présentant des limitations physiques pour les distances et tension du projet BdH | Technologie immature ⁷¹ pour les besoins spécifiques du projet BdH (entre les postes d'Avelgem et Courcelles), nécessitant une solution multi-terminal multi-vendor | |
| Limitations techniques | / | Génération de puissance réactive nécessitant compensation. Fréquences harmoniques, saut de tension et phénomènes transitoires compromettant la stabilité de réseau | Contrôle actif nécessaire et risque de défaut de mode commun compromettant le respect du critère N-1 et pouvant engendrer des déconnexions en cascade compromettant la stabilité du réseau européen. Phénomènes de résonance entre les composants du réseau. Reconstruction du réseau après incident (black-out) plus complexe qu'en AC | |

⁷¹ La technologie HVDC est mature pour les liaisons point-to-point d'une puissance limitée entre deux nœuds AC forts, ou pour le raccordement radial des parcs éoliens offshore.

| Caractéristiques économiques | | | | |
|--|---|---|---|---|
| Coûts d'investissement ⁷² | Solution la plus économique | 4 à 6 fois supérieur à l'AC aérien | 8 à 9 fois supérieur à l'AC aérien | 10 à 11 fois supérieur à l'AC aérien |
| Coûts de maintenance | Solution la plus économique | Supérieur à l'AC aérien | Supérieur à l'AC aérien | Supérieur à l'AC aérien |
| Caractéristiques environnementales | | | | |
| Occupation du sol | 50x50m autour des pylônes durant le chantier | 70m de large durant le chantier | 50x50m autour des pylônes durant le chantier | 64m de large durant le chantier |
| | Occupation permanente au sol pour les pylônes (400m ² , soit 20 x 20m) ⁷³ | Occupation permanente au sol pour les réacteurs shunt et les postes intermédiaires (12 à 33ha) et occupation du sol contrainte au-dessus du câble (18m) | Occupation permanente au sol pour les pylônes (400m ² , soit 20 x 20m) ⁷³ et stations de conversion (12 à 18ha) | Occupation permanente au sol pour les stations de conversion (12 à 18ha) et occupation du sol contrainte au-dessus du câble (12m) |
| Impact visuel | Pylônes visibles tout au long de la ligne | Réacteurs shunt nécessitant de nombreux postes intermédiaires et puits d'inspection visibles | Pylônes visibles tout au long de la ligne et impact au niveau des stations de conversion | Stations de conversion et puits d'inspection visibles |
| Nuisances sonores | Effet couronne intermittent | Nuisances permanente des réacteurs shunt | Effet couronne plus important qu'en AC. Nuisances permanentes au niveau des stations de conversion | Nuisances permanentes au niveau des stations de conversion |
| Champs magnétiques | Champs magnétiques (>0,4μT) sur une largeur ⁷⁴ de 61m | Champs magnétiques (>0,4μT) sur une largeur d'environ 30m | / | / |
| Emission de GES en phase d'exploitation ⁷⁵ | Emission plus importante que pour la liaison souterraine AC | Emission minimale | Emission plus importante que les technologies AC | Emission plus importante que les technologies AC |

⁷² Coûts d'investissements issus de l'étude technologique réalisée par Elia. Les montants sont toutefois donnés à titre indicatif dès lors que les prix d'investissement et de maintenance sont fortement dépendants du cours des matériaux et que celui-ci a fortement évolué depuis la réalisation de l'étude (2019).

⁷³ Pouvant atteindre 900m² maximum selon les caractéristiques du sol (soit 30 x 30m).

⁷⁴ La largeur de 61 m correspond à la largeur du couloir au sein de laquelle les champs électriques moyens à 1,5m du sol sont plus élevés que 0,4 μT. Ce concept est détaillé dans l'analyse des incidences du chapitre Champs électromagnétiques. Cette valeur est estimée sur base du courant annuel moyen, estimé à 35% dans le cadre du projet Boucle du Hainaut.

⁷⁵ Liées aux pertes électriques dans la liaison devant être compensées par une production supplémentaire d'électricité.

Avis du Professeur Roberto Benato

Concernant la technologie AC souterraine :

Pour la longueur de ligne envisagée (88km), la technologie AC souterraine nécessite une compensation de l'énergie réactive avec des réacteurs shunt disposés au minimum aux deux extrémités, mais de préférence tous les 25-30 km. La présence combinée d'inductances shunt et de capacités shunt pourrait entraîner des problèmes de résonance et une détérioration spectaculaire de la qualité de l'alimentation du réseau. Des études approfondies sur les harmoniques du réseau doivent être réalisées pour vérifier la faisabilité de cette option. Il est également à noter qu'en cas de court-circuit phase-écran dans la solution par câble souterrain, étant donné qu'il y aurait 5 ou 6 circuits en parallèle, la puissance N-1 serait de 5000 MW ou 4800 MW, contre une puissance N-1 OHL égale à 3000 MW.

Concernant la plus grande complexité associée à la technologie DC :

Au stade actuel de la technologie, le HVDC-VSC est une technologie mature pour une connexion point à point. En revanche, si l'on envisage une solution HVDC-VSC multi-terminale (qui nécessite, entre autres, des disjoncteurs fiables, rapides et sélectifs), celle-ci n'est pas encore suffisamment mature. De plus, la capacité de 6GW nécessite des liaisons parallèles qui présentent un risque d'instabilité (problèmes de mode commun pouvant entraîner la perte simultanée des deux liaisons). L'exploitation parallèle de plusieurs systèmes HVDC intégrés dans le réseau AC (comme requis pour la Boucle de Hainaut) et conçus par différents fournisseurs n'a pas encore été mise en œuvre et aucun projet n'est actuellement en cours.

Concernant les coûts :

J'ai développé une comparaison indépendante des coûts (basée sur ma « comparaison globale des coûts » publiée dans IEEE Trans. On Power Delivery [1]) dans les mêmes conditions pour chaque technologie, c'est-à-dire une longueur de ligne de 88 km (point à point) et une puissance active transmissible égale à 6 GW avec un facteur de puissance égal à 0,98 (courant RMS = 9116 A). Afin d'avoir une source impartiale de coûts, j'ai pris comme référence les coûts d'investissement du rapport de l'ACER intitulé « Indicateurs de coûts d'investissement unitaires et valeurs de référence correspondantes pour les infrastructures électriques et gazières ». Bien que publié en 2015, cette référence apparaît pertinente étant donné que nous nous intéressons aux ratios de coûts et non aux valeurs absolues.

Ma comparaison globale des coûts comprend :

- les coûts d'investissement des lignes de transport, de la compensation des shunts souterrains et des stations de conversion HVDC ;*
- les coûts liés aux pertes d'énergie ;*
- les coûts d'exploitation et de maintenance ;*
- les coûts de démantèlement ;*

À ce stade préliminaire de la comparaison, les coûts liés aux compensations, aux coupures forcées et aux réparations des pannes ne sont pas pris en compte.

Pour l'évaluation économique des pertes d'énergie pendant la durée de vie opérationnelle d'une ligne de transport, une courbe de durée est prise en compte et le coût est estimé sur la base d'une valeur classique de 40 €/MWh (taux d'intérêt annuel de 2,5 %). Avec une telle puissance (6 GW), le coût économique des pertes

d'énergie pendant la durée de vie de la ligne (40 ans) est considérable. Pour les technologies considérées ici, les coûts liés aux pertes sont minimaux pour la technologie AC souterraine. Ces coûts sont deux fois plus élevés pour la ligne aérienne AC et quatre fois plus élevés pour les technologies DC.

Les résultats de comparaison de mon analyse donnent un prix minimal pour la ligne aérienne AC. Ce coût est 2,2 fois supérieur pour le câble souterrain AC, 3,5 fois supérieur pour la ligne aérienne DC et 3,8 fois supérieur pour le câble souterrain DC.⁷⁶ Les conclusions de STRATEC concordent donc avec mon analyse : la meilleure solution en termes de coût global est la ligne aérienne HVAC. Pour une telle longueur de ligne, le coût du HVDC n'apparaît pas raisonnable. Le coût du transport de l'énergie électrique se répercute sur le coût de l'énergie. Cela entraînerait donc un coût trop élevé pour la collectivité. Le HVAC est sans aucun doute le meilleur choix d'un point de vue économique.

[1] R. Benato, D. Napolitano : « Overall Cost Comparison Between Cable and Overhead Lines Including the Costs for Repair After Random Failures », IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 27, n° 3, doi : 10.1109/TPWRD.2012.2191803, pp. 1213-1222, 2012.

4.5. Choix de la technologie

Les options technologiques retenues pour le projet Boucle du Hainaut sont détaillées ci-après, sur base des différentes caractéristiques préalablement présentées.

Pour rappel, les grands besoins auxquels doit répondre la liaison sont :

- Assurer l'accès compétitif et abordable à l'électricité ;
- Augmenter la capacité d'accueil des énergies renouvelables ;
- Soutenir l'attractivité économique de la Wallonie, plus spécifiquement dans le Hainaut ;
- Fiabiliser l'approvisionnement électrique pour les consommateurs.

Afin de répondre à ces objectifs, d'un point de vue technologique, la liaison doit :

- être fiable et disponible : la liaison doit avoir un taux de panne très réduit et des durées de réparation et de maintenance les plus réduites possible. Son exploitation ne doit pas mettre en péril le reste du réseau, notamment en cas d'incident. Elle doit permettre la reconstruction du réseau en cas de black-out (effondrement du réseau).
- permettre un maillage du réseau 380 kV afin de reprendre une partie des charges de la liaison Horta-Mercator, permettant ainsi de réduire les surcharges déjà constatées sur cet axe.
- permettre des repiquages sur le réseau du Hainaut ; et ce tant lors de la construction de la liaison que par la suite si les besoins en énergie augmentent et que de nouvelles injections s'avèrent nécessaires.

⁷⁶ Il est toutefois à noter que les prix de référence considérés ici datent de 2015, soit avant l'augmentation importante des coûts des technologies HVDC.

4.5.1. CHOIX ENTRE LES TECHNOLOGIES HVAC OU HVDC

A l'analyse des caractéristiques des technologies DC, les limitations techniques principales sont :

- Le risque lié à la mise en place de connexions HVDC en parallèle (risque de défaut de mode commun en cas d'un unique fournisseur ou de fonctionnement instable si deux fournisseurs différents) ;
- La nécessité de stations de conversion multi-terminaux en cas de repiquage présentant de nombreuses incertitudes (maturité et flexibilité limitées) ;
- La nécessité de contrôle actif aux stations de conversion VSC, contrairement à une connexion AC où l'énergie trouve elle-même le chemin qui offre la moindre résistance. Le système AC dans son ensemble a un effet d'autorégulation et est beaucoup moins sensible aux situations imprévues ;
- Les possibilités limitées de participer à la reconstruction du réseau en cas de black-out.

L'ensemble de ces limitations impliquent des risques pouvant compromettre la stabilité du réseau belge, voire présenter des effets sur le réseau européen (risque de défaillance en cascade de type black-out).

Compte tenu des limitations et des coûts associés aux liaisons DC, peu importe la technologie de liaison utilisée, **les options aérienne et souterraine HVDC sont jugées inadéquates pour le projet Boucle du Hainaut**. Cette meilleure adéquation de la technologie HVAC a été validée⁷⁷ par les experts Jing Dai et Menelika Bekolo dans le cadre de leurs analyses. Compte tenu de l'importance de la liaison projetée dans le réseau belge et européen, le chargé d'étude estime que cette décision est justifiée et permet d'assurer la mise en place d'une liaison fiable et répondant aux enjeux précités. Pour rappel, la fiabilité constitue l'un des besoins principaux auxquels la liaison doit répondre.

Economiquement, il est intéressant de noter que la technologie HVDC apparaîtrait seulement plus intéressante que la technologie HVAC à partir de 1700 km de ligne aérienne et 200 km de câble.

Avis du Professeur Roberto Benato

Une ligne de transmission haute ou très haute tension en courant alternatif - qu'elle soit aérienne ou souterraine - contribue à améliorer le maillage du réseau.

Cela présente plusieurs avantages, notamment un impact positif sur la stabilité du réseau, à la fois en régime permanent et en régime transitoire, puisque la réactance vue depuis un poste diminue. Le réseau devient ainsi plus interconnecté (« entrelacé ») et peut mieux se défendre naturellement en cas de perturbation.

Des réactances plus faibles permettent également de transmettre une plus grande quantité de puissance active, ce qui aide à compenser les variations de puissance dans le réseau. Ce comportement n'est pas naturellement vrai pour les liaisons HVDC.

La capacité de surcharge des lignes aériennes ou souterraines HVAC est supérieure à celle des lignes HVDC, qui doivent prévoir un système de contrôle limitant dynamiquement la surcharge disponible afin de maintenir les températures des jonctions semi-conductrices dans les limites opérationnelles.

⁷⁷ Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée aux titres 2.2 et 3.3 de son *Avis sur le choix technologique de la liaison Boucle du Hainaut*. Pour Menelika Bekolo, la validation est spécifiée dans la conclusion de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

De plus, pour une telle longueur de ligne (88 km), le coût du HVDC n'apparaît pas raisonnable. Le coût du transport de l'énergie électrique se répercute sur le coût de l'énergie. Cela entraînerait donc un coût trop élevé pour la collectivité. A ce titre, le HVAC est sans aucun doute le meilleur choix du point de vue économique.

Selon la littérature technique, le seuil de rentabilité entre les technologies HVAC et HVDC peut varier légèrement selon les hypothèses retenues. Cependant, pour une distance d'environ 85 km, le HVAC demeure l'option la plus avantageuse et la plus recommandée économiquement.

4.5.2. CHOIX DES TECHNOLOGIES HVAC

Pour rappel, la technologie souterraine AC présente également des risques pour la stabilité du réseau liés à la production de puissance réactive, aux fréquences harmoniques, aux sauts de tension et aux phénomènes transitoires. C'est pourquoi aucune liaison souterraine AC n'existe à ce jour pour la puissance et la distance considérée.

A nouveau, compte tenu de l'importance de la liaison projetée au sein du réseau belge et européen, un tel risque d'instabilité apparaît trop important et rend impossible le déploiement de cette technologie à un niveau de tension de 380 kV et une distance de 88 km. **Il en résulte qu'une liaison souterraine AC ne peut pas être appliquée sur la totalité de la liaison.** A nouveau, les experts consultés sur cette question ont validé⁷⁸ cette exclusion technique, le chargé d'étude les rejoint.

En revanche, cette technologie apparaît réaliste pour de courtes distances, car la longueur du câble enfoui amplifie ces phénomènes électriques limitatifs. **Elle reste donc envisageable sur des distances plus courtes, en liaison hybride aéro-souterraine AC.**

Il ressort de l'analyse technico-économique que la ligne aérienne AC est la technologie la plus adaptée à la liaison complète du projet Boucle du Hainaut. Cette conclusion est également obtenue par les experts à l'issue de leurs analyses⁷⁹.

Avis du Professeur Roberto Benato

Il n'existe pas d'installations de câbles HVAC 380 kV d'une telle longueur. À ma connaissance, le plus long câble 380 kV est la ligne double-circuit Sorgente-Rizziconi (Italie), d'une longueur totale de 43 km. Les caractéristiques du projet Boucle du Hainaut vont bien au-delà et nécessiteraient 5 ou 6 circuits sur une longueur de 85 km. Or, la présence combinée d'inductances shunt et de capacités shunt pourrait entraîner des problèmes de résonance et une détérioration spectaculaire de la qualité de l'alimentation du réseau. Cela n'implique pas nécessairement que la réalisation soit impossible, mais des études approfondies du réseau sont nécessaires pour valider l'utilisation d'une liaison entièrement souterraine.

Même si la faisabilité technique était démontrée, le rapport du coût global entre câble souterrain et ligne aérienne est plus que doublé. Il n'est pas raisonnable de raisonner comme si les ressources étaient infinies. Le coût du transport d'électricité se répercute directement sur le coût de l'énergie, ce qui entraînerait un coût trop élevé pour la collectivité. Selon l'étude comparative des coûts que j'ai réalisée

⁷⁸ Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée aux titres 2.2 et 3.1 de son *Avis sur le choix technologique de la liaison Boucle du Hainaut*. Pour Menelika Bekolo, la validation est spécifiée au titre V.III.1 de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

⁷⁹ Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée aux titres 3 de son *Avis sur le choix technologique de la liaison Boucle du Hainaut*. Pour Menelika Bekolo, la validation est spécifiée en conclusion de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

pour ce projet, le coût global de la technologie avec câble souterrain pourrait rattraper (mais pas égaler) la ligne aérienne si le coût unitaire des pertes d'énergie devenait très élevé, par exemple 100 €/MWh.

Ainsi, je rejoins les conclusions du rapport, la solution HVAC aérienne est la technologie présentant le moins de contraintes techniques et est sans aucun doute le meilleur choix d'un point de vue économique.

4.6. Liaison hybride aéro-souterraine

Les liaisons électriques ne doivent pas obligatoirement être réalisées via une même technologie sur leur totalité. Des liaisons, dites hybrides, couplant deux technologies différentes sont donc possibles.

A l'issue de l'analyse précédente, la ligne aérienne AC a été jugée la plus adaptée au projet considéré, mais celle-ci pourrait faire l'objet d'un enfouissement sur certains tronçons. L'enfouissement local est possible via 3 technologies : le câble DC, le câble AC-GIL ou le câble AC.

Compte tenu du fait que les raisons techniques, économiques et/ou environnementales ayant donné lieu à l'exclusion du câble DC et de l'AC-GIL restent pertinentes en cas d'enfouissement local, ces deux technologies ne sont pas retenues. A l'inverse, en ce qui concerne la liaison souterraine AC, les phénomènes électriques limitatifs sont d'autant plus réduits que la longueur de l'enfouissement est réduite. Cette technologie apparaît donc réalisable sur certains tronçons de la ligne et sur une distance limitée. Les points suivants présentent les caractéristiques d'une liaison aéro-souterraine HVAC et la distance d'enfouissement réalisable dans le cadre du projet Boucle du Hainaut.

4.6.1. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES, ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES D'UNE LIAISON AÉRO-SOUTERRAINE HVAC

Techniquement, le passage de la ligne aérienne de 2 circuits de 3 GW à la liaison souterraine comportant 6 circuits de 1GW est réalisé à travers des postes de transition. Ces postes permettent de connecter 3 circuits des câbles souterrains à un circuit (ou terne) aérien, ce qui permet de maintenir une exploitation classique.

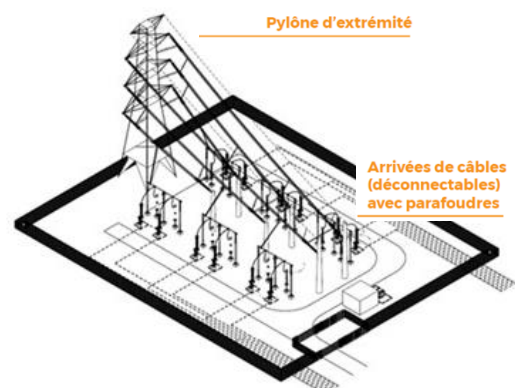


Figure 56 : Poste de transition aérien / souterrain (Source : Etude technologique, Elia, février 2019)

L'enfouissement augmente les risques de défaillance de la liaison (à cause de l'ajout de nombreux éléments techniques), et augmente la durée d'intervention en cas de défaut en comparaison à une ligne aérienne seule. La maturité du système apparaît toutefois suffisante pour des tronçons enfouis courts.

Il convient néanmoins de limiter le nombre de tronçons enfouis pour des raisons de fiabilité (risque de défaillance augmenté avec le nombre de tronçons enfouis).

D'un point de vue économique, l'ajout des postes de transition représente un surcoût de +/- 30M€⁸⁰ par tronçon enfoui. De plus, le coût par kilomètre de câble souterrain est environ 4 fois supérieur à l'aérien. D'un point de vue environnemental, les impacts visuels ne sont pas nuls dès lors que le poste de transition occupe une superficie de 1 ha (nécessaire aux extrémités de chaque tronçon enfoui). Sur le tronçon de liaison enfoui, les impacts visuels sont limités, mais des contraintes d'occupation du sol existent (empilage de matériaux, construction et activités agricoles, voir point 4.4.4).

4.6.2. DISTANCE MAXIMALE D'ENFOUISSEMENT

La distance maximale d'enfouissement est déduite de deux paramètres principaux, d'une part la capacité de transport nécessaire (qui détermine le nombre de circuits en parallèle) et d'autre part les phénomènes électriques limitatifs (saut de tension, besoin de compensation de la puissance réactive, phénomènes de résonnance, etc.).

Comme détaillé précédemment, la capacité de transport nécessaire au projet Boucle du Hainaut est de 6 GW en N et 3 GW en N-1. Pour assurer cette capacité, les tronçons souterrains devront comprendre plusieurs circuits par terre.

Le nombre de circuits détermine la distance électrique, c'est-à-dire la distance géographique multipliée par le nombre de circuits nécessaires pour transporter les flux. En considérant l'ensemble des phénomènes électriques limitatifs pour cette technologie, **Elia a déterminé qu'il était possible d'enfouir une distance électrique maximale de 24 km, soit une distance géographique de :**

- **8 km si 3 circuits par terre sont installés** (3 circuits x 8 km = 24 km électriques) ;
- **12 km si 2 circuits par terre sont installés** (2 circuits x 12 km = 24 km électriques).

Dans un scénario à 2 circuits par terre, les câbles transporteront donc un courant plus important que pour le scénario à 3 circuits par terre. Or, la capacité de transport réelle des câbles est dépendante de plusieurs paramètres :

- Les caractéristiques du câble (section, matériaux, etc.) ;
- La capacité du câble à être refroidi. Pour rappel, la chaleur générée par le passage de l'électricité dans le câble va élever sa température, en fonction de l'intensité du courant et de la capacité du câble à évacuer cette chaleur. Cette dernière dépend du caractère isolant ou non du sol qui l'entoure. Un sol isolant empêchera la chaleur de se dissiper et impliquera une montée en température du câble plus rapide et plus élevée en comparaison à un sol présentant une bonne conduction thermique. Le courant maximal admissible avec un sol isolant sera donc plus faible pour éviter d'atteindre la température maximale admissible du câble. La connaissance de ces caractéristiques de sol nécessite des essais de sol⁸¹ ;
- La courbe de charge de la liaison, c'est-à-dire la courbe indiquant en fonction du temps la quantité d'énergie transportée par la liaison. S'il y a alternance de périodes de fortes charges suivies de périodes suffisamment longues avec des charges moindres, les câbles auront plus

⁸⁰ Les montants sont toutefois donnés à titre indicatif dès lors que le prix d'investissement est fortement dépendant du cours des matériaux et que celui-ci a fortement évolué depuis la réalisation de l'étude (2019).

⁸¹ Dans le cadre du projet Boucle du Hainaut, les caractéristiques du sol ne sont pas encore connues.

de temps pour refroidir. A contrario, si la charge est relativement élevée et constante, il y aura peu de périodes propices au refroidissement.

Afin d'évaluer (par rapport aux limites thermiques) les pointes de charge sur les câbles, il convient de se référer à la courbe de charge de la liaison. La courbe de charge représente les flux en fonction du temps, en prenant en compte deux situations d'exploitation conduisant à une pointe de charge sur la liaison :

- la situation N-1 : correspondant à la perte d'un élément du réseau suite à un incident ;
- la situation N-1-1 : correspondant à une situation de maintenance sur un élément doublé d'une perte d'un élément du réseau suite à un incident.

Selon la courbe de charge et les analyses fournies par Elia, il apparaît que **seul l'enfouissement de 8km avec 3 circuits est techniquement possible**, une solution de 12km avec seulement 2 circuits générant des surcharges inacceptables.

Ces 8km de la solution référence peuvent être enfouis en une fois, mais pourraient également être divisés en plusieurs tronçons. Néanmoins, à chaque enfouissement, une transition ligne-câble doit être réalisée (via poste de transition), ce qui augmente les risques de défaillance. De plus, multiplier les postes de transitions pour des tronçons souterrains courts implique des nuisances environnementales (occupation du sol, impact visuel, ...) ainsi qu'un impact budgétaire. Il est donc préférable de limiter le nombre de tronçons enfouis. Dans le cadre de ce projet, **il est donc recommandé de limiter le nombre de sections enfouies à deux maximum**. A noter toutefois que l'analyse finale de l'impact des tronçons souterrains sur le comportement du réseau ne pourra être réalisée qu'une fois l'emplacement et la position des tronçons connus. Ceci afin de pouvoir réaliser une étude « Electromagnetic transient » caractérisant le comportement dynamique et transitoire du réseau. Cette étude, très complexe, dépend en effet de la topologie du réseau et donc aussi du nombre et du positionnement de tronçons souterrains dans la liaison.

La distance maximale d'enfouissement a également été vérifiée par l'experte indépendante Menelika Bekolo, dont les conclusions⁸² rejoignent celles d'Elia. Le chargé d'étude a analysé les différentes études techniques menant à cette distance maximale et confirme ces conclusions.

Le chargé d'étude estime que la prise en compte d'un scénario comprenant 3 circuits souterrains par terre est plus sûre et valide donc la distance maximale d'enfouissement estimée à 8 km.

Avis du Professeur Roberto Benato

Les lignes hybrides (lignes haute tension aéro-souterraines AC) sont généralement une solution privilégiée en cas de passage en zone à risque d'événements météorologiques extrêmes et de contraintes topographiques le long du tracé. Cependant, d'après les informations dont je dispose, ces conditions ne sont pas présentes sur le tracé actuel de la ligne.

Les lignes hybrides sont également considérées dans le cas d'un tracé présentant un impact paysager ou traversant des zones urbaines.

Sans remettre en cause la rigueur des simulations réalisées par Elia, il convient de noter que la liaison Boucle du Hainaut est censée fonctionner à très forte charge et constituera un maillon clé du réseau

⁸² La distance maximale d'enfouissement est vérifiée à travers le titre V.II.1.3 de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

belge (la charge de pointe du réseau belge est de 17 GW). Par conséquent, la disponibilité de la ligne de transport joue un rôle crucial. Comme on le sait, la plupart des défauts sur les lignes aériennes sont de nature temporaire et, très rarement, permanente. Par conséquent, les systèmes de réenclenchement des relais de distance sont d'une importance capitale. Si la ligne est hybride, le défaut doit se produire sur la partie aérienne pour que les systèmes de réenclenchement puissent être utilisés, car les défauts sur la partie souterraine sont toujours permanents. En cas de ligne hybride, l'architecture de protection doit donc être beaucoup plus complexe que celle utilisée pour une ligne entièrement aérienne.

Même si d'un point de vue purement technique, il n'existe pas de limite maximale de longueur pour l'enfouissement, grâce à la possibilité de compensation réactive shunt variable, une longueur optimale de section souterraine peut être déterminée au moyen d'études approfondies tenant compte des éléments suivants :

1. Des analyses harmoniques comparant les fréquences de résonance à celles présentes dans le réseau ;
2. La section souterraine ne doit pas diminuer la disponibilité globale de la ligne aérienne (les taux de défaillance et les temps de réparation doivent être connus à la fois pour les LHT et pour les CFS) [1] ;
3. La complexité de l'architecture de protection [2] ;
4. Une analyse multiconducteur (MCA) doit être réalisée afin de vérifier la répartition de la puissance entre les différents circuits de câbles souterrains et les phasages optimaux (RST, TSR, etc.) [3] ;
5. Une comparaison des diagrammes de capacité ou courbes de transitabilité (ensemble complet des puissances complexes transmissibles respectant toutes les contraintes de transport) entre les LHT et les combinaisons LHT/CFS. En 2005, j'ai créé ces diagrammes de capacité, et je les ai récemment enrichis dans un article publié intitulé « Transmission Line Loadability: Capability Charts Validation by Experimental Power Measurements on HVAC Insulated Cables, and Overhead Lines » dans IEEE Transactions on Power Delivery [4]. De nombreux GRT (TSO) utilisent mes diagrammes de capacité pour ce type d'analyse.

La valeur de 8 km résulte d'études approfondies menées par Elia et je n'ai aucun élément pour le contester.

Afin de ne pas introduire un trop grand nombre de stations de transition, je recommanderais néanmoins de concentrer la partie souterraine à l'extrémité d'émission ou de réception, permettant ainsi d'économiser au moins une station de transition. Selon moi, deux sections souterraines distinctes représentent une complexité d'installation excessive qu'il convient d'éviter si possible.

[1] R. Benato, D. Napolitano: "State-space model for availability assessment of EHV OHL-UGC mixed power transmission link", *Electric Power Systems Research* 99, pp. 45– 52, doi: 10.1016/j.epwr.2013.02.004, 2013.

[2] R. Benato: *Basics of power systems transmission*, Second edition, AMAZON KDP, 2025.

[3] R. Benato: "Multiconductor Analysis of Underground Power Transmission Systems: EHV AC Cables", *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, Issue 1, January 2009, pp. 27-38, doi: 10.1016/j.epwr.2008.05.016.

[4] R. Benato, L. Rusalen: "Transmission Line Loadability: Capability Charts Validation by Experimental Power Measurements on HVAC Insulated Cables, and Overhead Lines", *IEEE Trans. On Power Delivery*, DOI: 10.1109/TPWRD.2025.3608255, 2025.

4.7. Analyse de la pertinence de la tension de la liaison Boucle du Hainaut

Dans le cadre de l'analyse des options technologiques, il est pertinent d'examiner si l'utilisation d'un niveau de tension inférieur au 380 kV, tel que le 220 kV, pourrait constituer une alternative techniquement appropriée.

D'un point de vue électrique, la puissance pouvant être transportée par une infrastructure dépend notamment du niveau de tension et de l'intensité du courant circulant dans les conducteurs. Les métaux utilisés pour les lignes ou les câbles sont sélectionnés de manière à réduire au maximum leur résistance au transport d'électricité. Néanmoins, tout conducteur, aussi performant soit-il, oppose une certaine résistance au passage du courant électrique. Le transport d'électricité entraîne ainsi des pertes en ligne : les conducteurs s'échauffent et une partie de l'énergie est dissipée dans l'environnement sous forme de chaleur. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Joule. La puissance électrique transportée peut dès lors être décomposée entre la puissance utile et la puissance perdue par effet Joule.

Pour une puissance donnée, l'utilisation d'une tension plus élevée permet de réduire l'intensité du courant nécessaire au transport de l'électricité. Or les pertes d'énergie dans les conducteurs augmentent fortement avec l'intensité du courant⁸³. Par conséquent, à puissance transportée équivalente, l'utilisation d'un niveau de tension plus élevé permet de limiter les pertes d'énergie lors du transport sur de longues distances. Une liaison en 220 kV entraîne donc des pertes plus importantes qu'une liaison en 380 kV. C'est notamment pour cette raison que le backbone belge et européen (réseau de transport principal) est principalement constitué de liaisons 380 kV.

L'utilisation d'une infrastructure en 220 kV présente toutefois certains avantages. En effet, la puissance réactive générée par un câble évolue de manière quadratique avec la tension. Dès lors, les câbles souterrains en 220 kV produisent environ trois fois moins d'énergie réactive que des câbles de 380 kV. Cette caractéristique permet de réduire les besoins en dispositifs de compensation, tels que les réacteurs shunt, disposés le long de la liaison et nécessaires pour compenser l'énergie réactive générée par les câbles. Bien que le nombre de réacteurs shunt nécessaires en 220 kV soit inférieur⁸⁴ à celui requis en 380 kV, les réserves relatives aux phénomènes de résonance restent d'application et le risque d'instabilité resterait inacceptable dans un scénario de liaison intégralement souterraine en 220 kV. Pour rappel, ces shunt réacteurs imposent des travaux conséquents dans les postes électriques avec un impact urbanistique et environnemental important (détaillé au point 4.4.4). En revanche, dans un scénario combinant des sections aériennes et souterraines, cette contrainte plus limitée en matière de compensation pourrait théoriquement permettre d'envisager des longueurs de tronçons souterrains plus importantes qu'en 380 kV.

L'utilisation d'une tension de 220 kV présente toutefois plusieurs limites importantes. Tout d'abord, la capacité de transport par circuit est beaucoup plus faible qu'à une tension de 380 kV. À titre indicatif, un circuit aérien 220 kV comprenant quatre sous-conducteurs par phase présente une capacité de transport d'environ 1 788 MVA. Il faudrait donc :

⁸³ Les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

La puissance transportée est proportionnelle à la tension et à l'intensité du courant.

⁸⁴ Pour une liaison intégralement souterraine, 23 réacteurs shunt sont nécessaires en 220kV contre 42 en 380kV.

- pour atteindre 4 GW⁸⁵ : 3 circuits, soit une ligne à deux circuits et une ligne à un circuit, ou une ligne à trois circuits ;
- pour atteindre 6 GW : 4 circuits, soit deux lignes à deux circuits.

Un circuit souterrain 220 kV présente quant à lui une capacité de transport de l'ordre de 475 MVA (2500mm² Aluminium). Il faudrait donc :

- pour atteindre 4 GW : 9 circuits ;
- pour atteindre 6 GW : 13 circuits.

À titre de comparaison, le projet en 380 kV nécessite, pour une capacité de transport de 6 GW, une ligne aérienne à deux circuits et une liaison souterraine composée de six circuits parallèles.

Une technologie basée sur une tension de transport de 220 kV impliquerait donc une augmentation du nombre de circuits aériens. Cela engendrerait soit la nécessité de recourir à deux lignes aériennes (plutôt qu'une seule dans la configuration 380 kV), soit à une ligne comportant trois circuits, qui serait dès lors plus imposante qu'une ligne à deux circuits 380 kV. Dans les deux cas, les incidences environnementales seraient potentiellement plus importantes que dans la configuration 380 kV.

Dans le cas d'une liaison aéro-souterraine, la démultiplication des circuits entraînerait également des conséquences importantes en termes d'infrastructures et d'emprise au sol. Les estimations techniques indiquent que le chantier d'une liaison souterraine 220 kV nécessiterait une largeur minimale de tranchée d'environ 22 m pour 9 circuits et 30 m pour 13 circuits (contre environ 20 m pour la version 380 kV) et une largeur de chantier d'environ 60 m pour 9 circuits et de 75m pour 13 circuits.

Par ailleurs, dans le cas d'une liaison aéro-souterraine en 380 kV pour la partie aérienne et 220 kV pour la partie souterraine, les postes faisant la transition entre les parties aériennes et souterraines devraient permettre la transformation du 380 kV vers le 220 kV et vice-versa. Ces postes ne seraient donc plus de simples postes de transition (voir Figure 56 au point 4.6.1), mais des postes de transformation équipés chacun de 7 à 10 transformateurs 380/220kV 600MVA (pour atteindre une capacité respective de 4 et 6GW), de jeux de barres, de dispositifs d'isolement (disjoncteurs, sectionneurs) et de bâtiments accueillant les automatismes de commande et de télécommunication. L'ajout de seulement 7 transformateurs limiterait la capacité de transport à 4 GW alors que la partie aérienne 380 kV est dimensionnée pour 6 GW. L'emprise au sol et l'impact paysager des postes serait plus important que pour une liaison aéro-souterraine 380 kV. La présence des transformateurs générerait non seulement des nuisances sonores conséquentes mais poserait également d'importants défis techniques en termes de stabilité du réseau et de gestion du pouvoir de court-circuit.

Enfin, l'augmentation du nombre de circuits, tant aériens que souterrains, entraîne une complexité accrue du système et une augmentation du nombre potentiel de points de défaillance.

En conclusion, l'approche consistant à réaliser la liaison à une tension plus faible entraînerait une augmentation significative des pertes réseau et du nombre d'infrastructures nécessaires, de leur emprise spatiale et de la complexité globale du système électrique. Au regard de ces éléments, si l'utilisation du 220 kV présente certains avantages spécifiques, notamment en matière de production d'énergie réactive et de potentiel d'enfouissement dans des configurations mixtes, les contraintes et limites liées à la capacité de transport et à la multiplication des circuits nécessaires apparaissent importantes. Dans ce contexte, l'utilisation d'une infrastructure en 380 kV apparaît comme la solution la

⁸⁵ Pour rappel, à l'issue de l'analyse des besoins, le professeur Henneaux estimait qu'une augmentation de minimum 3-4 GW nette était justifiée.

plus adaptée pour répondre aux besoins de transport identifiés tout en limitant le nombre d'infrastructures nécessaires et les emprises associées.

Avis du Professeur Roberto Benato

D'après la théorie de la transmission de l'énergie électrique, il est bien connu que lorsqu'il est nécessaire de transporter de grandes quantités de puissance active sur de longues distances, il faut augmenter le niveau de tension afin d'obtenir une bonne efficacité de transmission.

Cela est principalement dû au fait que :

1) Les pertes de puissance sont inversement proportionnelles à U^2 , où U est la tension nominale entre phases (si les pertes sont égales à $P_{Joule} = 3RI^2$ et $I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$, il est immédiat d'obtenir que $P_{Joule} \propto \frac{1}{U^2}$) ;

2) La chute de tension est inversement proportionnelle à U^2 , où U est la tension nominale entre phases. En rappelant l'expression de la chute de tension estimée, c'est-à-dire $\Delta U =$

$\sqrt{3} \cdot (RI \cos \phi + XI \sin \phi) = \sqrt{3} \cdot (RI \cos \phi + XI \sin \phi) \cdot \frac{U}{U} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \phi \cdot R + \sqrt{3}UI \sin \phi \cdot X}{U} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}$, et en considérant une valeur en per unit, soit $\Delta U/U$, puis en utilisant la relation $Q/P = \tan \phi$, on obtient

immédiatement l'expression $\frac{\Delta U}{U} = \frac{P \cdot (R + \tan \phi \cdot X)}{U^2} \cong \frac{P \cdot \tan \phi \cdot x \cdot d}{U^2}$ après avoir négligé la résistance et exprimé la réactance totale comme le produit de la réactance linéique x par la longueur de la ligne d .

En ce qui concerne la solution entièrement en ligne aérienne (OHL), l'utilisation de l'option 220 kV constitue un mauvais choix technique pour transporter une puissance active de 6 GW. Supposons qu'un conducteur en faisceau composé de quatre sous-conducteurs soit utilisé : l'intensité admissible est alors $I_{amp} = 1075 \times 4 = 4300A$, ce qui correspond à une puissance apparente de $\sqrt{3} U I_{amp} \approx 1640MVA$.

Pour transmettre 6000 MW, il est nécessaire de construire deux lignes à double circuit (le nombre de circuits n étant donné par $n = 6000/1640 \approx 3,65$, soit $n = 4$).

Le corridor est ainsi doublé, ce qui entraîne un impact territorial et visuel plus important.

D'un point de vue économique, le CAPEX d'une ligne aérienne double circuit 380 kV est d'environ 1,06 M€/km ; celui d'une ligne 220 kV double circuit est d'environ 0,63 M€/km, ce qui devient environ 1,26 M€/km pour deux lignes double circuit. Les OPEX de la solution 220 kV sont plus élevés que ceux de la solution 380 kV, car les pertes de puissance sont supérieures de 50 %.

Des courants plus élevés impliquent également des champs magnétiques plus importants générés par les lignes aériennes elles-mêmes.

Par conséquent, il est démontré que l'option ligne aérienne 220 kV est techniquement et économiquement désavantageuse par rapport à la ligne aérienne 380 kV.

En ce qui concerne la solution entièrement en câble souterrain, l'utilisation d'une tension inférieure à $U = 380kV$ entraînerait un impact de puissance réactive plus faible, puisque $Q = \omega cdU^2$. Si $U = 220kV$, la puissance réactive absorbée Q est égale à un tiers de celle absorbée à 380 kV. Cela offrirait certains avantages en matière de compensation de puissance réactive shunt.

Ces avantages sont toutefois totalement annulés par le nombre de circuits nécessaires pour transporter une puissance active de 6 GW.

Supposons que l'on utilise la plus grande section disponible sur le marché des câbles, soit $S = 2500 \text{ mm}^2$ (Cuivre): l'intensité admissible, dans les conditions les plus favorables, pourrait être de 1880 A, ce qui correspond à une puissance apparente de 716 MVA.

Le nombre de circuits devrait donc être $n = 6000/716 = 8,38$, soit $n = 9$.

Le corridor souterrain aurait un impact bien plus important que celui des 5 circuits de la solution 380 kV. Une fois encore, les CAPEX et OPEX sont supérieurs à ceux de la solution en 380kV.

Par conséquent, il est démontré que l'option câble 220 kV est techniquement et économiquement désavantageuse par rapport au câble isolé 380 kV.

4.8. Analyse de la pertinence de la capacité de la liaison Boucle du Hainaut

Pour rappel, à l'issue de l'analyse des besoins, le professeur Henneaux estimait qu'une augmentation de minimum 3-4 GW nette était justifiée. Afin d'identifier la capacité brute correspondante, il recommandait d'estimer l'optimum économique permettant de limiter les coûts du renforcement et du redispatching. L'identification de l'optimum économique est dépendant de la technologie choisie pour la liaison. Compte tenu de la validation de la pertinence d'une technologie AC aérienne, l'analyse multicritère peut être réalisée pour cette technologie et est présentée dans le tableau ci-dessous pour une augmentation de la capacité nette de 3 et 4 GW en courant alternatif.

Tableau 8 : Evaluation de la capacité brute de la liaison Boucle du Hainaut

| Pour une augmentation de la capacité nette de minimum 3 GW : | |
|---|-----------------------------------|
| Type de technologie | Un terre de 3 GW (brut) |
| Coût du redispatching à l'horizon 2040 | Quelques dizaines de M€/an |

| | |
|---|--|
| <p align="center">Analyse de la pertinence économique</p> | <p>Un scénario de renforcement de 3GW (brut) uniquement apparait peu pertinent dès lors que les coûts de redispatching sont très importants et que la liaison ne présente pas de réserve de capacité pour les éventuelles évolutions futures.</p> <p>Par ailleurs, le professeur Henneaux insiste lui-même sur le besoin d'une capacité nette minimale de 3 à 4 GW et que, pour atteindre celle-ci, la capacité brute (càd le dimensionnement de construction) doit être plus élevée.</p> <p>Le renforcement par un terne supplémentaire (soit, 2 ternes de 3GW pour un total de 6GW) est une solution et est rentabilisé en une dizaine d'années (au niveau du delta coût d'un 2^e terne par rapport à une ligne simple terne presque équivalente dans sa construction). Un renforcement de 6GW permet d'éviter le redispatching et de mieux valoriser la production d'énergie renouvelable en évitant leur écrêtage.</p> |
| <p align="center">Pour une augmentation de la capacité nette de minimum 4 GW :</p> | |
| <p align="center">Type de technologie</p> | <p>Deux ternes de 3 GW (brut)</p> |
| <p align="center">Coût du redispatching à l'horizon 2040</p> | <p>Pas de redispatching</p> |
| <p align="center">Analyse de la pertinence économique</p> | <p>Comme l'indique le professeur Henneaux le besoin d'une capacité nette minimale de 4 GW nécessite de dimensionner l'infrastructure pour une capacité brute supérieure. Le standard immédiatement supérieur est de 6 GW.</p> <p>Un renforcement de 6GW permet d'éviter le redispatching et de mieux valoriser la production d'énergie renouvelable en évitant leur écrêtage.</p> |

Cette analyse multicritère a été réalisée afin de déterminer la capacité (brute et nette) de la liaison permettant d'optimiser les coûts d'investissement et de redispatching d'une part et de valoriser les énergies renouvelables d'autre part. Comme l'indique le professeur Henneaux, le besoin d'une capacité nette minimale de 3 à 4 GW ne peut être atteint que si la capacité brute (soit le dimensionnement de construction) est plus élevée. A l'issue de cette analyse, il apparait qu'un renforcement brut de 6 GW permettrait de couvrir l'augmentation des besoins en capacité de transmission entre l'ouest et le centre du pays et de maintenir une réserve de capacité pour les éventuelles évolutions futures. Cette capacité n'engendre pas de congestion de la liaison, elle ne présente pas de coût de redispatching et permet donc également de mieux valoriser les énergies renouvelables et d'éviter leur écrêtage. Si une capacité nette minimale de 3 GW était utilisée pour le dimensionnement de l'infrastructure (3 GW est le standard immédiatement inférieur à 6 GW au niveau de la capacité brute), les coûts de redispatching s'élèveraient à quelques dizaines de millions d'euros par an. Le dimensionnement à 6 GW, analysé sous cet angle tel que recommandé par le professeur Henneaux est dès lors rentabilisé en une dizaine d'années.

