Etude APS/APD du tracé et des caractéristiques de la ligne HTB 225 kV reliant les postes de Yopougon 3 à Songon

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ : GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Présenté et soutenu publiquement le lundi 26 janvier 2026 par

Dibo Henri Marcellin KOUADJO (20221058)

Encadrant 2iE : Ing. Justin BASSOLE, Enseignant au département Génie Électrique Énergétique et Industriel de 2iE

Maître de stage : Ing. Adama CISSE, Directeur des études à SEP I & C

Structure (s) d'accueil du stage : SEP Ingénierie & Conseils

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Pr. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE

Membres examinateurs : Dr. Mahaman Sani MOUSSA KADRI
Ing. Ahmed ZONGO

Promotion [2025/2026]

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mon Dieu, merci pour absolument tout !

A saint Joseph Cupertino, pour l'intercession efficace durant tout mon cycle.

A l'Etat de Côte d'Ivoire, pour l'appui et la confiance accordés à travers la bourse d'étude ayant contribué à la réussite de ce parcours académique.

A mes parents, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et les valeurs transmises tout au long de mon parcours.

A moi-même, pour les efforts consentis et la détermination tout au long de ce parcours

Enfin à toute ces personnes, qui m'ont soutenu et accompagné et/ou ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, sincère merci.

CITATION

« Go in those room where you think you don't belong shine and make sure you assume your identity »

Olivia Yacé

REMERCIEMENTS

Je rends avant tout grâce à Dieu pour la santé, la force et la sagesse qu'Il m'a accordées tout au long de mon parcours académique et durant la réalisation de ce travail, vraiment merci seigneur.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), par son Directeur Général Pr. El Hadji Bamba DIAW et toute son équipe pour la qualité de la formation dispensée et pour le cadre académique rigoureux mis à la disposition des étudiants.

J'adresse mes remerciements au département GEEI, dirigé par le Professeur. Y. Moussa SORO pour la rigueur et la culture de l'excellence prôné tout au long de mon cycle.

Je remercie mon encadrant interne, Ing. Justin BASSOLE, pour son accompagnement et ses conseils méthodologiques tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Ma reconnaissance va également à la structure d'accueil de mon stage, SEP Ingénierie & Conseils, pour l'opportunité offerte et l'environnement professionnel enrichissant dont j'ai bénéficié. Au Directeur Général, M. SEKONGO Drissa, au responsable administratif M. TOURE et à mon manager, M. Kassim CISSE, milles merci !

Je remercie enfin mon maître de stage, Ing. Adama CISSE, Chef de projet à SEP Ingénierie & Conseils, pour son encadrement technique et sa disponibilité.

Je remercie l'ensemble de mes enseignants, mes camarades, ainsi que ma famille et mes proches pour leur soutien et leurs encouragements constants.

RESUME

Ce mémoire présente l'étude d'Avant-Projet Sommaire et détaillée du tracé et des caractéristiques techniques de la ligne électrique aérienne HTB 225 kV reliant les postes de Yopougon 3 et de Songon, dans le district autonome d'Abidjan. L'objectif principal de ce travail est de proposer un tracé optimal et techniquement réalisable par l'identification d'un fuseau de moindre impact conciliant les contraintes techniques, environnementales, foncières et économiques à travers la conduite d'une étude APS/APD.

La phase APS a permis d'identifier trois fuseaux potentiels de tracé, évalués selon des critères techniques, environnementaux, fonciers et socio-économiques. À l'issue de cette analyse, le fuseau n°2 a été retenu comme corridor de moindre impact. Deux variantes de tracé y ont ensuite été étudiées, conduisant au choix de la proposition 4, d'une longueur d'environ 18,36 km, principalement intégrée dans des emprises existantes. La phase APD a porté sur le dimensionnement électrique et mécanique de la ligne. La puissance projetée à transiter sur un horizon de 20 ans est estimée à 137,81 MW, correspondant à un courant nominal de 392,91 A. Le conducteur de phase retenu est de type AAAC Aster 570 mm², associé à un câble de garde classique Phlox 147,1 ou à un câble de garde à télécommunications intégrées de type Thym 157,4. Les supports sont constitués de pylônes métalliques en treillis, adaptés aux portées et aux contraintes topographiques du tracé. Les chaînes d'isolateurs standard F70/127 assurent la tenue électrique et mécanique conformément aux normes internationales. L'analyse électrique réalisée à l'aide du logiciel DIgSILENT PowerFactory confirme la conformité de la ligne en termes de transit de puissance et de chute de tension admissible, évaluée à environ 0,8 %. Enfin, l'estimation financière du projet conduit à un coût global d'investissement (CAPEX) évalué à 3 075 480 000 FCFA, et l'étude intègre une évaluation des impacts environnementaux et sociaux assortie de mesures d'atténuation appropriées.

Mots Clés :

1. **Fuseau de moindre impact**
2. **Yopougon 3- Songon**
3. **Ligne HTB 225 kV**
4. **Réseau de transport électrique**
5. **Plan directeur production-transport**

ABSTRACT

This thesis presents the Preliminary Design (APS) and Detailed Design (APD) study of the routing and technical characteristics of the 225 kV high-voltage overhead transmission line connecting the Yopougon 3 and Songon substations, located in the Autonomous District of Abidjan. This project forms part of the national strategy to strengthen and secure the electricity transmission network, in a context marked by sustained growth in energy demand in the Abidjan-West area.

The adopted methodology is based on a progressive approach combining cartographic analyses, field investigations, and multi-criteria assessments. The APS phase made it possible to identify three potential routing corridors, assessed according to technical, environmental, land-use, and socio-economic criteria. Following this analysis, corridor no. 2 was selected as the least-impact option. Two routing alternatives were then examined within this corridor, leading to the selection of option 4, with a total length of approximately 18.36 km, mainly integrated into existing rights-of-way. The APD phase focused on the electrical and mechanical design of the transmission line. The projected power to be transmitted over a 20-year horizon is estimated at 137.81 MW, corresponding to a nominal current of 392.91 A. The selected phase conductor is of type AAAC Aster 570 mm², associated with a conventional shield wire Phlox 147.1 or an optical ground wire Thym 157.4. The supports consist of lattice steel towers adapted to the spans and topographical constraints of the route. Standard F70/127 insulator strings ensure electrical and mechanical performance in accordance with international standards. Electrical analysis carried out using DIgSILENT PowerFactory confirms the compliance of the line in terms of power transmission capacity and admissible voltage drop, estimated at about 0.8%. Finally, the financial assessment of the project results in a total investment cost (CAPEX) estimated at 3,075,480,000 FCFA, and the study includes an evaluation of environmental and social impacts together with appropriate mitigation measures.