Dès lors, une liaison de 6GW répartis en 2 circuits (afin de garantir le N-1) est pertinente. Cette conclusion de l’auteur de l’étude rejoint celle d’Elia et celles obtenues par les experts consultés à l’issue de leur analyse⁸⁶.

4.9. Choix des postes d’extrémité de la nouvelle liaison AC

Au sein du réseau backbone belge, il existe plusieurs postes AC 380 kV entre lesquels la nouvelle liaison pourrait être établie : Horta et Avelgem à l’ouest ; Mercator, Courcelles et Bruegel à l’est. Ces postes sont mis en évidence sur la Figure 57.

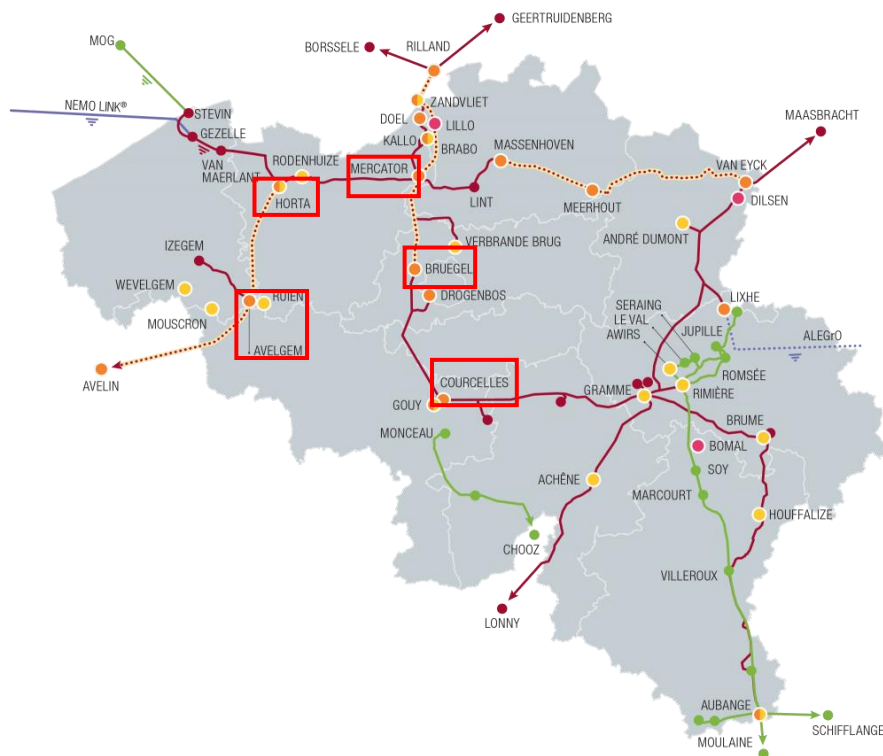


Figure 57: Postes 380 kV entre lesquels la liaison pourrait être établie (source : Elia - Dossier de base)

Tout d’abord, pour des raisons de fiabilité, Elia a décidé d’écarter la possibilité d’établir la nouvelle liaison entre les postes Horta et Mercator. En effet, compte tenu du transit important que cela impliquerait dans ces deux postes, cela mettrait en péril le critère N-1 dès lors que la perte d’un de ces postes serait trop impactante pour la stabilité du réseau belge et européen, cela pourrait en effet entraîner un dépassement des réserves européen de 3 GW. Pour cette raison, à l’ouest, le poste d’Avelgem est le seul pouvant accueillir la liaison. Les experts Dai et Bekolo valident⁸⁷ la pertinence de cette exclusion et le choix du poste d’Avelgem, le chargé d’étude également.

⁸⁶ Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée aux titres 2.6 de son *Avis sur la nécessité d’une nouvelle liaison à 380 kV entre Avelgem et Courcelles*. Pour Menelika Bekolo, la validation est spécifiée au point IV.II.2.1 et en conclusion de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l’expertise réalisée par Jing Dai*

⁸⁷ Pour Jing Dai, cette validation est spécifiée aux titres 2.5 de son *Avis sur la nécessité d’une nouvelle liaison à 380 kV entre Avelgem et Courcelles*. Pour Menelika Bekolo, la validation est spécifiée au titre IV.II.2.1 de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l’expertise réalisée par Jing Dai*

A l'est, les postes de Courcelles et Bruegel sont tous deux possibles. Néanmoins, dans le cas du poste de Bruegel en extrémité est de la liaison, les flux vers l'est du pays devraient emprunter l'axe Bruegel-Courcelles, ce qui engendrerait un dépassement de la capacité de cet axe⁸⁸. Par ailleurs, une ligne Avelgem-Bruegel ne permettrait pas la réalisation de repiquage au sein de la province de Hainaut. Il apparaît dès lors plus pertinent de choisir le poste de Courcelles à l'est afin d'éviter de devoir renforcer davantage la liaison Bruegel-Courcelles. Dans le cadre de son expertise, l'experte Bekolo a comparé les deux options de postes est (Avelgem-Courcelles et Avelgem-Bruegel)⁸⁹. **Il en ressort que le renforcement constitué par une ligne de deux circuits 380 kV entre Avelgem et Courcelles est la seule solution basée sur les postes existants qui permet de résoudre les surcharges observées, en écoulement de puissance, en situation normale et en situation N-1 sur le réseau backbone 380 kV.** Le chargé d'étude se rallie à cette conclusion.

Une solution se basant sur la création d'un nouveau poste connecté à une liaison existante du réseau 380kV structurant est également possible. Selon les études menées par Elia, ces alternatives nécessitent des évolutions complémentaires sur le réseau, des coûts et des incidences environnementales importants, les rendant moins pertinentes que l'option de liaison retenue, sous l'angle des impacts attendus sur le réseau existant. Le chargé d'étude rejoint cette analyse.

Avis du Professeur Henneaux

Sans avoir refait des calculs détaillés d'écoulement de la puissance sur le réseau belge dans le cadre de ce projet, les calculs réalisés par Menelika Bekolo Mekomba en 2021, ainsi que des calculs que j'ai pu réaliser en 2018 sur base de données publiques dans le cadre du projet PROMOTioN montrent que les axes Mercator-Bruegel et Bruegel-Courcelles devraient être proches de la saturation à l'horizon 2030. Dès lors, le raccordement d'une nouvelle liaison à Mercator ou à Bruegel sans renforcement des axes Mercator-Bruegel et/ou Bruegel-Courcelles ne permettra pas d'augmenter la capacité nette d'au moins 3-4 GW (et ne permettra pas non plus un repiquage sur le 150 kV dans la province du Hainaut). Par conséquent, il apparaît nécessaire de descendre jusque Courcelles pour raccorder la nouvelle liaison AC.

4.10. Conclusion relative aux options technologiques

Dans son dossier de base, Elia présente le projet Boucle du Hainaut en ligne AC intégralement aérienne.

Le présent chapitre a passé en revue l'ensemble des technologies existantes (ou en développement) à ce jour pour le transport d'électricité (ligne aérienne, liaison souterraine, GIL et supraconducteur, en AC et DC). L'analyse des caractéristiques techniques, économiques et environnementales amène le chargé d'étude à conclure que la technologie HVAC est la seule permettant de répondre à l'ensemble des besoins couverts par le projet Boucle du Hainaut tout en garantissant le niveau de fiabilité exigé pour ce type de réseau. En effet, les technologies DC-GIL et supraconducteurs ne sont pas assez matures, la technologie AC-GIL n'a été installée à ce jour que pour une longueur de ligne de 3,3 km et les

⁸⁸ Cet axe fera bientôt l'objet d'un renforcement. Ce dernier ne permettra néanmoins pas d'assurer le transit en cas de nouvelle liaison 380kV raccordant le poste de Bruegel à Avelgem.

⁸⁹ au point IV.2.2 et en conclusion de la *Contre-analyse des études réalisées par Elia et analyse ampliative de l'expertise réalisée par Jing Dai*

technologies HVDC présentent des limitations techniques ne permettant pas de répondre à l'ensemble des besoins (repiquage pour alimenter le Hainaut et maillage du réseau) et compromettant trop fortement la stabilité du réseau au regard de l'importance de la liaison projetée. Au sein des technologies HVAC, l'option de mise en œuvre d'une liaison entièrement souterraine doit également être exclue en raison des risques pour la stabilité du réseau qu'elle implique. Il ressort de l'analyse technico-économique que la ligne aérienne AC est la technologie la plus adaptée au projet Boucle du Hainaut. Cette technologie est mature, constitue la majorité du réseau haute tension belge mais présente un impact paysager important.

Une seconde solution technologique réside en la mise en œuvre d'une liaison hybride aéro-souterraine HVAC, pour laquelle il a été estimé qu'une distance totale d'enfouissement de 8 km était possible (et segmentable en différents tronçons enfouis). L'analyse des caractéristiques d'une liaison hybride montre que cette technologie est mature, présente des impacts visuels plus faibles au droit des zones d'enfouissements, mais qu'elle implique une augmentation des risques de défaillance permanente en comparaison à une ligne aérienne seule dont les défaillances sont presque toujours de nature transitoire. Compte tenu de l'importance de mettre en œuvre une liaison stable et hautement disponible, cette option technologique n'apparaît dès lors pertinente que si des incidences paysagères et/ou patrimoniales importantes ou si des zones comprenant de nombreuses habitations sont rencontrées sur le tracé de la ligne.

Compte tenu du choix de la technologie HVAC pour la liaison, la pertinence de la tension de transport de 380kV et de la capacité de 6GW en N et 3GW en N-1 pour la liaison projetée a été vérifiée.

De plus, les postes d'extrémité pour la liaison ont été déterminés : Avelgem à l'ouest et Courcelles à l'est. Ces postes permettent de boucler la liaison Horta-Mercator et de réaliser un repiquage dans le Hainaut.

5. COMPATIBILITÉ DES OBJECTIFS DU PROJET DE RÉVISION DU PLAN DE SECTEUR AU REGARD DE L'ARTICLE D.I.1 DU CODT ET D'AUTRES PLANS ET PROGRAMMES PERTINENTS

5.1. Liens avec d'autres plans et programmes

5.1.1. A L'ÉCHELLE EUROPÉENNE

5.1.1.a. UNION EUROPÉENNE - CLEAN ENERGY PACKAGE

Initié en 2016 et finalisé en 2019, le Clean Energy Package est un ensemble de mesures législatives qui doivent permettre à l'Europe de faire face aux défis climatiques et d'accélérer sa transition vers une énergie propre pour tous les Européens. Il comprend 8 actes législatifs qui contribuent à définir la politique énergétique de l'Union et à respecter les engagements pris par l'UE dans le cadre de l'accord de Paris. Pour rappel, dans le cadre de ce paquet, l'Union européenne s'est fixé les objectifs suivants à l'horizon 2030 :

- Réduction d'au moins 40 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990 (Règlement n° 2018/842) ;
- Part d'énergie produite à partir de sources renouvelables d'au moins 32% de la consommation finale brute de l'UE (Directive 2018/2001) ;
- Amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 32,5 % (Directive 2018/2002).

L'inscription du périmètre de réservation faisant l'objet de la demande de révision du plan de secteur permettra la réalisation du projet Boucle du Hainaut qui s'intègre dans ces objectifs, ainsi que leurs directives et règlements associés dès lors que cette nouvelle liaison a pour objectif de permettre le rapatriement de l'énergie éolienne offshore vers le centre du pays.

5.1.2. A L'ÉCHELLE NATIONALE

5.1.2.a. PLAN NATIONAL INTÉGRÉ ENERGIE CLIMAT BELGE 2021-2030

Pour atteindre les objectifs issus de l'Accord de Paris et fixés par l'Union européenne, les quatre Ministres de l'Énergie en Belgique ont conclu en 2017 le « Pacte énergétique interfédéral belge, une vision commune pour la transition ». Ce pacte a été transformé en un plan d'exécution assorti de mesures concrètes : le projet de « Plan National intégré Énergie Climat Belge 2021-2030 » (« PNEC Belge »), adopté le 18 décembre 2019.

Basée sur les plans spécifiques des entités fédérées, la politique Énergie-Climat belge fixe les objectifs stratégiques suivants :

- Garantir une énergie sûre, durable et abordable ;
- Placer le citoyen au cœur du système énergétique ;
- Maintenir les coûts du système à un niveau abordable pour les petits et grands consommateurs ;
- Assurer la participation et la cohérence des initiatives émanant de tous les niveaux de pouvoir.

Ce plan vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre de la Belgique de 35% en 2030 par rapport à 2005 (pour les secteurs non-ETS⁹⁰) et une consommation en énergies renouvelables par rapport à la consommation finale brute d'énergie atteignant 18,3%.

Concernant plus spécifiquement les infrastructures de transport de l'énergie, le Plan rappelle notamment les priorités visant au « *renforcement des interconnexions existantes avec la France et les Pays-Bas (Brabo) ainsi que le renforcement des corridors internes existants de 380 kV. En outre, dans le cadre de projets PCI en préparation, on investit dans le renforcement des interconnexions avec l'Allemagne (liaison Alegro-HVDC) et la Grande-Bretagne (liaison Nemo HVDC)* ».

L'inscription du périmètre de réservation faisant l'objet de la demande de révision du plan de secteur permettra la réalisation du projet Boucle du Hainaut, qui vise notamment à rapatrier l'énergie éolienne offshore produite en mer du Nord vers le centre du pays ainsi qu'à éviter le goulot d'étranglement sur la liaison Horta-Mercator qui détériorerait les transferts énergétiques avec les pays voisins. Le projet s'inscrit donc dans les objectifs du PNEC relatifs à l'énergie durable, abordable et renouvelable.

5.1.2.b. ACCORD DE GOUVERNEMENT FÉDÉRAL (DPF)

Un accord de Gouvernement fédéral a été établi en janvier 2025. En ce qui concerne l'énergie, l'accord affirme le désir du Gouvernement de garantir une sécurité d'approvisionnement, une durabilité et un coût abordable de l'énergie. En ce qui concerne l'engagement en faveur des énergies renouvelables et le développement du réseau électrique nécessaire qui en résulte, le document mentionne notamment *en collaboration avec les Régions, nous facilitons une capacité de connexion suffisante pour acheminer le flux d'énergie de l'offshore vers notre population et nos entreprises (Ventilus et Boucle du Hainaut)*.

L'inscription d'un périmètre de réservation vise à mettre en œuvre le projet Boucle du Hainaut qui a notamment pour objectif de permettre le transport de l'énergie renouvelable, dont l'accord de Gouvernement soutient le déploiement.

5.1.3. A L'ÉCHELLE RÉGIONALE

5.1.3.a. SCHÉMA DE DÉVELOPPEMENT DU TERRITOIRE (SDT)

Selon l'article D.II.2 du CoDT, le SDT définit, sur la base d'une analyse contextuelle, une « stratégie territoriale » qui comporte des objectifs régionaux, des principes de mise en œuvre de ces objectifs et une « structure territoriale », qui identifie et exprime cartographiquement certains éléments (dont notamment les réseaux de communication et de transports de fluides et d'énergie), et en reprend d'autres. Le SDT peut encore comporter, entre autres, des mesures de gestion et de programmation.

Le SDT a une valeur indicative (article D.II.16, alinéa 1^{er}, du CoDT). Il se situe néanmoins au sommet de la hiérarchie des outils d'aménagement du territoire et d'urbanisme. Il s'applique en effet aux autres schémas (communaux et pluricommunaux) et aux guides d'urbanisme, mais aussi au plan de secteur et, s'agissant des demandes de permis et de certificats, à la localisation des projets visés à l'article D.II.16, alinéa 2, du CoDT dont notamment ceux relatifs à une infrastructure linéaire visée par la structure territoriale du SDT.

Selon l'article D.II.20 du CoDT, le plan de secteur s'inspire du SDT. Il peut s'en écarter moyennant une motivation qui démontre qu'il ne compromet pas ses objectifs de développement territorial ou

⁹⁰ ETS=Emission Trading System. Les secteurs non-ETS sont les secteurs qui ne sont pas concernés par le système d'échange de quotas d'émissions de GES de l'Union européenne (transport, bâtiments, agriculture, déchets...)

d'aménagement du territoire et qu'il contribue à la protection, à la gestion ou à l'aménagement des paysages bâtis ou non bâtis.

En vigueur depuis le 1^{er} aout 2024, le SDT a pour objectif de relever douze défis sociétaux, parmi lesquels celui d' « assurer l'accès à une énergie bas carbone ». En effet, le SDT précise que « *dans un contexte conjoncturel d'explosion des coûts de l'énergie et d'instabilité géopolitique, la Wallonie, doit s'inscrire dans la transition énergétique en favorisant l'utilisation rationnelle de l'énergie, en soutenant la production d'énergies renouvelables et décarbonées, en maîtrisant son approvisionnement et en augmentant son autonomie énergétique* ».

Dans l'axe 1 « Soutenabilité et adaptabilité », sous l'objectif de « valoriser les patrimoines naturels, culturels et paysagers et les préserver des pressions directes et indirectes de l'urbanisation », le SDT émet la mesure de gestion et de programmation au niveau régional suivante :

« Lors de toute demande de permis pour la création ou le renouvellement d'une ligne à haute tension inférieure ou égale à 150 kV, analyser l'opportunité et la faisabilité de l'enfouissement des infrastructures dans le rapport sur les incidences environnementales. Planter les lignes à haute tension supérieure à 150 kV autant que possible dans les couloirs existants d'axes de transport et d'énergie. En cas de non-enfouissement, soutenir le développement de pylônes au design novateur et mobilisateur, qui limitent les effets négatifs sur l'avifaune et valorisent la trame paysagère en s'y intégrant. »

L'axe 3 concerne la « cohésion et coopération » et comprend 6 objectifs, dont celui d' « assurer l'accès à l'énergie à tous en s'inscrivant dans la transition énergétique ». Le SDT dresse le constat *qu'au niveau régional et en ce qui concerne le réseau électrique, le réseau centralisé à très haute tension constitue l'épine dorsale du réseau de transport d'électricité. Le réseau existant est déjà connecté avec les territoires voisins et l'établissement d'ALEGrO (reliant la Belgique à l'Allemagne via Lixhe) et de Nautilus (reliant la Belgique avec le Royaume-Uni) illustrent la volonté d'intégrer le réseau national au réseau européen, dans le respect du règlement européen relatif aux réseaux transeuropéens d'énergie (RTE-E). Le Plan de Développement fédéral du réseau de transport 2020-2030 prévoit encore de le compléter notamment par des interconnexions supplémentaires avec la France et le Luxembourg. Il est également prévu de renforcer l'épine dorsale par la création d'une nouvelle liaison à haute tension entre Avelgem et Courcelles. Les réseaux de transport et de distribution doivent s'adapter à la multiplication des unités de production décentralisées, et au besoin être renforcés.*

Dès lors, le SDT fixe comme mesure de :

« Renforcer et compléter le réseau de transport d'électricité très haute tension dans les limites des compétences régionales ».

Selon le dossier de base joint à la demande de révision du plan de secteur, le périmètre de réservation projeté vise à établir une nouvelle liaison électrique aérienne de tension de 380 kV. Le choix d'une liaison aérienne ne s'écarte pas du SDT, qui ne recommande l'enfouissement que pour les nouvelles liaisons jusqu'à 150 kV. Pour ces tensions, le SDT recommande que la ligne s'implante autant que possible dans les couloirs existants d'axes de transport et d'énergie et de soutenir le développement de pylônes au design novateur et mobilisateur. A ce titre, le périmètre de réservation proposé longe des infrastructures de transport d'énergie et de communication sur 46% de son parcours (voir analyse de la Phase 2 du présent document). Enfin, le design des pylônes n'est pas fixé à ce jour. Le choix définitif concernant le type de pylônes pour le projet fera l'objet d'études ultérieures telles que l'étude

d'incidences associée à la future demande de permis d'urbanisme pour la construction de la ligne haute tension.

L'inscription de ce périmètre de réservation apparaît donc compatible avec les grands principes retenus par le SDT.

5.1.3.b. PLAN AIR CLIMAT ÉNERGIE À L'HORIZON 2030 (PACE 2030)

L'objet du Plan Air Climat Énergie (PACE) est de décrire de manière intégrée les actions menées dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de polluants atmosphériques, ainsi qu'en faveur de la diminution de notre consommation d'énergie. Le PACE fixe notamment les objectifs suivants en matière de décarbonisation et d'énergie :

- Diminution de 47% d'émission de GES par rapport à 2005 ;
- Part d'énergie produite à partir de sources renouvelables d'au moins 23,5 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030 ;
- Augmentation de l'efficacité énergétique de 23 % de la consommation finale par rapport à 2005.

Le périmètre de réservation dont l'inscription est envisagée vise à réserver les espaces nécessaires à la réalisation d'une nouvelle liaison entre les postes Avelgem et Courcelles qui permettra l'intégration de toutes les énergies renouvelables produites de manière décentralisée sur le territoire belge et européen. Il s'inscrit donc dans les objectifs du PACE 2030.

5.1.3.c. DÉCLARATION DE POLITIQUE RÉGIONALE (DPR)

À la suite des élections régionales de juin 2024, le nouveau Gouvernement wallon a publié sa déclaration de politique régionale. Le projet de ligne haute tension s'inscrit dans cette déclaration sous les termes suivants : *« Au vu de l'enjeu stratégique de réindustrialisation de la Wallonie et singulièrement de création d'emplois en Hainaut, la Boucle du Hainaut sera concrétisée, sous toute réserve des procédures en cours. Le Gouvernement veillera à l'instauration d'un dialogue constructif entre toutes les parties prenantes portant sur les solutions techniques et économiques envisageables. Il veillera également à ce que les technologies choisies répondent au mieux aux enjeux industriels, de santé publique et d'impact environnemental. Le projet devra respecter les règles et recommandations internationales et du Conseil Supérieur de la santé, notamment en matière de nuisances électromagnétiques ».*

L'inscription d'un périmètre de réservation vise à réserver les espaces nécessaires à la réalisation du projet Boucle du Hainaut, dont la réalisation est un objectif de la DPR.

5.1.3.d. CONTRIBUTION WALLONNE AU PLAN NATIONAL ENERGIE CLIMAT 2030

Le règlement « Gouvernance » issu du paquet législatif établi par le « Clean Energy Package » impose aux Etats Membres, pour le 31 décembre 2019, la rédaction d'un plan stratégique Energie-Climat qui intègre 5 grandes dimensions interdépendantes : la décarbonation (y compris l'énergie renouvelable), l'efficacité énergétique, la sécurité d'approvisionnement, l'organisation du marché de l'énergie et la recherche et innovation.

La contribution de la Région wallonne aux objectifs belges en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre est fixée à -47% en 2030 (Non-ETS) par rapport à 2005 (cet objectif est indicatif et peut évoluer). En ce qui concerne la production d'énergie renouvelable, la Région wallonne prévoit un objectif de 28-29% d'énergie renouvelable dans la part totale de sources d'énergie à l'horizon 2030.

Dans le but de maintenir une énergie abordable pour tous, ce plan met également l'accent sur l'importance de maximiser la capacité d'accueil des infrastructures afin d'accueillir les sources

intermittentes d'énergie et d'éviter la congestion due à la multiplication des sources d'énergies renouvelables.

L'inscription du périmètre de réservation faisant l'objet de la demande de révision du plan de secteur permettra la réalisation d'une infrastructure qui participera à rencontrer ces objectifs sociaux, climatiques et énergétiques.

5.1.3.e. TROISIÈME STRATÉGIE WALLONNE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (SWDD)

La SWDD est un document d'orientation et d'actions visant à encourager à l'initiative et à la cohérence en matière de développement durable dans les politiques publiques de la Wallonie. Une première SWDD a été adoptée en 2013 puis une deuxième en 2016.

La troisième stratégie wallonne de développement durable (SWDD), intitulée « Ensemble vers les objectifs de développement durable ! » a été adoptée le 22 septembre 2022 par le Gouvernement wallon. En cohérence avec la Déclaration de politique régionale, cette troisième stratégie SWDD entend contribuer à l'engagement pris par la Wallonie de mettre en œuvre le Programme mondial de développement durable à l'horizon 2030 (Programme 2030) et ses 17 Objectifs de développement durable (ODD). Ces objectifs traduisent les priorités en matière de développement durable pour la décennie à l'échelle mondiale. Ils vont de la santé et l'éducation à la conservation des écosystèmes, en passant par le travail décent, les modes de production et de consommation durables ou encore la réduction des inégalités au sein et entre les pays.

La méthodologie d'élaboration de la SWDD s'est basée des 169 cibles associées aux 17 ODD, définies au niveau des Nations unies. 61 cibles ont été identifiées comme prioritaires et ont été assignées à un ou plusieurs objectifs chiffrés.

On y retrouve notamment pour l'ODD d'une énergie propre et d'un coût abordable, l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes à un coût abordable ainsi que l'accroissement de la part de l'énergie renouvelable et de l'efficacité énergétique qui concordent donc avec les objectifs de l'inscription au plan de secteur d'un périmètre de réservation de la boucle du Hainaut.

Dans le sens où le développement d'une infrastructure de transport d'énergie peut également engendrer la consommation d'espaces naturels, un lien peut être également fait avec l'ODD de consommation responsable qui prévoit notamment comme cible de parvenir à une gestion durable et à une utilisation rationnelle des ressources naturelles. L'ODD sur la vie terrestre prévoit également comme cible de garantir la préservation la restauration et l'exploitation durable des écosystèmes, en particulier des forêts. L'inscription d'un périmètre de réservation ne va pas à l'encontre de ces objectifs et cibles, mais un point d'attention sera noté dans le cas où une ligne à haute tension venait s'y implanter pour éviter, réduire ou compenser toute artificialisation des sols ou tout défrichage de forêt nécessaire.

5.1.3.f. PLAN WALLON ENVIRONNEMENT – SANTÉ 2025-2030 (ENVIES)

En 2025, le Gouvernement wallon a adopté un portefeuille de 43 actions prioritaires constituant le nouveau plan Environnement-Santé baptisé ENVIES 2025-2030 qui fait suite au précédent 2019-2023. Il rassemble des mesures concrètes pour :

- améliorer la qualité de l'air, de l'eau et des sols,
- réduire les nuisances sonores,
- favoriser l'accès aux espaces verts,
- limiter l'exposition aux substances préoccupantes.

Le Plan wallon environnement-santé vise ainsi à étudier et limiter les risques environnementaux sur la santé humaine et à assurer un cadre de vie plus sain et plus durable pour l'ensemble de la population.

Le plan est structuré autour de trois grands axes :

- Axe 1 - Enjeux transversaux : Cet axe vise à renforcer les bases communes pour mieux comprendre et agir sur les liens entre environnement et santé, en garantissant une approche globale et coordonnée.
- Axe 2 - Actions thématiques
- Axe 3 - Outils de gestion : Cet axe concerne les moyens nécessaires à la mise en œuvre efficace du plan.

Plus spécifiquement, l'axe 2 regroupe les thématiques prioritaires sur lesquelles portent les actions concrètes du plan. Il couvre la qualité de l'air extérieur, les nuisances sonores, la qualité de l'air intérieur, les substances préoccupantes, la qualité de l'eau, la qualité des sols, la pollution lumineuse, la biodiversité et les espaces verts ainsi que les services écosystémiques, les changements climatiques ainsi que les rayonnements électromagnétiques.

Concernant les rayonnements électromagnétiques, l'enjeu général est de « protéger la population en matière de rayonnements électromagnétiques ».

Les actions reprises dans le portefeuille ENVleS visent à réaliser un état des lieux des données disponibles, des bonnes pratiques mises en œuvre dans d'autres états-membres et d'identifier les actions pouvant être déployées utilement sur notre territoire. Une attention particulière est accordée aux personnes électrohypersensibles, par le biais d'initiatives sur les zones blanches et l'élaboration de recommandations pour le secteur de la construction.

Il y a deux actions reprises dans le plan.

La première vise à renforcer les données disponibles sur les conséquences de l'exposition aux ondes et les mesures visant à les atténuer. Elle prévoit de « réaliser un benchmarking des études européennes effectuées sur la problématique de l'exposition aux ondes, des conséquences de cette exposition, et des projets mis en œuvre pour les réduire ».

La deuxième vise à limiter l'exposition des citoyens et publics vulnérables aux rayonnements électromagnétiques. Elle prévoit d'« évaluer la mise en place de mesures spécifiques en vue d'aider les personnes électrohypersensibles ».

La recherche du meilleur itinéraire pour relier les postes de transformation de Courcelles et Avelgem et les choix qui ont été retenus dans le dossier de base sont cohérents avec l'objectif de limiter l'exposition des personnes aux rayonnements électromagnétiques puisque la présence d'habitations dans le périmètre ou à proximité a été un critère déterminant.

Il reste néanmoins que l'inscription d'un périmètre de réservation au plan de secteur pour permettre l'implantation d'une ligne à haute tension qui générera des ondes électromagnétiques peut sembler quelque peu contradictoire avec la volonté de limiter l'exposition des populations aux ondes électromagnétiques. Il faut néanmoins noter que l'intensité du champ dépend directement de l'intensité du courant qui passe et est donc avant tout lié à la consommation d'électricité plus qu'à son transport. En soulageant le reste du réseau, la boucle du Hainaut induirait donc un champ électromagnétique à sa proximité, mais réduirait également les champs présents en dessous des autres lignes moins sollicitées.

Dans l'ensemble, l'inscription au plan de secteur d'un périmètre de réservation pour une infrastructure de transport d'électricité est donc cohérente avec le Plan ENVleS mais une attention particulière doit être donnée lors de la sélection de l'itinéraire et, ultérieurement, lors de la conception du projet pour réduire au maximum l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques. Rappelons à ce sujet

que l'inscription d'un périmètre relativement large (200 m) permettra au gestionnaire du réseau de positionner plus précisément l'infrastructure de manière à limiter autant que possible l'impact de la construction sur la santé des êtres humains. L'analyse des incidences sur l'être humain du projet de périmètre de réservation projeté et de ses alternatives est réalisée dans la phase 2 du présent rapport.

5.1.4. A L'ÉCHELLE LOCALE

5.1.4.a. PLAN D'ACTION EN FAVEUR DE L'ÉNERGIE DURABLE ET DU CLIMAT (PAEDC) ET LA CONVENTION DES MAIRES

La convention des Maires est une initiative européenne rassemblant des collectivités locales et régionales volontaires qui désirent lutter contre le changement climatique et mettre en œuvre des politiques énergétiques durables. Les objectifs sont de réduire de 40% les émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'améliorer la résilience aux changements climatiques de leur territoire à l'horizon 2030. La Wallonie y est engagée depuis 2012 au travers du programme POLLEC (POLitique Locale de l'Énergie et du Climat). Ce programme a pour but d'inciter les Communes wallonnes à adhérer à la Convention des Maires en les aidant à respecter les premières étapes de l'engagement, à savoir réaliser un inventaire des émissions de gaz à effet de serre produites sur leur territoire, définir les objectifs de réduction et élaborer un Plan d'action en faveur de l'énergie durable (PAEDC).

Parmi les 14 communes wallonnes concernées par le périmètre de réservation du dossier de base, 9 d'entre elles ont élaboré un PAEDC : Frasnes-lez-Anvaing, Ath, Chièvres, Soignies, Braine-le-Comte, Ecaussinnes, Seneffe, Pont-à-Celles, Courcelles.

L'inscription du périmètre de réservation faisant l'objet de la demande de révision du plan de secteur permettra la réalisation du projet Boucle du Hainaut qui s'intègre dans les objectifs généraux de réduction des émissions de GES et d'amélioration de la résilience aux changements climatiques dès lors que cette nouvelle liaison a pour objectif de permettre le rapatriement de l'énergie éolienne offshore vers le centre du pays. Il est néanmoins à noter que plusieurs des PAEDC communaux visent à soutenir la décentralisation de la production énergétique en favorisant l'installation de centres de production locaux d'énergie renouvelable. Si le projet boucle du Hainaut vise en premier lieu à rapatrier l'énergie produite par un centre important de production d'énergie renouvelable offshore, il participe également à rendre le réseau belge capable d'intégrer les autres énergies renouvelables produites de manière décentralisée.

5.2. Justification du projet de plan au regard de l'article D.I.1 du CoDT

L'article 1er, § 1er du CoDT stipule que « *Le territoire de la Wallonie est un patrimoine commun de ses habitants. L'objectif du Code du Développement territorial [...] est d'assurer un développement durable et attractif du territoire. Ce développement rencontre ou anticipe de façon équilibrée les besoins sociaux, économiques, démographiques, énergétiques, patrimoniaux, environnementaux et de mobilité de la collectivité, en tenant compte, sans discrimination, des dynamiques et des spécificités territoriales, ainsi que de la cohésion sociale* »

Le projet de révision des plans de secteur se positionne comme suit par rapport à ce texte législatif :

- Rencontre et anticipation des besoins de la collectivité :

Sociaux-économiques :

L'analyse des besoins du projet et du contexte économique a montré que la saturation que présentera bientôt la liaison Horta–Mercator engendrera des coûts supplémentaires liés :

- aux pénalités prévues dans le Clean Energy Package européen pour les pays dont le réseau interne présente des goulots d'étranglement ;
- aux redispatching visant à ralentir/arrêter certaines unités de production en amont de la saturation pour en activer d'autres en aval.

Ces coûts se répercuteront sur les consommateurs d'électricité, ce qui se traduira négativement sur le bien-être des ménages et la compétitivité des entreprises wallonnes.

En évitant ces pénalités et les coûts de dispatching et plus généralement en facilitant les transferts d'électricité au sein du réseau national et avec les pays voisins, cette nouvelle liaison permettra un accès à une énergie plus abordable augmentant ainsi le bien-être des ménages et la compétitivité des entreprises.

En évitant la saturation de la liaison Horta-Mercator, cette nouvelle liaison augmentera également la fiabilité du réseau électrique et contribuera à la sécurité d'approvisionnement des consommateurs wallons en énergie électrique.

Plus localement, la nouvelle liaison assurera la desserte de la province de Hainaut par le réseau électrique très haute tension ce qui augmentera les possibilités d'électrification et soutiendra dès lors le développement économique de cette région qui affiche déjà un taux de chômage supérieur à la moyenne régionale.

Démographiques :

Le projet de périmètre de réservation répond principalement à des besoins énergétiques, environnementaux et socio-économiques. Néanmoins, en augmentant et en fiabilisant le potentiel électrique de la zone, il pourra répondre à la demande en consommation grandissante liée à l'augmentation démographique. En effet, le Hainaut présente une croissance stable de 0,2% depuis plusieurs années, légèrement inférieure à la croissance de la Région wallonne qui est de 0,3% (voir chapitre Population de la phase 2 du présent rapport).

Énergétiques :

Les besoins énergétiques du territoire belge sont importants. En particulier, le Hainaut représente la seconde zone électrique belge en termes de consommation (point détaillé dans le chapitre 3 relatif à l'analyse des besoins, Figure 40). Actuellement, l'ouest et le centre du pays ne sont reliés que par la seule liaison 380 kV entre Avelgem et Mercator (Bazel) via Horta (Zomergem) d'une capacité de transport de 2 x 3 GW. Cette liaison est un élément central du réseau et le seul carrefour électrique belge entre la France, l'Angleterre, les Pays-Bas, les éoliennes dans la partie belge de la mer du Nord et le centre du pays. Cette liaison s'avérera insuffisante en vue de l'augmentation des flux consécutive à l'augmentation de la production d'énergie éolienne offshore belge prévue en mer du Nord et à l'intensification des échanges internationaux. En effet, en 2030, la Belgique disposera d'une capacité de production d'énergie éolienne de 5,8 GW en mer du Nord. Les simulations de marché et de réseau indiquent que la liaison Horta-Mercator atteindra sa limite en raison de l'intensification de cette production d'énergie renouvelable et des échanges internationaux. D'ici à 2030, cette liaison constituera alors un goulot d'étranglement sur le réseau 380kV belge pendant près de 50 % de l'année.

Le projet Boucle du Hainaut fiabilisera l'approvisionnement électrique pour les entreprises et les ménages sur l'ensemble du territoire belge et permettra de rencontrer les besoins énergétiques de la collectivité.

Au sein du Hainaut, le projet permettra, d'ici à 2030, de libérer la capacité de transport du réseau local 150 kV et d'éviter sa saturation par les flux de transit attendus. Le projet assurera également la desserte de la province de Hainaut par le réseau électrique 380kV et soutiendra dès lors le développement économique de cette région en anticipant ses besoins énergétiques.

Patrimoniaux :

Le projet de périmètre de réservation n'a pas pour objectif de répondre à des besoins patrimoniaux. Au contraire, le projet de périmètre de réservation traverse 3 des 13 ensembles paysagers de Wallonie, plusieurs périmètres d'intérêt paysager et une réserve naturelle. Il passe également à proximité d'une zone d'intérêt biologique Natura 2000.

Le projet de périmètre de réservation tel que proposé dans le dossier de base a été déterminé en vue de limiter les passages au-dessus ou à proximité immédiate d'éléments d'intérêt patrimonial et des noyaux d'habitats où se situent la plupart des éléments de patrimoine architectural.

Le projet de révision des plans de secteur ne répond donc pas spécifiquement à des besoins patrimoniaux, mais a été défini (selon le dossier de base) de manière à préserver les éléments patrimoniaux de ces incidences potentielles. Le chapitre relatif à l'urbanisme, les biens matériels et patrimoniaux de la Phase II du présent rapport s'attèlera notamment à le vérifier.

Environnementaux :

Le projet de ligne 380kV permettra d'augmenter la capacité d'intégration de la production d'énergie éolienne en provenance de la mer du Nord et contribuera à permettre l'injection d'importations d'électricité en provenance des pays voisins, d'origine renouvelable entre autres. Dès lors, le projet de révision du plan de secteur contribue à l'atteinte des objectifs climatiques de l'Union européenne, du PNEC belge, de la participation wallonne du PNEC belge et du PACE 2030 relatifs à la décarbonation de la production d'électricité, réduction des émissions de GES, part d'énergie produite à partir de ressources renouvelable.

Le projet de révision du plan de secteur aidera la Wallonie à respecter ses objectifs régionaux dans le cadre de la transition énergétique et de la lutte contre le réchauffement climatique ainsi que de rencontrer les besoins environnementaux de la collectivité, notamment à travers l'électrification de la société (industrie, transports et ménage).

Un tel projet de ligne électrique n'est néanmoins pas sans incidence sur l'environnement. La Phase II du présent rapport s'attèlera notamment à identifier les incidences de la mise en œuvre du projet de ligne sur les différentes thématiques environnementales.

Mobilité :

Le projet de révision des plans de secteur ne répond pas spécifiquement à des besoins de mobilité. Néanmoins, la nouvelle liaison augmentera les possibilités d'électrification massive des modes de transport telle que prévue, entre autres, par l'accord du Parlement européen du 14 février 2023 actant la fin de la vente des moteurs thermiques en 2035 (un assouplissement de cet disposition a été proposé fin 2025 par la commission pour prévoir à la place un objectif de réduction des émissions des véhicules vendus de -90% en 2035 par rapport à 2021 mais cet assouplissement ne modifiera pas la nécessité d'électrifier massivement le parc automobile). Le projet de révision du plan de secteur permet donc dans ce sens de contribuer à répondre et anticiper les besoins en mobilité.

Démonstration de la durabilité des réponses aux besoins en tenant compte des dynamiques et des spécificités territoriales de la cohésion sociale :

Le projet ne compromet pas la satisfaction des autres besoins sociaux, économiques, démographiques, énergétiques, patrimoniaux, environnementaux et de mobilité de la collectivité. Selon le dossier de base, la proposition de périmètre de réservation formulée a été élaborée sur la base d'une méthodologie intégrant et minimisant les contraintes patrimoniales et environnementales et tenant compte de la dynamique et des spécificités territoriales. La Phase II du présent rapport s'attèlera notamment pour objet de le vérifier.

Cette proposition soutient la cohésion sociale en favorisant l'accès de la population à une énergie propre et produite au moindre coût. A l'inverse, l'absence de révision du plan de secteur pourrait compromettre le développement durable et attractif du territoire.

6. IDENTIFICATION DES ALTERNATIVES AU PROJET DE RÉVISION DE PLAN DE SECTEUR

6.1. Introduction

La mise en œuvre d'une ligne aérienne 380 kV visée par le projet de périmètre de réservation n'est pas sans incidences sur l'environnement. Elle présente d'abord un impact paysager dès lors que la ligne est visible sur tout son long, soit 84,8 km. Ensuite, elle implique une occupation permanente au sol pour les pylônes pouvant limiter le développement des parcelles concernées (tant pour les activités économiques que résidentielles). Elle engendre également des champs magnétiques autour de l'infrastructure auxquels il est préférable de limiter au maximum l'exposition des populations. Enfin, une ligne aérienne engendre des nuisances sonores, via un bruit de crépitement par temps humide, nommé effet couronne. La phase II du présent rapport a pour objectif d'identifier l'ensemble des incidences sur l'environnement du projet de ligne dans le périmètre de réservation.

Eu égard aux incidences d'un tel projet sur l'environnement et les domaines social et économique, l'étude identifie les alternatives raisonnables à l'inscription du périmètre de réservation tel que proposé dans le dossier de base, compte tenu des objectifs poursuivis et du champ d'application géographique du projet de révision.

L'identification des alternatives est réalisée dans les points suivants.

6.2. Transcription spatiale des grandes options régionales

La Région wallonne compte plusieurs plans et programmes servant de lignes directrices pour le développement de son territoire. Parmi ceux-ci, certains contiennent des indications concernant la mise en place d'une nouvelle ligne à haute tension. La compatibilité du projet de révision du plan de secteur avec les plans et programmes pertinents a été analysée au point 5.1 de la Phase 1 du présent rapport. L'analyse a montré que les objectifs du projet étaient dans l'ensemble compatibles avec ces plans et programmes. S'il ne résulte pas de nouvelle alternative de la consultation de ces plans et programmes, la recherche d'alternatives qui suit a été réalisée en tenant compte des indications de ces différents plans et programmes, à savoir éviter les zones urbanisées et les zones de grand intérêt biologique et éviter de mettre en péril les exploitations en zone agricole (SDT), mais également limiter l'exposition des personnes aux rayonnements électromagnétiques (plan ENVleS).

6.3. Recherche et présentation d'alternatives technologiques au projet de révision du Plan de secteur

Le chapitre 4 de la Phase 1 du présent rapport consiste en l'analyse des options technologiques. Pour rappel, il ressort de cette analyse que la ligne aérienne AC est la seule technologie garantissant le niveau de fiabilité nécessaire au projet Boucle du Hainaut à l'échelle de l'ensemble du projet. Cette technologie est mature, constitue la majorité du réseau haute tension belge mais peut représenter par endroit un impact paysager important.

6.3.1. ALTERNATIVE AÉRO SOUTERRAINE

Une alternative technologique réside en la mise en œuvre d'une liaison hybride aéro-souterraine HVAC, pour laquelle il a été estimé qu'une distance totale d'enfouissement de 8 km était possible (et segmentable en différents tronçons enfouis). L'analyse des caractéristiques d'une liaison hybride montre que cette technologie est mature, présente des impacts visuels plus faibles, mais qu'elle implique une augmentation des risques de défaillance en comparaison à une ligne aérienne seule. Compte tenu de l'importance de mettre en œuvre une liaison stable, cette option technologique n'apparaît dès lors pertinente que si des incidences paysagères fortes sont rencontrées sur le tracé de la ligne.

Le présent rapport ne considère donc pas l'étude systématique d'alternatives aéro-souterraines. En revanche, une telle technologie pourrait être recommandée, si des incidences paysagères fortes étaient relevées dans le cadre de l'analyse des incidences environnementales réalisée en Phase 2 du présent rapport.

6.3.2. ANALYSE DE LA CONTRE-PROPOSITION DE REVOLHT

Pour rappel, dans le cadre de l'analyse des besoins et des technologies du projet, le bureau d'études s'est adjoint le soutien technique d'un expert externe, le professeur Roberto Benato. Ce chapitre a fait l'objet d'une relecture par Mr. Benato, qui en valide le contenu.

Mr. Benato est ingénieur en génie électrique, dispose d'un doctorat en analyse des systèmes électriques et est professeur au département de génie industriel de l'université de Padoue, en Italie. Son CV est repris en **Annexe 10**.