Keywords :

1. **225 kV transmission line**
2. **Yopougon 3-Songon**
3. **Optimal routing**
4. **Power transmission network**
5. **Preliminary and detailed design**

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AAAC	All Aluminium Alloy Conductor
ANDE	Agence Nationale De l'Environnement
BIL	Basic Insulation Level (Niveau de tenue aux chocs de foudre)
BT	Basse Tension
CAPEX	Capital Expenditure (Coûts d'investissement)
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CEB	Communauté Électrique du Bénin
CEI (IEC)	Commission Électrotechnique Internationale
CIE	Compagnie Ivoirienne d'Électricité
CI-ÉNERGIES	Gestionnaire du réseau de transport d'électricité en Côte d'Ivoire
CNRA	Centre National de Recherche Agronomique
EIES	Étude d'Impact Environnemental et Social
HT	Haute Tension
HTA	Haute Tension A
HTB	Haute Tension B
IEC	International Electrotechnical Commission
NF	Norme Française
PLU	Plan Local d'Urbanisme
RTE	Réseau de Transport d'Électricité
SIG	Système d'Information Géographique
SONABEL	Société Nationale d'Électricité du Burkina Faso

SODEFOR	Société de Développement des Forêts
SODEXAM	Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
TDEE	Transport et Distribution de l'Énergie Électrique
THT	Très Haute Tension
UM	Tension maximale pour le matériel
WAPP	West African Power Pool

TABLES DES MATIERES

DEDICACES i

CITATION ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

LISTE DES ABREVIATIONS vi

TABLES DES MATIERES viii

LISTE DES TABLEAUX x

LISTE DES FIGURES xi

I. INTRODUCTION 1

II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET D'ETUDE 2

II.1 Présentation de la structure d'accueil 2

II.2 Présentation du projet d'étude 3

III. GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES 7

III.1 Hiérarchisation par niveau de tension 7

III.2 Le réseau électrique de la Côte d'Ivoire 8

III.3 Les composants d'une lignes aérienne HTB 9

IV. METHODOLOGIE DE L'ETUDE 13

IV.1 Approche générale 13

IV.2 Etape APS 13

IV.3 Etape APD 14

V. ETUDE AVANT-PROJET SOMMAIRE POUR LA DETERMINATION DU FUSEAU ET DU TRACE DE LA LIGNE 225 kV YOPOUGON 3- SONGON 15

V.1 Diagnostique de la zone d'étude 15

V.2 Élaboration des fuseaux de tracé et détermination du fuseau de moindre impact pour la ligne 225 kV 21

V.3 Définition 21
V.4 Cartographie des enjeux à éviter prioritairement 22
V.5 Cartographie des enjeux à éviter préférentiellement 23
V.6 Synthèse cartographique et hypothèse des fuseaux 24
V.7 Détermination du fuseau de moindre impact 28
V.8 Proposition des tracés retenus dans le fuseau de moindre impact (FUSEAU 2) 30
V.9 Description des variantes de tracés étudiées 31
VI. ETUDE AVANT PROJET DETAILLE DE LE LIGNE 225kV YOPOUGON 3 - SONGON 35
VI.1 Description du trace retenu (proposition 4) 35
VI.2 Dimensionnement électrique de la ligne 225 kV 36
VI.3 Analyse électrique de la ligne 225 kV 44
VI.4 Dimensionnement mécanique de la ligne 225 kv 48
VI.5 Estimation financière du projet 63
VII. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DU PROJET 64
VII.1 Objectif et portée 64
VII.2 Cadre juridique et classification du projet 64
VII.3 Impacts environnementaux et sociaux 65
VII.4 Mesures d'atténuation 66
VII.5 Synthèse des aspects environnementaux 66
VIII. CONCLUSION 67
IX. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 68
X. ANNEXES I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des réseaux suivant le niveau de tension 8
Tableau 2: Données climatiques du district d'Abidjan 16
Tableau 3: Détails des superficies des lotissements de l'aire d'étude Yopougon 3-Songon 19
Tableau 4: Caractéristique de l'aire d'étude en fonction de ses composantes à la vue des enjeux et sensibilité 21
Tableau 5: Synthèse des composantes à éviter prioritairement dans l'aire d'étude Yopougon 3 – Songon 22
Tableau 6: Synthèse des composantes à éviter préférentiellement dans l'aire d'étude Yopougon 3 – Songon 23
Tableau 7: Comparatif des hypothèses de fuseaux 29
Tableau 8: Ouvrages spécifiques – partie souterraine (592 m) 32
Tableau 9: Comparatif des propositions 4 et 5 33
Tableau 10: Association conducteurs/ câbles de garde 41
Tableau 11: Tension de contournement en fonction du degré de salinité et de la zone de pollution 42
Tableau 12: Récapitulatif des spécifications de la chaîne d'isolateur 44
Tableau 13: Hypothèse climatique de l'étude 50
Tableau 14: Distance de protection contre les risques électriques & probabilité simultanée de présence 51
Tableau 15: Répartition des pylônes sur le tracé 60
Tableau 16: Estimation financière du projet 63

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organigramme SEP I&C 2
Figure 2: Aire d'étude Yopougon3 – Songon..... 4
Figure 3: Structure générale d'un système électrique ; *source : SlideToDoc.com*..... 7
Figure 4: Conducteur ACSR Figure 5: Conducteur AAAC Figure 6: Conducteur AACSR 10
Figure 7: Types de fondation..... 11
Figure 8: Isolateur composite ; *Source : Isolateur composite MT-HT-THT-InexMax*..... 12
Figure 9: Synthèse des principales composantes de l'aire d'étude associée au plan de lotissement de la zone du projet 20
Figure 10: Synthèse cartographique des éléments à éviter prioritairement (bleu foncé) et préférentiellement (bleu clair)..... 25
Figure 11 : Hypothèse des fuseaux dans l'aire d'étude 27
Figure 12: Illustration du tracé 4 (tracé de moindre impact) dans le fuseau 2 de moindre impact 34
Figure 13: Modélisation du réseau sur PowerFactory..... 46
Figure 14: Résultats du model après calcul du flux de puissance..... 46
Figure 15: Pylône treillis 6 triangles *source « cours présentation ingénierie des réseaux, Ing. Ulrich PODA »* (PODA, s.d.)..... 59
Figure 16: Répartition des pylônes sur le tracé et vue sur les cantons..... 60

I. INTRODUCTION

L'énergie électrique joue un rôle central dans le développement économique et industriel d'un pays. En Côte d'Ivoire, la croissance démographique et l'essor des activités industrielles, notamment dans le district d'Abidjan, entraînent une augmentation constante de la demande en électricité. Pour répondre à cette dynamique, le gouvernement ivoirien a élaboré un programme de planification des investissements du secteur de l'électricité sur la période 2014–2030, articulé autour de quatre Plans Directeurs : Production–Transport, Distribution, Automatisme-Téléconduite et Électrification Rurale.