Son analyse technique de la contre-proposition de REVOLHT a été intégrée au texte sous la forme d'encadrés insérés à la suite des paragraphes relevant de son expertise technique.

6.3.2.a. RECHERCHE D'ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES

REVOLHT est une asbl constituée par des citoyens s'opposant au projet Boucle du Hainaut. En 2021, ce groupement citoyen a publié un rapport⁹¹ proposant différentes alternatives technologiques :

- L'utilisation de la technologie GIL pour le projet Boucle du Hainaut seul ;
- L'utilisation de la technologie HVDC à 525 kV en place des projets Ventilus et Boucle du Hainaut selon deux méthodes principales :
 - Via un réseau maillé HVDC en Belgique (visant à interconnecter plusieurs nœuds du réseau haute tension Elia, de manière redondante) ;
 - Via une solution HVDC point à point (visant à connecter deux nœuds du réseau haute tension d'Elia).

A la demande de REVOLHT, une équipe de chercheurs de l'UMons a analysé ces alternatives (**Annexe 7**) afin de se prononcer sur leur faisabilité technique et financière. Les conclusions de l'UMons indiquent que les technologies GIL et réseau maillé (multi-terminal) HVDC ne sont actuellement pas suffisamment matures. Bien que plus coûteuse⁹², l'étude de l'UMons a jugé l'alternative HVDC de point à point

⁹¹ <https://www.revolht.be/> <https://www.revolht.be/documents/dossier-technique/Contre-expertise%20REVOLHT%20-%20REV30052022.pdf>

⁹² Pour rappel, la technologie DC est plus coûteuse que la technologie AC aérienne, principalement en raison de la nécessité de stations de conversion. Il est à noter qu'ici, le surcoût provenant des stations de conversions est en partie éliminé grâce à l'approche globale HVDC entre les éoliennes offshore/les interconnexions avec UK/Danemark et le centre du pays. Dès lors, les stations de conversions ne seraient pas nécessaires à l'ouest de la liaison (ces stations étant comprises au sein des interconnexions HVDC).

potentiellement envisageable sous réserve d'études complémentaires devant éclairer certains points d'attention. Les doutes portent sur la possibilité d'évacuer l'énergie transitée par les réseaux régionaux ; l'impact sur la stabilité d'ensemble du réseau électrique belge ; l'impact sur la congestion des lignes existantes (Horta-Mercator) et sur la sécurité d'alimentation aux postes se trouvant dans les parcs d'activité économique (PAE) de Ghlin et Baudour.

6.3.2.b. PRÉSENTATION DU CONCEPT ALTERNATIF DE REVOLHT EN HVDC

Suite à la validation sous réserve par l'Umons de la faisabilité d'une alternative HVDC constituée de liaisons point à point, REVOLHT a travaillé davantage son concept afin d'aboutir à une contre-proposition plus concrète.

Plutôt qu'une ligne aérienne AC, REVOLHT a proposé un concept en courant continu (DC) avec des liaisons enfouies de point à point, et ce à l'échelle de l'ensemble du tracé des projets Ventilus⁹³ et Boucle du Hainaut, soit sur environ 150km.

En effet, l'augmentation de la capacité de transit d'ouest en est du pays s'articule à travers deux projets (Figure 58) :

- Projet Ventilus⁹⁴ : reliant les postes de Stevin et Avelgem par une liaison aérienne d'une capacité de 6GW ;
- Projet Boucle du Hainaut : reliant les postes d'Avelgem et de Courcelles par une liaison aérienne d'une capacité de 6GW.

⁹³ Le projet Ventilus est détaillé au point 2.2.1.d de la phase 1 du présent document.

⁹⁴ Au même titre que le projet Boucle du Hainaut, le projet Ventilus répond à plusieurs objectifs :

- Raccorder sur le continent au réseau de 380 kV l'énergie renouvelable produite par les nouveaux parcs éoliens offshore ;
- Réaliser un réseau robuste grâce à une connexion haute tension de 6 GW entre l'axe de Stevin et le poste haute tension d'Avelgem ;
- Réaliser une capacité d'accueil pour de nouvelles productions d'énergie onshore en Flandre occidentale ;
- Créer la possibilité d'une deuxième connexion sous-marine avec un pays étranger, contribuant ainsi à l'intégration plus poussée du marché européen de l'électricité ;
- Le remplacement optimal de la connexion 150 kV Slijkens (Ostende) - Brugge-Waggelwater ;
- Le renforcement de la sécurité d'approvisionnement de la région d'Izegem.

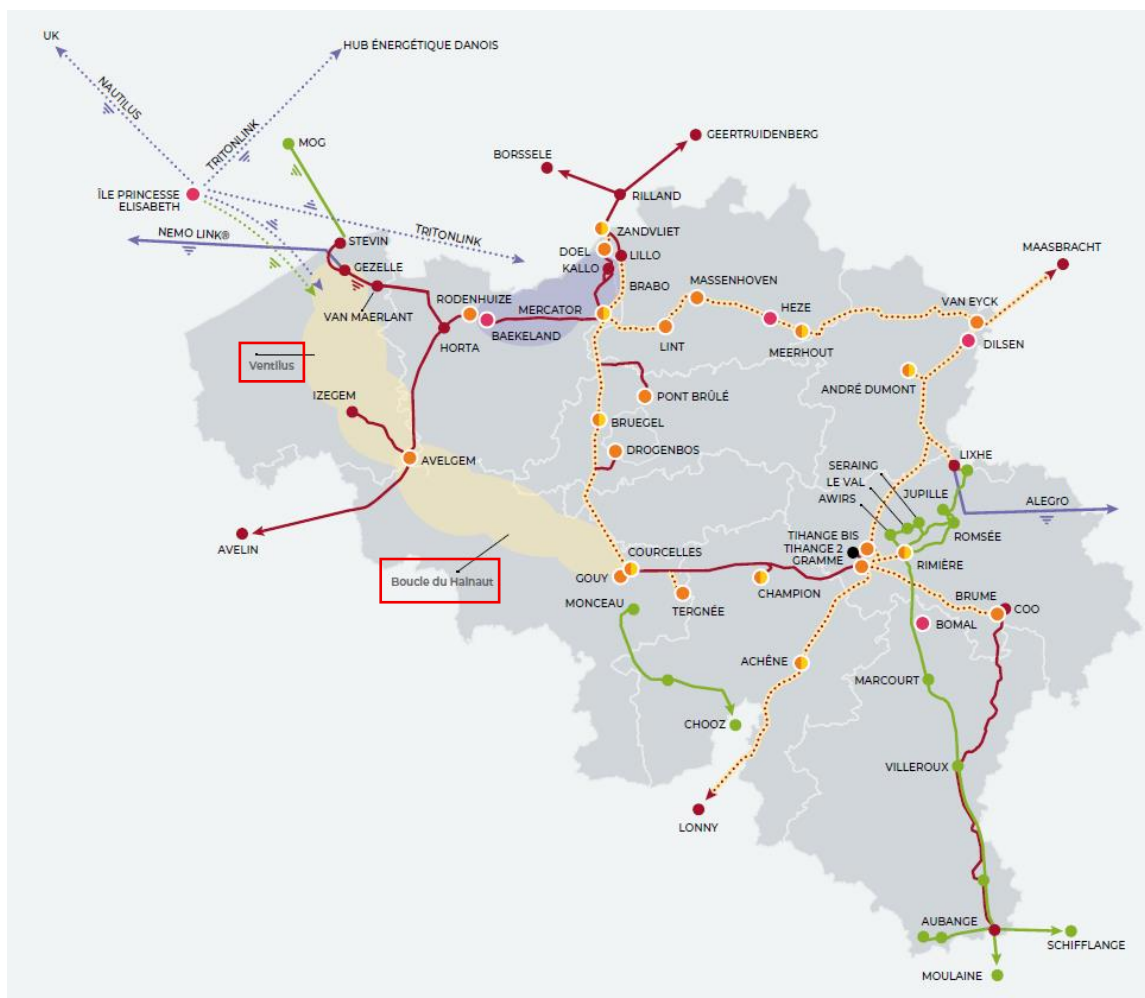


Figure 58 : Carte récapitulative des projets à très haute tension sur la période 2024-2034 (source : Plan de développement fédéral 2024-2034)

En résumé, REVOLHT propose d’analyser le développement du réseau dans une perspective plus globale et établit une alternative aux projets Boucle du Hainaut et Ventilus combinés. Ces deux projets répondent en effet à un objectif commun, à savoir de permettre le transit d’importantes quantités d’énergie d’ouest en est.

Un exemple de déclinaison de ce concept est présenté sur la figure suivante. Il comprend deux liaisons HVDC de 2GW à 525kV au départ de l’île énergétique : l’une en direction de la région d’Anvers et l’autre de Courcelles, sans passer par un poste de conversion à la côte. Dans ce concept, l’île Princesse Elisabeth devient un nœud central de redistribution de l’électricité offshore⁹⁵ et participe à soutenir le réseau en cas de surcharge ou de défaillance, à réduire la charge sur certaines lignes et à boucler le réseau belge. Ce concept intègre également une injection de 0,5GW dans le Hainaut.

⁹⁵ Cette redistribution est prévue depuis la côte dans les projets tels qu’envisagé actuellement

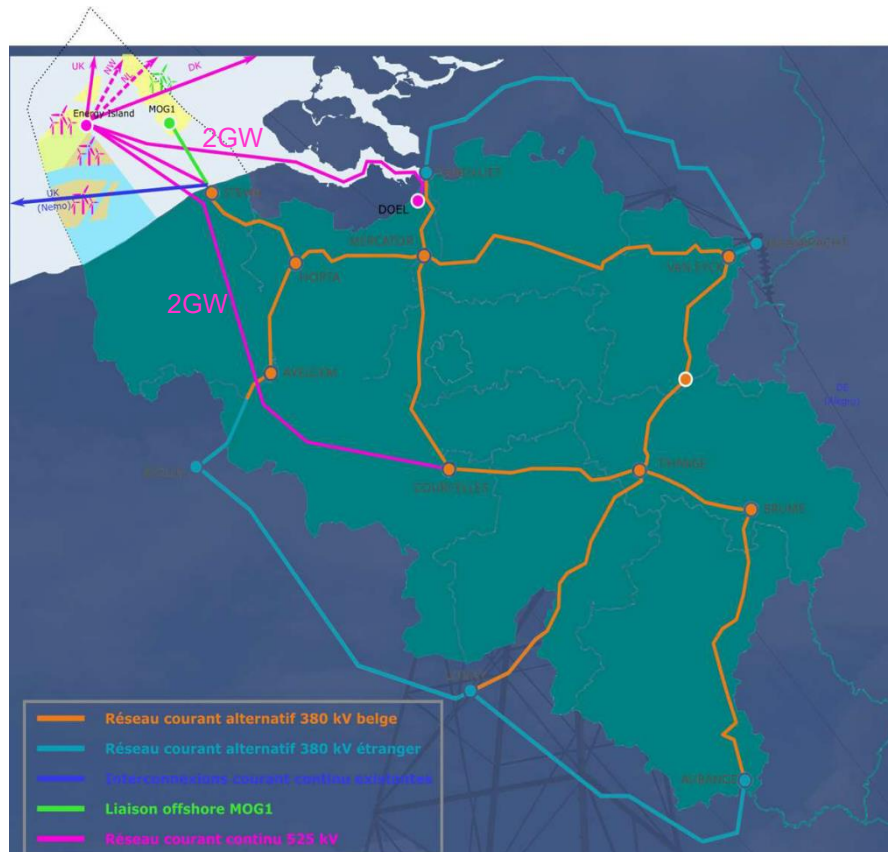


Figure 59 : Schéma du concept alternatif de REVOLHT (proposition 1) (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

Selon REVOLHT, ce concept permettrait d'atténuer les incidences environnementales des projets Ventilus et Boucle du Hainaut, d'optimiser leurs coûts, d'accroître la flexibilité du réseau, de renforcer l'alimentation du Hainaut et de soulager la liaison Horta-Mercator.

6.3.2.c. DIALOGUE ENTRE ELIA ET REVOLHT

Suite aux élections régionales de juin 2024, le nouveau Gouvernement wallon a publié sa déclaration de politique régionale et, concernant le projet Boucle du Hainaut, mentionne que « *Le Gouvernement veillera à l'instauration d'un dialogue constructif entre toutes les parties prenantes portant sur les solutions techniques et économiques envisageables* ». De décembre 2024 à avril 2025, un dialogue a dès lors eu lieu entre REVOLHT et Elia (sous l'égide de l'administration régionale) portant sur les solutions techniques et économiques envisageables. Ce dialogue visait notamment à améliorer la contre-proposition de REVOLHT sur le plan technique et d'en estimer le coût et les délais de mise en œuvre. Ce point du rapport expose et vérifie les éléments avancés dans le cadre de ce dialogue.

6.3.2.c.1. Identification et optimisation de la contre-proposition de référence

En début de dialogue, des échanges ont permis de clarifier les besoins et les contraintes techniques. A l'issue de ces premiers échanges et malgré certaines réserves sur les hypothèses et les scénarios présentés par Elia, REVOLHT a reconnu les besoins de renforcement du réseau. REVOLHT conteste en revanche la façon dont ces besoins sont traduits en solution.

REVOLHT a ensuite fait évoluer son concept alternatif, présenté au point précédent, afin d'aboutir à une contre-proposition permettant d'égaliser les besoins rencontrés par le projet Boucle du Hainaut.

La contre-proposition obtenue est traduite en schéma unifilaire sur la Figure 61.

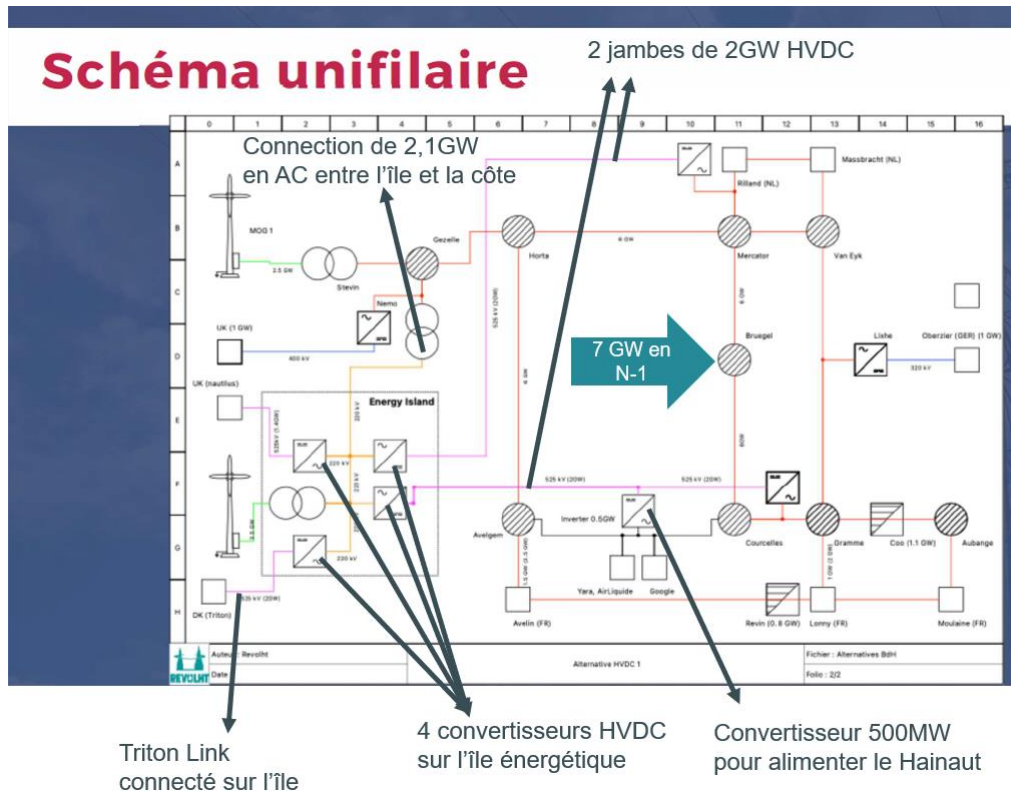


Figure 60 : Schéma unifilaire de la proposition 1 de REVOLHT (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

Lors de son évaluation de la contre-proposition, Elia a complété ce schéma unifilaire en ajoutant les capacités de transport et les directions des liaisons (Figure 61) afin d'analyser si la topologie proposée est suffisante pour le réseau.

(SGFM; Synchronous Grid Forming Mode) pour contrôler cette exploitation n'existe pas encore à cette échelle, et un problème mènerait à perdre jusqu'à 5,5 GW d'injection (production) dans la zone de réglage belge, ce qui dépasse la limite européenne de 3 GW maximum pour ce type de risque.

- **Injection insuffisante et complexe dans le réseau du Hainaut** : La puissance de 0,5 GW prévue est trop faible et permet de soulager à court terme la saturation du réseau 150 kV, de manière sub-optimale quant à l'utilisation des infrastructures prévues. Pour rappel, les technologies que cela nécessite (structure multi-terminal) manquent de maturité et de flexibilité et n'ont encore jamais été mises en œuvre sur un projet de cette échelle (voir chapitre 4, cette complexité de repiquage est d'ailleurs confirmée par l'UMons dans sa conclusion⁹⁷).
- **Maillage insuffisant du réseau belge** : une telle structure réseau est une solution de raccordement qui vise principalement le transport de l'énergie issue de l'éolien offshore sur le continent (bien qu'il ne réponde pas aux critères N-1 dans sa forme proposée), mais ne constitue pas une solution réseau répondant au besoin de maillage du réseau et fiabilisation de l'approvisionnement électrique : Les risques liés à la perte de l'axe Stevin persistent donc, de même que le risque de system split à l'échelle européenne en lien avec la saturation de l'axe Horta-Mercator.
- **Limitation des interconnexions futures** : Une telle structure réseau, sans liaison en AC entre Avelgem et Courcelles, limiterait également fortement les possibilités de raccordement de futurs projets de liaisons internationales HVDC qui ne pourraient plus être connectées sur des postes 380 kV dans le centre du pays, par manque de capacité d'accueil.

Les limites de la proposition ayant été identifiées et partagées avec REVOLHT, Elia a élaboré des propositions d'amélioration en vue de tendre vers une solution rencontrant les besoins et résolvant ces éléments critiques. Les principales évolutions visent à :

- Supprimer un convertisseur sur l'île en modifiant la liaison Nautilus en liaison hybride pour qu'elle serve d'une part d'interconnexion entre le Royaume-Uni et la Belgique et d'autre part à acheminer l'électricité depuis les éoliennes offshore.
- Supprimer un second convertisseur sur l'île en raccordant la liaison Triton Link sur le backbone 380kV entre Gand et Anvers.
- Réaliser une ligne Ventilus « light » de 3GW en AC pour sécuriser (boucler) l'axe Stevin.
- Réaliser une ligne Boucle du Hainaut « light » de 3GW en AC pour solutionner les surcharges sur la liaison Horta-Mercator et réduire les risques de « system split » au niveau européen. Une liaison HVDC n'étant pas envisageable, car une liaison HVDC vers Courcelles serait déjà prévue dans la proposition de REVOLHT, seule une liaison aérienne ou hybride aéro-souterraine 380 kV AC serait envisageable⁹⁸.
- Réaliser le repiquage depuis la ligne Boucle du Hainaut « light » en alternative au repiquage complexe sur la liaison HVDC proposée, peu mature et engendrant des incidences environnementales importantes du concept REVOLHT.

⁹⁷ « La solution en courant continu HVDC réseau maillé (multi-terminal) est techniquement très ambitieuse. Étant donné le peu d'expériences avec cette technologie dans le monde, l'incertitude et les questions autour de cette solution qui sont nombreuses, une telle application est donc peu recommandable à ce stade. »

⁹⁸ En effet, s'il y a déjà une liaison HVDC « Revolht » connectée à Courcelles et qu'une seconde liaison Avelgem – Courcelles est mise en place, on se retrouve avec les risques de fiabilité expliqués au chapitre 4 (mode commun ou interopérabilité).

L'ensemble des améliorations permettent de résoudre les contraintes techniques à l'exception du risque d'instabilité du nœud AC sur l'île pour lequel aucune solution n'a pu être trouvée et qui reste inacceptable pour Elia.

La figure ci-dessous illustre le concept de REVOLHT optimisé par Elia pour qu'il rencontre les besoins des projets Ventilus et Boucle du Hainaut.

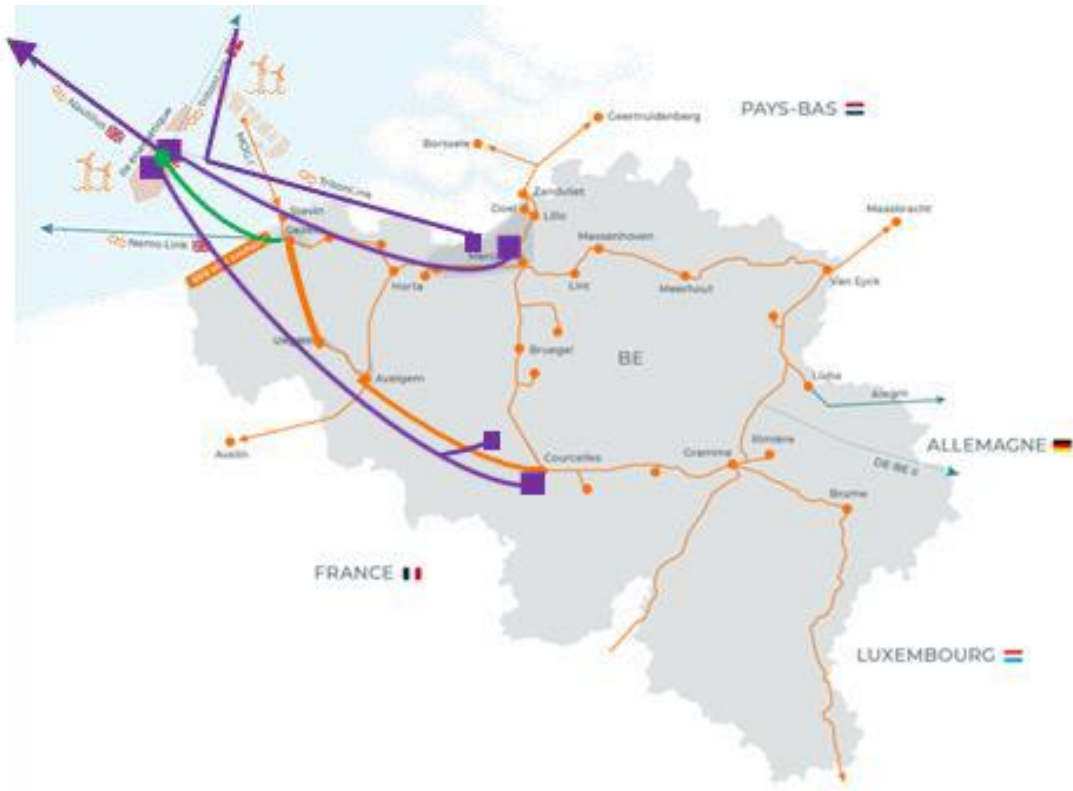


Figure 62 : Proposition 1 de REVOLHT optimisée par Elia (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

A l'issue de cet échange, REVOLHT partage les principaux constats d'Elia et demande à pouvoir proposer une seconde version de son concept.

REVOLHT a ensuite soumis trois nouvelles propositions, basées sur des liaisons HVDC souterraines tout en comprenant un maintien de Ventilus en AC aérien. Elia a évalué l'ensemble de ces trois variantes et a sélectionné celle jugée la plus robuste⁹⁹ dans l'objectif de formuler des pistes d'améliorations (Figure 63).

⁹⁹ Parmi les 3 propositions, seule l'une d'entre elle permet d'atteindre une capacité de 12GW et 9GW en N-1, ce qui correspond aux besoins.

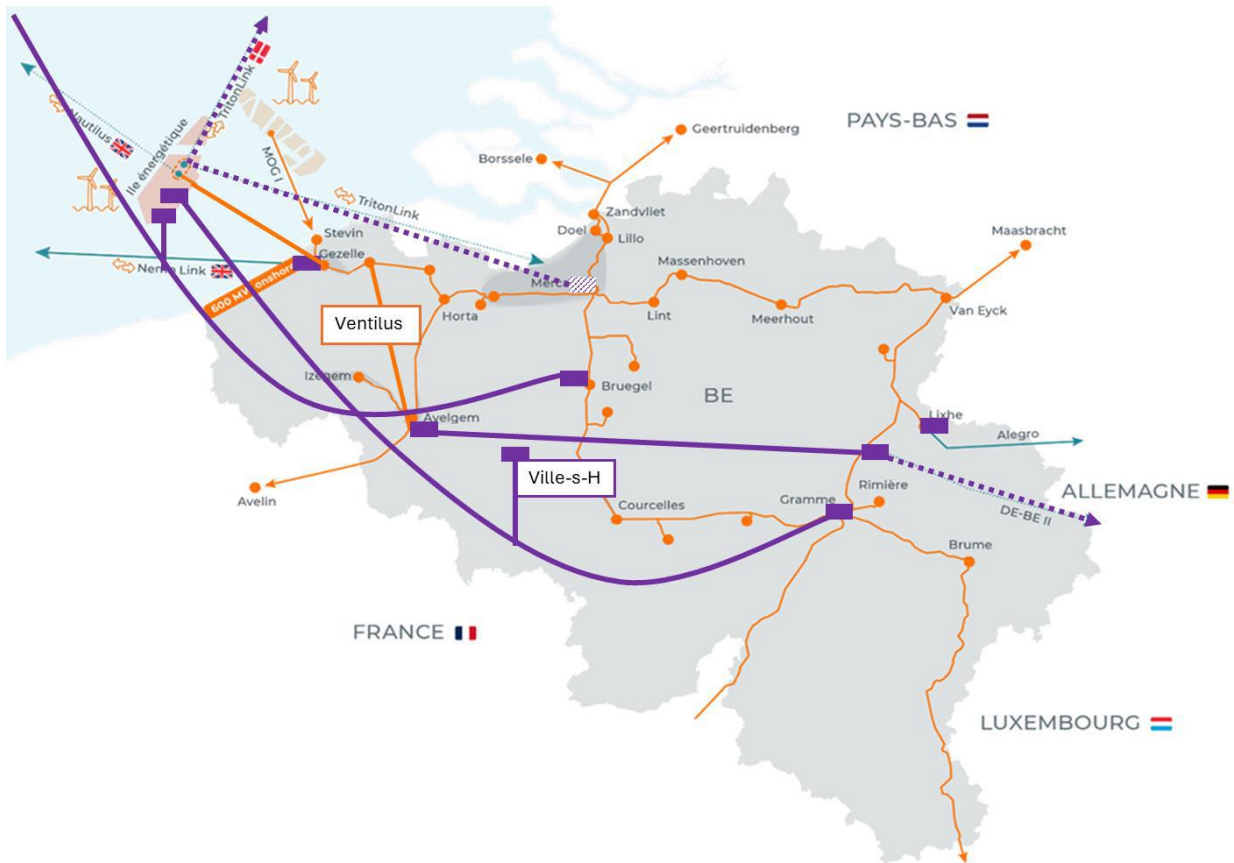


Figure 63 : Proposition 2 de REVOLHT (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

L'évaluation par Elia de cette proposition 2 mène aux constats suivants :

- **Risques d'instabilité du nœud AC sur l'île énergétique (MOG II) :** la proposition prévoit 2 convertisseurs HVDC et 3,5GW d'éolien sur un nœud AC faible de l'île énergétique. La technologie nécessaire (SGFM) pour contrôler cette exploitation n'existe pas encore à cette échelle, et un problème mènerait à une capacité qui dépasse la limite européenne de 3 GW maximum pour ce type de risque.
- **Risques d'instabilité liés aux convertisseurs sur terre :** le nombre encore élevé de convertisseurs HVDC sur terre présente un risque potentiel d'interactions et de dysfonctionnements entre ceux-ci (à étudier par des simulations EMT), ce qui augmente le risque de déclenchements.
- **Redistribution des flux complexes en cas d'incident :** les liaisons HVDC nécessitent un système de contrôle actif (voir 4.4.2). En cas d'incident, la puissance n'est pas automatiquement redistribuée par l'intermédiaire des liaisons DC et une surcharge des lignes AC en parallèle peut survenir. Les liaisons HVDC ne contribuent donc pas au maillage nécessaire du réseau interne. Dans le pire des scénarios (N-2 Horta-Mercator), un (non-)report de flux pourrait mener à une cascade de déclenchements et entraîner une séparation du réseau interconnecté européen.
- **Limitation des interconnexions futures :** Les liaisons HVDC ne sont pas flexibles et détériorent la capacité du réseau à s'adapter aux développements futurs, en ce compris les possibilités d'interconnexions HVDC avec d'autres pays.

- De même, la localisation, la capacité et la réalisation de la station de conversion pour **injection dans le Hainaut** est fixe dans le design HVDC, et ne pourra plus être modifiée par la suite en fonction de l'évolution des besoins du Hainaut.

Seuls les éléments techniques de cette proposition sont abordés ici, mais il apparaît néanmoins important de mentionner que sa mise en œuvre nécessiterait de revoir les choix avec les partenaires (Flandre notamment) et impliquerait la démultiplication des procédures administratives.

Des améliorations ont été proposées par Elia sur cette proposition REVOLHT pour d'une part faciliter la gestion des flux réseau et la stabilité d'exploitation rendues très complexes par l'intégration d'un grand nombre de convertisseurs HVDC sur terre et d'autre part réduire les coûts associés. Elles comprennent :

- Le déplacement d'un convertisseur de l'île vers la côte ;
- L'exploitation d'un convertisseur sur l'île énergétique en mode isolé (c'est-à-dire sans couplage sur le réseau AC) ;
- Le déplacement d'un convertisseur de Bruegel vers Courcelles ;
- La réduction de la capacité des convertisseurs HVDC à 2GW afin de rendre la proposition plus réaliste vis-à-vis des standards du marché.

Ces adaptations permettent de lever le risque d'instabilité sur le nœud AC de l'île mais pas les autres barrières techniques de cette proposition. En effet, compte tenu du nombre encore élevé de convertisseurs HVDC sur terre, le risque d'instabilité persiste, tout comme la complexité de redistribution des flux en cas d'incident ainsi que le manque de flexibilité pour les évolutions futures du réseau.

La figure suivante présente la proposition 2 optimisée par Elia (Figure 64). Elle comprend :

- La liaison Ventilus de 2x3GW en AC entre Zeebruges et Avelgem ;
- Une liaison hybride de 2GW en HVDC Nautilus - île énergétique – Courcelles ;
- Une liaison de 2GW en HVDC entre la côte et Gramme avec un repiquage fixe (1GW) dans le Hainaut pour l'alimentation du réseau local ;
- Une liaison de 2GW en HVDC entre Avelgem et Lixhe (point de raccordement exact à déterminer).

Cette proposition optimisée constitue la contre-proposition de référence et a ensuite fait l'objet d'une analyse approfondie afin d'en évaluer les risques techniques, les coûts et les délais de mise en œuvre.

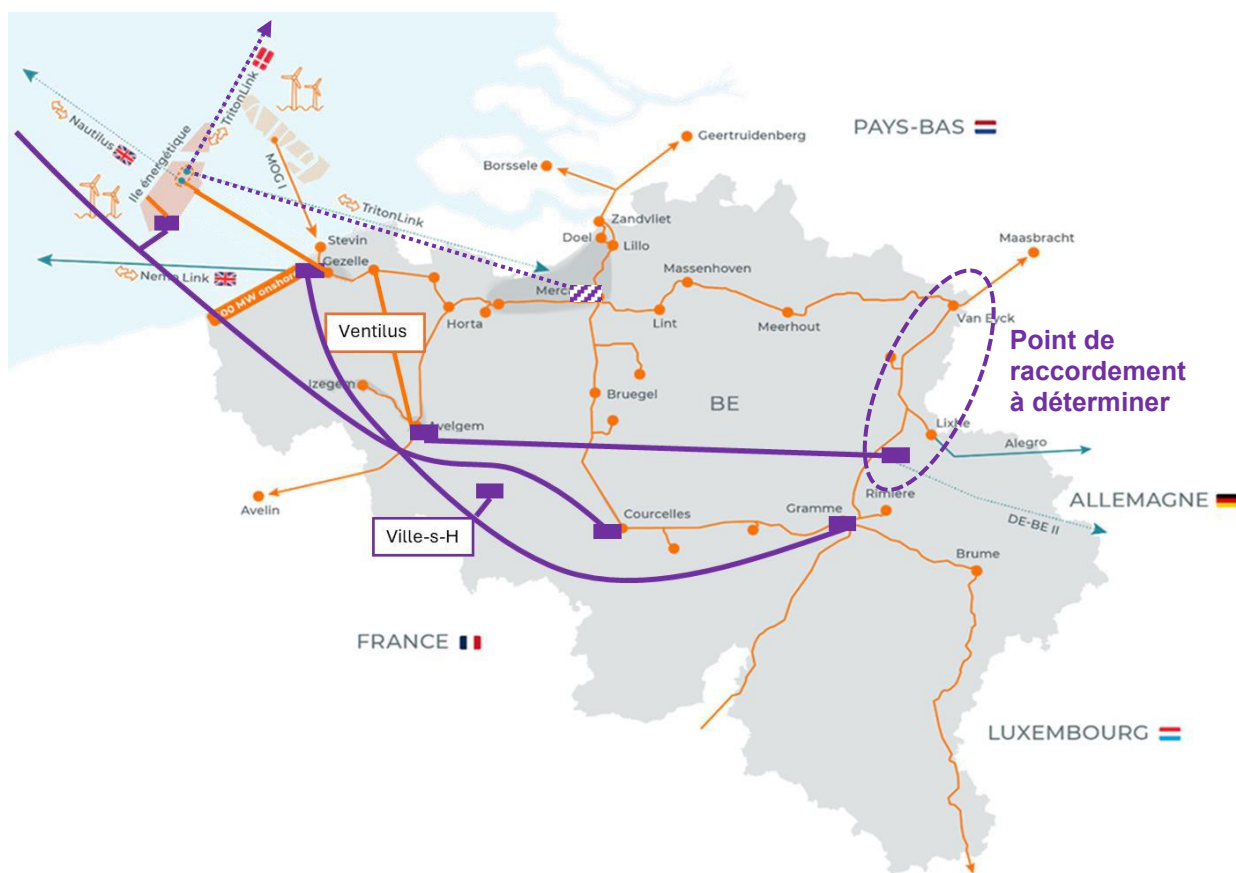


Figure 64 : Proposition 2 de REVOLHT optimisée par Elia (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

6.3.2.c.2. Analyse technique approfondie

Une analyse technique approfondie basée sur des outils de calcul de réseau spécialisés a été menée par Elia sur la contre-proposition. Divers scénarios ont été testés afin d'identifier les « setpoints » (ou consignes) devant être appliquées aux liaisons HVDC en temps réel pour assurer la sécurité du réseau.

Cette analyse confirme la grande complexité opérationnelle de la contre-proposition dès lors que pour 10% du temps par année, le concept HVDC ne permet pas de trouver un ensemble de setpoints pour les liaisons HVDC qui évite des surcharges problématiques en cas d'incidents sur le réseau (N-1 et N-2). Selon Elia, ceci montre que le concept de REVOLHT atteint déjà ses limites à l'horizon 2040.

Pour ces mêmes moments problématiques, la solution Boucle du Hainaut dispose encore d'une marge suffisante. Ceci, grâce à un meilleur maillage du réseau AC, où les courants sont immédiatement redistribués après des incidents selon les lois de la physique.

Les figures ci-dessous illustrent un scénario d'impossibilité de gestion des setpoints pour la contre-proposition et son équivalent pour la solution Elia (Boucle du Hainaut en AC) (Figure 65 et Figure 66). Sur la Figure 65, le setpoint engendre une surcharge sur la liaison France-Avelgem, qui, pour être évité, nécessite l'augmentation d'un autre setpoint qui implique une saturation sur Horta-Mercator.

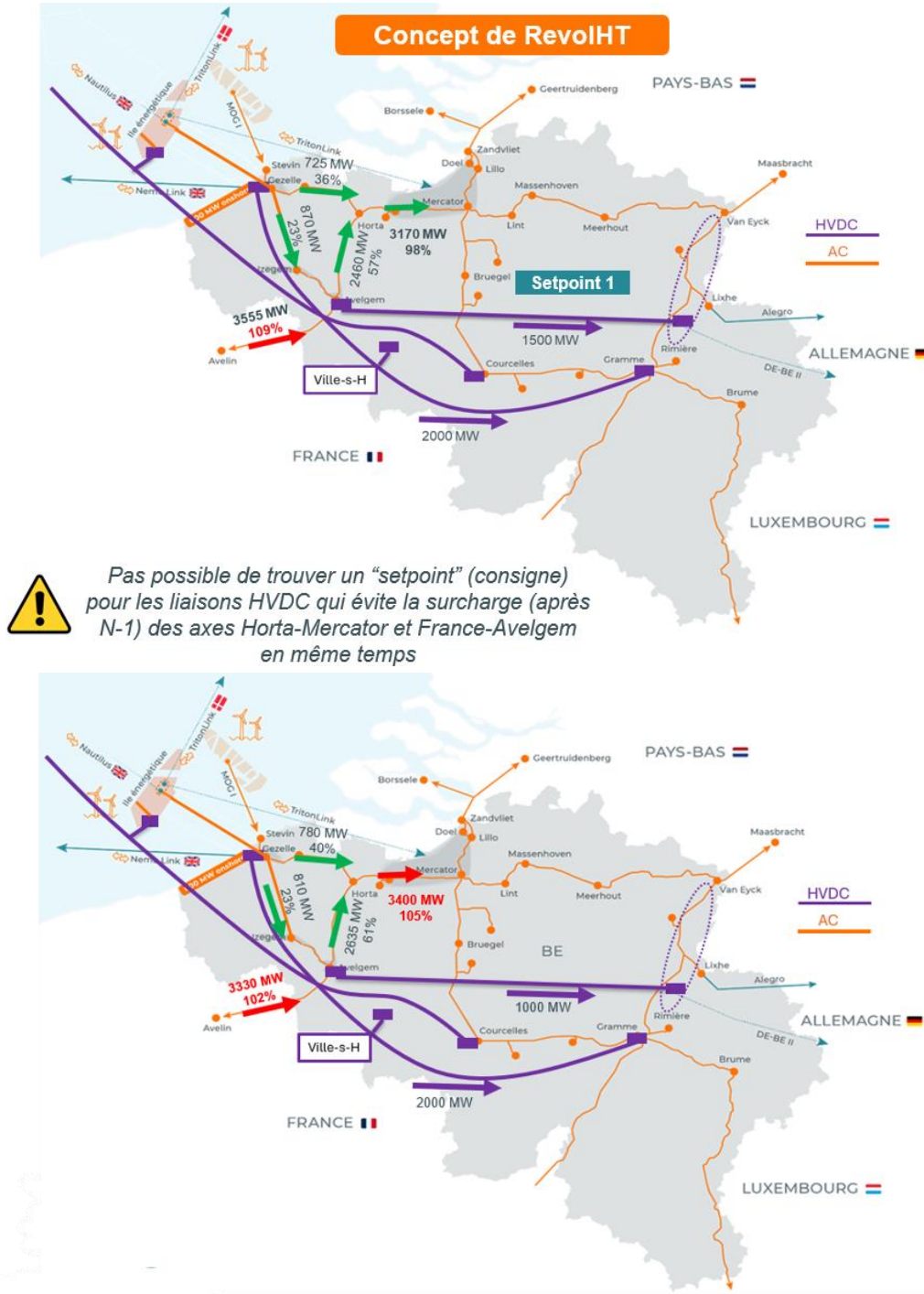


Figure 65 : Illustration de la complexité opérationnelle de la contre-proposition REVOLHT pour le scénario « Global Import » en 2040 (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

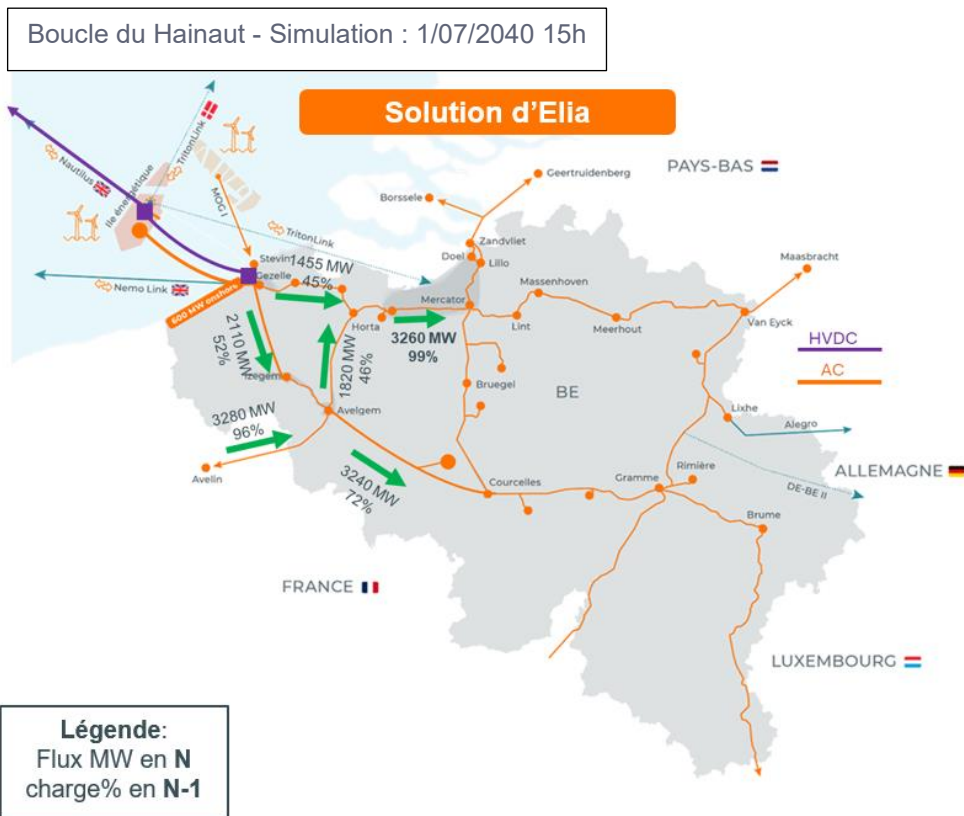


Figure 66 : Illustration de la distribution des flux pour le scénario « Global Import » en 2040 pour la solution Elia Boucle du Hainaut (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

Selon Elia, les simulations réalisées confirment que les risques en termes de fiabilité du réseau sont trop importants. La contre-proposition, en raison de l'intégration d'un trop grand nombre de convertisseurs HVDC dans le réseau interne AC, engendre des risques de surcharge et de déclenchements en cascade ne permettant pas de constituer une réponse réaliste aux besoins de renforcement du réseau.

Cette conclusion est contestée par REVOLHT. Parmi les points de désaccord, il est notamment estimé que le risque de non-fiabilité est exagéré et que des moyens de mitigation pourraient être établis. De plus, REVOLHT appuie que les setpoints pourraient être ajustés de manière dynamique (alors qu'ils sont considérés statiques par Elia) et que d'ici 2040, il est probable que des logiciels de gestion dynamique existent. En d'autres termes, REVOLHT considère ici que les avancées technologiques pouvant être attendues d'ici 2040 pourraient permettre de solutionner les contraintes techniques de la contre-proposition et qu'Elia devrait accepter un risque technologique jugé raisonnable par REVOLHT.

Elia estime pour sa part qu'il est impossible de prendre une décision de mise en œuvre d'un tel investissement (voir 6.3.2.c.3 relatif aux caractéristiques économiques) en se basant sur la potentialité de développements techniques futurs, tout en rappelant les autres barrières techniques de cette proposition.

Avis du Professeur Roberto Benato

Les études de puissances et les analyses approfondies réalisées par Elia montrent que la solution de REVOLHT présente une surcharge pendant 10 % de l'année 2040. Il ne s'agit pas d'une opinion d'ELIA,

mais bien du résultat de simulations logicielles, que je ne remets pas en cause. Compte tenu de ces limitations techniques, les réserves exprimées par ELIA sont compréhensibles.

En observant l'histoire des systèmes électriques, les liaisons HVDC, dans un réseau majoritairement AC, ont toujours été installées avec une grande prudence et une attention particulière. En effet, il n'est pas raisonnable de disséminer des liaisons HVDC à travers l'ensemble du réseau AC — et cela n'a d'ailleurs jamais été fait.