Dans cette optique, la création de nouvelles interconnexions entre postes de transformation haute tension (HTB) représente une solution stratégique pour améliorer la continuité de service et réduire les pertes techniques, favorisant une meilleure répartition des flux électriques et une plus grande résilience du réseau face aux éventuelles pannes ou surcharges.

La présente étude, intitulée « Étude APS/APD du tracé et des caractéristiques de la ligne HTB 225 kV reliant les postes de Yopougon 3 à Songon », s'inscrit dans le cadre de ce projet de renforcement du réseau de transport. Elle a pour objectif principal de proposer un tracé optimal et techniquement réalisable pour la future ligne, tout en intégrant les contraintes topographiques, environnementales, économiques et sociales propres à la zone d'étude.

La démarche adoptée repose sur une approche progressive, articulée autour de deux grandes phases :

- **Une étude APS** (Avant-Projet Sommaire), destinée à identifier et comparer plusieurs options de tracé selon des critères techniques et environnementaux,
- **Une étude APD (**Avant-Projet Détaillé), visant à approfondir le tracé retenu à travers un dimensionnement électrique et mécanique complet, accompagné d'une évaluation financière et environnementale.

Ce travail s'appuie sur la collecte et l'exploitation de données techniques, cartographiques et climatiques, ainsi que sur des hypothèses de calcul conformes aux normes internationales (CEI) et aux références nationales. Il servira de base technique à la mise en œuvre du projet de bouclage 225 kV, contribuant ainsi à la fiabilisation et à la modernisation du réseau ivoirien de transport d'électricité.

II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET D'ETUDE

II.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

II.1.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Fondée en 2015, SEP Ingénierie & Conseils est une société ivoirienne d'ingénierie, d'assistance à maîtrise d'ouvrage, de maîtrise d'œuvre et de conseil technique, spécialisée dans les secteurs des infrastructures électriques (lignes HTB, postes, électrification rurale), du bâtiment, des ouvrages hydrauliques et de l'assainissement.

Basée à Abidjan, SEP Ingénierie & Conseils intervient sur l'ensemble du territoire ivoirien ainsi qu'à l'international dans la sous-région ouest-africaine. L'entreprise bénéficie d'une solide expérience dans la conduite de missions de supervision de travaux, de contrôle qualité, de planification et de gestion de projets d'infrastructures complexes, financés par des bailleurs multilatéraux et des institutions publiques.

SEP Ingénierie & Conseils compte actuellement :

- 15 collaborateurs permanents,
- 25 à 30 collaborateurs mobilisables sur projet (experts partenaires, techniciens de terrain, consultants seniors),
- Plus de 30 projets réalisés ou en cours

II.1.2 ORGANISATION INTERNE

II.1.2.1 ORGANISATION INTERNE ACTUELLE (SIÈGE - ABIDJAN)

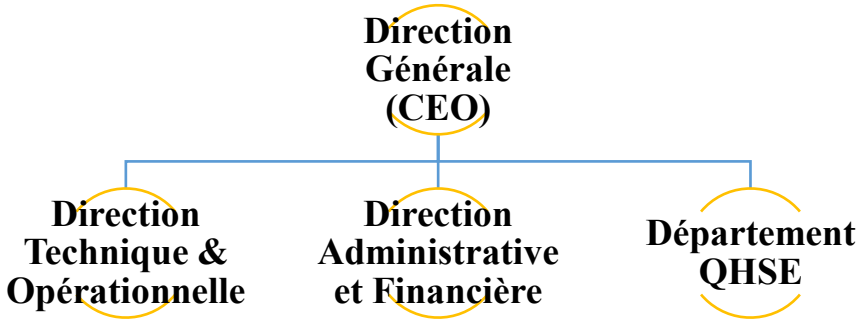


Figure 1: Organigramme SEP I&C

II.2 PRESENTATION DU PROJET D'ETUDE

II.2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

L'aire d'étude du présent projet concerne la future ligne électrique aérienne 225 kV reliant les postes de Yopougon 3 et de Songon, dans le district autonome d'Abidjan (voir **Figure 2**), au sud de la Côte d'Ivoire. Elle couvre une superficie totale d'environ 192,53 km². Elle a été délimitée et validée par CI-ÉNERGIES dans le cadre des études préliminaires de recherche du fuseau de moindre impact pour l'implantation de la future ligne 225 kV. Les limites principales de cette aire sont définies comme suit :

- À **l'est** : la zone forestière relevant de la SODEFOR ainsi que le futur site du poste 225 kV de Yopougon 3 ;
- Au **sud** : la localité de Songon Dagbé et le futur site du poste 225 kV de Songon ;
- Au **nord** : l'autoroute du Nord, principal axe de liaison entre Abidjan et l'intérieur du pays ;

La zone présente une topographie plane à faiblement ondulée, avec des altitudes variant de 50 à 100 mètres. On y rencontre quelques bas-fonds et zones humides proches des affluents de la lagune Ébrié. Le climat est équatorial humide, avec une température moyenne annuelle d'environ 26 °C et des précipitations supérieures à 1500 mm.
La végétation est constituée de forêts secondaires, de plantations agricoles (hévéa, palmier à huile, manioc) et de zones de savane dégradée. Ces caractéristiques naturelles imposent une analyse fine pour limiter les impacts environnementaux lors du choix du fuseau.

Cette aire englobe également la ligne 400 kV Akoupé-Zeudji–Taboth, déjà existante, dont la présence influence le choix des couloirs possibles pour le passage de la future ligne 225 kV.