Je pense qu'à l'horizon 2040, la technologie HVDC-VSC (convertisseur source de tension) sera suffisamment mature pour être utilisée en configuration multi-terminale, et qu'elle aura également acquis la capacité d'assurer un contrôle stabilisant de type "grid-forming". Néanmoins, envisager de fonder un renforcement stratégique du réseau, nécessaire dans les prochaines années, sur une option technologique qui n'existe pas encore, constitue un pari risqué.

6.3.2.c.3. Estimation des coûts

Une évaluation des coûts de mise en œuvre a été réalisée pour le projet Boucle du Hainaut et la contre-proposition issue du dialogue entre Elia et REVOLHT.

Le projet Boucle du Hainaut considéré dans l'analyse de coûts comprend un enfouissement partiel de 8km. Afin de présenter l'ensemble des scénarios possibles, le chargé d'étude a complété l'analyse avec le projet Boucle du Hainaut en version aérienne uniquement, sans enfouissement.

L'estimation des coûts de mise en œuvre comprend les montants d'investissement (CAPEX) sur base des coûts de projets récents réalisés, les achats de terrain et coûts de servitude ainsi que des compensations (compensations agricoles et – dans la solution AC uniquement – les autres types de compensation). En revanche, les coûts présentés ici ne constituent pas les montants totaux pour ces projets dès lors qu'ils ne comprennent pas les dépenses opérationnelles (OPEX, telles que les frais d'études), les prestations de mise en œuvre, les imprévus, ni l'inflation.

En parallèle sont également renseignés les coûts estimés relatifs aux frais de financement, à la rémunération d'Elia, à l'amortissement des installations, et à leur maintenance.

Les montants pour les trois scénarios sont repris dans le tableau suivant.

Tableau 9 : Coûts de mise en œuvre estimés, en millions d'euros, pour les scénarios (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

| | Boucle du Hainaut -aérien AC | Boucle du Hainaut – aérien AC + 8km enfouissement | Contre-proposition issue du dialogue |
|--|-------------------------------------|--|---|
| Coûts de mise en œuvre (Investissement, d'achat de terrain, de servitude et compensation) | 583 | 784 | 7 888 |
| Frais de financement, rémunération, amortissement et maintenance des installations | 1 014 | 1 362 | 13 714 |

Selon les estimations d'Elia, la contre-proposition issue du dialogue entre Elia et REVOLHT présente un budget 10 fois supérieur à celui du projet Boucle du Hainaut hybride avec enfouissement sur 8km et 13,5 fois supérieur à celui du projet Boucle du Hainaut entièrement aérien.

Les informations Elia relatives aux coûts sont issues d'offres de leurs fournisseurs. Afin d'en vérifier les ordres de grandeur, l'analyse qui suit estime le coût associé aux équipements principaux des liaisons sur base des coûts publiés dans le cadre des Plans de développement du réseau allemand (NEP¹⁰⁰) et français (RTE^{101, 102}) ainsi que d'une récente étude de coûts des installations au Royaume-Uni¹⁰³. Ces coûts sont synthétisés dans le Tableau 10. Les montants jugés représentatifs du réseau belge ont été retenus pour la suite de l'analyse. Lorsque les montants français, allemands et du Royaume-Uni sont tous trois représentatifs, une moyenne est réalisée.

Tableau 10 : Coût des liaisons et équipements associés (sources : Plans de développement du réseau allemand et français^{100,101}, étude des coûts au Royaume-Uni¹⁰³)

| | Allemagne | France | Royaume-Uni | Montant retenu pour l'analyse |
|-----------------------------|--|---|------------------------------|-------------------------------|
| Ligne AC aérienne 6GW | 4,5 M€/km Montant non retenu car la puissance n'est pas précisée. | 2,1 à 3 M€/km pour 4GW ¹⁰⁴ , soit 3,8M€/km | 1190£/MW.km, soit 8,2M€/km | 6,0 M€/km |
| Liaison AC souterraine 6GW | 0,00105M€/MW.km ¹⁰⁵ , soit 6,3M€/km | 3,4 M€/km pour 600MW ¹⁰⁶ , soit 34 M€/km | 5330£/MW.km, soit 36,73M€/km | 25,7 M€/km |
| Poste de conversion DC 2GW | 0,35M€/MW, soit 700M€ | 500 à 600 M€ ¹⁰⁷ | / | 637,5 M€ ¹⁰⁸ |
| Liaison souterraine DC 2GW | 6,6 M€/km | 3,4 à 6 M€/km ¹⁰⁹ | 2270£/MW.km, soit 5,21M€/km | 5,5 M€/km |
| Travée 380kV | 4,4 M€ | / | / | 4,4 M€ |
| Transformateur 380/150kV 1G | 0,015M€/MW, soit 15M€ | 5,5 à 7,3 M€ | / | 10,7 M€ |

¹⁰⁰ https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-03/230321_NEP_Kostenschaeetzung_NEP2037_2045_V2023_1_Entwurf.pdf

¹⁰¹ <https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-03/SDDR2024-volet-etudes-technico-%C3%A9conomiques-doc-B.pdf> (p66)

¹⁰² <https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-09/2024-09-09-complement-etude-strategies-souterraines.pdf> (p28)

¹⁰³ https://www.theiet.org/media/axwkkkb/100110238_001-rev-j-electricity-transmission-costs-and-characteristics_final-full.pdf

¹⁰⁴ Le plan de développement ne précise pas la puissance de ligne considérée. Mais pour le projet entre Fos-sur-Mer et Jonquières-Saint-Vincent, ce prix est appliqué pour une liaison de 4GW. Il est dès lors considéré qu'il correspond à une ligne d'une capacité de 4GW. Source : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2025-05/2025-05-19-strategie-amenagement-electrique-du-territoire.pdf>

¹⁰⁵ Le plan de développement ne précise pas le coût en fonction de la puissance mais celui-ci est obtenu par une étude ENTSO-E qui mentionne ces mêmes coûts allemands par puissance. Pour le câble AC, le coût allemand est de 0,00105M€/MW.km. Source : <https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/tyndp-documents/ONDP2024/ONDP2024-methodology.pdf> (P8, set 3)

¹⁰⁶ Le plan de développement ne précise pas la puissance de câble considérée. Mais pour le projet entre Fos-sur-Mer et Jonquières-Saint-Vincent, ce prix est appliqué pour un tri-câble de 600MW. Source : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2025-05/2025-05-19-strategie-amenagement-electrique-du-territoire.pdf>

¹⁰⁷ Le plan de développement ne précise pas la puissance de station considérée. Mais pour le projet entre Fos-sur-Mer et Jonquières-Saint-Vincent, ce prix est appliqué pour une station 2GW. Source : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2025-05/2025-05-19-strategie-amenagement-electrique-du-territoire.pdf>

¹⁰⁸ Il est à noter que durant l'exercice, le chargé d'étude a eu accès à une offre de prix d'un fournisseur pour un poste de conversion 2GW et a également eu des échanges avec des fournisseurs de câble HVDC onshore, permettant de valider les ordres de grandeurs.

¹⁰⁹ Le plan de développement ne précise pas la puissance de câble considérée. Mais pour le projet entre Fos-sur-Mer et Jonquières-Saint-Vincent, ces prix sont appliqués pour un câble de 2GW. Source : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2025-05/2025-05-19-strategie-amenagement-electrique-du-territoire.pdf>

Les montants retenus permettent de faire une rapide estimation des coûts d'équipements majeurs des différents scénarios.

Le scénario projet Boucle du Hainaut aérien comprend les équipements majeurs suivants :

- 88km de ligne aérienne AC ;
- L'ajout de deux travées au poste d'Avelgem (des travées de réserves étant disponibles au poste de Courcelles) ;
- L'ajout d'un TFO au poste de Chièvres pour le repiquage.

Tableau 11 : Estimation des coûts matériels majeurs de la liaison pour le projet Boucle du Hainaut aérien, en millions d'euros (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni)

| | Montant issu des références externes | Nombre | Coûts pour le scénario (M€) |
|----------------------------|--------------------------------------|--------|-----------------------------|
| Ligne AC aérienne | 6,0 | 88 | 396 |
| Liaison AC souterraine | 25,7 | 0 | 0 |
| Poste de conversion DC 2GW | 637,5 | 0 | 0 |
| Liaison souterraine DC | 5,5 | 0 | 0 |
| Travée 380 kV | 4,4 | 2 | 8,8 |
| TFO 380/150 | 10,7 | 1 | 10,7 |
| Total | | | 548,4 |

Le scénario projet Boucle du Hainaut avec enfouissement comprend les équipements majeurs suivants :

- 80km de ligne aérienne AC ;
- 8km de liaison souterraine AC ;
- L'ajout de deux travées au poste d'Avelgem (des travées de réserves étant disponibles au poste de Courcelles) ;
- L'ajout d'un TFO au poste de Chièvres pour le repiquage.

Tableau 12 : Estimation des coûts matériels majeurs de la liaison pour le projet Boucle du Hainaut aérien avec 8km d'enfouissement, en millions d'euros (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni)

| | Montant issu des références externes | Nombre | Coûts pour le scénario (M€) |
|----------------------------|--------------------------------------|--------|-----------------------------|
| Ligne AC aérienne | 4,5 | 80 | 480,8 |
| Liaison AC souterraine | 25 | 8 | 205,4 |
| Poste de conversion DC 2GW | 625 | 0 | 0 |
| Liaison souterraine DC | 5,65 | 0 | 0 |
| Travée 380 kV | 4,4 | 2 | 8,8 |
| TFO 380/150 | 10,7 | 1 | 10,7 |
| Total | | | 705,7 |

La contre-proposition HVDC issue du dialogue comprend les équipements majeurs suivants :

- 3 liaisons HVDC d'une longueur totale estimée à 600km de tranchées (distance à vol d'oiseau majorée de 30% pour un tracé réel) ;
- 5 convertisseurs¹¹⁰ ;
- 6 travées 380kV (2 à Gramme, 2 à Avelgem et 2 à l'Est).

Tableau 13 : Estimation des coûts matériels majeurs de la contre-proposition issue du dialogue entre Elia et REVOLHT, en millions d'euros (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni)

| | Montant issu des références externes | Nombre | Coûts pour le scénario (M€) |
|----------------------------|--------------------------------------|--------|-----------------------------|
| Ligne AC aérienne | 4,5 | 0 | 0 |
| Liaison AC souterraine | 25 | 0 | 0 |
| Poste de conversion DC 2GW | 625 | 5 | 3187,5 |
| Liaison souterraine DC | 5,65 | 600 | 3302,8 |
| Travée 380 kV | 4,4 | 6 | 26,4 |
| TFO 380/150 | 10,7 | 0 | 0 |
| Total | | | 6516,7 |

Sur base des coûts de référence pour l'Allemagne, la France et les Royaume-Uni, les montants obtenus pour les équipements majeurs des liaisons s'élèvent à 548,4M€ pour la Boucle du Hainaut aérien, 705,7M€ pour la Boucle du Hainaut hybride et à 6516,7M€ pour la contre-proposition.

Ces montants représentent respectivement 94%, 90% et 82% des montants de mise en œuvre estimés par Elia (Tableau 9). Compte tenu du fait que l'estimation réalisée ici ne comptabilise que les équipements majeurs, sans prendre en compte l'ensemble des autres éléments techniques nécessaires (tels que l'adaptation du réseau AC 150kV hennuyer via de nouvelles travées et/ou lignes, les postes de transition et les réacteurs shunt pour le scénario hybride AC aérien et enfoui), les achats de terrains (pour l'extension et l'implantation des postes d'extrémité et de repiquage, pour les implantations de pylônes), les compensations (pour les riverains et les activités économiques, pour les initiatives communautaires et pour les mesures d'intégration paysagères). Il peut être raisonnablement considéré que l'ensemble de ces postes expliquent en grande partie les écarts entre les budgets annoncés par Elia et la présente évaluation.

Pour ce qui est des coûts de maintenance des installations, la littérature renseigne des coûts s'élevant à 1,5% du montant d'investissement pour les lignes aériennes et 0,15% pour les câbles (technologies AC et DC confondues)¹¹¹. En revanche, les coûts de maintenance des postes de conversion nécessaires pour la technologie HVDC représentent des montants plus importants, à hauteur de 1,5% du montant d'investissement pour ces postes¹¹². Le tableau suivant présente ces coûts de maintenance appliqués aux montants estimés pour les équipements majeurs des scénarios.

¹¹⁰ La contre-proposition nécessite 7 convertisseurs. Seuls 5 convertisseurs sont comptabilisés dans l'exercice car 2 d'entre eux sont déjà inclus dans le projet MOGII.

¹¹¹ The University of Queensland and Curtin University. 2023. Cost and Economic Aspects Comparing high voltage overhead and underground transmission infrastructure (up to 500 kV) https://s37430.pcdn.co/ciet/wp-content/uploads/sites/16/2023/11/04_Cost_Economics_Aspects.pdf P18

¹¹² TYNDP 2024. Offshore Network Development Plans Methodology. <https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/tyndp-documents/ONDP2024/ONDP2024-methodology.pdf> P8

Tableau 14 : Estimations des coûts de maintenance pour les différents scénarios, en millions d'euros/an (sources : Calculs Stratec sur base des Plans de développement du réseau allemand et français et d'une étude des coûts au Royaume-Uni)

| | Boucle du Hainaut - aérien AC | Boucle du Hainaut – aérien AC + 8km enfouissement | Contre-proposition HVDC issue du dialogue |
|----------------------|--------------------------------------|--|--|
| Coûts de maintenance | 5,9 | 5,7 | 52,0 |

Les coûts apparaissent donc similaires pour les deux scénarios du projet Boucle du Hainaut et sont environ 10 fois supérieurs pour la contre-proposition.

A ces montants annuels de maintenance s'ajoutent des frais de financement liés aux prêts nécessaires pour l'investissement, aux frais de fonctionnement d'Elia ainsi qu'à l'inflation qui ne sont pas considérés ici.

Enfin, les pertes réseau des différents scénarios doivent également être évaluées dès lors que les pertes électriques dans la liaison sont compensées par une production supplémentaire d'électricité. L'estimation par Elia de ces pertes est détaillée ci-dessous.

Tableau 15 : Estimations des pertes réseau des scénarios, en GWh/an (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

| | Boucle du Hainaut - aérien AC | Boucle du Hainaut – aérien AC + 8km enfouissement | Contre-proposition HVDC issue du dialogue |
|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Pertes Nautilus Hybride | 150 | 150 | 168 |
| Pertes des conducteurs | 49 | 51 | 10 |
| Pertes autres convertisseurs | 0 | 0 | 175 |
| Pertes transformateurs et shunts | 8 | 19 | 0 |
| Total | 207 GWh/an | 220 GWh/an | 353 GWh/an |
| Total sans Nautilus | 57 GWh/an | 70 GWh/an | 185 GWh/an |

Au total, les pertes de la contre-proposition sont estimées respectivement 3,2 et 2,5 fois plus importantes que pour la Boucle du Hainaut aérienne et hybride. Pour chaque scénario, des coûts de compensation proportionnels aux pertes des scénarios sont donc également attendus.

La présente analyse ne vise pas à valider les montants exprimés dans l'estimation des scénarios réalisée par Elia dans le cadre du dialogue. En effet ceux-ci sont extrêmement variables et dépendants de nombreux facteurs (cours des matières premières, coût de l'énergie, inflation générale, etc.). Elle permet toutefois de valider les ordres de grandeur du coût de chacun des scénarios et la comparaison relative du coût des scénarios entre eux. Sur base des éléments de coûts publics, les montants d'investissement de la contre-proposition issue du dialogue entre Elia et REVOLHT apparaissent environ 9 fois supérieurs à celui du projet Boucle du Hainaut hybride avec enfouissement sur 8 km et 12 fois supérieurs à celui du projet Boucle du Hainaut entièrement aérien. Ces proportions sont en ligne avec l'analyse réalisée par Elia.

Avis du Professeur Roberto Benato

L'avis du Professeur Roberto Benato a été développé dans l'encadré du point 4.4.5. Son avis est complété ci-dessous plus spécifiquement aux pertes des liaisons.

Mes analyses montrent que pour la ligne hybride de la Boucle du Hainaut, le coût lié aux pertes dans les conducteurs ne peut pas être supérieur à celui d'une solution entièrement aérienne. En effet, les pertes des câbles souterrains AC sont inférieures à celles des lignes aériennes AC : supposons que l'on dispose de six circuits en parallèle (je pense que cinq suffiraient). On obtient alors une résistance par unité de longueur de :

$$12,5 / 6 = 2 \text{ m}\Omega/\text{km},$$

contre une résistance par unité de longueur pour une ligne aérienne de $12,75 / 2 = 6,375 \text{ m}\Omega/\text{km}$.

Dans le cas considéré ici, les pertes de la ligne aérienne AC seraient donc environ trois fois plus élevées que celles des câbles souterrains AC.

Il est vrai que les pertes dépendantes de la tension (c'est-à-dire les pertes diélectriques, modélisées par la conductance shunt) des câbles AC sont supérieures à celles des lignes aériennes AC. Cependant, elles ne représentent que quelques points de pourcentage du total des pertes et n'altèrent pas les rapports mentionnés ci-dessus.

Bien que je ne rejoigne pas l'estimation des pertes des alternatives AC aérienne et AC hybride, cela ne remet pas en cause l'avantage économique incontestable de la solution Boucle du Hainaut proposée par Elia par rapport à la contre-proposition de Revolht.

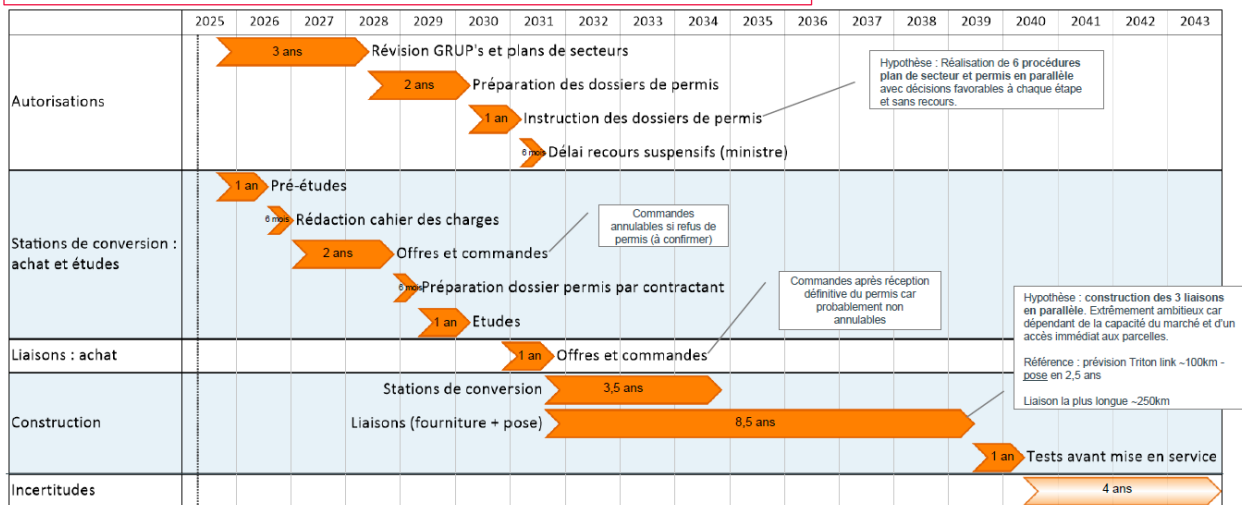
6.3.2.c.4. Délais de mise en œuvre

Afin d'évaluer la capacité des différents scénarios à répondre de façon fiable au besoin de renforcement du réseau, leurs délais de mise en œuvre ont été estimés par Elia.

Les diagrammes suivants présentent l'estimation des délais pour le projet Boucle du Hainaut¹¹³ et la contre-proposition.

¹¹³ Les deux variantes confondues. Il peut être raisonnablement considéré que les variantes aérienne et hybride du projet n'impactent pas significativement le délai de mise en œuvre.

Contre-proposition issue du dialogue entre Elia et REVOLHT



Boucle du Hainaut



Figure 67 : Délais de mise en œuvre estimés pour la Boucle du Hainaut et la contre-proposition (source : slides du dialogue constructif Elia-REVOLHT)

Les délais estimés à partir de 2025 sont de :

- 6 ans pour Ventilus-Boucle du Hainaut ;
- 14 ans pour la contre-proposition (18 ans en tenant compte d'un délai d'incertitude).

Les délais très longs de mise en œuvre de la contre-proposition amènent Elia à conclure que cela ne permettra pas de répondre aux besoins du réseau vis-à-vis de l'éolien offshore (MOG II), de Nautilus et des besoins locaux du réseau hennuyer.

Cette analyse est contestée par REVOLHT, qui soutient que certaines étapes pourraient être menées en parallèle ou accélérées. REVOLHT soutient également l'idée que la contre-proposition pourrait être phasée de sorte à répondre progressivement aux besoins du réseau, au fur et à mesure de sa mise en œuvre.

Afin d'évaluer le réalisme de ces estimations, plusieurs éléments doivent être soulignés. D'abord, l'estimation des délais de la contre-proposition a été réalisée sur base de délais de 6 ans pour les procédures administratives (3 ans pour les révisions de plan de secteur et 3 ans pour l'obtention des permis). Compte tenu de l'étendue des interventions, ces procédures devront être menées parallèlement au sein des Région wallonne et flamande et ce pour 6 procédures de révision de plan de secteur et de demande de permis en parallèle (une procédure plan de secteur et un permis par liaison HVDC de la contre-proposition). Les délais sont estimés pour la procédure de modification du Plan de Secteur et sont en ligne avec les délais de rigueur des procédures administratives de demande de permis. Néanmoins, dans la pratique, ils sont régulièrement plus longs, en particulier lorsque le projet fait l'objet d'une opposition (recours) ou que les dossiers de procédures sont jugés incomplets. A titre d'exemple, 5 ans ont été nécessaires pour la modification du plan de secteur pour le projet Ventilus.

Dans le cadre de la contre-proposition, un risque d'opposition particulièrement important est identifié en Région Flamande. En effet, la contre-proposition prévoit l'implantation de liaisons enfouies sur environ 200 km de son territoire afin de rencontrer des besoins similaires au projet Boucle du Hainaut qui ne l'impacte que sur 4 km en ligne aérienne. La prise en compte d'une durée de 6 ans pour la réalisation de l'ensemble de ces procédures en parallèle apparaît donc optimiste.

A l'issue de ces 6 ans, un an d'achat de matériel est considéré. Cette étape apparaît relativement bien anticipée par Elia et majoritairement réalisée durant les demandes d'autorisation (deux mois seulement entre la fin du délai de recours et la commande).

Ensuite, les délais de construction sont 2,3 fois plus longs pour la contre-proposition par rapport au projet Boucle du Hainaut. Compte tenu de la longueur des liaisons et de l'importance des chantiers pour les technologies enterrées, cela est à nouveau jugé pertinent.

Dans l'ensemble, des risques d'allongement de délais sont identifiés pour les procédures administratives de demande d'autorisation. En conclusion, un délai de mise en œuvre de l'ordre de 2 à 3 fois plus long pour la contre-proposition que pour Boucle du Hainaut est jugé réaliste.

6.3.2.d. CONCLUSION SUR LA CONTRE-PROPOSITION DE REVOLHT

La contre-proposition de REVOLHT repose sur un concept visant à trouver une alternative au projet Boucle du Hainaut en prenant de la hauteur et en considérant le réseau dans son ensemble. La contre-proposition a pour objectif d'égaliser la réponse aux besoins du projet Boucle du Hainaut. Le dialogue entre Elia et REVOLHT a permis d'identifier une contre-proposition concrète, basée sur la mise en œuvre de 3 liaisons souterraines HVDC au sein du réseau AC.

Cette contre-proposition a fait l'objet d'une analyse technique approfondie ainsi que d'une comparaison des coûts et délais de mise en œuvre avec ceux du projet Boucle du Hainaut.

Il apparaît d'abord que les contraintes techniques d'une telle alternative restent très importantes et que son bon fonctionnement est dépendant d'un logiciel de gestion dynamique des liaisons HVDC qui n'existe pas à ce jour. En ce sens, la mise en œuvre de cette contre-proposition constitue donc un choix reposant sur un risque technologique avéré. Elia estime ce risque trop important. De plus, la contre-proposition implique également d'autres contraintes techniques (risques d'instabilité dynamique) jugées inacceptable par Elia.

Le coût de mise en œuvre de la contre-proposition a ensuite été évalué. Il est estimé environ 9 à 10 fois supérieur à celui du projet Boucle du Hainaut hybride avec enfouissement sur 8km et 12 à 13,5 fois supérieur à celui du projet Boucle du Hainaut entièrement aérien.

Les délais de mise en œuvre de la contre-proposition ont également été estimés. Ces délais s'avèrent incertains compte tenu du grand nombre de procédures et de chantiers à mener en parallèle. Ils sont toutefois bien supérieurs que pour le projet Boucle du Hainaut, une prolongation de l'ordre de 10 ans peut raisonnablement être attendue.

Enfin, il est important de rappeler que la contre-proposition présente de nombreuses incidences environnementales, avec un chantier nécessitant de creuser des tranchées sur une longueur de 600 km ce qui constitue une incidence forte pour les sols, la biodiversité, les activités socio-économiques et les infrastructures traversées. De plus, les restrictions d'usage au droit du câble et l'occupation au sol des postes de conversion seraient impactant pour le développement urbanistique et les exploitations agricoles et sylvicoles concernées.

Le Tableau 16 synthétise les caractéristiques de la contre-proposition de REVOLHT en comparaison à la Boucle du Hainaut.

Tableau 16 : Synthèse comparative de la solution Boucle du Hainaut en courant alternatif avec la contre-proposition HVDC de REVOLHT issue du dialogue constructif

| | Boucle du Hainaut | Contre-proposition |
|---|-------------------|--------------------|
| Intégration des énergies renouvelables offshore | + | + |
| Intégration des énergies renouvelables de Flandre occidentale et du Hainaut | ++ | -- |
| Sécurité du réseau belge et européen | ++ | -- |
| Sécurité d’approvisionnement du Hainaut | ++ | + |
| Congestion Horta - Mercator | + | + |
| Solution « future proof » | ++ | - |
| Délai de mise en œuvre | + | -- |
| Impact environnemental | -- | --- |
| Efficacité énergétique et d’utilisation du matériel | + | -- |
| Coût | - | --- |

Légende : + = avantageux, ++= bon, +++= très bon, -=désavantageux, -=mauvais, ---=très mauvais

En conclusion, compte tenu de ses incidences environnementales, des limitations technologiques et des incertitudes relative à la mise en service d’un logiciel de gestion dynamique, du fait que cette alternative ne permet pas de répondre à l’ensemble des besoins identifiés pour le territoire, et que le budget global et les délais de mise en œuvre seraient bien supérieurs à celui d’une solution en courant alternatif, le chargé d’étude considère qu’elle ne peut être envisagée comme alternative pertinente au projet Boucle du Hainaut.

L’avis des experts consultés par les administrations et/ou Gouvernements wallon et flamand confirment également cette conclusion :

- La consultante indépendante Menelika Bekolo Mekomba a été interrogée sur la faisabilité de l’alternative technologique proposée par REVOLHT. Le 1^{er} février 2022, l’experte s’est prononcée devant la commission de l’économie, de l’aménagement du territoire et de l’agriculture du Parlement de Wallonie et a estimé ce concept non pertinent.
- Dans le cadre des expertises demandées par la Flandre pour le projet Ventilus, des solutions HVDC depuis la côte vers le centre du pays ont également été envisagées. Le professeur Dirk Westermann tire les mêmes conclusions et confirme également que bien que cette technologie soit prometteuse, elle n’est actuellement pas en mesure de répondre aux enjeux court terme du réseau et doit davantage être considérée comme une solution complémentaire au projet Ventilus. Suite à ce rapport, le Gouvernement flamand a décidé d’opter pour une solution aérienne AC pour le projet Ventilus.

Avis du Professeur Roberto Benato

Je suis entièrement d'accord avec la conclusion de cette partie.

Dans le cadre de ma comparaison de la Boucle du Hainaut HVAC point à point à la solution HVDC, la meilleure option du point de vue économique global s'est révélée être la ligne HVAC aérienne. La contre-proposition de Revolht ne prévoit pas une, mais trois lignes HVDC. Si le coût du HVDC était déjà déraisonnable auparavant, cette contre-proposition est encore plus onéreuse. Cela démontre encore davantage qu'on ne peut pas raisonner comme si les ressources étaient infinies. Le coût du transport d'énergie électrique se répercute directement sur le coût de l'énergie elle-même. Cela impliquerait donc un coût trop élevé pour la collectivité. La solution Boucle du Hainaut HVAC (qu'elle soit aérienne ou hybride) est sans aucun doute la meilleure du point de vue économique.

D'un point de vue technique, les études de puissances et les analyses approfondies réalisées par Elia montrent que la solution de REVOLHT présente une surcharge pendant 10 % de l'année 2040. De plus, cette contre-proposition repose sur une option technologique, la configuration multi-terminale, qui n'existe pas encore. Envisager de fonder un renforcement stratégique du réseau, nécessaire dans les prochaines années, sur une option technologique qui n'existe pas encore, constitue selon moi un pari risqué. Les réserves exprimées par ELIA sont dès lors compréhensibles.

De plus, les délais de réalisation sont entièrement en faveur de la solution HVAC Boucle du Hainaut. Si le renforcement du réseau est nécessaire dans les prochaines années, comment serait-il possible d'attendre jusqu'en 2041 pour la mise en œuvre de la solution de Revolht ? Il convient de mentionner que ne pas agir à temps revient parfois à ne pas agir du tout. A ce titre, une analyse du coût de l'inaction serait intéressante à réaliser.

6.3.3. ANALYSE DE L'ALTERNATIVE DE LIAISON PAR CÂBLES VIA LE RÉSEAU NAVIGABLE

Une contre-proposition de liaison par câbles dans le réseau navigable a été formulée par différents intervenants lors de la RIP.

La proposition consiste à dérouler les câbles haute tension dans le fond des voies navigables. La figure suivante reprend le tracé proposé. Le tracé s'implante donc successivement au sein de l'Escaut, le canal Nimy Blaton Personnes, le canal du centre et le canal Charleroi-Bruxelles.

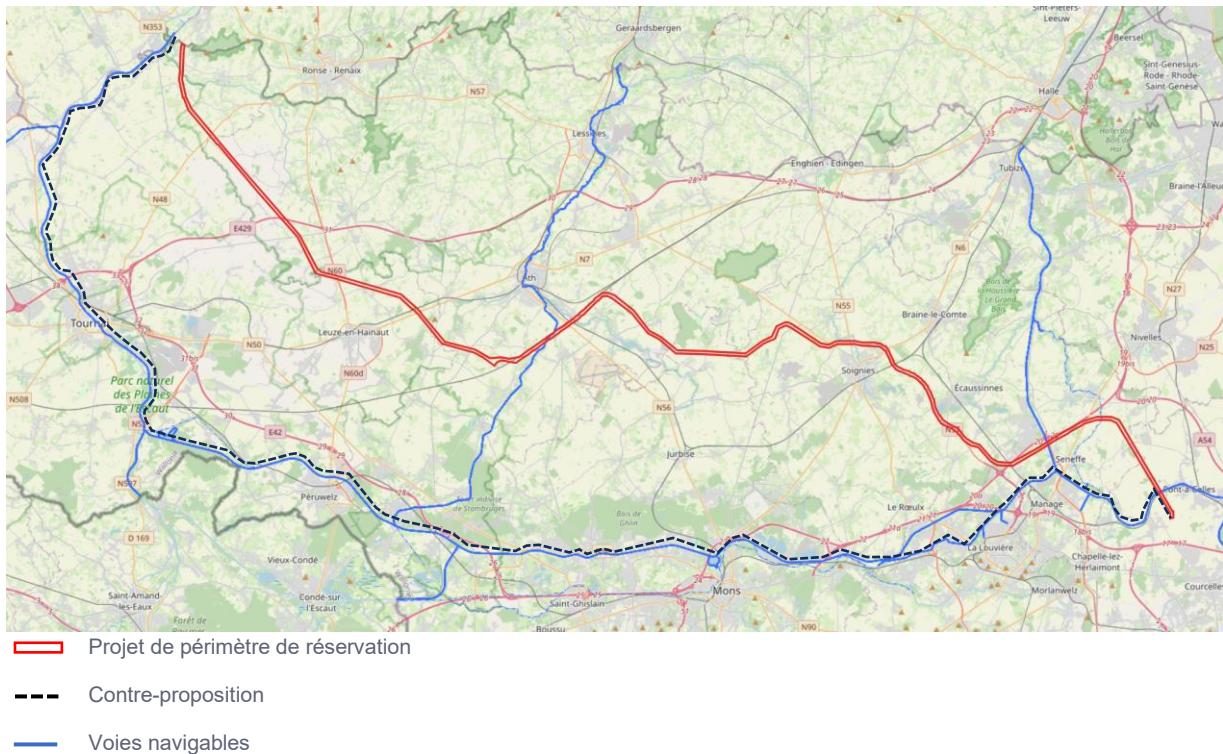


Figure 68 : Contre-proposition de tracé via le réseau des voies navigables (source fond de plan : Openstreetmap)

Cette contre-proposition de tracé ne définit pas la technologie (HVDC ou HVAC). Pour rappel, le courant alternatif est la technologie jugée la plus adaptée à l'issue de l'analyse des options technologiques (voir chapitre 4).

En courant alternatif, les distances en câble souterrain envisageables sont de 8 km, cette alternative n'est pas réalisable dès lors qu'elle prévoit des câbles souterrains sur tout son long.

En courant continu, les limitations trop restrictives mentionnées dans l'analyse technologique ci-avant ainsi que les surcoûts associés aux liaisons DC qui ont mené à leur exclusion en comparaison aux technologies AC restent pertinents dans le cadre de cette contre-proposition.

L'alternative n'apparaît donc techniquement pas réalisable.

Au-delà des limitations techniques, la contre-proposition nécessiterait de trouver des moyens de mise en place permettant d'éviter tout risque d'accrochage lors de l'ancrage des bateaux et/ou des travaux de dragage. Par ailleurs, en cas d'incident ou de défaut sur le câble, le délai de réparation serait plus long que pour une pose sur la terre ferme en raison d'une part, des difficultés à déterminer la localisation exacte du défaut¹¹⁴, et d'autre part, de la complexité des réparations sous l'eau.

Enfin, étant donné le nombre de conducteurs (18) et la largeur nécessaire (20 m), la traversée des ouvrages d'art tels que les écluses serait problématique.

6.4. Analyse de l'alternative planologique visant

¹¹⁴ sur la terre ferme, un signal est injecté sur le câble et le câble est suivi à pied avec un détecteur afin de localiser précisément le défaut. La présence des câbles au fond de l'eau complexifie cette méthodologie.

L'inscription de la ligne 380kV en place des lignes existantes 150kV

L'infrastructure de transport d'électricité du projet Boucle du Hainaut, envisagée sous la forme d'une ligne aérienne 380kV en courant alternatif et d'une capacité de transport de 2 x 3 GW, nécessite une révision du plan de secteur en vue d'y inscrire un périmètre de réservation. La nécessité de réviser le plan de secteur résulte des articles suivants du CoDT :

Article D.II.21, §1er « *le plan de secteur comporte : 2° le tracé existant et projeté, ou le périmètre de réservation qui en tient lieu, du réseau des principales infrastructures de communication et de transport de fluides, à l'exception de l'eau, et d'énergie* ».

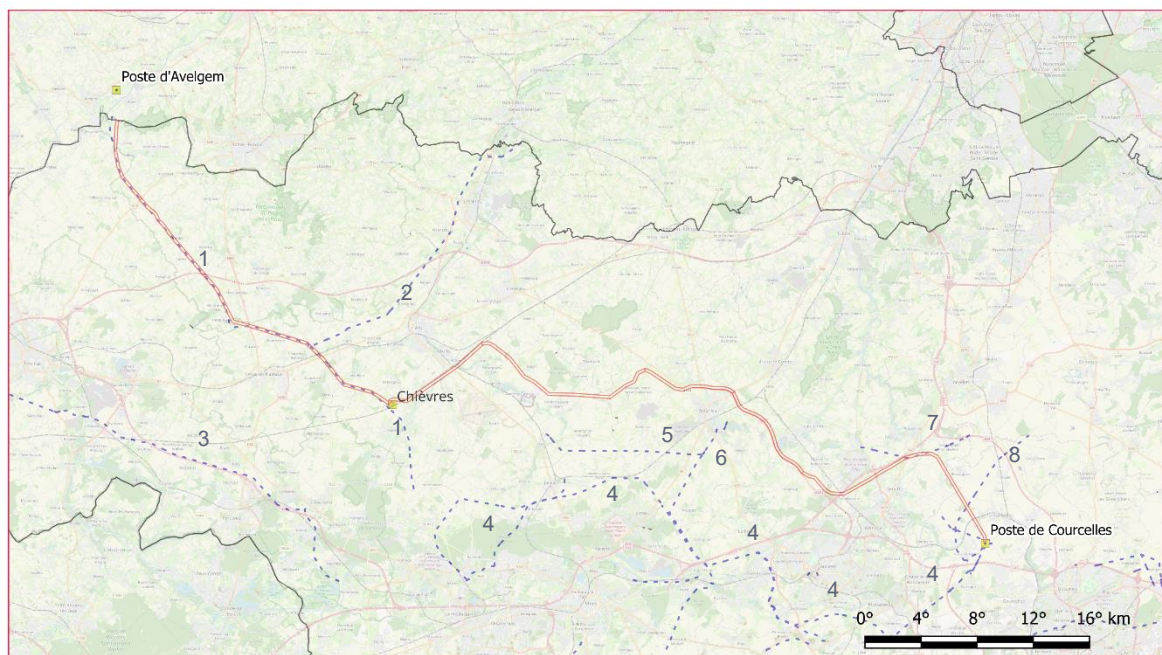
Article R.II.21-2, « *le réseau des principales infrastructures de transport d'électricité est constitué des lignes aériennes et souterraines d'une tension supérieure à cent cinquante kilovolts assurant le transport d'électricité et faisant partie du réseau structurant* ».

Les lignes HT d'une tension supérieure à 150 kV existantes et projetées doivent donc être inscrites au plan de secteur soit sous la forme d'un tracé, soit sous la forme d'un périmètre de réservation.

Si aujourd'hui le CoDT n'impose l'inscription des lignes haute tension au plan de secteur qu'à partir d'une tension supérieure à 150kV, le régime réglementaire antérieur¹¹⁵ était plus large et certaines lignes (existantes ou projetées) de tension inférieure (70kV et 150 kV) ont été inscrites parce qu'elles étaient considérées comme structurantes pour le réseau régional. Bien qu'aujourd'hui l'obligation d'inscription stricte vise les lignes de plus de 150 kV, cela n'efface pas les inscriptions antérieures.

Les figures suivantes présentent les tracés "projetés" (Figure 69) et "existants" (Figure 70) inscrits au plan de secteur.

¹¹⁵ Le Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine (CWATUPE), avant l'entrée en vigueur de son article 259/3, y inséré par l'arrêté du Gouvernement wallon du 14 juillet 2011, notamment.



RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES RELATIF A LA REVISION DU PLAN DE SECTEUR - BOUCLE DU HAINAUT

- Périmètre de réservation
- Postes de transformation
- - - Ligne HT en projet inscrite au plan de secteur

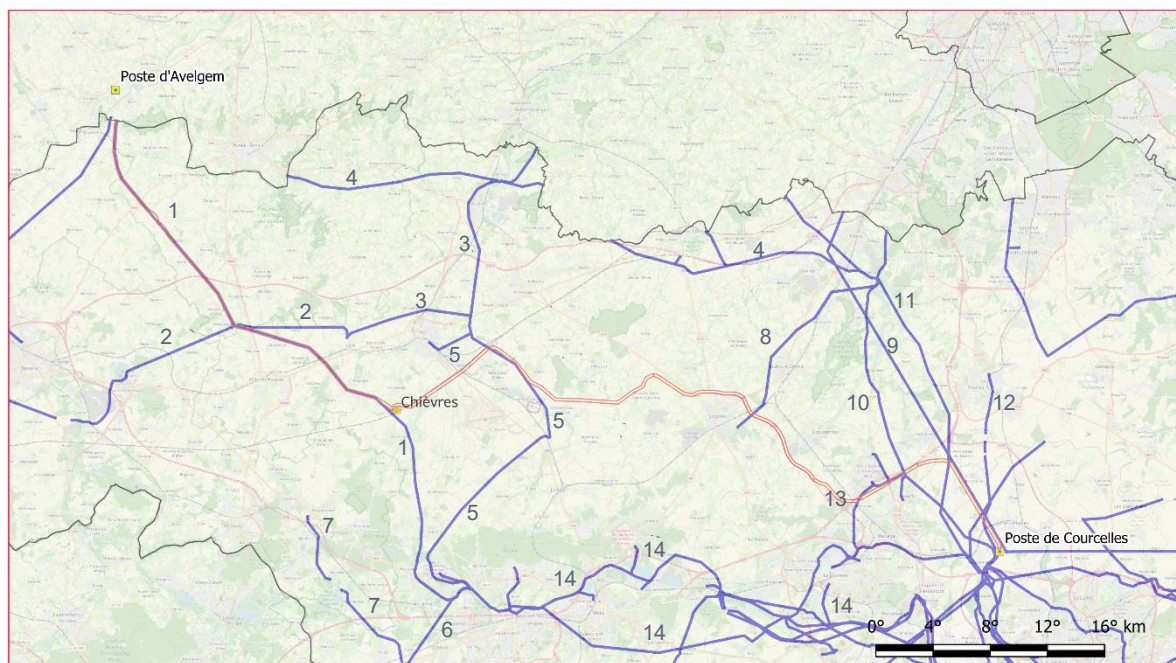
DEMANDEUR
ELIA ASSET S.A.
Boulevard de L'Empereur, 20
1000 Bruxelles

CHARGES D'ETUDE
Bureaux d'études **Stratec** & **SGS**
Av. Adolphe Lacombié 69-71 bte 8
1030 Bruxelles

Figure 69 : Tracés “projetés” inscrits au plan de secteur (source : Walonmap)

Les tracés “projetés” inscrits entre les postes d’Avelgem et Courcelles sont les suivants :

1. Le tracé allant de la frontière régionale, au niveau de la commune de Mont-de-l’Enclus, à la limite des communes de Chièvres et de Saint-Ghislain, en passant par le poste de Chièvres ;
2. Le tracé allant de la frontière régionale, au niveau de la commune de Lessines, au poste de Ligne (commune d’Ath) ;
3. Le tracé allant de la frontière régionale, au niveau de la commune de Mouscron (non visible sur la carte), au poste d’Antoing et qui continue vers Quevaucamps (commune de Belœil) pour se terminer sur la commune de Bernissart ;
4. Le tracé allant du poste de Baudour (Saint-Ghislain) au poste de Courcelles, en passant par le poste de Trivières et formant une boucle passant par Ghlin et Tertre ;
5. Le tracé rejoignant les postes de Lens et Soignies ;
6. Le tracé rejoignant le poste de Soignies et le tracé n°4 ;
7. Le tracé traversant la commune de Seneffe ;
8. Le tracé rejoignant les postes de Nivelles et Courcelles.



RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES RELATIF A LA REVISION DU PLAN DE SECTEUR – BOUCLE DU HAINAUT

- Périmètre de réservation
- Postes de transformation
- Ligne HT existante inscrite au plan de secteur

DEMANDEUR
ELIA ASSET S.A.
Boulevard de L'Empereur, 20
1000 Bruxelles

CHARGES D'ETUDE
Bureaux d'études **Stratec** & **SGS**
Av. Adolphe Lacombé 69-71 bte 8
1030 Bruxelles

Figure 70 : Tracés “existants” inscrits au plan de secteur (source : Walonmap)

Les tracés “existants” inscrits entre les postes d’Avelgem et Courcelles sont les suivants :

1. Le tracé entre la frontière régionale et le poste de Baudour en passant par le poste de Chièvres - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 150 kV ;
2. Le tracé entre Antoing et le poste de Ligne - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 150 kV ;
3. Le tracé entre les postes de Ligne et Deux-Acren - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 150 kV ;
4. Le tracé entre la frontière régionale (Ellezelles) et le poste de Oisquercq en passant par les postes de Deux-Acren et Hoves - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 70 kV ;
5. Le tracé entre les postes d’Ath (SNCB) et Baudour – Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 70 kV ;
6. Le tracé entre les postes d’Elouges et Baudour - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 70 kV ;
7. Le tracé entre les postes de Quevaucamps et Elouges - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 70 kV ;
8. Le tracé entre les postes de Soignies et Oisquercq - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 70 kV ;
9. Le tracé entre la frontière régionale (Tubize) et Courcelles - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 380 kV ;
10. Le tracé entre les postes de Oisquercq et Gouy en passant par Ronquières - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 70 kV ;
11. Le tracé entre les postes de Oisquercq et Gouy - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 150 kV ;
12. Le tracé entre les postes de Baulers et Gouy - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 70 kV ;

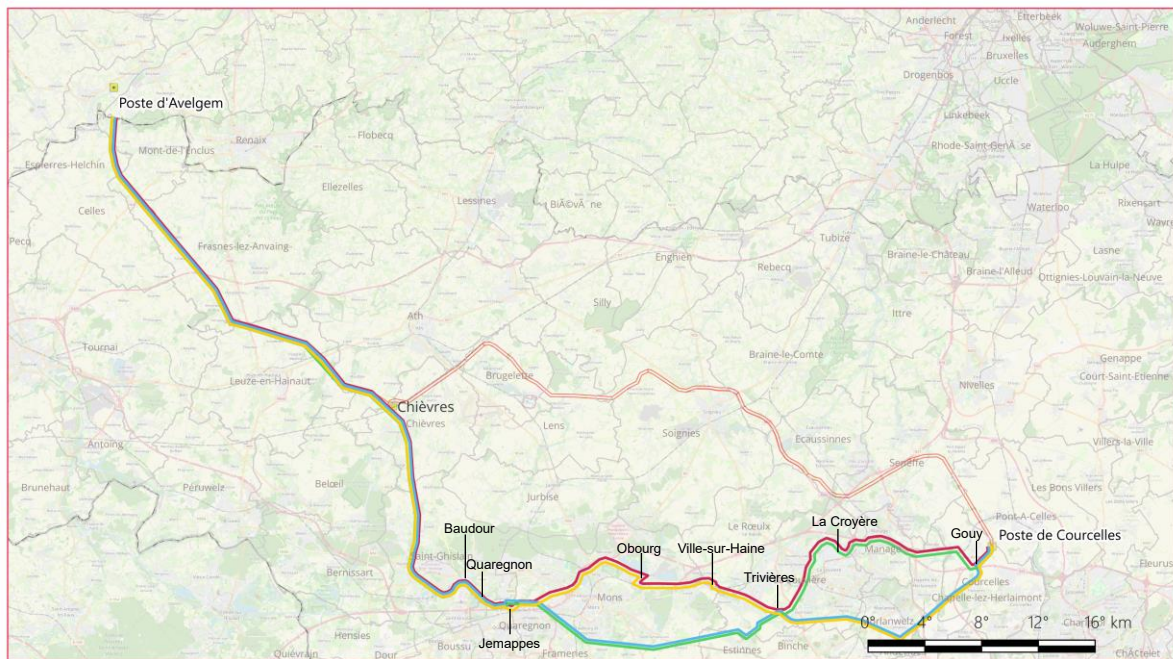
13. Le tracé formant une boucle depuis Gouy en passant par Feluy et La Croyère - Ce tracé est actuellement utilisé par une ligne 150 kV ;
14. Un réseau dense de tracés entre Ville-sur-Haine, Trivières, Bascoup et Gouy – Ces tracés sont actuellement utilisés par des lignes 150 kV.

L'alternative planologique considérée ici consiste à étudier la possibilité d'implanter la nouvelle liaison 380 kV au droit des tracés (existants ou projetés) déjà inscrits au plan de secteur. Le cas échéant, cela permettrait d'éviter l'inscription d'un nouveau périmètre de réservation tel que prévu par le projet et donc d'éviter ou de limiter les adaptations à apporter au plan de secteur.

D'un point de vue juridique, les réglementations successives depuis la loi organique de 1962 n'ont jamais imposé la détermination dans le plan de secteur du niveau de tension des liaisons électriques dont le tracé doit y être inscrit. En conséquence, les planches des plans de secteur ne comportent généralement pas d'indication sur le niveau de tension des liaisons auxquelles les tracés qui y sont inscrits se rapportent. Il arrive cependant que ce niveau de tension soit expressément précisé dans le dispositif de l'arrêté ayant adopté ou révisé le plan de secteur. Il se peut également que ce niveau de tension ait été pris en considération lors de la procédure préalable à l'inscription de ces tracés au plan de secteur pour apprécier l'opportunité de cette inscription, sur le plan environnemental notamment. L'implantation de la nouvelle liaison 380 kV au droit de tracés qui ont été inscrits précédemment au plan de secteur devrait vérifier au préalable cette question.

Tous les tracés « existants » et « projetés » ont été considérés. En effet, pour les tracés « existants », étant donné que les lignes 70kV et 150kV ne sont plus concernées par l'obligation d'inscription au plan de secteur en application des articles D.II.21 et R.II.21-2 du CoDT, elles pourraient être déplacées sans révision préalable du plan de secteur pour libérer le tracé inscrit au plan de secteur en vue de la construction d'une liaison d'un niveau de tension 380 kV (moyennant la vérification des travaux passés, au niveau de l'évaluation des incidences notamment, lors de l'inscription du tracé au plan de secteur - voir paragraphe précédent). Seule l'utilisation du tracé "existant" reliant la frontière régionale (Tubize) et Courcelles (tracé n° 9 ci-avant) n'a pas été envisagée. En effet, ce tracé est actuellement déjà utilisé par une ligne 380 kV qui doit obligatoirement être inscrite au plan de secteur et dont le déplacement nécessiterait dès lors, en soi, une révision du plan de secteur (sauf à réutiliser l'un des tracés déjà inscrits dont il a été tenu compte dans la présente analyse). Il ressort de l'analyse des tracés projetés et existants déjà inscrits au plan de secteur qu'il est possible de rejoindre la frontière régionale (à proximité du poste d'Avelgem) au poste de Courcelles via plusieurs itinéraires. La figure suivante présente les 4 principaux itinéraires possibles (Figure 71)¹¹⁶.

¹¹⁶ Ces itinéraires ont été identifiés afin de limiter la distance totale et les incidences environnementales de la liaison.



RAPPORT SUR LES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES RELATIF A LA REVISION DU PLAN DE SECTEUR – BOUCLE DU HAINAUT

- Périmètre de réservation
- Alternative planologique
- Postes de transformation
- Option 1
- Option 2
- Option 3
- Option 4

DEMANDEUR
ELIA ASSET S.A.
Boulevard de L'Empereur, 20
1000 Bruxelles

CHARGES D'ETUDE
Bureaux d'études **stratéc** & **SGS**
Av. Adolphe Lacombié 69-71 bte 8
1030 Bruxelles

Figure 71 : Itinéraires suivant les tracés “existants” et “projetés” inscrits au plan de secteur

Les 4 itinéraires sont identiques au projet de périmètre de réservation du dossier de base depuis la frontière régionale jusqu’au poste de Chièvres. A partir du poste de Chièvres, les 4 itinéraires s’écartent du projet de périmètre de réservation, mais restent identiques jusqu’à peu après le poste de Baudour.

La première grande option consiste à passer ensuite au-dessus de Mons, passer par les postes de transformation de Jemappes, Obourg, Ville-sur-Haine et Trivières et ensuite repiquer vers le Nord de La Louvière pour rejoindre les postes de La Croÿère, Gouy et enfin Courcelles.

La deuxième grande option contourne Mons par le Sud pour rejoindre le poste de Trivières. Il passe ensuite par le sud de La Louvière et Morlanwelz pour rejoindre les postes de Gouy et enfin Courcelles.

Les deux grandes combinaisons entre ces deux options qui sont envisageables consistent, depuis l’itinéraire passant au Sud de Mons d’ensuite remonter par le Nord de La Louvière ou depuis l’itinéraire passant au Nord de Mons de redescendre ensuite par le Sud de La Louvière.

L’intégralité des options suit des tracés “existants” inscrits au plan de secteur, qui sont actuellement utilisés par des lignes 150 kV existantes à l’exception de la portion de tracé entre les postes de Gouy et Courcelles qui s’inscrit sur un tracé projeté au plan de secteur qui n’est actuellement occupé par aucune ligne 150 kV. De plus, les options 1 et 4 suivent un tracé "projeté" entre les postes d’Obourg et de Ville-sur-Haine. Ce tracé projeté est actuellement utilisé par une ligne 150 kV existante.

L’analyse qui suit présente les principales implications d’une telle alternative en termes de mise en œuvre technique, d’incidences environnementales, de délai de procédure, de coûts et de sécurité du réseau.

6.4.1. ANALYSE DE LA MISE EN ŒUVRE TECHNIQUE

En ce qui concerne la mise en œuvre technique, il convient tout d'abord de souligner que la nouvelle liaison 380 kV ne peut pas être superposée aux infrastructures existantes. Ni l'ajout de conducteurs 380 kV sur les pylônes actuels, ni la construction de nouveaux pylônes au même emplacement portant simultanément les conducteurs 150 kV existants et les nouveaux conducteurs 380 kV ne constituent des solutions techniquement réalistes. En effet, les pylônes en place ne sont pas dimensionnés pour supporter des conducteurs supplémentaires de gabarit 380 kV. Quant à l'hypothèse consistant à ériger de nouveaux pylônes mixtes, elle se heurte à plusieurs contraintes majeures :

- La mise en place de pylônes mixtes nécessiterait de rendre indisponibles les lignes 150kV concernées durant le chantier (démontage des anciens pylônes et de construction des nouveaux pylônes), lignes qui sont indispensables pour l'approvisionnement de la région hennuyère ;
- regrouper plusieurs liaisons redondantes sur un même pylône serait électriquement inacceptable, puisqu'un incident, un défaut ou une opération de maintenance rendrait simultanément indisponibles plusieurs circuits essentiels à la sécurité d'approvisionnement.

L'alternative suppose dès lors le remplacement préalable des lignes existantes par de nouvelles liaisons (enterrées, en 150kV), avant leur démantèlement pour reconstruction au niveau de tension 380kV (en aérien). En effet, comme détaillé au point 3.4.3, le réseau 150 kV hennuyer arrive à saturation et joue un rôle structurant dans l'interconnexion des postes de la province. Un simple démontage n'est donc pas envisageable. Les lignes concernées devraient nécessairement être remplacées, en considérant la possibilité d'enfouissement conformément au SDT¹¹⁷, avant toute intervention sur l'infrastructure 380 kV. A ce titre, il est intéressant de mentionner que la ligne 150kV existante entre Ruien et Chièvres (numérotée 1 sur la Figure 70) arrivant en fin de vie, celle-ci fait déjà l'objet de travaux d'enfouissement (finalisation prévue pour 2027) et son démantèlement suivra courant 2028-2029 conformément aux permis et autorisations obtenus. Pour les autres lignes existantes, elles ne font pas encore l'objet de projet de renouvellement et la réutilisation des tracés concernés suppose donc leur démantèlement anticipé. Afin d'évaluer l'évolution dans le temps de la situation de référence sans chantiers anticipés, il est intéressant d'estimer l'importance de cette anticipation, c'est-à-dire le nombre d'années théoriques restantes pour l'exploitation des infrastructures qui seraient perdues en cas de démantèlement. Pour ce faire, le tableau suivant présente les années de mise en service des lignes 150 kV existantes concernées par les options 1 à 4 ainsi que la durée de vie restante estimée de chacune d'elle (Tableau 17). La durée de vie restante est calculée sur base de la durée de vie moyenne d'une ligne haute tension 150 kV. Celle-ci est complexe à estimer, car elle dépend de la durée de vie de chacun de ses composants (pylônes, conducteurs, isolateurs, accessoires, etc.) et d'autres facteurs (maintenance, conditions climatiques, etc.). Dans l'ensemble, il apparaît que les composants critiques montrent des durées de vie typiques de 40 à 70 ans¹¹⁸. La durée de vie des lignes est néanmoins prolongée par les

¹¹⁷ En effet, la mesure SA6.M3 du SDT stipule : « Lors de toute demande de permis pour la création ou le renouvellement d'une ligne à haute tension inférieure ou égale à 150 kV, analyser l'opportunité et la faisabilité de l'enfouissement des infrastructures dans le rapport sur les incidences environnementales. Planter les lignes à haute tension supérieure à 150 kV autant que possible dans les couloirs existants d'axes de transport et d'énergie. En cas de non-enfouissement, soutenir le développement de pylônes au design novateur et mobilisateur, qui limitent les effets négatifs sur l'avifaune et valorisent la trame paysagère en s'y intégrant.

¹¹⁸ CIGRE. *Extending the Life of Overhead Aging Assets with a Focus on the Energized Portion of Transmission and Distribution Lines*. <https://cigre-usnc.org/wp-content/uploads/2022/11/1D.1-Tamm-Extending-the-Life-of-Aging-Assets-Cigre-GOTF-2022-Final.pdf>

gestionnaires de réseau grâce à la maintenance et au remplacement ciblé des composants (cornières de pylônes, conducteurs, accessoires, isolateurs, etc.). Sur cette base, une fourchette réaliste de durée de vie est comprise 60 et 100 ans. Dans le cas présent, une durée de vie de 80 ans est considérée. Cette hypothèse n'a pas pour objectif de déterminer la date exacte de remplacement par Elia, mais bien d'estimer l'horizon de temps à partir duquel la réflexion sur l'avenir des liaisons existantes sera posée.

Tableau 17 : Evaluation de la durée de vie restante des lignes 150kV concernées

| Ligne 150kV | Tracés de l'alternative concernés (options 1 à 4) | Date de mise en service ¹¹⁹ | Durée de vie théorique restante |
|-----------------------------|---|--|---------------------------------|
| Ruien - Chièvres | 1, 2, 3, 4 | <i>Enfouissement en cours</i> | |
| Chièvres - Baudour | 1, 2, 3, 4 | 1959 | 13 ans |
| Baudour - Quaregnon | 2, 3 | 1959 | 13 ans |
| Quaregnon - Trivières | 2, 3 | 1932 | <i>Fin de vie</i> |
| Baudour - Jemappes | 1, 4 | 1959 | 13 ans |
| Jemappes - Obourg | 1, 4 | 1973 | 27 ans |
| Obourg - Ville-sur-Haine | 1, 4 | 1981 | 35 ans |
| Ville-sur-Haine - Trivières | 1, 4 | 1958 | 12 ans |
| Trivières - -La Croyère | 1, 3 | 1961 | 15 ans |
| La Croyère - Gouy | 1, 3 | 1973 | 27 ans |
| Trivières - Gouy | 2, 4 | 1932 | <i>Fin de vie</i> |

La durée de vie estimée permet de montrer que deux lignes 150 kV sont âgées de 94 ans et arrivent en fin de vie. Pour les autres, le démantèlement anticipé engendrerait une diminution de plusieurs années d'exploitation (évaluée entre 12 et 35 ans selon les lignes et les hypothèses considérées). L'alternative implique donc la suppression et le remplacement immédiat et non progressif des lignes 150 kV existantes au droit des tracés concernés.

L'implantation de la nouvelle liaison le long des tracés existants impose donc le démontage complet des lignes en place. Toutefois, les infrastructures actuelles ne sont ni récupérables ni adaptables pour un passage en 380 kV. Les pylônes existants présentent en effet des hauteurs sous consoles, des longueurs et espacements de console insuffisants ainsi que des fondations et des membrures incapables de reprendre les sollicitations mécaniques d'une ligne 380 kV. Il ne s'agit donc pas d'un renforcement possible, mais bien d'une démolition intégrale des lignes 150 kV suivie d'une construction d'une nouvelle ligne aérienne 380kV.

Enfin, le changement de niveau de tension entraîne également une modification d'échelle significative qui affecte l'implantation même de la ligne dans le tracé existant. Les pylônes 380 kV présentent un gabarit plus important, impliquant des fondations plus volumineuses et une emprise au sol accrue. En outre, la portée moyenne d'une ligne 380 kV (de l'ordre de 400 m) est supérieure à celle d'une ligne 150 kV (environ 300 m). Une reconstruction strictement « en lieu et place » conduirait donc à une augmentation du nombre de pylônes par rapport à ce qui est nécessaire. Cette reconstruction en lieu et place s'avère par ailleurs techniquement complexe compte tenu des constructions venues s'implanter à proximité des pylônes au cours du temps. A titre d'exemple, les photos suivantes illustrent cette complexité technique pour divers pylônes existants des liaisons concernées.

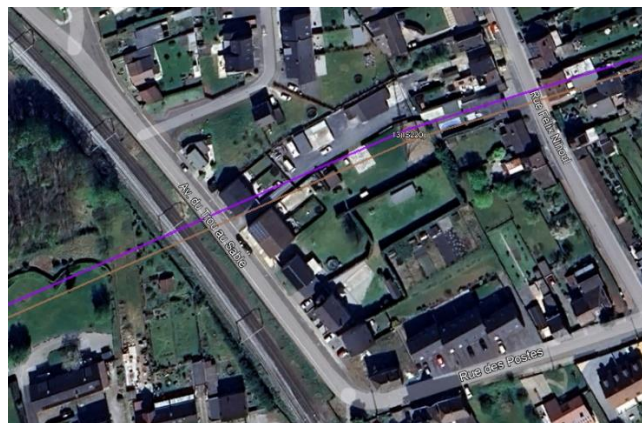
¹¹⁹ Certaines de ces lignes ont déjà fait l'objet de remplacements de composants. La date indiquée ici considère uniquement la mise en service, sur base de laquelle l'estimation de la durée de vie totale est réalisée.



Ligne 150 kV Gouy-Trivières (Pylône 33) : Deux nouvelles constructions sont venues s’implanter de part et d’autre du pylône existant engendrant un manque d’espace pour implanter un pylône 380 kV en lieu et place.



Ligne 150 kV Gouy-Trivières (Pylône 4) : L’îlot d’époque de 8 m de côté construit en arrondi en pierres de taille serait trop petit pour implanter un pylône d’angle 380 kV.



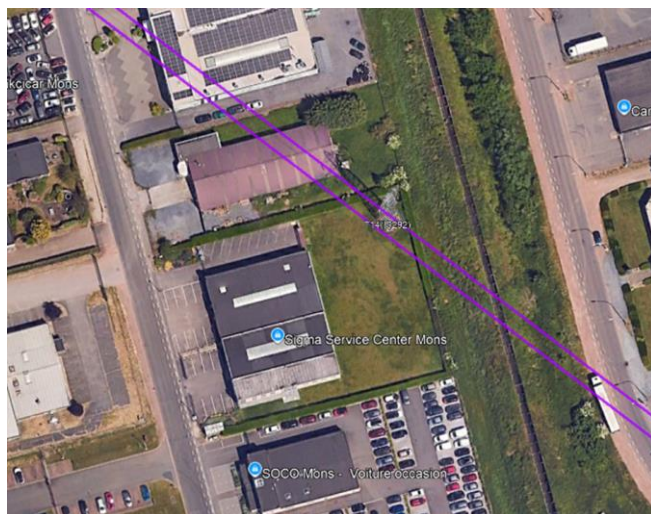
Ligne 150 kV Baudour- Obourg (Pylône 13) : Pylône encerclé par trois rues et par des jardins privés. L’implantation d’un pylône en lieu et place nécessiterait de trouver un accord avec tous les propriétaires privés pour créer un chemin d’accès pour charroi lourd (grues de levage, nacelles, engins de chantier, mixers à béton, etc).



Ligne 150 kV Baudour-Obourg (Pylône 10) : L'entrepôt a été construit en « contournant » le pylône P10. Il en résulte une impossibilité technique de reconstruire ce pylône d'angle en lieu et place.



Ligne 150 kV Quaregnon-Trivières (Pylônes 15 et 16) : Pylônes inscrits en zone disposant peu d'espace pour une emprise au sol supérieure.



Ligne 150 kV Quaregnon-Trivières (Pylônes 14) : Pylône situé en arrière parcelle (privée) à l'accès compliqué et nécessitant l'accord de propriétaire privé¹²⁰.

Figure 72 : Illustration de la complexité technique à reconstruire les pylônes en lieu et place des pylônes existants

En outre, les plus grandes portées d'une ligne 380 kV engendrent également des angles de cheminement différents que pour une ligne 150kV.

En conclusion, la construction d'une ligne 380 kV sur le tracé d'une ligne 150 kV existante implique une emprise au sol plus importante, une implantation des pylônes partiellement différente (qui s'écarterait du tracé inscrit au plan de secteur) et des surplombs modifiés.

6.4.2. ANALYSE DES INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES

Méthodologie

Dans le cadre de cette alternative, la liaison 380 kV constitue une nouvelle infrastructure de transport d'électricité, correspondant à un projet distinct qui tirerait parti de tracés déjà inscrits au plan de secteur, indépendamment de la présence actuelle de lignes 150 kV au sein de ceux-ci. L'analyse qui suit se concentre dès lors, dans un premier temps, sur les incidences environnementales associées à l'implantation d'une ligne aérienne 380 kV sur ces tracés et les compare aux incidences identifiées pour le tracé du dossier de base.

Dans un second temps, l'analyse s'intéresse aux incidences différentielles, c'est-à-dire aux incidences supplémentaires qui résultent de la mise en œuvre de la nouvelle infrastructure dans un contexte où des lignes électriques sont déjà présentes. Elle s'intéresse donc aux incidences relatives au démantèlement et à l'enfouissement des lignes existantes ainsi qu'à la mise en œuvre d'une ligne 380kV en place des lignes 150kV existantes. Cette approche permet de distinguer les effets liés à la modification d'échelle de l'infrastructure et de l'enfouissement des lignes existantes, de ceux déjà associés à la situation existante.

¹²⁰ En effet, la parcelle étant clôturée,

Incidences environnementales de la mise en œuvre d'une ligne haute tension 380 kV en place des lignes existantes 150kV en comparaison au tracé du dossier de base

Afin d'identifier les principales incidences environnementales liées à l'implantation d'une infrastructure 380 kV, les figures suivantes présentent les principales contraintes environnementales du territoire pour les itinéraires de l'alternative et le projet de périmètre de réservation du dossier de base.

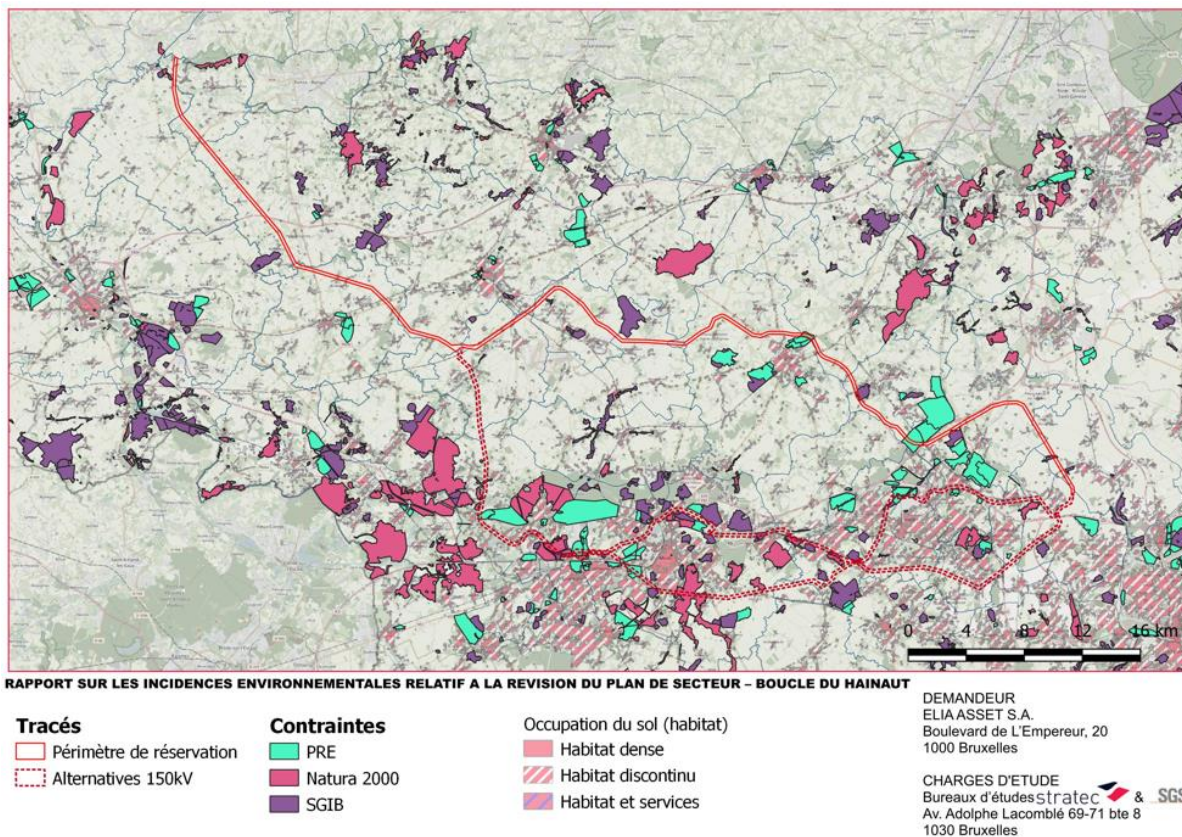


Figure 73 : Contraintes environnementales des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation (PRE= Périmètre de reconnaissance économique)

Les itinéraires (et donc les contraintes environnementales) étant les mêmes pour le projet de périmètre de réservation que pour les itinéraires de l'alternative jusqu'au poste de Chièvres¹²¹, la figure et l'analyse qui suit se concentrent sur la portion des itinéraires entre les postes de Chièvres et de Courcelles.

¹²¹ Il est toutefois à noter qu'un périmètre de réservation de 200m de large offre une flexibilité plus importante pour l'inscription d'une ligne haute tension par rapport à la réutilisation pure et simple des tracés inscrits au plan de secteur. La mise en œuvre via un périmètre de réservation est donc susceptible de limiter les incidences environnementales.

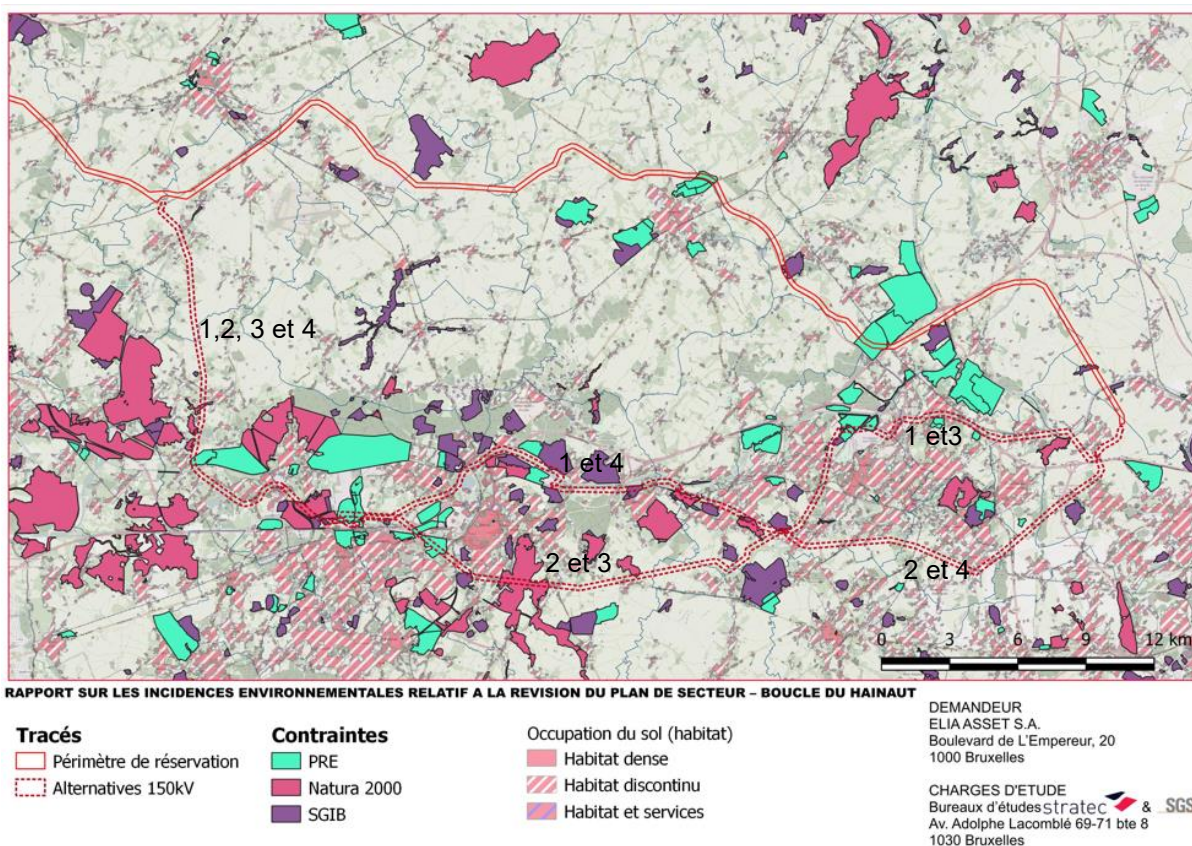


Figure 74 : Contraintes environnementales des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation – Zoom sur la zone entre les postes de Chièvres et de Courcelles (PRE= Périmètre de reconnaissance économique)

Le tableau et la figure suivants présentent une comparaison des principales contraintes associées aux itinéraires de l'alternative et au projet de périmètre de réservation entre les postes de Chièvres et de Courcelles. En vue d'avoir des scénarios comparables, l'analyse a été faite pour un périmètre de 200m de large sur l'ensemble des itinéraires¹²².

Tableau 18 : Comparaison des contraintes environnementales des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation entre les postes de Chièvres et de Courcelles

| | Longueur (km) | Nombre habitations | Superficie zones d'habitation (ha) | Superficie SGIB* (ha) | Superficie Natura 2000 (ha) | Superficie PIP Adesa* (ha) | Superficie PRE* (ha) | Superficie agricole (ha)- |
|---------------------------------|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|
| Option 1 | 62,2 | 1688 | 134,8 | 58,9 | 40,3 | 62,8 | 41,5 | 576,6 |
| Option 2 | 59,7 | 1422 | 108,4 | 16,3 | 66,8 | 86,2 | 70,6 | 658,3 |
| Option 3 | 61,2 | 1362 | 110,3 | 29,1 | 66,8 | 78,5 | 91,3 | 706,5 |
| Option 4 | 60,7 | 1748 | 132,9 | 46,1 | 40,3 | 70,6 | 20,8 | 562,9 |
| Périmètre de réservation | 55,1 | 130 | 8,2 | 14,1 | 0,0 | 152,4 | 42,3 | 1143,7 |

*SGIB = Sites de Grand Intérêt Biologique
 PIP= Périmètre d'intérêt paysager
 PRE= Périmètre de reconnaissance économique

¹²² Un périmètre de 100m de part et d'autre des lignes existantes a été considéré pour les tracés de l'alternative. Cette méthodologie est nécessaire pour avoir des scénarios comparables. De plus, comme détaillé plus haut, l'emplacement des pylônes et des conducteurs ne sera pas tout à fait similaire pour des raisons techniques.

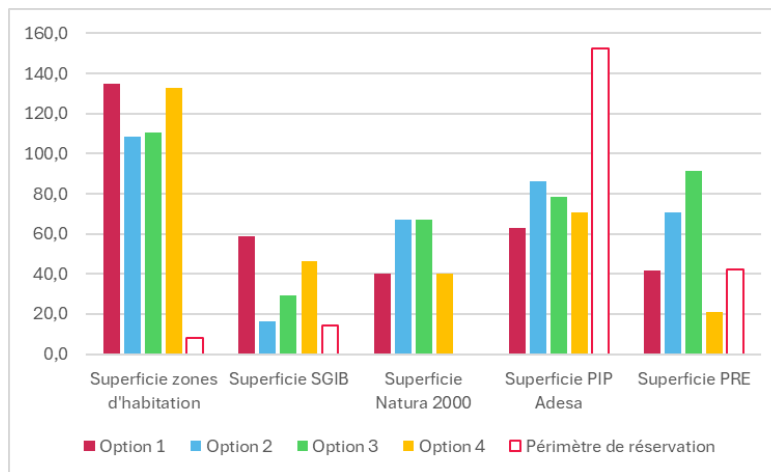


Figure 75 : Comparaison des contraintes environnementales (en ha) des itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur et du projet de périmètre de réservation entre les postes de Chièvres et de Courcelles

En premier lieu, il apparaît que l'ensemble des itinéraires de l'alternative sont plus longs que le projet de périmètre de réservation¹²³. Ces tracés sont donc moins directs et engendrent des incidences environnementales sur une plus grande distance que le projet.

Ensuite, une différence significative réside dans le nombre d'habitations comprises dans le périmètre de 200m de large. Les tracés alternatifs comprennent entre 1362 et 1748 habitations contre seulement 130 pour le projet de périmètre de réservation soit 10,5 à 13,5 fois plus que celui-ci. Cela se répercute logiquement sur les superficies reprises en zone d'habitat (à caractère rural) au plan de secteur qui sont également bien plus élevées pour les 4 itinéraires alternatifs que pour le projet de périmètre de réservation. Une telle alternative impacterait donc un beaucoup plus grand nombre de riverains, tant en phase de chantier qu'en phase d'exploitation.

En ce qui concerne la biodiversité, les alternatives impactent plus de superficies reprises en Sites de Grand Intérêt Biologique que le projet de périmètre de réservation et, contrairement au projet, elles survolent diverses zones Natura 2000 :

- « Bord nord du bassin de la Haine » - code BE32012 (commune de Saint-Ghislain) ;
- « Vallée de la Haine en aval de Mons » - code BE32017 (commune de Saint-Ghislain) ;
- « Vallée de la Trouille » - code BE32019 (commune de Mons) ;
- « Vallée de la Haine en amont de Mons » - code BE32014 (commune de Mons).

Les alternatives présentent un moindre impact sur les périmètres d'intérêt paysager (moins nombreux en région densément peuplée) et sur les superficies agricoles que le projet de périmètre de réservation ainsi qu'un impact variable selon l'itinéraire retenu sur les périmètres de reconnaissance économique.

Dans l'ensemble, les alternatives s'inscrivent donc en zones très densément urbanisées impactant un bien plus grand nombre d'habitations que le projet de périmètre de réservation. Du point de vue de la biodiversité, les alternatives présentent des incidences plus importantes sur des zones Natura 2000 et des SGIB que celles du projet de périmètre de réservation. Les alternatives permettent toutefois de diminuer l'impact sur les zones d'intérêt paysager. Il apparaît globalement que les bénéfiques paysagers

¹²³ Les itinéraires suivant les tracés existants et projetés inscrits au plan de secteur présentent une longueur 8 à 12,8% plus importante que le tracé du périmètre de réservation

permis par les itinéraires alternatifs (diminution de l'impact sur les PIP) ne contrebalancent pas les contraintes environnementales significativement plus importantes en termes de zones d'habitations et zones Natura 2000.

Analyse des incidences différentielles de l'alternative

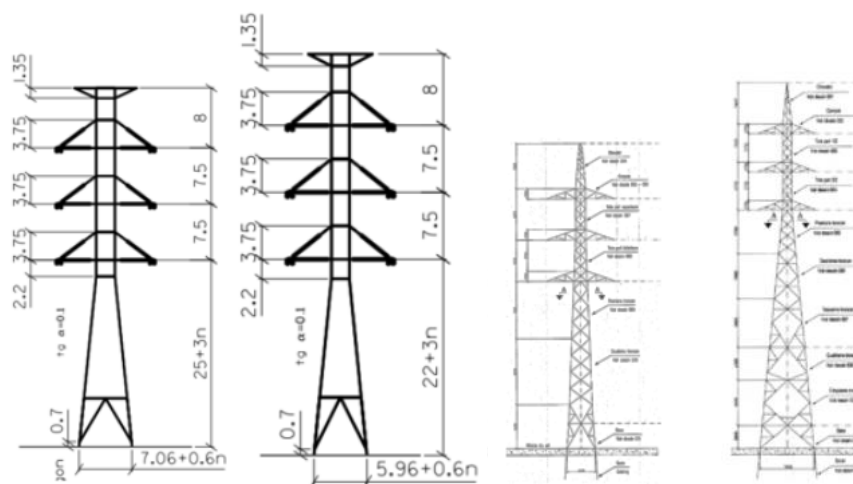
Il ressort de l'analyse de la mise en œuvre technique que la mise en place d'une ligne 380 kV sur le tracé de la ligne 150 kV existante implique des surplombs différents, une plus grande emprise au sol, et une modification de la localisation des pylônes en comparaison aux lignes 150 kV. Les lignes 150kV existantes traversent des zones densément peuplées, leur environnement et leurs incidences ont donc évolué depuis leur inscription au plan de secteur, et leur construction. Ainsi, des habitations construites postérieurement à l'implantation des lignes existantes pourraient se retrouver sous les nouveaux surplombs et des acquisitions foncières supplémentaires pourraient être nécessaires.

Même dans l'hypothèse théorique où les pylônes 380 kV seraient implantés exactement à l'emplacement des pylônes existants, les caractéristiques intrinsèques d'une ligne 380 kV entraîneraient des incidences environnementales supplémentaires par rapport à la situation actuelle.

En termes d'**occupation au sol et de paysage**, les pylônes d'une ligne 380 kV présentent des dimensions significativement plus importantes que ceux d'une ligne 150 kV existante¹²⁴. À titre indicatif, la hauteur moyenne d'un nouveau pylône 380 kV est supérieure d'environ 10 m par rapport aux pylônes 150 kV existants (qui présentent une hauteur moyenne de 45 m). Leur emprise au sol (fondations profondes comprises) est également plus importante, de l'ordre de 400 m² pour une ligne 380 kV contre environ 300 m² pour une ligne 150 kV.

La structure des pylônes diffère également : les pylônes 380 kV présentent une silhouette plus massive et des membrures renforcées afin de supporter les sollicitations mécaniques liées aux conducteurs de plus grande section et aux portées plus importantes (Figure 76).

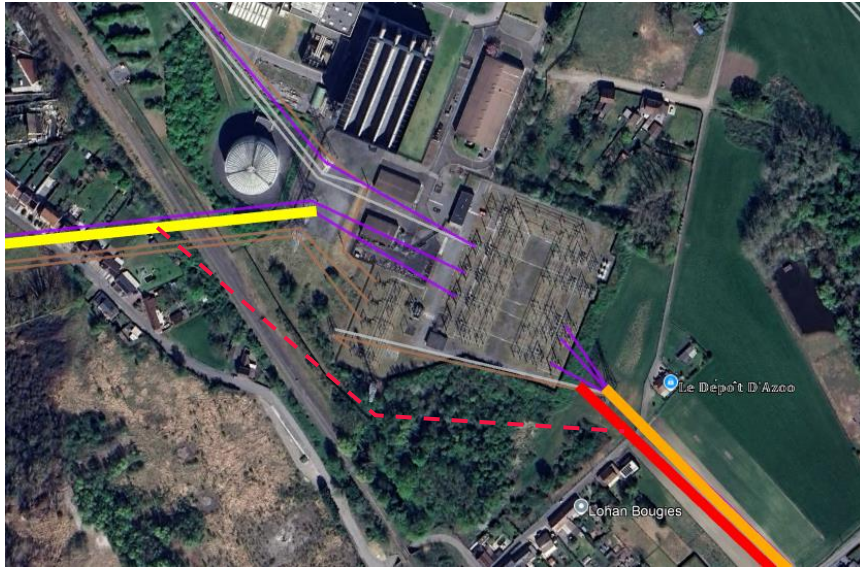
¹²⁴ Les lignes 150kV concernées ont été construites avec des normes de résistance inférieures aux normes actuelles.



| | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| Tension | 380 kV | 380 kV | 150 kV | 150 kV |
| Angle max (GON) | 15 | 3 | 20 | 00 |
| H sous consoles | 25 | 31 | 21 | 31,3 |
| H totale | 48 | 54 | 37 | 48 |
| L pied | 7,06 | 7,76 | 3,32 | 7.1 |

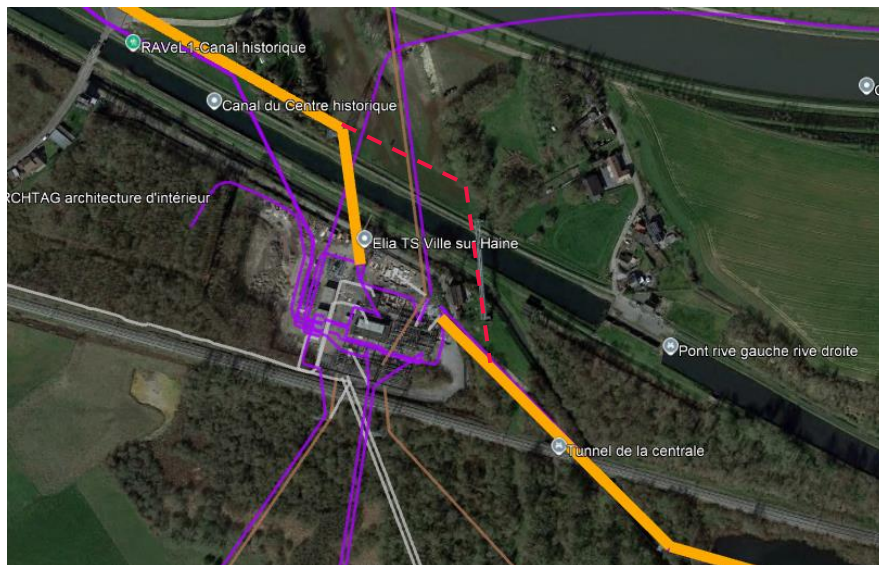
Figure 76 : Comparaison du gabarit d'un petit pylône 150 kV (angle 20 GON – hauteur 37 m) et moyen pylône 150kV (hauteur 48m) et de pylônes 380kV aux caractéristiques similaires (hauteur 58 et 54m) (source :Elia)

Une autre particularité impactante en termes paysagers tient au fait que, contrairement aux lignes 150 kV qui relient directement les postes de transformation, la ligne 380 kV ne se connecterait pas à ces postes intermédiaires et devrait donc les contourner avec des angles importants imposant la mise en œuvre de pylônes d'angle plus imposants. Or, ces postes constituent des nœuds du réseau auxquels convergent plusieurs lignes existantes. Leur contournement implique dès lors, dans certains cas, le croisement d'autres lignes électriques. Ces croisements nécessitent l'implantation de pylônes plus élevés et plus robustes, ce qui accentue encore l'impact paysager de l'infrastructure. Une première analyse indique qu'un contournement sans croisement est possible pour certains postes, notamment Trivières, La Croyère et Baudour. En revanche, pour le poste de Ville-sur-Haine, un contournement sans croisement apparaît techniquement impossible. Par ailleurs, ces contournements s'inscrivent parfois dans des zones déjà fortement contraintes du point de vue urbanistique ou environnemental et pourraient nécessiter de nouvelles acquisitions foncières. La figure ci-dessous illustre ces contraintes.



--- Contournement du poste en évitant les croisements

Poste de Baudour : Le contournement du poste en évitant les croisements nécessite de passer au sud de celui-ci, sur une zone boisée.



--- Contournement du poste en évitant les croisements

Poste de Ville-sur-Haine : Le contournement du poste est impossible sans croisement de lignes existantes : un croisement par le nord en zone contrainte (canal), nombreux croisements par le sud et zone boisée.

Figure 77 : Illustration de la complexité technique à contourner les postes de transformation

Il est également à souligner que l'écartement de l'itinéraire inscrit au plan de secteur qu'impliquent ces contournements pourra nécessiter des révisions du plan de secteur. Ces contournements peuvent par ailleurs contraindre les extensions futures des postes électriques concernés (par ex. pour solutionner des besoins d'électrification/congestion).

Le nombre de conducteurs aériens de la ligne dimensionnée¹²⁵ pour la boucle de Hainaut est plus important que celui des lignes actuelles 150 kV. Le diamètre de chaque conducteur est également plus grand pour la ligne 380 kV, augmentant également leur impact visuel.