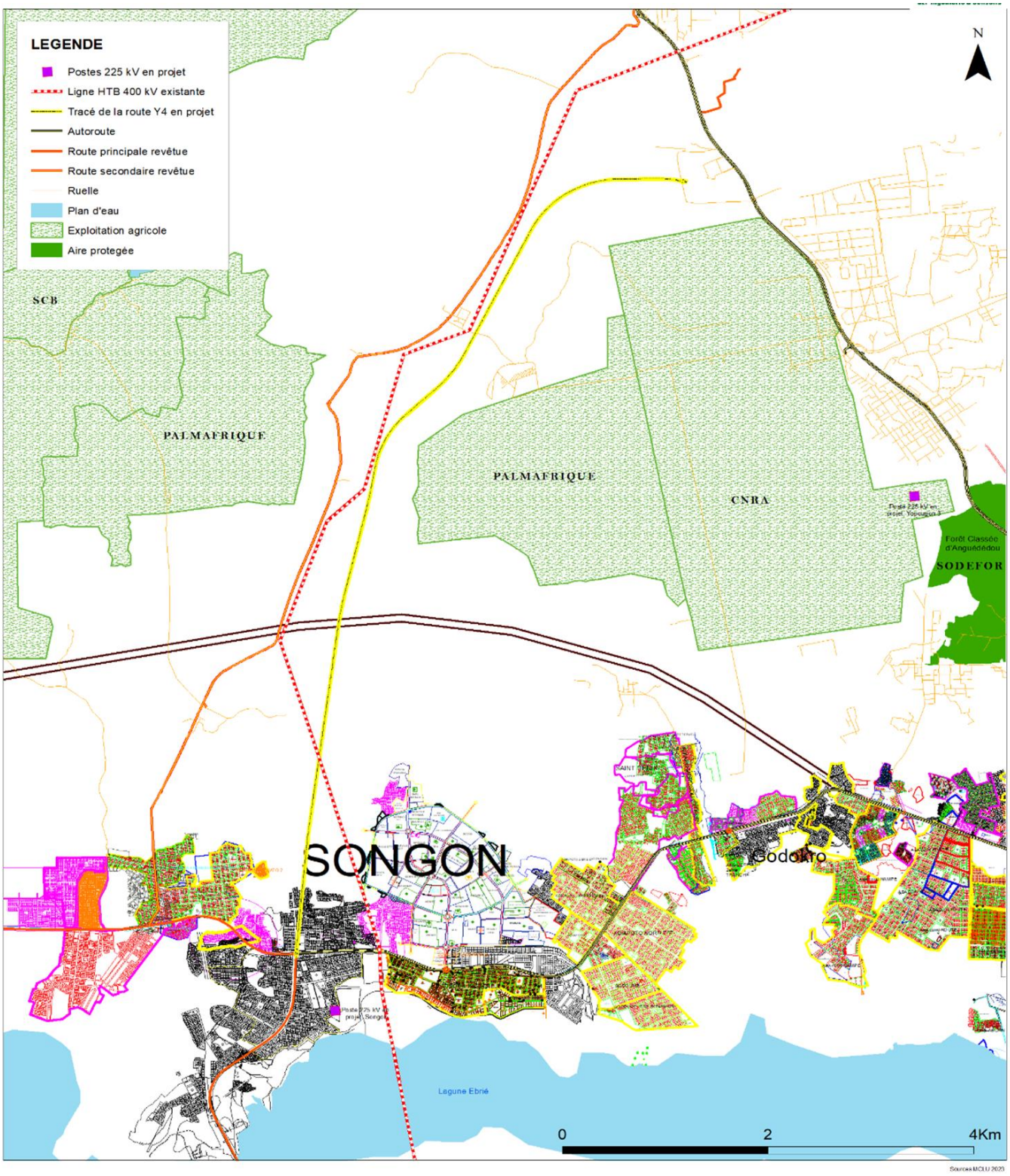


Figure 2: Aire d'étude Yopougon3 – Songon

II.2.2 CONTEXTE ET JUSTIFICATION

Le développement socio-économique de la Côte d'Ivoire repose en grande partie sur la disponibilité d'une énergie électrique fiable, accessible et en quantité suffisante. Face à la croissance soutenue de la demande, particulièrement dans le district d'Abidjan, le gouvernement ivoirien a mis en œuvre un programme de planification cohérent des investissements du secteur de l'électricité sur la période 2014–2030. Ce programme s'appuie sur quatre Plans Directeurs : Production–Transport, Distribution, Automatisme–Téléconduite et Électrification Rurale, traduisant la vision du Ministère des Mines, du Pétrole et de l'Énergie visant à faire de la Côte d'Ivoire le hub énergétique de la sous-région, tout en assurant l'électrification totale du territoire.

Dans ce cadre, plusieurs projets structurants ont été identifiés, notamment la construction des futures lignes 225 kV Yopougon 3–Songon et Songon–Dabou, accompagnée de la reconversion du poste 90 kV de Dabou en 225 kV. Ces projets s'inscrivent dans la logique de renforcement et de sécurisation du réseau de transport d'électricité d'Abidjan-Ouest, une zone à forte croissance industrielle et résidentielle où les besoins énergétiques augmentent rapidement.

C'est dans cette dynamique que CI-Énergies, maître d'ouvrage du secteur, a confié à la société SEP Ingénierie & Conseils la réalisation d'une étude APS/APD du tracé et des caractéristiques de la future ligne 225 kV entre Yopougon 3 et Songon.

La justification de cette étude repose sur plusieurs aspects majeurs :

- **Technique** : garantir la continuité d'alimentation et la stabilité du réseau 225 kV à Abidjan-Ouest en assurant une efficacité du poste de Yopougon 3.
- **Économique** : réduire les pertes en ligne et optimiser les investissements en infrastructures électriques.
- **Environnemental et social** : minimiser les atteintes aux milieux naturels, aux zones habitées et aux propriétés privées par le choix d'un tracé de moindre impact.

Ainsi, cette étude vise à fournir à CI-Énergies et à SEP Ingénierie une base technique solide pour la mise en œuvre du projet de ligne 225 kV Yopougon 3–Songon. Elle contribuera à la modernisation du réseau de transport ivoirien, à la sécurisation de l'alimentation électrique d'Abidjan, et, plus globalement, à la réalisation des objectifs du Plan Directeur Transport 2014– 2030.