Dans l'ensemble, les pylônes de la ligne 380 kV seraient visibles depuis des distances plus importantes et produiraient un impact paysager plus marqué que les pylônes 150 kV actuels (en particulier à proximité des postes de transformation), ce qui pourrait également influencer la valeur immobilière des nombreux biens situés à proximité.

Les **nuisances sonores** associées à une ligne haute tension sont principalement liées à l'effet couronne. Ce phénomène est plus marqué pour les lignes 380 kV que pour les lignes 150 kV. Les estimations indiquent que le niveau sonore généré par une ligne 380 kV peut être environ deux fois supérieur à celui d'une ligne 150 kV. Compte tenu du caractère densément urbanisé de certaines portions des tracés étudiés, un nombre significatif d'habitations serait susceptible d'être exposé à des niveaux de bruit plus élevés qu'en situation actuelle.

Le passage de 150 kV à 380 kV entraîne également une augmentation de l'étendue des **champs électromagnétiques**. Pour une ligne 150 kV, un champ magnétique supérieur à 0,4 µT est généralement observé sur une largeur d'environ 34 m autour de la ligne¹²⁶. Pour une ligne 380 kV, cette largeur est d'environ 61 m. Une analyse réalisée sur le tracé le moins impactant pour ce critère (option n°3 de la Figure 3) indique qu'en situation actuelle environ 350 habitations sont exposées à un champ supérieur à 0,4 µT. Dans le scénario de remplacement par une ligne 380 kV, environ 350 habitations supplémentaires seraient exposées à un champ supérieur à ce seuil, portant le total à environ 700 habitations. Par ailleurs, les habitations déjà exposées en situation actuelle seraient soumises à des niveaux de champ plus élevés. Pour rappel, le projet de périmètre de réservation comprend 130 habitations entre les postes de Chièvres et de Courcelles (qui ne seraient pas toutes concernées par un champ supérieur à 0,4µT)¹²⁷.

En **phase de chantier**, la construction d'une ligne aérienne et la démolition des lignes 150 kV nécessitent la mise en place de zones de chantier importantes autour de chaque pylône (environ 50 m × 50 m), ainsi que des accès temporaires d'une largeur d'environ 5 m. Ces aménagements impliquent des travaux de terrassement et, le cas échéant, des opérations d'élagage ou de déboisement lorsque la ligne surplombe des zones boisées. La réalisation de tels travaux au sein ou à proximité immédiate de sites Natura 2000 est susceptible de générer des perturbations supplémentaires pour les habitats et les espèces d'intérêt communautaire. Dès lors, les incidences liées à la phase de chantier des tracés alternatifs apparaissent potentiellement importantes pour la biodiversité que celles associées au projet de périmètre de réservation, lequel ne concerne aucun site Natura 2000.

Indépendamment des incidences accrues sur la biodiversité liées au survol de zones Natura 2000, l'alternative reposant sur les tracés 150 kV implique également un chantier intrinsèquement plus complexe et plus étendu. En effet, sa mise en œuvre nécessite, dans un premier temps, l'enfouissement et le démantèlement complet des lignes 150 kV existantes, avant de pouvoir entamer les travaux de construction de la nouvelle ligne 380 kV. Cette succession d'interventions entraîne une augmentation

¹²⁵ 6 faisceaux de 4 conducteurs (soit 24 conducteurs de phase au total) pour la ligne 380 kV contre 6 conducteurs de phase au total pour les lignes 150 kV actuelles.

¹²⁶ 34m pour les lignes non transposées et 13m pour les lignes transposées.

¹²⁷ Le nombre de maisons concernées par des champs supérieurs à 0,4 µ T dépendra de la position de la future ligne.

du volume global de travaux ainsi qu'un allongement de la durée des chantiers (pouvant être estimé à 10 ans au total pour les communes concernées). Par conséquent, les incidences liées à la phase de chantier en termes de nuisances temporaires, d'impact sur la mobilité, d'occupation du sol, de biodiversité et de perturbations locales seraient globalement plus importantes et plus durables pour l'alternative que pour le projet de périmètre de réservation. Cet impact accru est d'autant plus important que l'alternative s'inscrit en zone dense en zone d'habitat.

L'alternative suppose également le **remplacement des lignes 150 kV existantes par des câbles souterrains** sur une longueur¹²⁸ estimée à environ 75 km selon les itinéraires envisagés. La réalisation de ces liaisons souterraines implique des incidences environnementales significatives, en particulier durant la phase de chantier. Pour rappel, les incidences associées aux liaisons souterraines sont exposées au point 4.6.1.

Les estimations techniques indiquent que la pose d'un câble 150 kV nécessite une tranchée d'environ 2 m de largeur et une largeur totale de chantier de 20 m sur l'ensemble du linéaire concerné. Un tel chantier présente des incidences importantes pour les sols et leur structure, la biodiversité, les activités socio-économiques et les infrastructures traversées. Ces incidences sont d'autant plus sensibles que le territoire concerné est fortement contraint, avec la présence de zones résidentielles, de zones d'activités économiques, de sites Natura 2000 et de Sites de Grand Intérêt Biologique, rendant inévitables de nombreux contournements.

Par ailleurs, l'intégration de ces câbles dans le réseau nécessiterait l'installation de cinq à six réacteurs shunt dans les postes afin de compenser la puissance réactive générée par les câbles. Ces équipements sont eux-mêmes source de nuisances sonores permanentes.

Enfin, les câbles 150 kV généralement posés en voiries publiques génèrent également des champs électromagnétiques supérieurs à 0,4 μ T sur une largeur généralement comprise entre 5 et 10 m selon la configuration des circuits, ce qui pourrait exposer de nouvelles habitations à ces champs.

Le tableau suivant compare, sous forme de synthèse, les incidences existantes (liées aux lignes 150 kV en place) et projetées en cas de mise en œuvre de l'alternative (comprenant l'implantation d'une ligne 380 kV en lieu et place des lignes 150 kV et l'enfouissement des lignes 150 kV) afin de mettre en évidence les incidences différentielles que cela implique.

¹²⁸ La longueur en câbles est estimée en ajoutant 30% à la longueur des lignes actuelles. La distance en câble est plus longue qu'en ligne en raison du contournement de certaines zones telles que les zones protégées.

Tableau 19 : Comparaison des incidences en situation existante et en cas de mise en œuvre de l'alternative 150 kV

| | Lignes 150 kV existantes | Alternative 150 kV | |
|----------------------------------|--|---|---|
| | | Nouvelle ligne 380 kV en place des lignes 150 kV | Nouveaux câbles 150 kV |
| Occupation du sol | Occupation permanente au sol pour les pylônes de 300 m² (soit 17 sur 17m) | <p><u>Chantier :</u> 50x50m autour des pylônes durant le chantier</p> <p><u>Exploitation :</u> Occupation permanente plus importante au sol pour les pylônes de 400 m² (soit 20 sur 20 m)</p> | <p><u>Chantier :</u> Tranchée de 2m de large sur une largeur totale d'intervention de 20m et sur une longueur de plus de 75km.</p> <p><u>Exploitation :</u> Occupation permanente au sol pour les réacteurs shunt (5 à 6) et occupation du sol contrainte au-dessus du câble (3m)</p> |
| Paysage / impact visuel | Les pylônes en place font en moyenne 45 m de hauteur et sont visibles tout au long de la ligne. | <p>Les nouveaux pylônes 380 kV ont en moyenne une hauteur supérieure de 10m par rapport aux pylônes existant et sont visibles sur une plus grande distance tout au long de la ligne.</p> <p>De nombreux pylônes d'angles, plus hauts et plus robustes sont nécessaires pour contourner les postes 150kV qui se trouvent sur le tracé. De nouvelles acquisitions foncières sont nécessaires.</p> | <p>Armoires de cross-bonding visibles (équivalent des puits d'inspection en 150kV).</p> <p>Effet limité de l'impact des réacteurs shunt, préférentiellement ajoutés dans les postes de transformation.</p> |
| Nuisances sonores | Effet couronne intermittent. | Effet couronne intermittent. Niveau sonore supérieur à une 150kV. | Nuisances permanente des réacteurs shunt |
| Champs électromagnétiques | Champs magnétiques (>0,4μT) sur une largeur ¹²⁹ de 34m. | Champs magnétiques (>0,4μT) sur une largeur ¹³⁰ de 61m. Sur le tracé le moins impactant pour ce critère (option n°3 de la Figure 71), | Champs magnétiques (>0,4μT) sur une largeur d'environ 5 à 10 m selon la technique de pose des câbles, |

¹²⁹ La largeur renseignée correspond à la largeur du couloir au sein de laquelle les champs électriques moyens à 1,5m du sol sont plus élevés que 0,4 μT.

¹³⁰ La largeur de 61 m correspond à la largeur du couloir au sein de laquelle les champs électriques moyens à 1,5m du sol sont plus élevés que 0,4 μT. Ce concept est détaillé dans l'analyse des incidences du chapitre Champs électromagnétiques. Cette valeur est estimée sur base du courant annuel moyen, estimé à 35% dans le cadre du projet Boucle du Hainaut.

| | | | |
|---------------------|--|--|--|
| | Sur le tracé le moins impactant pour ce critère (option n°3 de la Figure 71), 350 habitations sont exposées à un champ supérieur à 0,4μT. | 350 habitations supplémentaires seront exposées à un champ supérieur à 0,4 μT, soit 700 habitations au total. De plus, les 350 habitations déjà soumises à un champ supérieur à 0,4 μT en situation existante seront soumises à des champs plus importants. | impactant potentiellement de nouvelles habitations. |
| Biodiversité | Surplomb de zone Natura 2000 et de Sites de grand intérêt biologique. | <u>Chantier :</u> Impact important lié au chantier de démolition/reconstruction en zones protégées. <u>Exploitation :</u> Surplomb de zone Natura 2000 et de Sites de grand intérêt biologique. | Effet limité, l'itinéraire des câbles évitant probablement les zones protégées |
| Planologie | - | Révisions locales du plan de secteur potentiellement nécessaires compte tenu de la nécessité de contourner les postes de transformation auxquels la ligne 380kV ne se connecte pas. | Pas de révision de plan de secteur pour les liaisons dont la tension est inférieure ou égale à 150 kV (Article R.II.21-2 du CoDT). |

L'analyse des incidences différentielles montre que la mise en œuvre de l'alternative étudiée entraînerait une augmentation significative des incidences environnementales par rapport à la situation actuelle. Ces incidences sont supérieures aux incidences du projet de périmètre de réservation.

En effet, cette alternative combine :

- la construction d'une nouvelle ligne aérienne 380 kV présentant un gabarit plus important ;
- le démantèlement des lignes 150 kV existantes ;
- la réalisation d'environ 75 km de liaisons souterraines.

Elle conduit ainsi à pérenniser l'utilisation de corridors historiques et sous-optimaux qui n'ont pas été conçus pour accueillir une infrastructure de ce gabarit et qui traversent aujourd'hui des territoires fortement urbanisés ou contraints.

6.4.3. ANALYSE DE L'IMPACT SUR LA STABILITÉ DU RÉSEAU

D'un point de vue de la **stabilité du réseau**, la présence d'une ligne 380 kV au plus près des grands consommateurs industriels du Hainaut est structurellement favorable. Cette alternative représente une opportunité de modifier le poste de repiquage, et de le réaliser sur les postes plus proches des centres de consommation (tel que Ville-sur-Haine). Cela nécessiterait toutefois des investissements et des impacts locaux pour l'agrandissement de celui-ci. En revanche, l'enfouissement massif de liaisons 150 kV génère une production importante de puissance réactive qui nécessiterait l'installation de plusieurs réacteurs shunt pour la compenser. De plus, une telle concentration de câbles dans une même région engendre un risque accru d'instabilité de tension, une dépendance forte au bon fonctionnement des réacteurs shunts ainsi que de potentielles difficultés de régulation en cas de défaut (N-1-1, soit une indisponibilité pour maintenance et une suite à un incident). Par ailleurs, rappelons que les temps de réparation d'un câble souterrain sont significativement plus longs que ceux d'une ligne aérienne et que plusieurs liaisons comporteraient des repiquages, augmentant la complexité opérationnelle.

La résilience du réseau hennuyer serait donc potentiellement réduite par rapport à une solution intégrant directement la nouvelle ligne 380 kV dans un nouveau tracé.

6.4.4. ANALYSE DE L'IMPACT SUR LES DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE ET LES COÛTS

Le phasage temporel propre à cette alternative a un impact direct et significatif sur les **délais de mise en service** de la Boucle du Hainaut. Pour rappel, il prévoit successivement : (1) la construction et la mise en service des nouvelles liaisons 150 kV destinées à remplacer les lignes existantes, (2) le démantèlement des lignes aériennes actuelles après la mise en service des liaisons de remplacement et (3) la construction de la nouvelle ligne 380 kV.

Ce séquençage crée une dépendance technique stricte entre les différentes étapes et génère une complexité logistique plus importante. Chaque phase conditionne le lancement de la suivante, ce qui limite fortement les possibilités de parallélisation des travaux et accroît la vulnérabilité du calendrier global.

Sur le plan procédural, cette alternative entraîne une multiplication des démarches administratives. Des autorisations devront être obtenues pour :

- l'enfouissement ou la reconstruction des liaisons 150 kV ;
- le démantèlement des pylônes et infrastructures existantes ;

- la construction de la nouvelle ligne 380 kV.

Afin d'éviter tout conflit entre procédures, la demande de permis relative à la construction de la nouvelle ligne 380 kV ne pourra raisonnablement être introduite qu'une fois les autorisations nécessaires à la démolition et construction des nouvelles liaisons 150 kV auront été obtenues. Il en résulte un enchaînement procédural contraignant, dans lequel tout retard affectant une phase se répercute sur l'ensemble du calendrier.

Au-delà des délais administratifs, des contraintes techniques incompressibles s'imposent également. Le maintien de la sécurité d'approvisionnement impose notamment la mise en service effective des nouvelles liaisons 150 kV avant tout démantèlement des lignes existantes. De même, la construction de la nouvelle infrastructure 380 kV ne pourra débuter qu'une fois les emprises libérées. Ces interdépendances successives allongent nécessairement la durée globale de réalisation pour la mise en service finale de la Boucle du Hainaut.

Il peut être raisonnablement estimé que cette alternative entraînerait un décalage de l'ordre de sept à huit années (sans tenir compte d'éventuels recours) par rapport au calendrier actuel de la Boucle du Hainaut. Ce risque d'allongement est d'autant plus marqué qu'une opposition locale est prévisible, compte tenu de l'ampleur des tranchées nécessaires pour l'enfouissement des lignes aériennes existantes et des modifications de gabarit et de surplomb induites par le passage de 150 kV à 380 kV. L'obtention des autorisations n'est par ailleurs pas garantie eu égard des impacts environnementaux en jeux.

La multiplication des procédures accroît par ailleurs le risque de recours et d'effets domino entre autorisations successives. Or, tout allongement des délais impacte directement la disponibilité de la Boucle du Hainaut et, par conséquent, la capacité du réseau à répondre aux besoins croissants de transit d'électricité et d'intégration des productions renouvelables. Ces besoins ont été démontrés au Chapitre 3 et constituent un élément structurant de la justification du projet.

D'un point de vue des **coûts**, cette alternative présente également des surcoûts en comparaison au projet de révision du plan de secteur. Ces surcoûts résultent principalement de la perte de plusieurs années d'exploitation pour les lignes 150 kV qui ne sont pas en fin de vie qui seront démontées et d'enfouies anticipativement ¹³¹.

6.4.5. CONCLUSION SUR L'ANALYSE DE L'ALTERNATIVE PLANOLOGIQUE

Cette alternative présente le principal avantage de plus rapidement diminuer le nombre de lignes aériennes de transport d'électricité dans la province du Hainaut. En effet, l'alternative permet d'implanter la ligne 380 kV le long de tracés inscrits au plan de secteur déjà largement occupés par des lignes haute tension aériennes qui seraient préalablement démantelées et enfouies (comme c'est en cours pour la ligne entre Ruien et Chièvres). Néanmoins, l'examen des incidences environnementales globales et différentielles montre que la réalisation de la nouvelle ligne 380 kV projetée au droit des tracés disponibles au plan de secteur serait la cause d'impacts défavorables significativement plus importants que ceux qui seraient causés par la réalisation d'une ligne selon un tracé alternatif actuellement non

¹³¹ Le coût de l'enfouissement de ces liaisons peut être estimé à au moins 450 M€. Ces coûts seraient donc anticipativement rencontrés, et non justifiés par la nécessité de remplacer une ligne en fin de vie. Ces coûts seront de toute façon rencontrés par Elia à mesure que les infrastructures arrivent en fin de vie. En revanche, l'alternative engendre un surcoût lié à la perte d'années d'exploitation des infrastructures qui ne sont pas en fin de vie.

inscrit dans son ensemble au plan de secteur. Dans ce contexte, il faut souligner que la plupart des tracés actuellement inscrits au plan de secteur n'ont jamais fait l'objet d'une évaluation environnementale¹³². Implanter une ligne 380 kV en place de ces lignes existantes viendrait à pérenniser une infrastructure aux impacts importants pour des dizaines d'années supplémentaires.

En conclusion, l'analyse démontre que l'alternative consistant à implanter la ligne 380 kV exclusivement au droit des tracés inscrits au plan de secteur ne constitue pas une solution optimale au regard des objectifs de cohérence environnementale, de sécurité d'approvisionnement et de maîtrise des délais. Elle conforte la nécessité d'une révision du plan de secteur afin de permettre l'inscription d'un périmètre de réservation. Suite à la présente analyse, l'alternative n'est donc pas retenue.

6.5. Analyse de la pertinence de la localisation des composantes (Points de raccordements) du projet de révision de Plan de secteur

Le périmètre de réservation faisant l'objet de la demande de révision du plan de secteur vise à relier les postes d'Avelgem et de Courcelles.

Ces deux postes ont été retenus par l'initiateur de la révision, puis par le Ministre compétent, parce qu'ils constituent des nœuds majeurs du réseau belge 380 kV car directement reliés à d'autres postes structurants tels que Gramme, Bruegel, Horta et Mercator. Par conséquent, la connexion de l'infrastructure projetée aux postes de Courcelles et Avelgem ne nécessite pas de renforcement complémentaire du réseau.

En son point 0 de la Phase 1, le présent rapport comprend néanmoins une réflexion sur la faisabilité d'établir la connexion via d'autres points du réseau 380 kV.

Pour rappel, il en ressort que parmi les postes 380 kV existants, les postes Horta et Mercator doivent être écartés compte tenu du transit important que cela impliquerait dans ces deux postes, mettant en péril le critère N-1. Pour cette raison, à l'ouest, le poste d'Avelgem est le seul pouvant accueillir la nouvelle liaison.

A l'est, les postes de Courcelles et Bruegel sont tous deux possibles. Néanmoins, le poste de Bruegel doit également être écarté, car il engendrerait un dépassement de la capacité de l'axe Bruegel-Courcelles et parce qu'il ne permettrait pas de remédier à la saturation du réseau 150 kV du Hainaut via des repiquages.

Il en ressort que le renforcement constitué par une ligne de 2x3 GW d'une tension de 380 kV entre Avelgem et Courcelles est la seule solution basée sur les postes existants.

Une solution se basant sur la création d'un nouveau poste connecté à une liaison existante du réseau 380kV structurant est également possible. Ces alternatives nécessitent des évolutions complémentaires sur le réseau, sources de coûts et d'incidences environnementales importants, les rendant moins pertinentes que l'option de liaison retenue, sous l'angle des impacts attendus sur le réseau existant et sur l'environnement.

¹³² La plupart des lignes 150kV datent des années 1950. Or, ce n'est qu'à partir du 1er octobre 2002 que ces projets ont été d'office soumis à étude d'incidences. Quant aux révisions du plan de secteur, elles n'ont éventuellement été soumises à études d'incidences qu'à dater du 1er mars 1998.

De ce fait, aucune alternative de localisation de poste de raccordement permettant de répondre aux besoins identifiés n'a pu être retenue dans le cadre du présent rapport.

6.6. Recherche et présentation d'alternatives de localisation au projet de révision du Plan de secteur

6.6.1. CONSTRUCTION DU RÉSEAU D'ALTERNATIVES

Dans le dossier de base déposé par Elia à l'appui de sa demande de révision du plan de secteur, plusieurs alternatives ont été comparées au tracé du périmètre de réservation inscrit en projet au plan de secteur. La méthodologie suivie pour leur identification visait à trouver le juste équilibre entre différents éléments, à savoir :

- Maximiser l'utilisation des tracés de lignes à haute tension inscrits au plan de secteur et disponibles ou qui pourraient être rendus disponibles en 2025 ;
- Maximiser le regroupement d'infrastructures ;
- Minimiser la confrontation aux contraintes du territoire concerné.

Sur base de ces critères, six tracés alternatifs à celui initialement proposé ont été identifiés. Ceux-ci sont repris sur la figure ci-dessous.

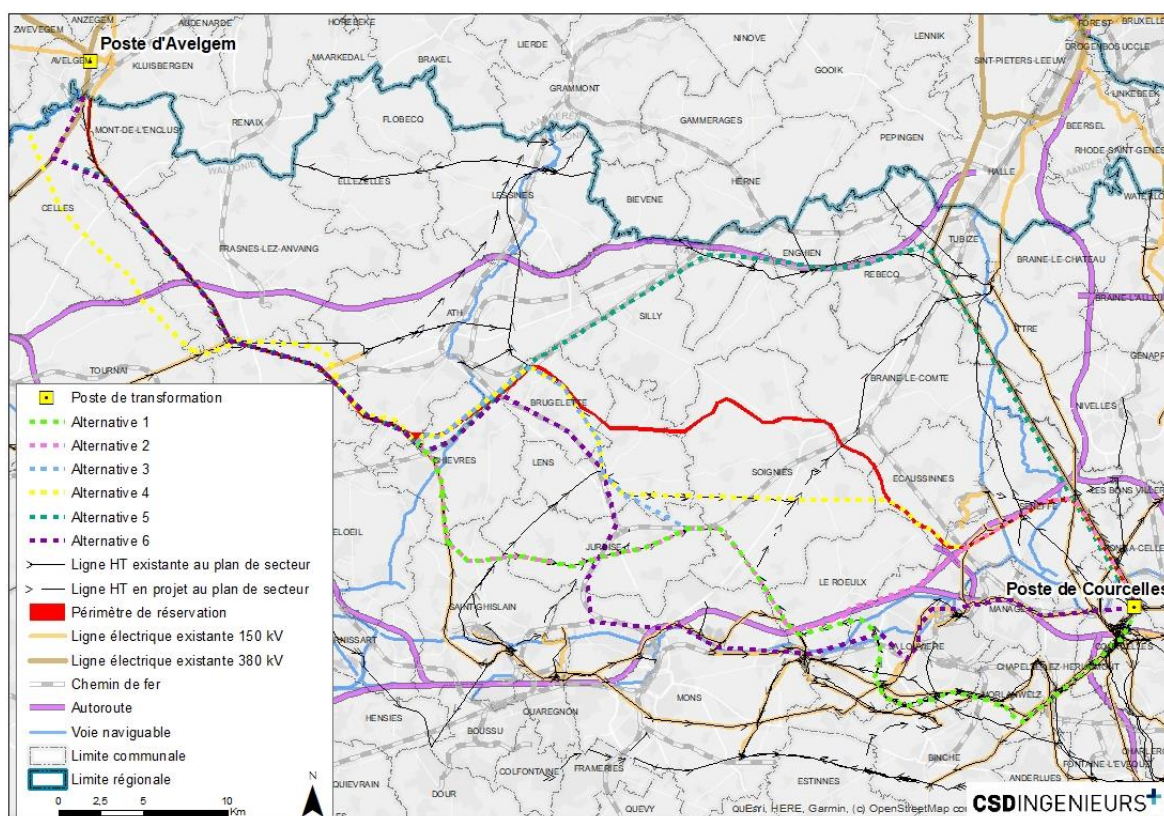


Figure 78: Alternatives étudiées dans le dossier de base (source : dossier de base)

Ensuite, une analyse a été réalisée entre ces tracés et celui retenu dans le dossier de base afin de les comparer. Cette analyse a conclu que le tracé de base permettait de répondre au mieux aux différents critères et il a donc été confirmé comme tracé privilégié. Pour une analyse plus détaillée, le lecteur peut se référer au dossier de base.

Cette analyse ne se concentre pas uniquement sur les incidences environnementales, les deux premiers critères « maximiser l'utilisation des tracés de lignes à haute tension inscrits au plan de secteur et disponibles ou qui pourraient être rendus disponibles en 2025 » et « maximiser le regroupement d'infrastructures » étant essentiellement planologiques. Dans le cadre de la présente étude, les 6 alternatives envisagées ont donc été reconsidérées dans une analyse complémentaire basée uniquement ici sur les aspects environnementaux.

Par ailleurs, dans le cadre de la procédure de révision du plan de secteur et conformément à la législation environnementale en vigueur, une réunion d'information préalable suivie d'une consultation publique ont été organisées pour récolter les avis et suggestions des riverains et associations. Cette consultation est intéressante notamment pour identifier les alternatives possibles au projet. Les nombreux avis (principalement textuels) ainsi récoltés ont été dépouillés, interprétés et transposés de manière cartographique (travail commandé par l'administration et réalisé par la société INDIVILLE). La carte reprise ci-après illustre les différents tracés alternatifs suggérés lors de cette consultation publique.

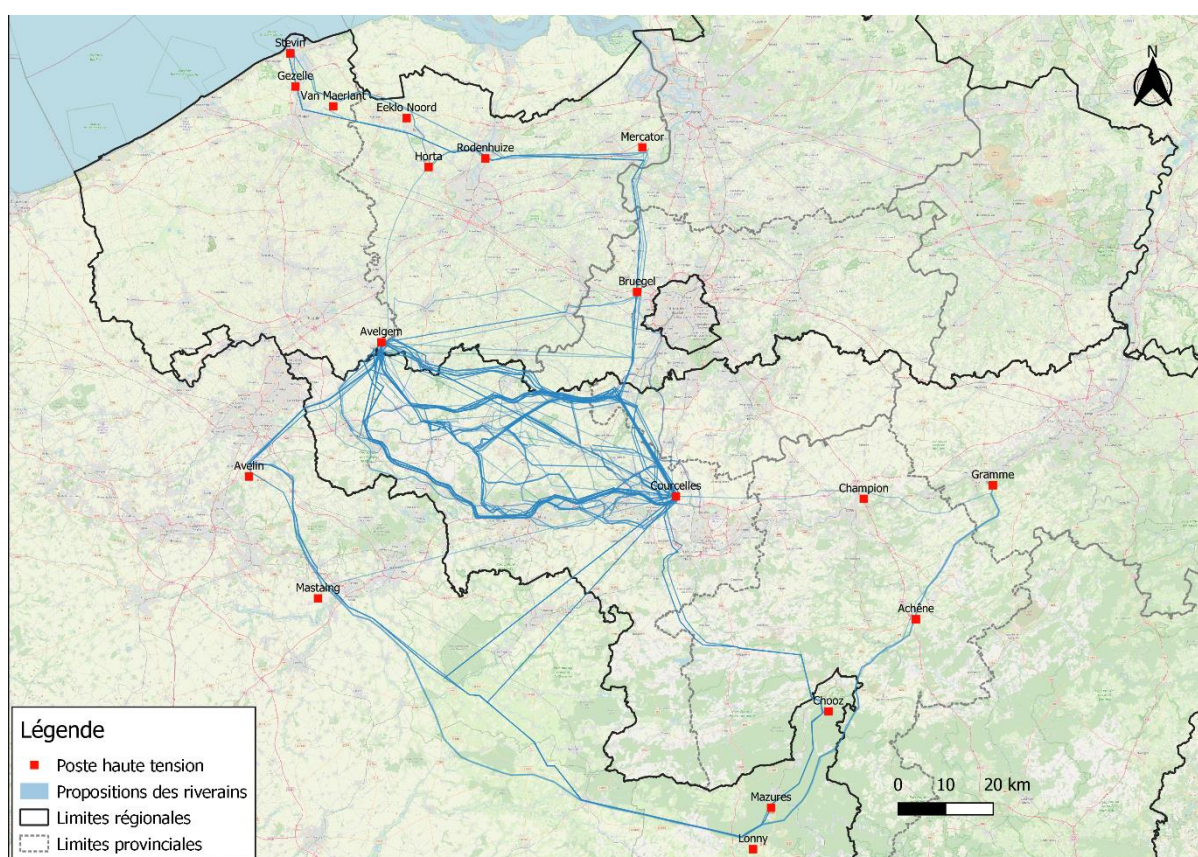


Figure 79: Alternatives issues de la consultation publique (source : INDIVILLE)

Parmi tous les tracés alternatifs proposés, une première sélection a été faite en gardant uniquement les tracés directs entre les postes d'Avelgem et de Courcelles puisqu'il a été exposé ci-avant que le renforcement constitué par une ligne 380 kV entre ces deux postes est la seule solution qui permette de résoudre les surcharges observées sur le réseau backbone 380 kV.

Dans un second temps, une analyse a été réalisée par le chargé d'étude afin d'identifier, parmi tous ces tracés alternatifs, ceux pouvant apporter certains avantages environnementaux par rapport au projet retenu dans le dossier de base et par le Ministre compétent. L'objectif de l'analyse des alternatives est en effet d'étudier si certaines alternatives au projet initial permettent d'en réduire les incidences environnementales tout en continuant de répondre aux objectifs du projet. Il faut ici considérer les

incidences environnementales comme toutes les incidences que le projet peut avoir sur la nature, l'être humain ou ses activités et quelle que soit leur localisation (les incidences ne se limitent donc pas aux frontières régionales). Dès lors, les tracés alternatifs passant par des zones densément peuplées ont pu rapidement être écartés, car augmentant fortement les incidences environnementales du projet. De même, les tracés ne permettant pas du tout de répondre aux objectifs principaux du projet n'ont pas été retenus. Enfin, plusieurs propositions se superposent ou ne sont séparées que de 100 - 200 mètres ce qui pourrait être simplement dû à la transposition d'avis similaires par différentes personnes. C'est pourquoi, afin de simplifier le réseau, ces suggestions de tracé ont été regroupées en un seul segment. La position exacte de celui-ci a été choisie de manière à minimiser les contraintes environnementales présentées ci-dessous.

Comme le montre la figure ci-dessus, plusieurs tracés alternatifs proposés suggéraient le passage par la France. Ces tracés n'ont pas été retenus dans le cadre de l'analyse des alternatives de localisation pour trois raisons principales. Premièrement, cette alternative ne permet pas de répondre aux besoins du réseau belge, en particulier en ce qui concerne le renforcement de la capacité d'accueil dans le Hainaut. Deuxièmement, un passage par la France nécessiterait de renforcer la capacité de transport transfrontalière entre la Belgique et la France. Or, afin de répondre aux besoins de plus grande capacité d'échange lié à l'augmentation des flux et de leur volatilité résultant de l'intégration d'énergie renouvelable à grande échelle, le renforcement à la capacité maximale de l'axe Horta-Avelgem-Avelin a déjà été réalisé et est prévu pour l'axe Gramme-Achene-Lonny. En conséquence, une simple exploitation du réseau français existant n'est dès lors pas possible et cette alternative nécessiterait la construction de nouvelles liaisons transfrontalières entre la Belgique et la France ainsi qu'un renforcement du réseau interne français pour évacuer la production offshore vers la France et puis l'importer à nouveau vers la Belgique en un autre point. Cela implique donc de reporter les problèmes de réseau interne belge sur la France. Troisièmement, une augmentation de la capacité de transport entre la Belgique et la France devrait notamment être disponible pour les flux de marché en vertu des règles européennes en vigueur. En cas d'import d'énergie depuis la France, les flux supplémentaires arrivant sur le réseau belge augmenteraient donc la pression sur celui-ci, déjà à saturation. Cette alternative via la France augmenterait donc, dans certaines circonstances, les besoins en renforcements du réseau interne belge.

Finalement, les réflexions du chargé d'étude ont également permis de compléter le maillage des alternatives potentielles. Les éléments ajoutés sont des connexions entre les alternatives identifiées précédemment présentant des contraintes environnementales (présentées ci-dessous) faibles et étant, par conséquent, pertinentes dans la recherche d'alternatives au dossier de base. Au total, une dizaine de tronçons sont venus achever le réseau allant des postes de Courcelles et d'Avelgem.

Trois sources principales de tronçons alternatifs ont donc été utilisées : les alternatives du dossier de base, les remarques et commentaires issus de la réunion d'information préalable et les réflexions propres au chargé d'étude. Il est important de souligner que la réflexion sur les alternatives a été menée à l'échelle de l'ensemble de la future liaison, entre les postes d'Avelgem et de Courcelles, sans que cette réflexion soit contrainte par un passage de la future liaison au point de la frontière régionale constituant le point de départ du projet de périmètre de réservation du dossier de base. Les tronçons alternatifs identifiés ne se limitent donc pas au territoire de la Région wallonne. Plusieurs tronçons ont en effet été identifiés sur le territoire de la Région flamande, entre le poste d'Avelgem et différents points de la frontière régionale. A strictement parler, ces tronçons ne constituent pas des tronçons « alternatifs » à ceux du projet de périmètre de réservation, qui ne concerne que la partie wallonne de la future liaison. Ils seront néanmoins traités comme tels dans la suite du RIE.

La figure suivante présente le réseau d'alternatives obtenu à l'issue de cette première sélection. Il comprend 238 tronçons (y compris le périmètre de réservation). Comme le projet de périmètre de réservation en Wallonie, chaque tronçon présente une largeur de 200m.

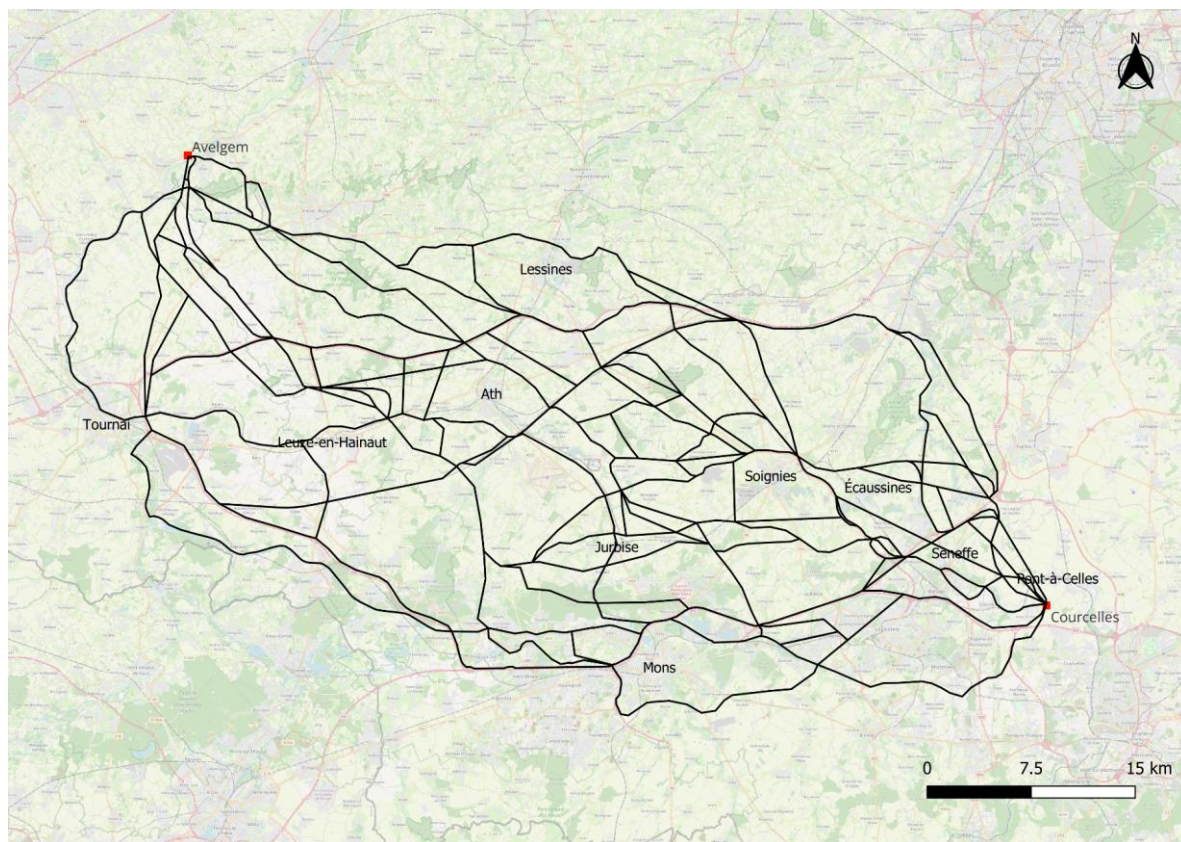


Figure 80 : Réseau des alternatives

6.6.2. QUANTIFICATION DES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Après la construction du réseau de tronçons, une évaluation multicritère a été appliquée pour évaluer la pertinence des différents tronçons.

Pour ce faire, une liste des différentes contraintes qui peuvent être rencontrées sur le territoire a été établie. Une contrainte peut être un élément du territoire qui limite les possibilités de passage d'une ligne (par exemple la présence d'une installation Seveso ou d'un parc éolien) ou un élément du territoire sur lequel une nouvelle ligne pourrait induire des incidences (par exemple la présence d'habitations, d'écoles ou d'exploitations agricoles).

La méthode de quantification de chacune de ces contraintes est reprise dans le tableau ci-dessous. Une fois que chaque contrainte a été quantifiée et pour permettre d'obtenir des valeurs du même ordre, les contraintes ont été ramenées à une échelle de 0 à 10 sur base du maximum de chaque (sous)contrainte. Les scores obtenus pour les différentes contraintes évaluées sont ensuite pondérés selon le coefficient d'importance détaillé ci-dessous puis additionnés pour parvenir à un score final par tronçon représentant la contrainte totale que représente chaque tronçon par rapport à l'implantation d'une ligne à haute tension. Les coefficients d'importance attribués sont compris entre 1 (importance la plus faible) et 5 (importance la plus élevée).

Cette liste de contraintes et leur pondération ont été établies sur base des éléments ressortant de l'analyse des incidences environnementales du périmètre de base (se trouvant dans le chapitre 2 de la Phase 2 du présent RIE) et du niveau d'enjeu considéré pour ce type d'infrastructure.

Pour chaque contrainte évaluée, un indicateur équivalent a été recherché pour la partie du projet située en Flandre. Les tronçons ou parties de tronçons situés en Flandre ont donc été évalué de manière similaire et les scores obtenus ont été additionnés de la même manière qu'en Wallonie. Ce travail a été réalisé en collaboration avec le bureau d'études Antea, chargé de l'évaluation environnementale de la portion flamande du projet Boucle du Hainaut.

Un exemple détaillé est repris sous le tableau afin d'illustrer la méthode utilisée.