II.2.3 OBJECTIF DE L'ETUDE

Objectif général

L'objectif principal de cette étude est de proposer un tracé optimal et techniquement réalisable pour la future ligne aérienne 225 kV entre les postes de Yopougon 3 et de Songon, à travers la conduite d'une étude APS/APD permettant d'identifier un fuseau de moindre impact conciliant les contraintes techniques, environnementales, foncières et économiques.

Objectif spécifique

De manière spécifique, l'étude vise à :

- Réaliser l'Avant-Projet Sommaire (APS) afin d'identifier plusieurs hypothèses de fuseau, d'en tirer celle de moindre impact et d'y ressortir le tracé de la ligne. D'en analyser les avantages et contraintes selon des critères techniques, topographiques, environnementaux et sociaux.
- Élaborer l'Avant-Projet Détaillé (APD) du tracé retenu, incluant :
- Le dimensionnement électrique de la ligne
- Le dimensionnement mécanique
- Estimer le coût global du projet (CAPEX)
- Évaluer les impacts environnementaux et sociaux liés au tracé retenu et proposer des mesures d'atténuation conformes aux exigences réglementaires nationales et internationales.

III. GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

Le réseau électrique est l'infrastructure mettant en relation la production d'électricité et les usages finaux (**Figure 3**). En réalisant cette interface, le réseau assure non seulement un lien physique permettant la circulation des flux d'énergie mais aussi une mise à disposition de services pour la collectivité qu'il irrigue (Zouzou et Kanoune, 2017). Il est composé d'ouvrages interconnectés de transport et de distribution, dont la mission principale est d'assurer la continuité, la fiabilité et la qualité de l'alimentation électrique. L'électricité, une fois produite dans les centrales (hydrauliques, thermiques, solaires, etc.), est transportée à haute tension sur de longues distances afin de minimiser les pertes. À l'approche des zones de consommation, elle est abaissée à des niveaux de tension moyens, puis à basse tension pour la distribution finale aux usagers domestiques, commerciaux et industriels.

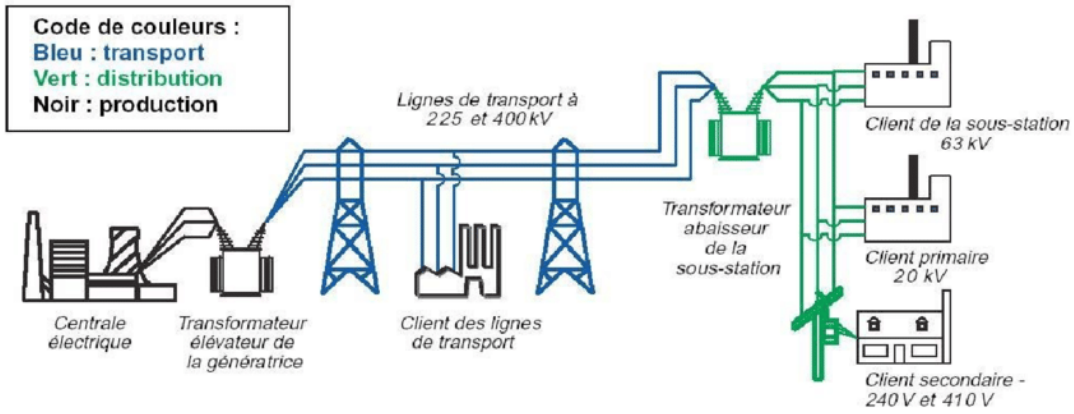


Figure 3: Structure générale d'un système électrique ; *source : SlideToDoc.com*

Un réseau électrique moderne repose sur trois principes fondamentaux :

- **L'interconnexion**, qui permet la mutualisation des moyens de production et la sécurité du système (UN DESA, 2006)
- **L'adaptation de la tension**, nécessaire pour un transport économique et sûr de l'énergie
- **La coordination et le contrôle**, via des centres de dispatching et de téléconduite qui assurent l'équilibre entre la production et la demande.

III.1 HIERARCHISATION PAR NIVEAU DE TENSION

Dans les pays dotés d'un système électrique élaboré, le réseau est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions (CARRIVE, 1991) :

- **Les réseaux de transport** à très haute tension (HTB) transportent l'énergie des gros centres de production vers les régions consommatrices. Ces réseaux sont souvent interconnectés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production à disposition de tous les consommateurs.
- **Les réseaux de répartition** à haute tension (HTA) assurent, à l'échelle régionale, la desserte des points de livraison à la distribution.
- **Les réseaux de distribution** sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle, à l'exception de quelques gros clients industriels alimentés directement par les réseaux HTB et HTA. On distingue deux sous-niveaux : les réseaux à moyenne tension (HTA) et les réseaux à basse tension (BT).

Conformément à la norme **NF C18-510**, cette classification distingue plusieurs catégories de réseaux en fonction de la valeur de leur tension, comme présenté dans le tableau ci-après.

Tableau 1: Classification des réseaux suivant le niveau de tension

Domaine de tension		**Valeur de la tension composée nominale (Un en Volts)**	
		Tension Alternatif	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA	$1000 < U_n \leq 50\,000$	$1500 < U_n \leq 75\,000$
	HTB	$U_n > 50\,000$	$U_n > 75\,000$

Source : extrait de la norme NF C18-510

III.2 LE RESEAU ELECTRIQUE DE LA COTE D'IVOIRE

Le système d'énergie électrique ivoirien est constitué d'un réseau principal de transport 225 kV, d'un réseau régional de transport 90 kV et des réseaux de distribution 33 kV et 15 kV. Le réseau de distribution 33kV est utilisé pour le transport à longue distance jusqu'à des petites localités éloignées des zones urbaines, alors que celui de 15 kV est destiné à la distribution dans les zones urbaines. La fourniture aux grands abonnés se fait généralement en 33 kV et 15 kV. En revanche, les clients ordinaires sont alimentés en 380 V et 220 V après l'abaissement de tension au moyen des transformateurs de distribution (poste sur poteau et poste placé sur le sol) (JICA, 2019).

Le système électrique ivoirien est caractérisé par les points suivants :

- Pour l'approvisionnement en électricité du centre-ville d'Abidjan, lieu de consommation, un réseau de transport circulaire 225 kV (réseau en anneau extérieur) qui entoure la ville est mis en place, ce qui assure une haute fiabilité du réseau.
- Bien qu'il existe au nord, à l'est et à l'ouest du pays des lignes d'interconnexion avec les pays voisins, le transport vers le Mali et le Burkina Faso, pays septentrionaux, se fait sur une longue distance à partir des centrales situées au sud et au centre sud.
- La fiabilité des réseaux est peu élevée dans l'arrière-pays en raison du fait que bon nombre de lignes de transport 225 kV et 90 kV sont en simple terne, et que beaucoup de postes électriques ne comporte qu'un simple jeu de barres et un seul banc de transformateurs.
- La plupart des lignes de transport sont aériennes, mais une partie de la ville d'Abidjan est desservie par un réseau de transport souterrain 90 kV.