Tableau 20 : Catégorie de contraintes et pondération

| Contraintes | Coefficient | Sous-contrainte | Part dans la contrainte | Distance considérée (de part et d' autre du tronçon) | Méthode de quantification | Sources | Justification |
|---|-------------|----------------------------------|-------------------------|--|--|--|--|
| Urbanisme, biens matériels et patrimoniaux | | | | | | | |
| Présence d'éléments de patrimoine architectural | 5 | Biens classés en Région wallonne | 25% | 350 m | Nombre de biens classés par la Région wallonne | Wallonie : Géoportail de la Wallonie (SPW) : ' <i>Patrimoine – Biens classés et zones de protection – Série</i> ', Flandre : Geopunt.be : ' <i>Beschermde monumenten</i> ' | La mise en œuvre d'une ligne haute tension pourrait impacter les biens classés, car des pylônes pourraient se trouver en arrière-plan des vues. Selon la classification dans laquelle chaque élément est repris (régional, exceptionnel et mondial), la valeur de celui-ci augmente et l'incidence visuelle est plus impactante. À partir de 350 m les pylônes deviennent sous-dominants dans le paysage ce qui réduit leur impact visuel. |
| | | Biens exceptionnels | 33% | 350 m | Nombre de biens exceptionnels | Wallonie : Géoportail de la Wallonie (SPW) : ' <i>Patrimoine – Biens exceptionnels – Série</i> ' Flandre: Bouwkundig erfgoed elementen | |
| | | Biens classés mondiaux | 42% | 350 m | Nombre de biens classés mondiaux | Wallonie : Géoportail de la Wallonie (SPW) : ' <i>Biens patrimoine mondial UNESCO – Biens</i> ' Flandre: Geopunt.be: ' <i>Unesco werelderfgoed – kernen</i> ' | |
| Paysage | | | | | | | |
| Présence Arbres et haies remarquables | 3 | Arbres remarquables | 50% | 350 m | Nombre d'arbres remarquables | Wallonie : Géoportail de la Wallonie (SPW) : ' <i>Arbres et haies remarquables (AHREM) – Série</i> ' Flandre : Landschappelijk waardevolle bomen + Landschappelijk erfgoed (haag) | Le passage d'une ligne haute tension aurait un impact sur le paysage. À partir de 350 m les pylônes deviennent sous-dominants dans le paysage ce qui réduit leur impact visuel. |
| | | Haies remarquables | 50% | 350 m | Nombre de haies remarquables | | |
| Périmètre d'intérêt paysager | 4 | / | / | 350 m | Superficie de 'Périmètre d'intérêt paysager' | Wallonie : Géoportail de la Wallonie (SPW) : ' <i>Inventaire des périmètres d'intérêt paysager et des points et lignes de vue remarquables de l'ADESA</i> ' + Plan de secteur Flandre: vastgesteld landschappelijk erfgoed + erfgoedlandschappen + beschermde cultuurhistorische landschappen | Le passage d'une ligne haute tension aurait un impact sur le paysage. À partir de 350 m les pylônes deviennent sous-dominants dans le paysage ce qui réduit leur impact visuel. |

| | | | | | | | |
|---|---|-------------------------|-----|-------|--|---|--|
| Présence d'habitat | 4 | / | / | 350 m | Superficie des zones en 'habitat dense', 'habitat discontinu' et 'habitat et services' sur la carte de l'occupation du sol (SPW) | <u>Wallonie</u> : Carte occupation du sol SPW <u>Flandre</u> : Geopunt.be: 'Landgebruik - Vlaanderen - toestand 2019' (categorie: Ruimtebeslag) | Le passage d'une ligne haute tension aurait un impact sur le paysage qu'observeraient les habitants depuis leur domicile. À partir de 350 m les pylônes deviennent sous-dominants dans le paysage ce qui réduit leur impact visuel. |
| Population et domaines social et économique | | | | | | | |
| Présence d'équipements communautaires et touristiques | 4 | / | / | 100 m | Nombre d'établissements HoReCa, récréation et établissements sensibles (hôpitaux, crèches et établissements pour aînés) | <u>Wallonie</u> : Géoportail de la Wallonie (SPW), de la couche ' <i>Les offres touristiques de Wallonie</i> ' + OpenStreetMap + Géoportail de la Wallonie (Agence pour une Vie de Qualité), la couche ' <i>Etablissements pour aînés (hors territoire de la Communauté germanophone)</i> ' <u>Flandre</u> : POI zorg, onderwijs, kinderopvang, sport, toerisme + OpenStreetMap horeca | La présence d'une ligne à haute tension juste au-dessus ou à proximité des établissements peut affecter leur image et leur fréquentation. |
| Présence d'activités agricoles et sylvicoles | 3 | Exploitations agricoles | 44% | 100 m | Nombre d'exploitations agricoles | <u>Wallonie</u> : OpenStreetMap <u>Flandre</u> : Geopunt.be 'Landbouwgebruikspercelen LV, 2022' | Le passage d'une ligne haute tension près d'activités agricoles et sylvicoles peut impacter leurs activités. La présence d'une ligne à haute tension proche d'une exploitation agricole peut porter atteinte à l'image de qualité des exploitations et de leurs produits. Les incidences pour les activités agricoles et sylvicoles concernent les surfaces directement sous la ligne et au droit d'implantation des pylônes. Le placement d'un pylône diminue |
| | | Superficie Agricole | 33% | 0 m | Superficie de terres agricoles | <u>Wallonie</u> : Géoportail de la Wallonie (SPW) : ' <i>Parcellaire agricole anonyme (situation 2019)</i> ' <u>Flandre</u> : Geopunt.be 'Landbouwgebruikspercelen LV, 2022' | |

| | | | | | | | |
|---|---|----------------------|-----|-------|--|---|---|
| | | Superficie sylvicole | 22% | 0 m | Superficie de forêts | <p><u>Wallonie</u> : Carte occupation du sol SPW</p> <p><u>Flandre</u>: Geopunt.be 'Landbouwgebruikspercelen LV, 2022'</p> | localement les superficies agricoles exploitables et impacte la logistique (passage des tracteurs autour du pylône). De la même manière, le passage d'une ligne et l'implantation d'un pylône peut, selon les cas, nécessiter l'élagage des arbres sur la trajectoire. |
| Dépréciation du foncier | 5 | Plan de secteur | 29% | 350 m | Superficie des zones en 'habitat' et 'habitat à caractère rural' au Plan de secteur. | <p><u>Wallonie</u> : Zones d'habitat et d'habitat à caractère rural au plan de secteur</p> <p><u>Flandre</u>: Ruimteboekhouding 2022 wonen</p> | La dépréciation foncière est une incidence forte. Elle impacte en particulier les habitations existantes et les terrains non bâtis inscrits au plan de secteur en zone d'habitat (à caractère rural). Ces impacts sont évalués jusqu'à 350m de part et d'autre du périmètre, zone au sein de laquelle une ligne haute tension est considérée comme « dominante » dans le paysage. Au delà de cette distance, les impacts sont plus faibles. |
| | | Occupation du sol | 71% | 350 m | Superficie des zones en 'habitat dense', 'habitat discontinu' et 'habitat et services' sur la carte de l'occupation du sol (SPW) | <p><u>Wallonie</u> : Carte occupation du sol SPW</p> <p><u>Flandre</u>: Geopunt.be: 'Landgebruik - Vlaanderen - toestand 2019' (categorïe: Ruimtebeslag)</p> | |
| Présence d'activités économiques | 2 | / | / | 0 m | Superficie des zones identifiées comme 'Périmètre de reconnaissance économique'. | <p><u>Wallonie</u> : Géoportail de la Wallonie (SPW) : 'Périmètres de reconnaissance économique (PRE)'</p> <p><u>Flandre</u>: Inventaris VLAIO (bedrijventerrein perceel)</p> | Le passage d'une ligne à haute tension pourrait impliquer l'installation d'un ou plusieurs pylône(s) dans le périmètre ce qui freinerait le développement du site. Le passage d'une ligne serait également synonyme de contraintes urbanistiques pour les bâtiments se trouvant sous cette ligne. |
| Mobilité, transports et autres infrastructures | | | | | | | |
| Présence de zones Seveso | 3 | / | / | 0 m | Superficie des bâtiments des activités SEVESO | <p><u>Wallonie</u> : Géoportail de la Wallonie (SPW) : 'SEVESO – Série'</p> <p><u>Flandre</u>: Geopunt.be 'Consultatiezones van Seveso-inrichtingen in Vlaanderen'</p> | En fonction du type d'activité, le passage d'une ligne à haute tension doit se faire à une certaine distance de sécurité pour éviter tout impact en cas de chutes d'un pylône ou de câble(s). La zone concernée par ce risque de chute se situerait à distance équivalente à la hauteur des pylônes. |

| | | | | | | | |
|---|---|------------------------|-----|-------|--|---|--|
| Présence d'éoliennes | 2 | / | / | 140 m | Nombre d'éoliennes | <u>Wallonie</u> : OpenStreetMap + Elia <u>Flandre</u> : Mercator + OpenStreetMap | Le passage d'une ligne à haute tension doit se faire à une certaine distance de sécurité pour éviter tout impact en cas de chutes d'un pylône ou de câble(s), ou à l'inverse, en cas de chute d'une éolienne ou de bris de pale. |
| Présence de carrières | 2 | / | / | 0 m | Superficie des carrières | <u>Wallonie</u> : SPW <u>Flandre</u> : Ruimteboekhouding 2022 - ontginningsgebied | Le passage d'une ligne à haute tension doit se faire à une certaine distance de sécurité pour éviter tout impact en cas de chutes d'un pylône ou de câble(s). |
| Intersection d'infrastructures routières | 1 | / | / | 0 m | Nombre d'autoroutes intersectées | <u>Wallonie & Flandre</u> : OpenStreetMap | Le passage d'une ligne à haute tension représenterait un risque de sécurité en cas de chute d'un pylône ou de câble(s) et nécessite l'implantation de pylônes plus robustes. La partie des infrastructures concernées par ce risque de chute serait celle directement sous la ligne. |
| Intersection d'infrastructures ferroviaires | 1 | Ligne de chemin de fer | 25% | 60 m | Nombre de lignes de chemin de fer intersectées | <u>Wallonie & Flandre</u> : Infrabel : 'Liste et position géographique des voies principales' | Le passage d'une ligne à haute tension représente un risque de sécurité en cas de chute d'un pylône ou de câble(s) et nécessite l'implantation de pylônes plus robustes. Des perturbations sur une ligne à grande vitesse auraient plus de conséquences que sur une ligne de chemin de fer classique (arrêts plus fréquents et solutions de remplacement temporaire plus facile à mettre en œuvre). Lorsque la ligne longe une infrastructure ferroviaire, cela doit se faire à une distance minimale de 60 m. |
| | | Ligne à grande vitesse | 75% | 60 m | Nombre de lignes à grande vitesse intersectées | | |
| Présence d'infrastructures aériennes | 2 | Zone orange | 25% | 0 m | Superficie comprise dans une zone orange | <u>Wallonie & Flandre</u> : Skeyes | La présence d'une ligne pourrait représenter un danger pour les usagers du ciel, principalement aux |

| | | | | | | | |
|---|---|-------------|-----|-------|--|---|--|
| | | Zone rouge | 75% | 0 m | Superficie comprise dans une zone rouge | | abords d'aéroports. Plus la ligne est proche d'un aéroport (zone rouge), plus le risque de collision est élevé. C'est la ligne elle-même qui représente un danger. |
| Intersection d'infrastructures fluviales | 1 | / | / | 0 m | Nombre de canaux navigables intersectés | Wallonie : Géoportail de la Wallonie (SPW) : 'Axes des voies hydrauliques en Région wallonne (AXVHW)' Flandre: Geopunt.be: 'Vlaamse Hydrografische Atlas – Waterlopen, 3 maart 2022' | Le passage d'une ligne à haute tension représenterait un risque de sécurité en cas de chute d'un pylône ou de câble(s) et nécessite l'implantation de pylônes plus robustes. La partie des infrastructures concernées par ce risque de chute serait celle directement sous la ligne. |
| Champs électromagnétiques | | | | | | | |
| Présence d'habitants pouvant être impactés par les ondes électromagnétiques | 5 | / | / | 61 m | Superficie des zones en 'habitat dense', 'habitat discontinu' et 'habitat et services' sur la carte de l'occupation du sol | Wallonie : Carte occupation du sol SPW Flandre: Geopunt.be: 'Landgebruik - Vlaanderen - toestand 2019' (categorie: Ruimtebeslag) | Les habitants se trouvant à moins de 61 m d'une ligne à haute tension, seraient exposés à des champs supérieurs à 0,4 µT (valeur prise en compte pour appliquer le principe de précaution). |
| Bruits et vibrations | | | | | | | |
| Présence d'habitants pouvant être impactés par le bruit généré. | 2 | / | / | 200 m | Superficie des zones en 'habitat dense', 'habitat discontinu' et 'habitat et services' sur la carte de l'occupation du sol | Wallonie : Carte occupation du sol SPW Flandre: Geopunt.be: 'Landgebruik - Vlaanderen - toestand 2019' (categorie: Ruimtebeslag) | Le bruit généré par une ligne haute tension n'est pas une contrainte forte, car il s'agit d'un impact peu contraignant et temporaire puisqu'il est lié aux conditions météorologiques. Au-delà de 200 m, le bruit devient négligeable. |
| Faune, flore et biodiversité | | | | | | | |
| Présence de zones d'intérêt biologique | 4 | Natura 2000 | 33% | 0 m | Superficie de zones Natura 2000 | Wallonie : Géoportail de la Wallonie (SPW) : 'Réseau Natura 2000 en vigueur – Série' Flandre: Geopunt.be: 'Biologische Waarderingskaart en Natura 2000 Habitatkaart - Toestand 2020' | La mise en œuvre d'une ligne haute tension aurait des incidences notables sur les sites sensibles telles que la destruction d'habitats ou une pression sur les milieux, la flore et la faune. Chaque site est impacté de |

| | | | | | | | |
|---|---|--|-----|-----|---|---|---|
| | | Site de grand intérêt biologique (SGIB) non repris dans un périmètre Natura 2000 | 33% | 0 m | Superficie de zones SGIB (hors Natura 2000) | <u>Wallonie</u> : SPW <u>Flandre</u> : Geopunt.be : 'Gebieden van het VEN en het IVON' | manière égale et les zones concernées seraient celles directement sous la ligne puisque c'est l'implantation de pylônes qui causerait le plus de dommage. |
| | | Qualité des milieux | 33% | 0 m | Evaluation de la qualité des milieux traversés | <u>Wallonie & Flandre</u> : Analyse cartographique et observations de terrain | |
| Participation de la zone au réseau écologique | 3 | Liaisons écologiques | 57% | 0 m | Longueur des liaisons écologiques adoptées par le Gouvernement wallon | <u>Wallonie</u> : SPW <u>Flandre</u> : 'Gebieden van het VEN en het IVON' | Le passage d'une ligne haute tension pourrait impacter la continuité et la qualité des liaisons écologiques. Les liaisons écologiques adoptées par le Gouvernement wallon ont une importance légèrement plus élevée, car il s'agit d'éléments reconnus à l'échelle régionale. Les sites concernés seraient ceux directement sous la ligne puisque c'est l'implantation de pylônes qui causerait le plus de dommage. |
| | | Maillage écologique | 43% | 0 m | Evaluation des éléments biologiques créant un maillage écologique | <u>Wallonie & Flandre</u> : Analyse cartographique et observations de terrain | |
| Présence de parcs naturels | 1 | / | / | 0 m | Superficie dans un parc naturel | <u>Wallonie</u> : Site de la fédération des parcs naturels de Wallonie <u>Flandre</u> : / | La présence d'une ligne haute tension dans un parc naturel pourrait avoir un impact sur sa faune et flore. Les superficies impactées sont celles directement sous la ligne puisque que c'est l'implantation de pylônes qui causerait le plus de dommage. |
| Présence d'arbres et de haies remarquables | 1 | / | / | 0 m | Nombre d'arbres et haies remarquables | <u>Wallonie</u> : Géoportail de la Wallonie (SPW) : 'Arbres et haies remarquables (AHREM) – Série' <u>Flandre</u> : Landschappelijk waardevolle bomen + Landschappelijk erfgoed (haag) | L'impact du passage d'une ligne à haute tension pourrait avoir un impact sur les arbres et haies remarquables. Les arbres et haies potentiellement impactés sont ceux directement sous la ligne puisque c'est l'implantation de pylônes qui causerait le plus de dommage. |

| | | | | | | | |
|--|---|---|---|-----|--|---|--|
| Présence de forêts | 3 | / | / | 0 m | Superficie de forêts | <u>Wallonie</u> : Carte occupation du sol SPW <u>Flandre</u> : Geopunt.be: BWK | <p>La mise en œuvre d'une ligne haute tension aurait des impacts sur les boisements, notamment via la fragmentation de ceux-ci et la destruction d'habitat. L'impact exact dépend de la qualité, mais également de la taille du boisement. La partie des boisements qui serait impactée est celle directement sous la ligne, car c'est là que les arbres devraient être élagués.</p> |
| Présence d'éléments du réseau hydrographique, de milieux aquatiques et de berges | 1 | / | / | 0 m | Evaluation des superficies des eaux de surface | <u>Wallonie & Flandre</u> : Analyses cartographiques et observations de terrain | <p>La présence d'une ligne haute tension n'aurait pas d'impact majeur sur les zones humides et surfaces d'eau (l'aspect de la qualité de ces milieux étant déjà repris dans le critère 'Qualité des milieux' ci-dessus). Les impacts restants se retrouveraient directement sous la ligne puisqu'ils seraient la conséquence de l'implantation d'un pylône.</p> |
| Zones sensibles aux lignes aériennes pour l'avifaune | 4 | / | / | 0 m | Evaluation des données Elia/Natagora pour déterminer des tendances par tronçon | <u>Wallonie & Flandre</u> : Elia/Natagora (ELIA_collision_risk_analysis) | <p>Une ligne haute tension représente un danger important pour l'avifaune puisqu'il existe un risque de collision. (atténué par la mise en place de balises colorées qui devraient rendre la ligne plus visible). Ce sont les éléments de la ligne elle-même qui présentent un risque puisque ce sont eux qui forment un obstacle.</p> |

La figure ci-dessous montre l'exemple d'un tronçon se situant à l'ouest d'Écaussinnes.

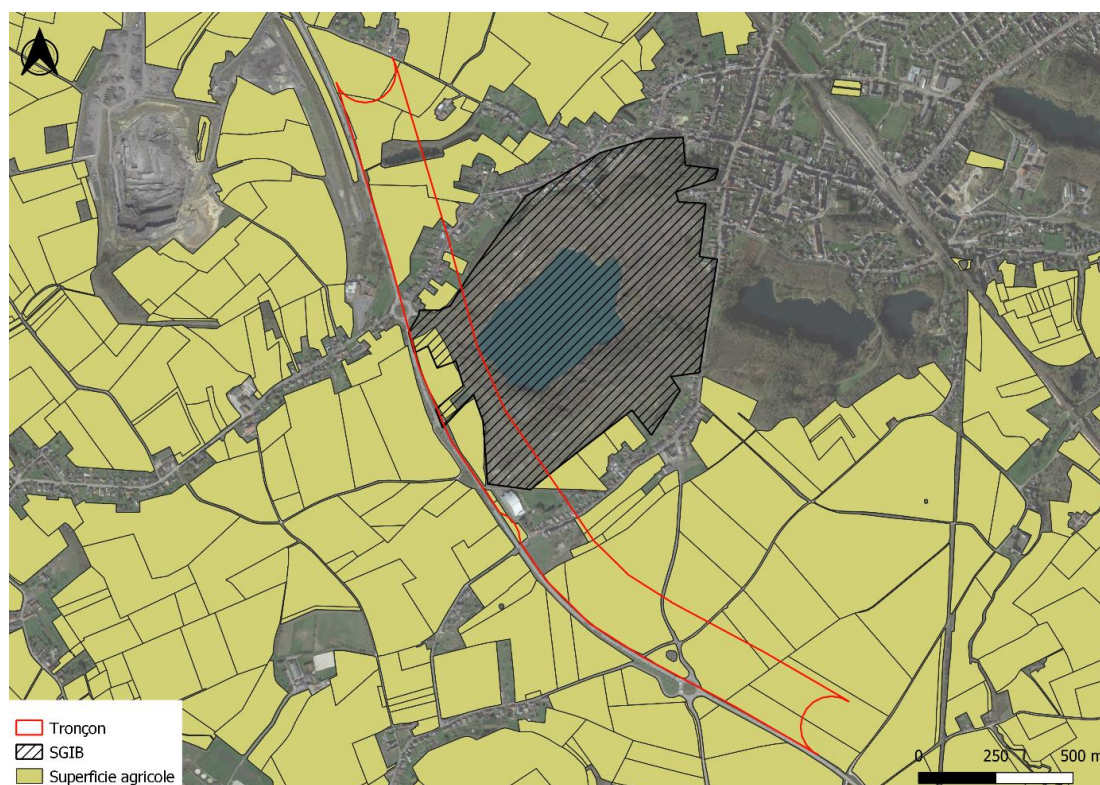


Figure 81: Exemple de tronçon du réseau d'alternatives

Les contraintes les plus importantes pour ce tronçon sont la superficie agricole et la présence d'un site de grand intérêt biologique, basées toutes deux sur des données cartographiques, ainsi que la participation au maillage écologique qui est notée sur base d'une évaluation d'expert. Notons, que des habitations se trouvent également dans le tronçon et à proximité. Celles-ci sont reprises dans plusieurs thématiques (voir tableau ci-dessus). Néanmoins, la superficie couverte par celles-ci est très faible et ne sera pas explicitée lors de la démonstration de la méthode de calcul mais sera repris dans le calcul de score total. Il en est de même pour les contraintes concernant les liaisons écologiques et les zones sensibles aux lignes aériennes pour l'avifaune. Toutes les autres contraintes sont égales à 0. Pour la superficie agricole et la présence d'un site de grand intérêt biologique, c'est la superficie à l'intérieur de la distance considérée correspondante qui est calculée. Pour la participation au maillage écologique, une note sur 10 est donnée et est multipliée par la surface du tronçon. Ensuite, ces valeurs sont ramenées sur une échelle de 0 à 10 sur base du maximum des contraintes sur l'ensemble des tronçons. Le tableau ci-dessous illustre ce processus pour l'exemple de tronçon choisi ci-dessus.

Tableau 21: Méthode de calcul pour obtenir le score des (sous-)contraintes

| | Superficie agricole | Site de grand intérêt biologique | Maillage écologique |
|--|--------------------------------------|----------------------------------|--|
| Superficie pour le tronçon | 332 521 m ² | 89 930 m ² | 1 548 244 |
| Superficie maximale dans un des tronçons | 3 213 318 m ² | 842 754 m ² | 63 733 281 |
| Calcul | $(332\ 521 \times 10) / 3\ 213\ 318$ | $(89\ 930 \times 10) / 842\ 754$ | $(1\ 548\ 244 \times 10) / 63\ 733\ 281$ |
| Score de 0 à 10 | 1,03 | 1 | 3 |

Une fois que les scores sur une échelle 0 à 10 sont définis pour toutes les contraintes, ceux-ci sont multipliés par leur coefficient d'importance pour ensuite être additionnés et obtenir le score final. Pour l'exemple de tronçon choisi, le résultat est le suivant :

Tableau 22: Exemple de calcul du score total d'un tronçon

| Thématique | Contrainte | Coefficient | Sous-contrainte | Part dans la sous-contrainte | Score sous-contrainte | Score contrainte | Score thématiques |
|--|--|-------------|--|------------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| Urbanisme, biens matériels et patrimoniaux | Contraintes | | | | | 0 | 0 |
| Paysage | Habitat | 4 | | | | 0,32 | 1,28 |
| | Autres contraintes | | | | | 0 | |
| Population et domaines social et économique | Présence d'activités agricoles et sylvicoles | 3 | Exploitations agricoles | 44% | 0 | 0,34 | 2,88 |
| | | | Superficie Agricole | 33% | 1,03 | | |
| | | | Superficie sylvicole | 22% | 0 | | |
| | Dépréciation du foncier | 5 | Occupation du sol | 71% | 0,32 | 0,37 | |
| | | | Plan de secteur | 29% | 0,49 | | |
| Autres contraintes | | | | | 0 | | |
| Mobilité, transports et autres infrastructures | Contraintes | | | | | 0 | 0 |
| Champs électromagnétiques | Habitat | 5 | | | | 0,30 | 1,50 |
| Bruits et vibrations | Habitat | 2 | | | | 0,26 | 0,52 |
| Faune, flore et biodiversité | Présence de zones d'intérêt biologique | 4 | Natura 2000 | 33% | 0 | 0,46 | 8,39 |
| | | | Site de grand intérêt biologique (SGIB) non repris dans un périmètre Natura 2000 | 33% | 1 | | |
| | | | Qualité des milieux | 33% | 0 | | |
| | Participation de la zone au réseau écologique | 3 | Liaisons écologiques | 57% | 0,38 | 1,50 | |
| | | | Maillage écologique | 43% | 3 | | |
| | Zones sensibles aux lignes aériennes pour l'avifaune | 4 | | | | 0,40 | |
| Autres contraintes | | | | | 0 | | |
| Total | | | | | | | 14,57 |

6.6.3. SÉLECTION DES MEILLEURS ITINÉRAIRES ET DES TRONÇONS ALTERNATIFS Y AFFÉRENTS

Grâce à un algorithme de recherche des itinéraires possibles, tous les itinéraires permettant de relier les deux postes d'Avelgem et de Courcelles via le réseau des 238 tronçons alternatifs ont été identifiés. Au total, près de 3 millions d'itinéraires ont été trouvés. Ensuite, pour chacun de ces itinéraires, un score total a été calculé en additionnant les scores de chaque tronçon le composant.

De cette manière, il a été possible d'appréhender de manière globale quels sont les itinéraires alternatifs qui peuvent représenter certains avantages environnementaux par rapport au projet initialement retenu.

Par différents tests de sensibilité et de confrontation entre les résultats de l'analyse quantitative et ceux d'une analyse directe par les différents experts thématiques, il a été estimé que la précision de l'analyse quantitative était de l'ordre de 2 à 3%. Les meilleurs itinéraires ont ensuite été analysés pour voir ceux qui correspondaient environ à cette valeur. De manière prudente, ce sont finalement les 200 meilleurs itinéraires qui ont été retenus. Le score du meilleur itinéraire s'élevant à 469 et celui du deux-centième à 493, c'est donc une augmentation de 5% qui a été prise en compte, bien au-delà de la marge d'erreur.

Ces 200 itinéraires comprennent une bonne partie des tronçons du dossier de base (mais pas tous) ainsi que 39 tronçons alternatifs supplémentaires, parmi lesquels 3 sont situés sur le territoire de la Région flamande, entre le poste d'Avelgem et la frontière régionale. Ces tronçons qui ne sont pas inclus dans le projet de périmètre de réservation du dossier de base ont donc été considérés comme ceux pouvant constituer des alternatives au projet potentiellement intéressantes d'un point de vue environnemental.

La carte suivante reprend ce réseau de tronçons retenus au sein du réseau complet d'alternatives au projet considéré.

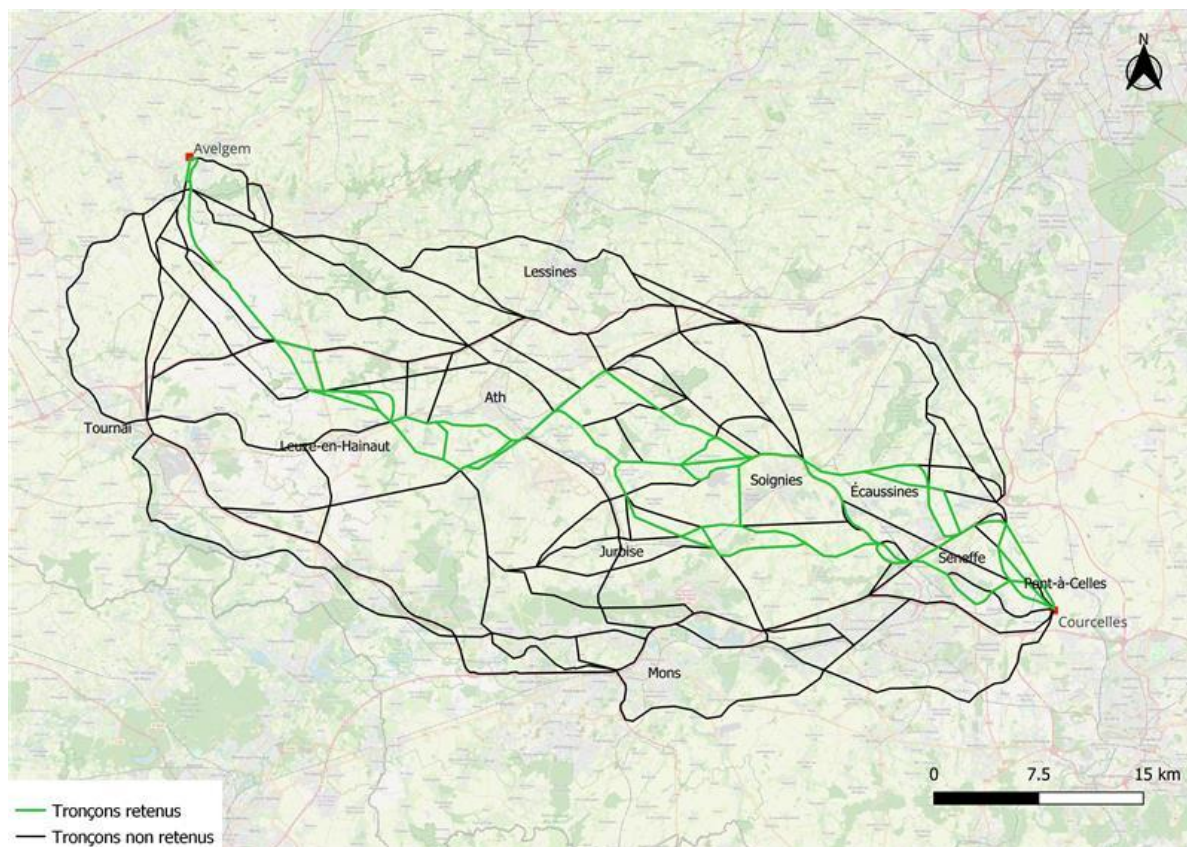


Figure 82: Tronçons retenus et non retenus suite à la première analyse quantitative

6.6.3.a. EXEMPLE D'ANALYSE DÉTAILLÉE D'ITINÉRAIRES

Afin d'illustrer globalement les raisons principales pour lesquelles certaines alternatives n'ont pas été retenues, une analyse plus détaillée des résultats a été réalisée pour deux itinéraires non retenus situés au Sud ainsi que sur deux itinéraires situés au Nord. La carte suivante représente les 39 tronçons retenus (en vert) ainsi que ces 2 alternatives au Sud (en jaune et rose) et au Nord (en bleu et noir).

Le diagramme à la suite de la carte permet de comparer les contraintes de ces différents itinéraires avec celles de l'itinéraire ayant obtenu le meilleur score. De cette comparaison il ressort que les itinéraires au Sud ont un score largement plus élevé, particulièrement pour l'itinéraire le plus au Sud (Figure 84). Pour ce dernier c'est principalement la présence de zones urbanisées qui explique ce score significatif ainsi que la présence importante de périmètres d'intérêts paysagers (PIP) sur la première partie de l'itinéraire. Pour le second itinéraire au sud, il n'y a pas une thématique qui ressort sur tous les tronçons. Cela varie essentiellement entre la présence de forêts, de l'importance du réseau écologique, de la présence d'activités agricoles et d'habitat. Ces scores élevés au Sud expliquent également les tronçons alternatifs (flamands et wallons) croisant la frontière régionale plus à l'ouest que le périmètre de réservation du dossier de base n'ont pas été sélectionnés. En ce qui concerne les itinéraires au Nord, là aussi, plusieurs thématiques ressortent en fonction des tronçons (Figure 84) : les infrastructures ferroviaires et routières, les activités agricoles, le réseau écologique, l'habitat, les carrières, les risques pour l'avifaune et le patrimoine architectural. Pour le second tracé au nord (en noir), il y a également la présence de périmètres d'intérêt paysager (PIP).

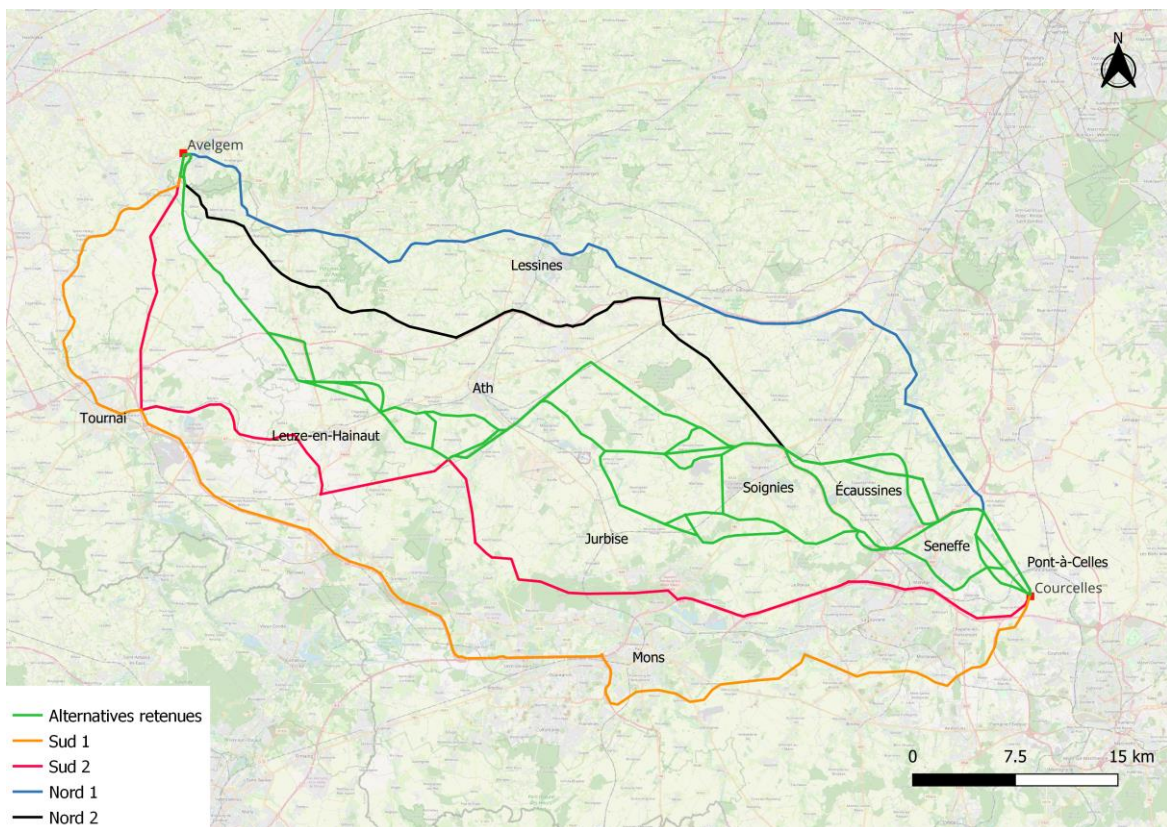


Figure 83: Itinéraires alternatifs au Nord et au Sud du fuseau central qui permettent de comparer les différentes contraintes pour l'environnement.

Il est intéressant de noter également la corrélation assez forte entre la distance par rapport au fuseau central et l'importance de la contrainte totale. Logiquement, au plus l'itinéraire s'écarte du tracé le plus court entre Avelgem et Courcelles au plus la probabilité de rencontrer des contraintes environnementales est grande. Les itinéraires les plus au Nord et au Sud qui allongent sensiblement la distance parcourue pour rejoindre Avelgem et Courcelles présentent donc généralement une contrainte totale bien plus élevée que les itinéraires plus centraux.

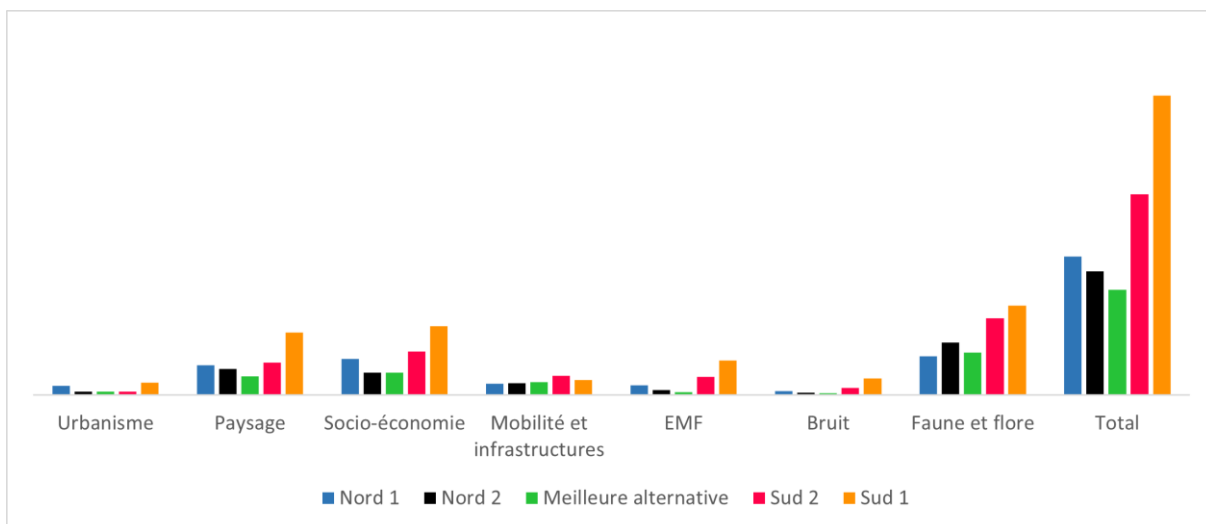


Figure 84: Comparaison des contraintes sur les différents itinéraires illustrés à la figure précédente.

6.6.3.b. ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ AUX FACTEURS DE PONDÉRATION

Afin d'évaluer la sensibilité de la méthodologie aux coefficients de pondération appliqués, une analyse de sensibilité a été réalisée. Différents scénarios ont été testés :

- Une analyse de **sensibilité** a été réalisée en examinant comment le changement du poids d'un critère à la fois (tout en maintenant tous les autres facteurs constants) affecte le choix des meilleurs itinéraires. Pour chacun de ces scénarios, le poids de la catégorie accentuée a été doublé. Cette opération a été réalisée pour 5 scénarios, accentuant les pondérations des contraintes liées aux thématiques suivantes :
 - Urbanisme et patrimoine ;
 - Agriculture ;
 - Champs électromagnétiques et Bruits et vibrations ;
 - Paysage ;
 - Faune, flore et biodiversité.
- Il semblait également intéressant d'analyser le résultat qui aurait été obtenu si une seule thématique environnementale avait été considérée, en ignorant les autres. Des scénarios « **extrêmes** » ne considérant qu'une seule des cinq thématiques précitées ont donc été réalisés.

Bien que cela ne soit pas une thématique environnementale à proprement parler, cette analyse est complétée par un 6^{ème} scénario extrême répondant à une sensibilité accrue au principe du regroupement des infrastructures.

Les résultats pour tous ces scénarios (5 scénarios de sensibilité en doublant le poids des thématiques et 6 scénarios extrêmes ne considérant qu'une seule thématique) sont présentés ci-dessous. Chaque figure présente les meilleurs itinéraires issus du scénario testé d'une part et ceux de l'analyse de référence d'autre part (en transparence).

Urbanisme et patrimoine

1. Sensibilité

Les meilleurs itinéraires qui ressortent du scénario dans lequel le poids des contraintes relatives aux aspects urbanistiques et patrimoniaux sont représentés dans la figure suivante.

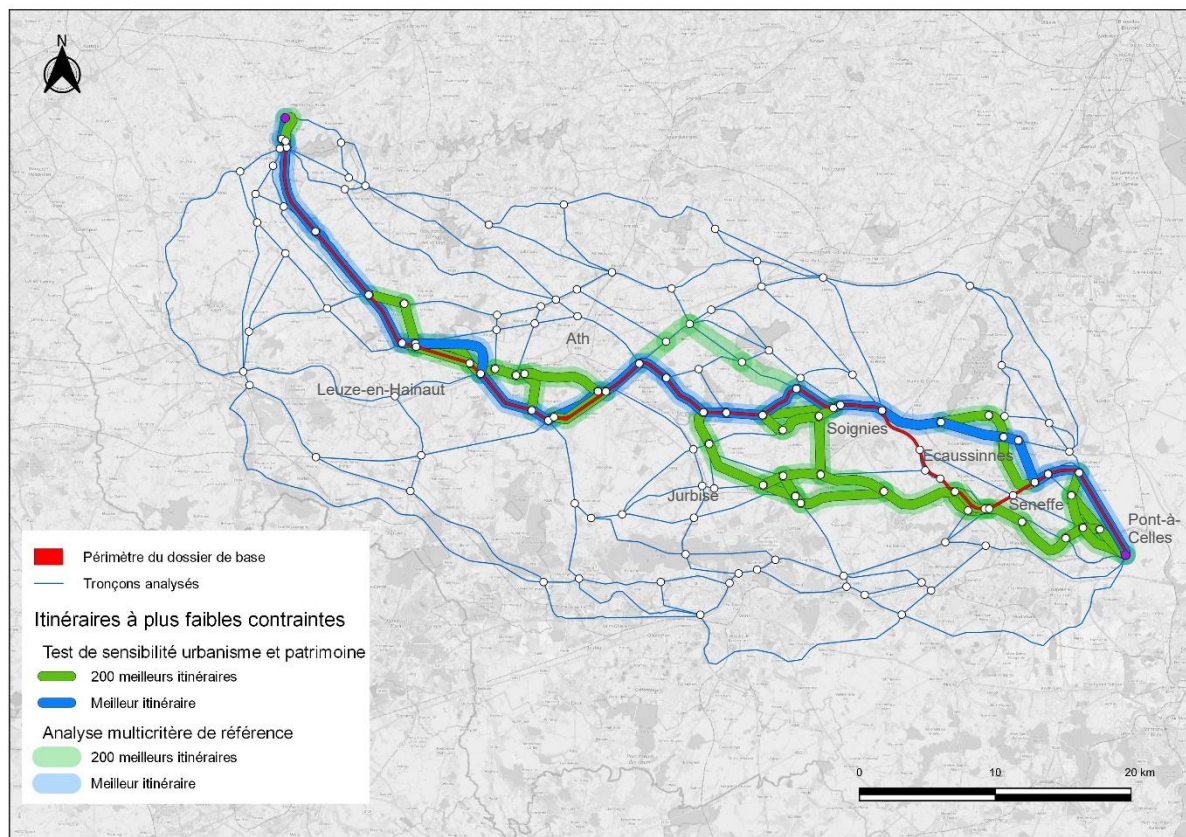


Figure 85 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant les thématiques urbanisme et patrimoine

Les résultats révèlent que le scénario accentuant les thématiques urbanisme et patrimoine présente des tronçons très similaires à ceux obtenus dans le scénario de référence. Seule la variante plus au Nord entre les villes d'Ath et de Soignies (qui remonte vers Ghislenghien-Silly puis redescend ensuite) présente dans les meilleurs itinéraires de l'analyse de référence n'est pas retenue dans ce scénario. Le meilleur tracé selon ce scénario correspond également au meilleur tracé de l'analyse de référence.

Les scores obtenus pour ce scénario ne sont que légèrement augmentés par rapport au scénario de référence, malgré le doublement du poids des contraintes urbanistiques et patrimoniales. La sélection des meilleurs itinéraires est donc peu sensible à une variation du poids du critère urbanisme et patrimoine.

2. Extrême

Les meilleurs itinéraires qui ressortent du scénario extrême dans lequel seules les contraintes relatives aux aspects urbanistiques et patrimoniaux ont été considérées sont représentés dans la figure suivante.

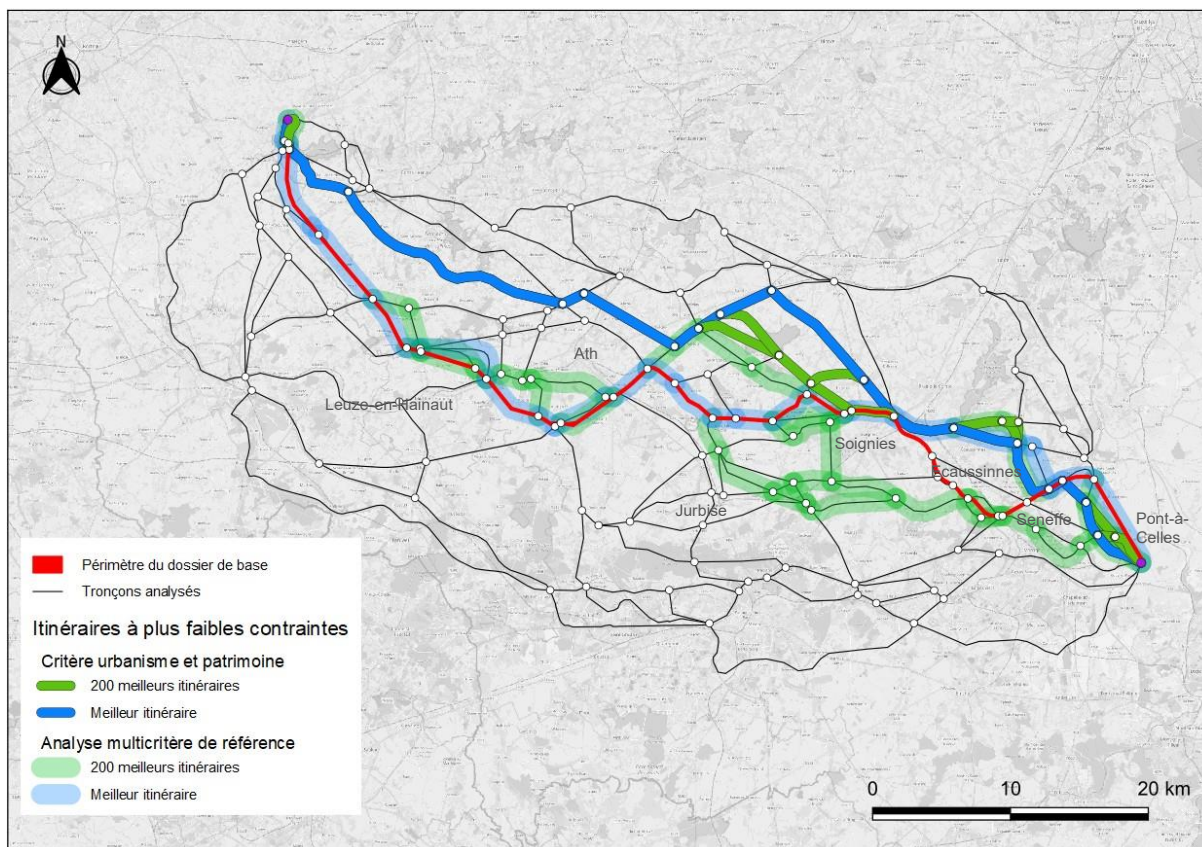


Figure 86 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que les thématiques Urbanisme et Patrimoine

Dans ce scénario, la plupart des tronçons composant les 200 meilleurs itinéraires se situent plus au Nord du fuseau central dans lequel se concentrent les itinéraires de l'analyse de référence.

Le meilleur tracé qui ressort de cette analyse (en bleu affirmé dans la Figure 86) obtient, lorsqu'on le ramène à la pondération de référence de l'analyse multicritère, un score 20% plus élevé que le meilleur tracé de l'analyse de référence. Cela signifie qu'en ne tenant compte que des aspects urbanistiques et patrimoniaux, on obtient un itinéraire qui est largement défavorable du point de vue des autres thématiques environnementales.

Agriculture

1. Sensibilité

Les meilleurs itinéraires qui ressortent du scénario dans lequel le poids des contraintes relatives à l'agriculture sont représentés dans la figure suivante.

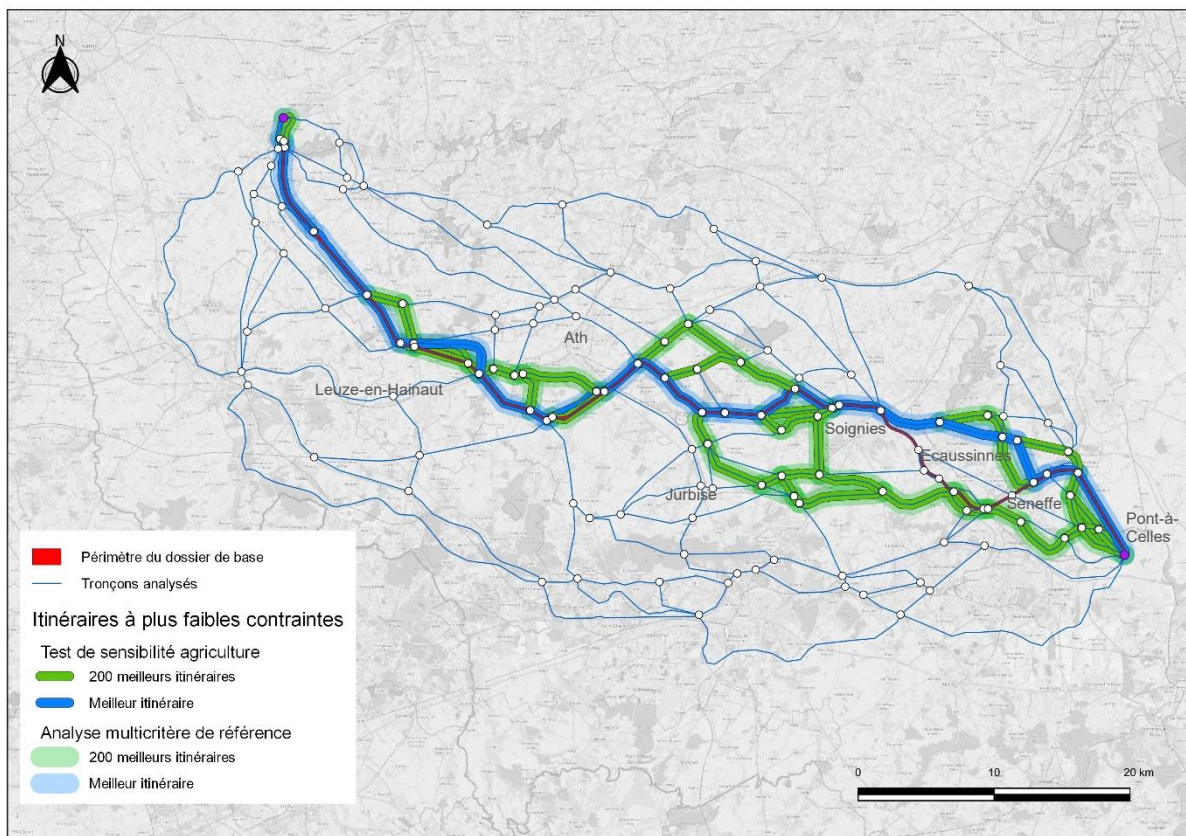


Figure 87 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant la thématique Agriculture

Le scénario accentuant la thématique agriculture présente des tronçons similaires au scénario de références à l'exception de deux tronçons (à l'Est de Jurbise et à l'ouest d'Écaussinnes). Le meilleur tracé selon ce scénario correspond également au meilleur tracé du scénario de référence. En doublant le poids du critère agriculture par rapport au scénario de référence, nous constatons que les scores n'évoluent que très légèrement. Le choix des meilleurs itinéraires est donc peu sensible à une variation du poids du critère agriculture.

2. Extrême

Les meilleurs itinéraires qui ressortent du scénario extrême dans lequel seules les contraintes relatives à l'agriculture ont été considérées sont représentés dans la figure suivante.

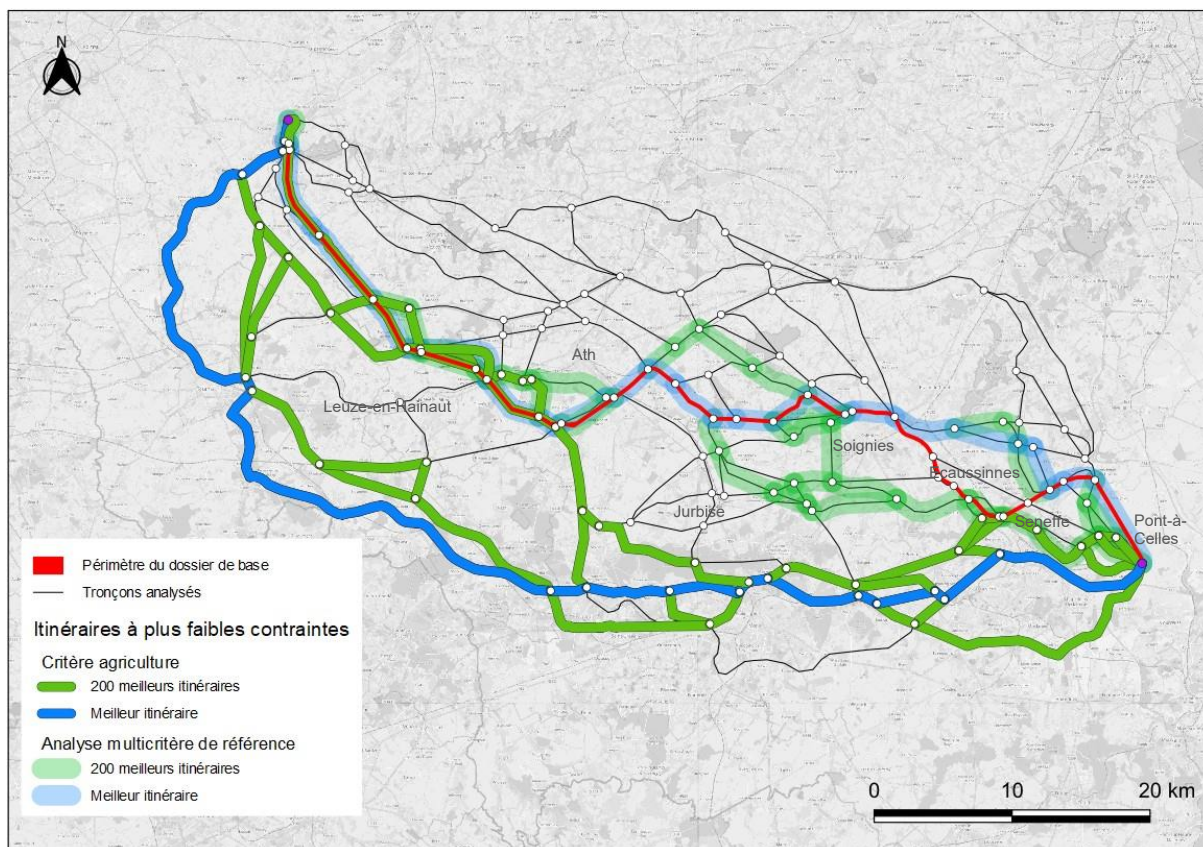


Figure 88 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que la thématique agriculture

Ce scénario révèle que, lorsqu'on isole les critères liés à l'agriculture, le faisceau des meilleurs itinéraires est fort écarté de ceux qui étaient ressortis de l'analyse multicritère de référence. Les tronçons sélectionnés se trouvent majoritairement au sud du fuseau central. Il y a, en effet, davantage de zones boisées, de zones industrielles et de zones urbanisées dans la partie Sud du territoire concerné. Les itinéraires qui passent par le Sud surplombent donc moins d'exploitations et de terres agricoles malgré la distance totale parcourue plus longue.

Le meilleur tracé selon ce scénario obtient, lorsqu'on le ramène à la pondération de référence de l'analyse multicritère, un score plus de quatre fois plus élevé que le meilleur tracé du scénario de référence. C'est donc un scénario qui pointe vers une solution très pénalisante du point de vue des autres thématiques environnementales.

Champs électromagnétiques et bruits et vibrations (thématiques associées à la santé)

1. Sensibilité

Les meilleurs itinéraires qui ressortent de ce scénario sont représentés, comme précédemment, dans la figure suivante.

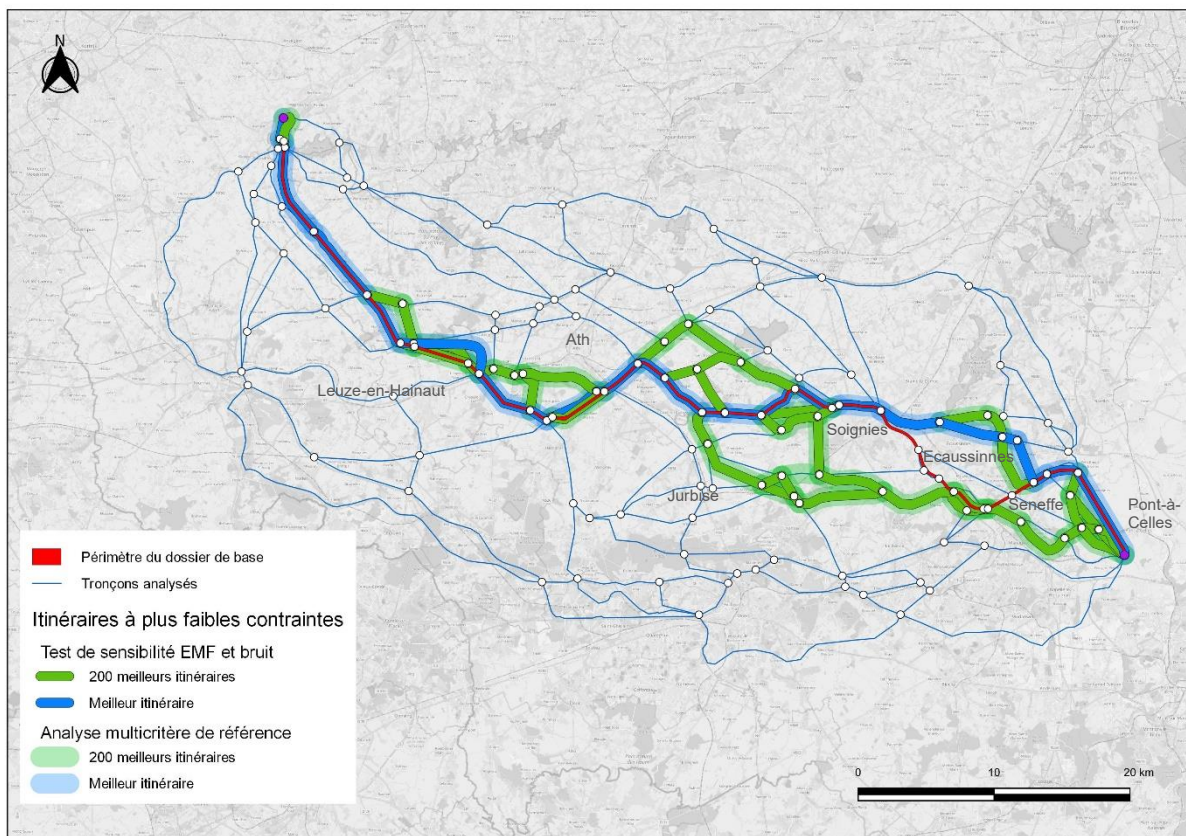


Figure 89 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant les thématiques champs électromagnétiques et bruits et vibrations

Le scénario accentuant les thématiques champs électromagnétiques et bruits et vibrations présente des tronçons similaires au scénario de références à l'exception d'un tronçon (à l'Est de Jurbise). Le meilleur tracé selon ce scénario correspond également au meilleur tracé du scénario de référence. A nouveau, le choix des meilleurs itinéraires est peu sensible à une variation du poids de ce critère.

2. Extrême

Les meilleurs itinéraires qui ressortent du scénario extrême dans lequel seules les contraintes relatives aux champs électromagnétiques au bruit et au vibrations ont été considérées sont représentés dans la figure suivante.

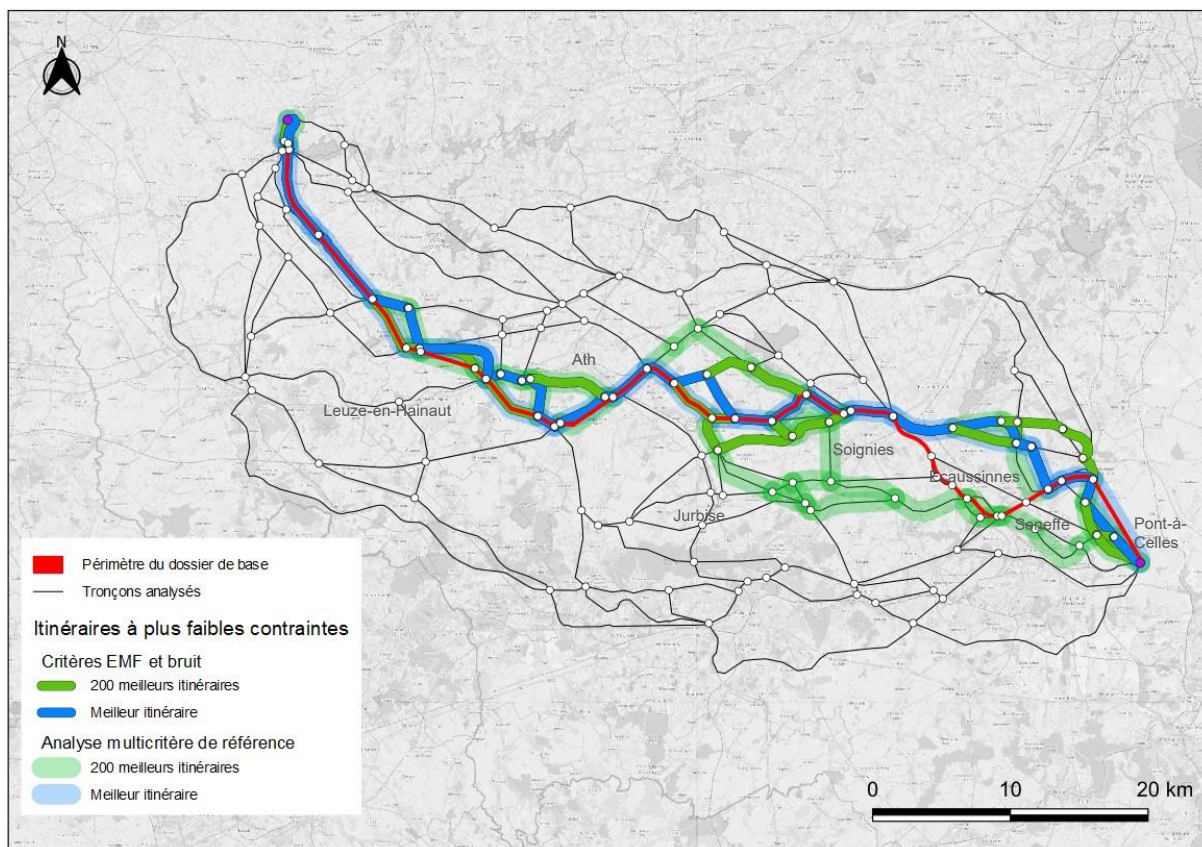


Figure 90 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que les thématiques Champs électromagnétiques et Bruits et vibrations

Ce scénario révèle un réseau de tronçons similaire à celui sélectionné dans le scénario de référence, avec un nombre inférieur de tronçons sélectionnés en raison du fait que les 200 meilleurs itinéraires se concentrent fortement au sein de tracés très semblables variant faiblement entre eux. Le meilleur tracé selon ce scénario présente néanmoins plusieurs différences avec celui du scénario de référence.

Le meilleur tracé selon ce critère obtient, lorsqu'on le ramène à la pondération de référence de l'analyse multicritère, un score 18% plus élevé que le meilleur tracé du scénario de référence.

Paysage

1. Sensibilité

Les meilleurs itinéraires qui ressortent de ce scénario sont représentés, comme précédemment, dans la figure suivante.

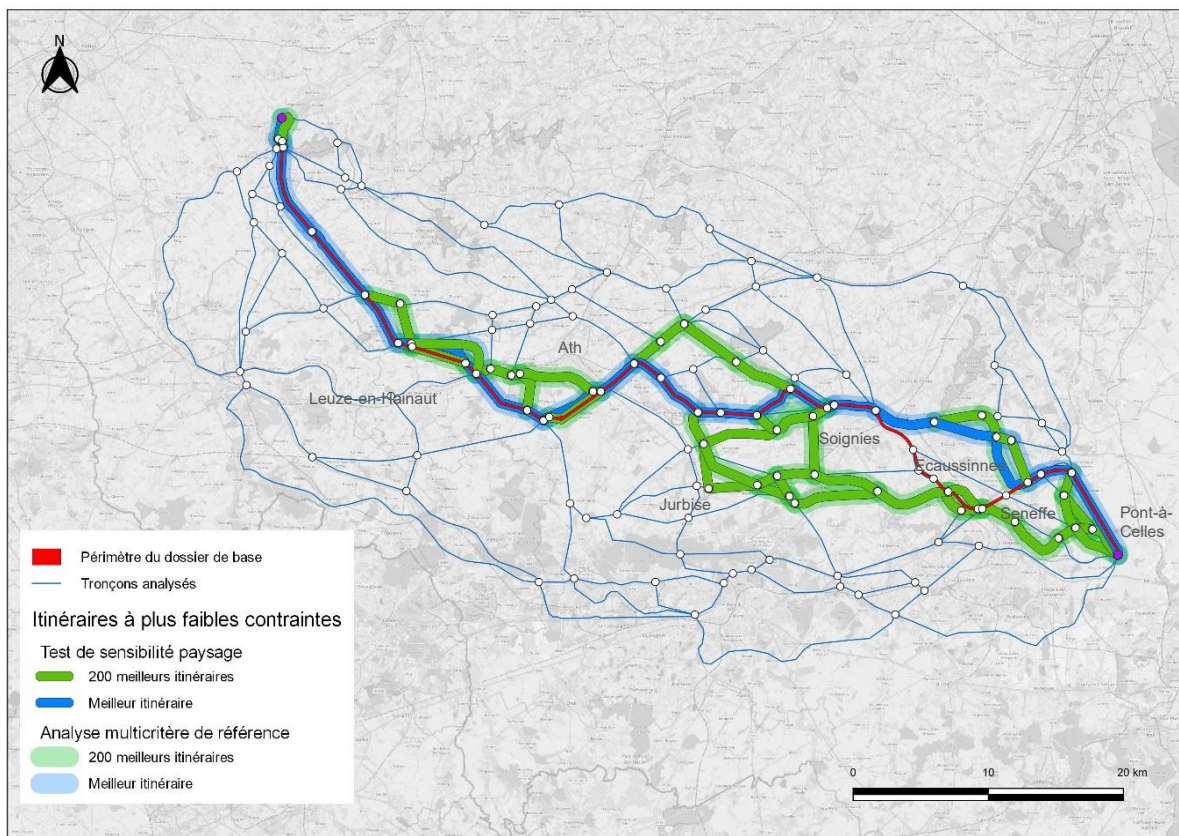


Figure 91 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant la thématique Paysage

Le scénario accentuant la thématique paysage présente des tronçons similaires au scénario de références à l'exception de quelques tronçons entre Jurbise et Soignies. Le meilleur tracé selon ce scénario varie sur un tronçon à l'Est d'Écaussinnes par rapport au meilleur tracé de l'analyse de référence. En doublant le poids du critère paysage par rapport au scénario de référence, nous constatons que les scores n'évoluent que très légèrement. Le choix des meilleurs itinéraires est donc peu sensible à une variation de ce critère.

2. Extrême

Les meilleurs itinéraires qui ressortent du scénario extrême dans lequel seules les contraintes relatives au paysage ont été considérées sont représentés dans la figure suivante.

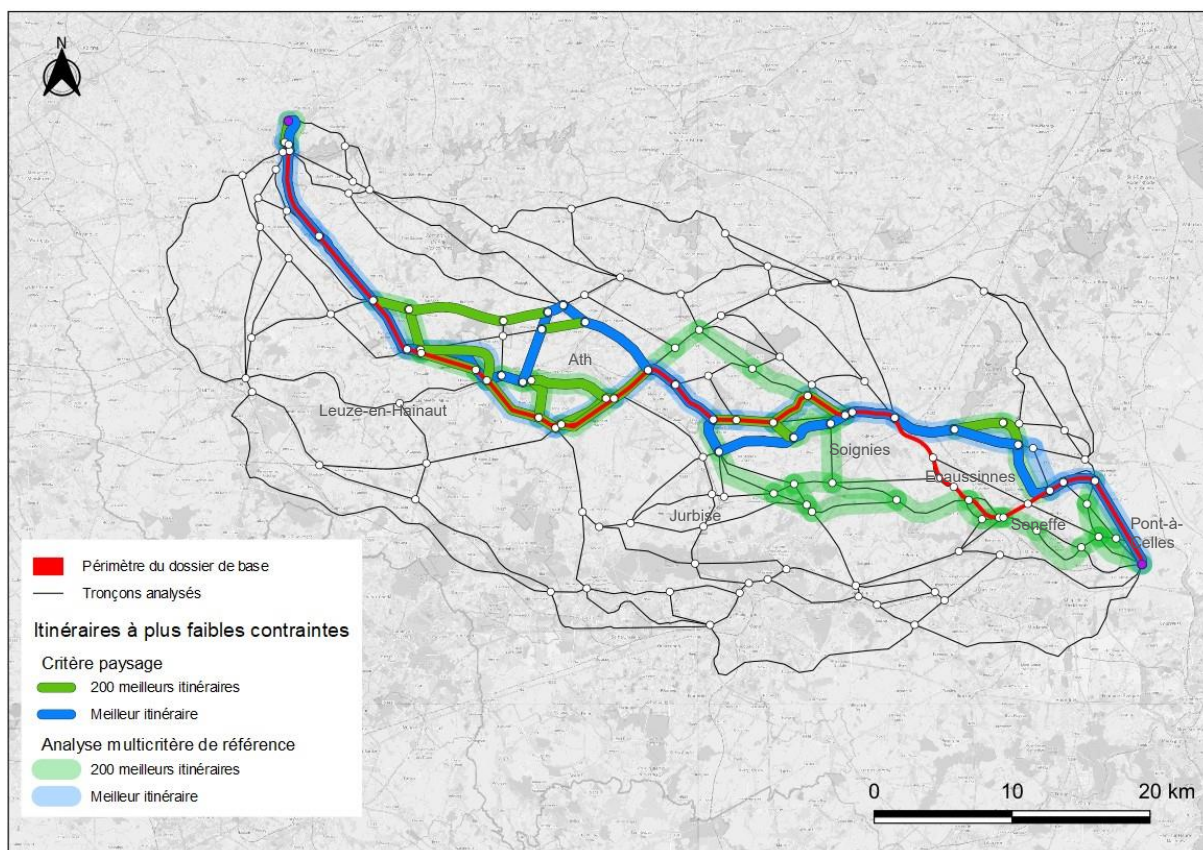


Figure 92 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que la thématique paysage

Le scénario extrême associé à la thématique du paysage révèle un réseau de tronçon partiellement commun avec celui du scénario de référence avec toutefois une sélection de tronçons plus large en partie Ouest de la liaison et, au contraire, plus étroite en partie Est de celle-ci. Le meilleur tracé présente également certaines sections communes avec celui de l'analyse de référence.

Le meilleur tracé selon ce critère obtient, lorsqu'on le ramène à la pondération de référence de l'analyse multicritère, un score 21% plus élevé que le meilleur tracé de l'analyse de référence.

Faune, flore et biodiversité

1. Sensibilité

Les meilleurs itinéraires qui ressortent de ce scénario sont représentés, comme précédemment, dans la figure suivante.

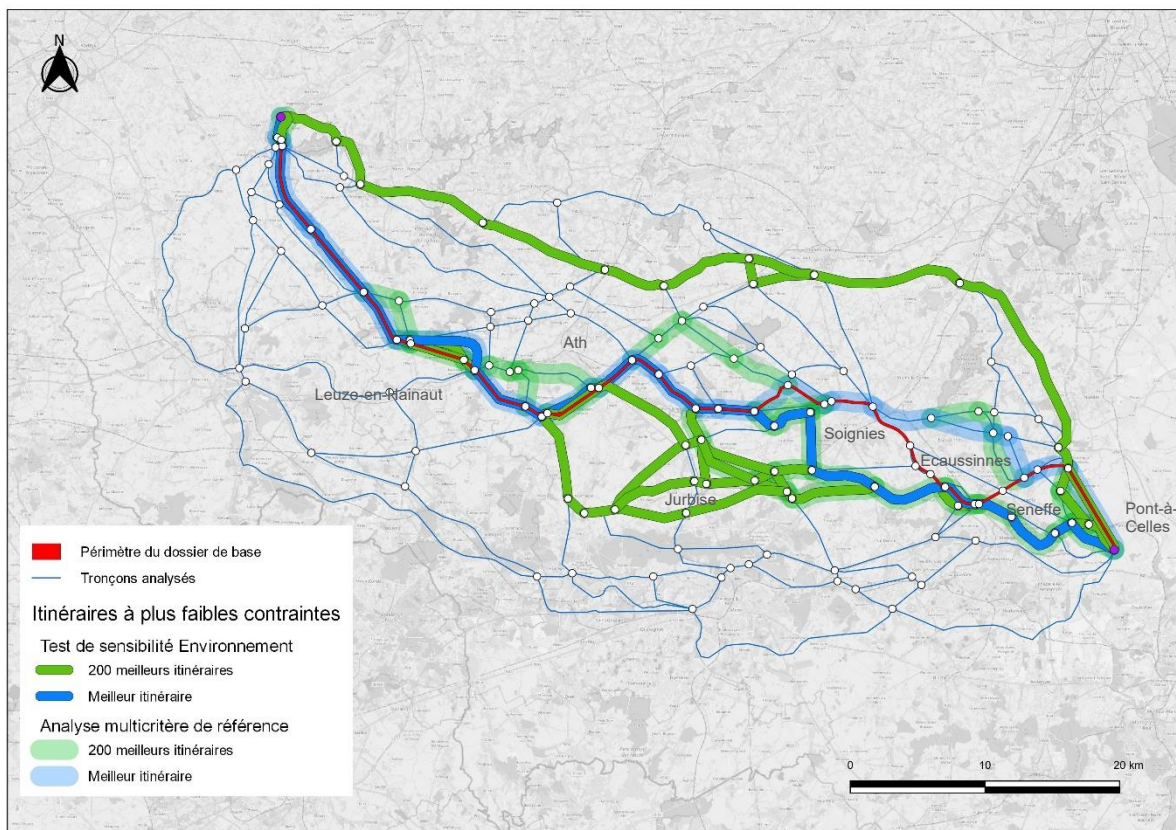


Figure 93 : Tronçons composants les meilleurs itinéraires pour le scénario accentuant les thématiques faune, flore et biodiversité

En doublant le poids des critères relatifs à la faune, la flore et la biodiversité rapport à l'analyse de référence, nous constatons que les tronçons composant les meilleurs itinéraires sont modifiés en partie et que le meilleur tracé est également sur la partie Est de la liaison. Le choix des meilleurs itinéraires est donc sensible à ce critère. Néanmoins, les tronçon composants le meilleur itinéraire sont bien compris dans les 200 meilleurs tracés étudiés dans le scénario de référence.

2. Extrême

Les meilleurs itinéraires qui ressortent du scénario extrême dans lequel seules les contraintes relatives à la faune, la flore et la biodiversité ont été considérées sont représentés dans la figure suivante.

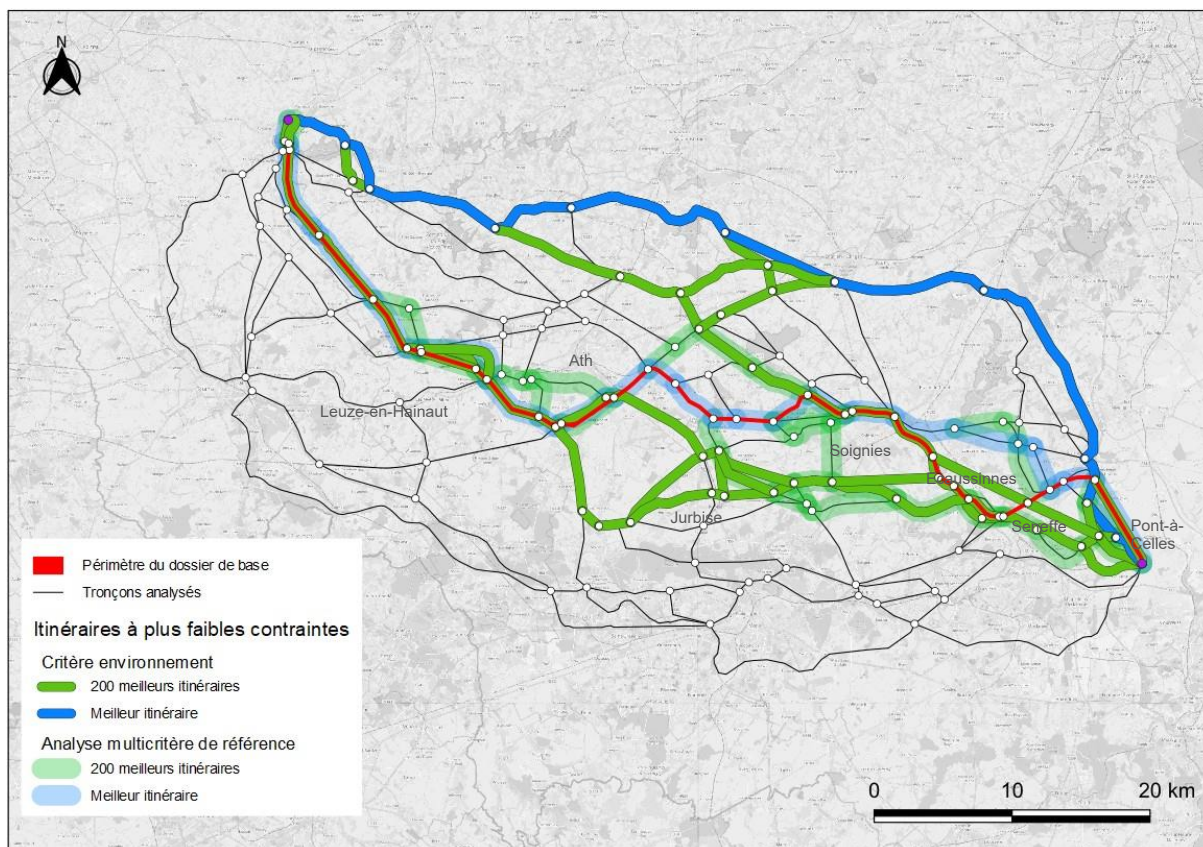


Figure 94 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que les thématiques Faune, flore et biodiversité

Le scénario extrême associé à la thématique faune, flore et biodiversité montre que, lorsqu'on isole ces critères, le faisceau des meilleurs itinéraires est assez diffus et écarté de celui qui était ressortis de l'analyse multicritère de référence.

Le meilleur tracé selon ce critère obtient, lorsqu'on le ramène à la pondération de référence de l'analyse multicritère, un score 23% plus élevé que le meilleur tracé du scénario de référence.

Regroupement des infrastructures

Le scénario extrême associé au principe de regroupement des infrastructures n'est pas issu d'un résultat de l'analyse multicritère dès lors que ce principe ne correspond pas à des contraintes spécifiques. Ce scénario a donc été construit par le chargé d'étude en sélectionnant des tronçons permettant de longer les infrastructures (routières, ferroviaires, fluviales et de transport d'électricité).

Les itinéraires qui ressortent de cet exercice sont représentés dans la figure suivante.

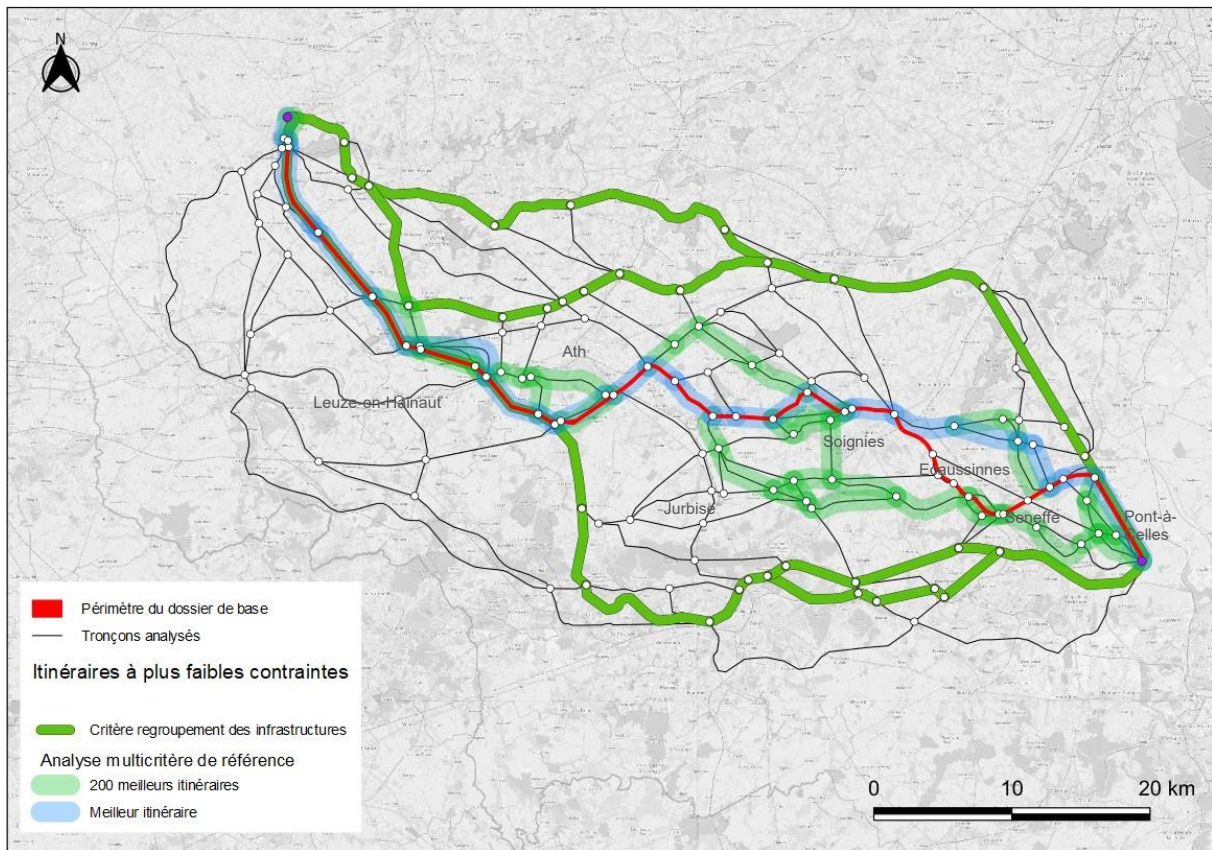


Figure 95 : Tronçons composant les meilleurs itinéraires pour le scénario extrême ne considérant que le principe de regroupement des infrastructures

Il apparaît que le réseau de tronçons s'écarte du fuseau central du scénario de référence, en allant tant au Sud qu'au Nord de celui-ci.

Les scores des tracés de ce scénario sont tous bien supérieurs à celui du meilleur itinéraire du scénario de référence, en particulier en raison de la longueur totale plus longue. En effet, au plus l'itinéraire s'écarte du tracé le plus court entre Avelgem et Courcelles au plus la probabilité de rencontrer des contraintes environnementales est grande.

Conclusions de l'analyse des tests de sensibilité et des scénarios extrêmes

L'analyse qui a été réalisée révèle la multidisciplinarité de l'approche et plus généralement des contraintes rencontrées tout le long des itinéraires. Au total, chaque critère considéré dans l'analyse multicritère contribue à la contrainte globale mais de manière assez limitée par rapport aux autres critères. Lorsqu'on double certaines pondérations, le choix des meilleurs itinéraires n'est donc que faiblement affecté, l'ensemble des autres critères restant très majoritaires dans la contrainte globale.

Les scénarios extrêmes donnent quant-à-eux des itinéraires souvent bien différents mais qui se révèlent sensiblement voire très défavorables par rapport aux autres thématiques environnementales.

Au terme de cette analyse de sensibilité, il peut être conclu que les itinéraires permettant de limiter au maximum les contraintes environnementales, d'un point de vue global, en tenant compte de la multidisciplinarité des impacts environnementaux potentiels, se trouvent dans le fuseau d'alternative issus de l'analyse multicritère de référence.

6.6.3.c. LE RÉSEAU DE TRONÇONS ALTERNATIFS ÉTUDIÉS

L'analyse chiffrée des 238 tronçons alternatifs et des 3 millions d'itinéraires trouvés pour relier les postes d'Avelgem et Courcelles ainsi que l'analyse de sensibilité réalisée dans le cadre de cette étude ont donc permis de dégager 39 tronçons alternatifs pouvant constituer des alternatives au projet potentiellement intéressantes d'un point de vue environnemental. Au cours de la phase 2 de cette étude, un maillon supplémentaire s'est également avéré présenter certains intérêts et a été ajouté à l'analyse, portant le nombre de tronçons alternatifs intéressants à 40.

Les 40 tronçons alternatifs considérés en plus du tracé de base sont présentés sur la carte ci-après.

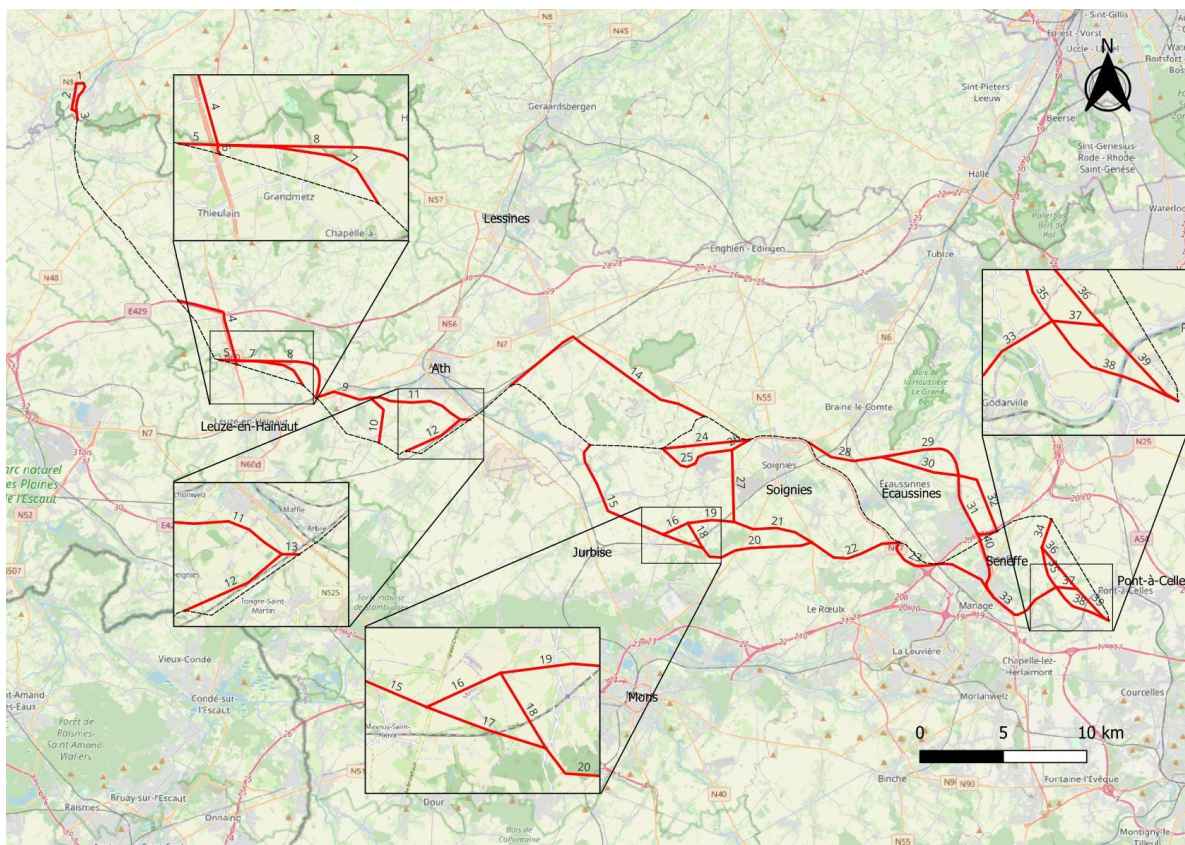


Figure 96: Les 40 tronçons retenus après analyse multicritères

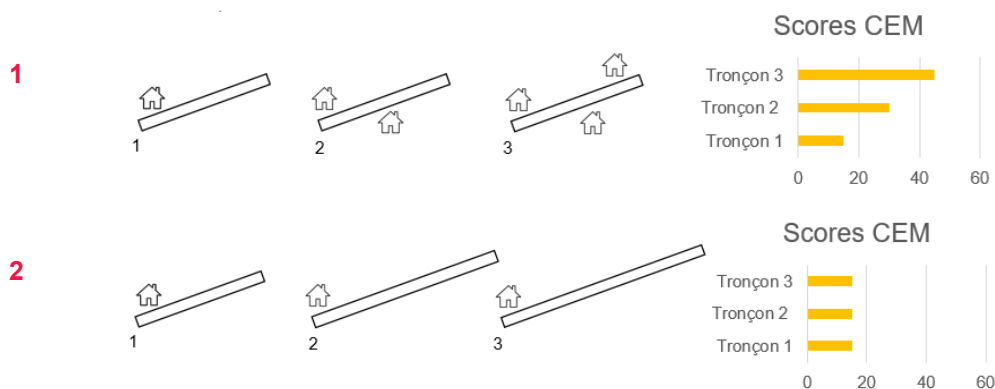
Chacun de ces tronçons a donc été analysé en détails à la suite de l'analyse des tronçons du projet de périmètre de réservation du dossier de base dans chacune des thématiques environnementales (cf. rapport de phase 2, partie 1 A et 1 B).

Dans cette analyse, les scores attribués pour l'ensemble de ces tronçons ont été ajustés selon l'appréciation du chargé d'études (regard des experts de chaque thématique, visite de terrain, etc.), et ce à l'échelle de l'ensemble des thématiques environnementales du RIE. A titre d'exemple, cette analyse détaillée a permis de prendre en compte la possibilité d'évitement de la contrainte au sein des 200 m de large du périmètre de réservation, les réelles co-visibilités avec les éléments patrimoniaux, etc. Cette révision des scores est présentée dans chaque thématique environnementale à la suite de l'analyse des incidences du projet de périmètre de réservation (Phase 2 -Partie 2) et comprend deux éléments principaux :

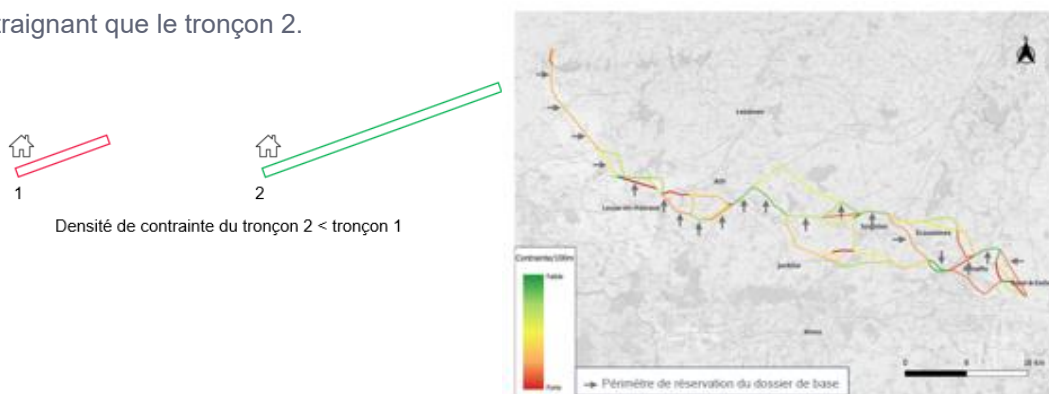
- La révision des scores en **contrainte absolue** pour chaque tronçon ;
- L'établissement d'une carte présentant, pour chaque thématique, une analyse comparative des tronçons **en densité de contrainte**.

Contrainte absolue et densité de contrainte :

La **contrainte absolue** correspond à la contrainte observée pour chaque tronçon. Ainsi dans l'exemple 1 ci-dessous, la contrainte en champ électromagnétique (CEM) est proportionnelle au nombre d'habitations situées à proximité du tronçon analysé. Le tronçon 1 présente donc une contrainte respectivement deux et trois fois moins élevée que celle des tronçons 2 et 3. Dans l'exemple 2, bien que les trois tronçons présentent une longueur totale différente, leur contrainte est identique puisqu'il n'y a qu'une seule habitation à proximité.



La comparaison des tronçons entre eux est réalisée en **densité de contrainte**, obtenue en divisant les résultats par tronçon par la longueur du tronçon. Ainsi dans l'exemple ci-dessous, les tronçons 1 et deux présentent la même contrainte absolue mais en densité de contrainte, le tronçon 1 apparaît plus contraignant que le tronçon 2.



Une analyse plus détaillée des choix qui restent à faire au sein de ce réseau des 200 meilleurs itinéraires est ensuite réalisée en Phase 2 - Partie 3. Cette analyse permet d'identifier les différentes contraintes qui jalonnent les différents itinéraires à éclairer sur les meilleures options à suivre ainsi que sur les mesures d'accompagnement qui pourront être mises en place. Une optimisation plus marginale des différents tronçons a également été proposée lorsque certains plus petits changements permettent de réduire encore davantage les incidences environnementales.

Le schéma ci-dessous synthétise la méthodologie utilisée depuis les données de base jusqu'à l'analyse des différents itinéraires intéressants et leur optimisation.