La Côte d'Ivoire occupe une place importante au sein du Système d'Échanges d'Énergie Électrique Ouest Africain (WAPP). Il existe actuellement des lignes d'interconnexion 225 kV avec les pays limitrophes. En effet, la Côte d'Ivoire est interconnectée, d'une part, à la SONABEL du Burkina Faso et à l'EDM du Mali en passant par le réseau du nord, et d'autre part, avec la société ghanéenne d'électricité GRIDCo. Dans le même temps, le système ivoirien fournit son électricité aux réseaux togolais et béninois gérés par la société béninoise CEB, et ceci par le biais de VRA ghanéen.

III.3 LES COMPOSANTS D'UNE LIGNES AERIENNE HTB

Une ligne aérienne de transport haute tension comprend un ensemble d'éléments interconnectés assurant la conduction et la protection du courant électrique :

III.3.1 CONDUCTEURS

Ils assurent le transport du courant électrique. Le choix du conducteur dépend de la tension de service, du courant transporté et des conditions climatiques (température, vent). Pour réaliser ces câbles, les métaux conducteurs de faible résistivité sont peu nombreux. Seuls sont utilisés actuellement l'aluminium dans sa forme écroui dur, de grande pureté d'une part, et un alliage d'aluminium, l'almélec, d'autre part ; soit les conducteurs câbles aluminium-acier (ACSR), les conducteurs homogènes en almélec (AAAC) et les câbles almélec-acier (AACSR).

❖ Câbles aluminium-acier (ACSR)

L'aluminium utilisé, écroui et de grande pureté (norme EN 60889) a une contrainte à la rupture en traction de 160 MPa, très insuffisante pour réaliser les lignes à haute tension. Pour pallier cet inconvénient, les câbles ACSR (Conducteur en aluminium renforcé d'acier) comportent au centre une âme en fil d'acier galvanisé qui supporte la plus grande partie de la tension mécanique et autour de cette âme, plusieurs couches de fils d'aluminium conduisant le courant électrique (Chanal et Lévêque, 2003).

❖ Conducteurs homogènes en almélec (AAAC)

Les alliages d'aluminium utilisés pour les conducteurs AAAC (Conducteur en alliage d'aluminium) de lignes aériennes contiennent de faibles additions de magnésium et de silicium. La métallurgie de ces alliages permet, dans certaines limites, une adaptation des caractéristiques électriques et mécaniques aux utilisations envisagées. Les deux caractéristiques précédentes varient dans le même sens : si on diminue la résistivité, on diminue également la résistance mécanique et inversement (Chanal et Lévêque, 2003).



Figure 4: Conducteur ACSR



Figure 5: Conducteur AAAC



Figure 6: Conducteur AACSR

❖ Conducteur almélec-acier (AACSR)

Dans le but d'obtenir des câbles très résistants mécaniquement pour les zones fortement givrées ou les lignes de montagne, des câbles almélec-acier (AACSR) sont réalisés avec des sections voisines de celles des câbles aluminium-acier (ACSR), les fils d'aluminium étant remplacés par des fils d'almélec. On utilise toujours de l'acier à très haute résistance mécanique (Chanal et Lévêque, 2003).

III.3.2 CABLES DE GARDE

Placés au-dessus des conducteurs de phase, les câbles de garde sont soumis à une tension mécanique plus élevée afin d'assurer une protection efficace de la ligne contre les décharges atmosphériques. Bien que leur section soit généralement réduite, ils doivent néanmoins offrir une résistance mécanique comparable à celle des conducteurs, notamment face aux efforts dus au vent, au givre ou à la neige. De ce fait, leur dimensionnement doit être réalisé en tenant compte des mêmes conditions climatiques que celles appliquées aux conducteurs de puissance, et les contraintes exercées sur les supports doivent être intégralement considérées dans les calculs de structure.

Sur le plan électrique, ces câbles assurent la liaison équipotentielle entre les mises à la terre des pylônes et doivent être capables de supporter les échauffements liés au passage éventuel de courants de court-circuit lors d'un impact de foudre ou d'un défaut sur la ligne (Chanal et Lévêque, 2003).

III.3.3 SUPPORT (PYLONE)

Structures métalliques ou en treillis, ils soutiennent les conducteurs et garantissent le gabarit de sécurité. Leur type dépend de la configuration du terrain, de la portée et du nombre de circuits (simple ou double terne) (Didierlaurent, 2005).

III.3.4 FONDATION

Une fondation est un ouvrage enterré dont le rôle est d'ancrer dans le sol la superstructure, constituée dans le cas d'une ligne aérienne, de différents supports complétés par les câbles et tout le matériel complémentaire. Une fondation peut être unique (monobloc) (**Figure 7a**) ou à raison d'un massif par pied (**Figure 7b**). Leur nature dépend du type de pylône. On peut distinguer (Naud, 2004).

- Les fondations massives de type monobloc
- Les fondations multipodes de type dalle et cheminée

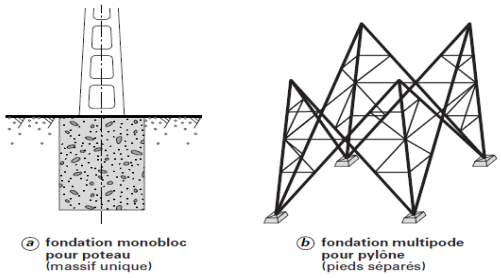


Figure 7: Types de fondation

III.3.5 ISOLATEURS

Les isolateurs constituent des éléments essentiels des lignes aériennes à haute et très haute tension. Leur rôle principal est d'assurer la séparation électrique entre les conducteurs sous tension et les structures métalliques des supports (pylônes), tout en supportant les efforts mécaniques générés par le poids des conducteurs et les contraintes climatiques. Ils sont soumis à des contraintes électriques importantes, notamment les surtensions transitoires dues à la foudre, aux coupures ou aux réenclenchements automatiques (Ducouret, 2004).

Les principaux matériaux utilisés sont :

- La porcelaine : Elle offre une excellente résistance mécanique et une bonne tenue aux contraintes électriques. Cependant, sa fragilité et son poids limitent son emploi dans certaines conditions.
- Le verre trempé : il présente une très bonne rigidité diélectrique et une résistance accrue aux chocs.
- Les matériaux composites (résine époxy et fibre de verre) : plus récents, ils combinent légèreté, résistance mécanique élevée et très bonne performance diélectrique. Leur surface hydrophobe permet de limiter les courants de fuite dus à la pollution



Figure 8: Isolateur composite ; *Source : Isolateur composite MT-HT-THT-InexMax*

IV. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

La méthodologie adoptée pour la réalisation de cette étude se base sur une approche progressive et structurée, conforme aux standards de conception des ouvrages de transport d'énergie électrique. Elle comprend principalement deux grandes phases : l'Avant-Projet Sommaire (APS) et l'Avant-Projet Détaillé (APD).

IV.1 APPROCHE GENERALE

L'étude a été conduite suivant une démarche analytique et cartographique visant à identifier, analyser et optimiser le tracé de la future ligne 225 kV entre les postes de Yopougon 3 et Songon. Elle s'appuie sur la collecte de données existantes, l'analyse de terrain, la modélisation technique et l'évaluation multicritères des variantes possibles de tracé.

Cette approche méthodologique a permis de passer progressivement d'une analyse globale de la zone d'étude (APS) à une définition détaillée des caractéristiques techniques du tracé retenu (APD).

IV.2 ETAPE APS

L'étape APS a consisté à effectuer une analyse préalable de la zone d'étude, dans le but d'identifier les contraintes physiques, humaines, environnementales et techniques susceptibles d'influencer le tracé de la future ligne 225 kV. Cette phase a comporté notamment :

- Le diagnostic de la zone d'étude (topographie, occupation du sol, infrastructures existantes, contraintes environnementales)
- La délimitation de l'aire d'étude en concertation avec le maître d'ouvrage (CI-Energies)
- La définition et comparaison de plusieurs fuseaux possibles de passage
- Le choix du fuseau de moindre impact, conciliant faisabilité technique, environnementale et économique
- Le choix de la ligne de moindre impact retenue

Cette phase a permis d'obtenir un tracé préliminaire optimal à développer lors de la phase APD.

IV.3 ETAPE APD

L'Avant-Projet Détaillé a permis de consolider les résultats de l'APS en établissant les caractéristiques techniques précises de la ligne à construire. Il s'est agi de :

- Préciser le tracé définitif de la ligne dans le fuseau retenu
- Réaliser le dimensionnement électrique (détermination de la puissance à transiter, choix du conducteur et câble de garde, les chaînes d'isolateurs, analyse électrique du réseau etc.)
- Réaliser le dimensionnement mécanique (types de supports, flèches, efforts, hypothèses climatiques, etc.)
- Elaborer une estimation financière des coûts (CAPEX)
- Evaluer les impacts environnementaux et sociaux associés au tracé définitif.

Cette étape aboutit à la production d'un dossier technique complet, servant de base à la phase de consultation et de réalisation du projet.

IV.3.1 SOURCES ET OUTILS UTILISES

L'étude s'est appuyée sur :

- Des données cartographiques et topographiques (cartes IGN, Raster, images satellites)
- Des informations techniques fournies par CI-Énergies et la CIE
- Des outils de cartographie et de conception assistée par ordinateur (CAO/SIG) tels que AutoCAD, ArcGIS, COVADIS, Google Earth, PowerFactory
- Des références normatives internationales (CEI, CIGRE, NF C18-510) Pour le dimensionnement électrique et mécanique

V. ETUDE AVANT-PROJET SOMMAIRE POUR LA DETERMINATION DU FUSEAU ET DU TRACE DE LA LIGNE 225 KV YOPOUGON 3-SONGON

L'Avant-Projet Sommaire (APS) constitue la première étape technique de l'étude du projet de ligne 225 kV Yopougon 3 – Songon. Il vise à identifier, analyser et comparer plusieurs propositions de fuseaux afin de retenir le fuseau de moindre impact qui contiendra les différentes propositions de tracé ligne, conciliant faisabilité technique, coûts raisonnables et préservation de l'environnement.

Cette phase repose sur un diagnostic approfondi de la zone d'étude. L'objectif est de disposer, à l'issue de cette étape, d'un tracé préliminaire optimal, qui servira de base aux études détaillées de l'Avant-Projet Détaillé (APD).

V.1 DIAGNOSTIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

À l'intérieur de l'aire d'étude, un état initial de l'environnement existant a été dressé afin d'en déterminer les principaux enjeux au regard de la définition d'un fuseau de moindre impact.

V.1.1 MILIEU PHYSIQUE

- **Climat**

La ville d'Abidjan bénéficie d'un climat de type tropical humide, marqué par une alternance de saisons sèches et pluvieuses. La période sèche et chaude s'étend généralement de décembre à février, tandis que la saison des pluies débute vers mars pour se prolonger jusqu'à novembre. Les précipitations atteignent leur maximum au cours des mois de mai et juin, puis connaissent une baisse notable en août, malgré une couverture nuageuse souvent persistante. La température moyenne annuelle varie entre 25,2 °C pendant les mois les plus frais (août) et 28,8 °C durant les mois les plus chauds (mars). L'ensoleillement annuel moyen est estimé à environ 2 150 heures, témoignant d'une luminosité relativement constante tout au long de l'année. La pluviométrie moyenne annuelle reste élevée, avoisinant 1 441 mm, avec un pic de 266 mm enregistré en juin, considéré comme le mois le plus arrosé, et un minimum de 57 mm observé en janvier, le mois le plus sec (période de référence : 1991–2020) (MERKEL, 2016).

Tableau 2: Données climatiques du district d'Abidjan

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oc	Nov.	Déc.
Température Moyenne (°C)	26,7	27	27,2	27,1	26,4	25,3	24,6	24,1	24 ,5	25,4	26,1	26,6
Température minimale (°C)	24,9	25,4	25,6	25,5	24,9	24	23,5	23	23,3	23,9	24,5	25
Température maximale (°C)	29,1	29,2	29,4	29,2	28,3	26,9	26,1	25,7	26,3	27,3	28,3	28,7
Précipitations (mm)	57	62	87	119	217	266	147	74	100	123	111	78
Humidité (%)	81 %	83 %	83 %	84 %	85%	86%	85%	87%	88%	86%	85%	83%

Source : (data 1999-2021 SODEXAM)

En ce qui concerne les vents de la frange littorale et des plaines intérieures traversées par la ligne de haute tension, les données de la SODEXAM précise que les vents y sont de direction Sud-ouest et elles varient entre 1 m/s et 4 m/s. En considérant l'échelle de Beaufort des forces du vent (Bonnaud *et al.*, 2024), on note que les vents de la zone du projet sont des airs légers et des petites brises.

❖ **Géologie et topographie**

L'aire d'étude Yopougon3-Songon appartient au Bassin sédimentaire. Géographiquement, le Bassin Sédimentaire ivoirien est entièrement compris entre les Longitudes 3 et 6 degrés W et les Latitudes 5 et 5"30 degrés N. Il ne dépasse pas 150 m d'altitude (Roose *et al.*, 1966; Achuo *et al.*, 2024).

Dans cette aire d'étude, Les faciès géologiques rencontrés sont :

- Sable lessivé noirâtre d'une épaisseur variant de 0.5 à 1m selon la configuration du relief.
- Sable jaune fin à poussiéreux sur les hauts plateaux.
- Sables argileux ou Argiles par endroits.
- Grès ferrugineux en chapeau sur les sommets des collines ;
- Vases de marécages et Boue de Bas-fonds

En ce qui concerne la topographie dans la zone du projet, les observations du terrain montrent que les vallées et les lignes de crêtes composent le paysage. Le relief est caractérisé par son altitude et par la disposition de ses pentes.

Le milieu terrestre de la zone du projet se distingue par deux grands ensembles de relief qui sont :

- **Les plaines** : on les rencontre presque sur l'ensemble du territoire. Mais, depuis le poste de Songon jusqu'à la limite du village Agnéby dans le sud de la zone d'étude, puis en remontant légèrement dans le Nord on observe une grande étendue de plaine qui englobe les localité d'Abiaté 1 et Abiaté 2 en longeant les localités de Niecky-Bonjour, Mathys, Mulhein et Abiaté. Les altitudes dans ce milieu sont comprises entre 4 et 20 m avec des pentes relativement nulles inférieures à 5%.

- **Les plateaux** : on distingue deux types de plateau dans la zone d'étude ; les bas plateaux et les hauts plateaux. Les bas plateaux ont des altitudes qui varient entre 20 et 50 m et sont caractérisés par de faibles pentes dont les élévations vont de 5% à 10%. Ils sont repandus sur l'ensemble du finage de l'aire d'étude. Les hauts plateaux sont compris entre 51 et 124 m d'altitude selon les levées topographiques. Les pentes dans ce milieu se varient entre 11% et 108% et sont fortes.

Enjeux/sensibilités : La topographie comme la géologie ne constituent pas des composantes à enjeux. L'implantation d'un pylône est possible quel que soit la nature des sols et quel que soit la topographie. C'est pourquoi, le franchissement des plaines de la région ne constituera pas une difficulté technique majeure. Toutefois, elles feront l'objet d'une étude du sol et du sous-sol pour déterminer avec plus de précision la nature géologique des terrains au droit de l'ouvrage dans les phases ultérieures.

❖ **Hydrogéologie**

Deux (2) types d'aquifères existent dans l'aire d'étude, à savoir, les aquifères continus du bassin sédimentaire côtier au Sud et les aquifères discontinus du socle au Nord de la région.

Enjeux/sensibilités : Une ligne électrique aérienne n'induit pas de risques de perturbation qualitative et quantitative des écoulements souterrains liés à la nappe phréatique. C'est uniquement au moment des travaux de pose et de construction (pylônes) qu'un risque de pollution existe (carburant des engins de chantier, laitance du béton, etc.).

❖ **Hydrographie**

L'hydrographie dans le district autonome d'Abidjan et dans la région des grands ponts est dominée par de nombreux cours d'eau que sont l'Agnéby, et le système lagunaire (lagune Ebrié) parallèle à l'Océan Atlantique. Toutefois, seule la lagune Ebrié influence l'aire d'étude en y créant des zones humides (marécages et bas-fonds) qui y sont disséminées.

Enjeux/sensibilités : l'hydrographie n'est pas déterminante dans la définition ou le choix d'un fuseau. En revanche, les ouvrages à construire (lignes) seront conçus et réalisés pour assurer leur compatibilité avec la gestion des eaux.

- **Synthèse des composantes du milieu physique déterminantes pour la définition des fuseaux**

De façon générale, les composantes du milieu physique n'apparaissent pas comme déterminantes pour la définition des fuseaux. Seuls les captages et leurs périmètres de protection immédiats et rapprochés, qui sont les plus sensibles aux travaux de construction de pylônes, devront être évités dans la mesure du possible

V.1.2 MILIEU BIOLOGIQUE

Les différents habitats floristiques qui caractérisent l'aire d'étude sont dominés par les plantations (hévéa et palmiers à huile), les cultures vivrières (manioc et maïs), les fourrés marécageux, les prairies (sèche et humide) et des bananeraies.

Enjeux/sensibilités : la définition de l'aire d'étude a mis en évidence que le milieu ne recèle pas des habitats abritant des espèces fauniques et floristiques diversifiées. De plus, il n'y existe aucune zone de protection.

V.1.3 MILIEU HUMAIN

Le milieu humain de la zone d'étude se caractérise par une occupation du sol en forte évolution, marquée par l'expansion urbaine du district d'Abidjan. Les localités situées entre Yopougon 3 et Songon connaissent un développement rapide sous l'effet conjugué de la croissance démographique, des activités économiques et de la multiplication des projets immobiliers. Le plan local d'urbanisme (PLU) constitue, dans ce contexte, un document de référence qui encadre l'aménagement du territoire. Il fixe les règles d'urbanisation et détermine la nature des zones selon leur vocation (habitat, industrie, services, espaces réservés, etc.).

Au sein de l'aire d'étude, les documents d'urbanisme et les plans de lotissement recensés permettent d'identifier plusieurs catégories d'espaces urbanisés (voir **Figure 9**)

- **Les lotissements approuvés** : il s'agit des zones officiellement planifiées et validées par les autorités locales, disposant d'un découpage régulier des parcelles et d'un réseau viaire de base (rues, voies principales). Ces secteurs sont généralement dotés de services urbains essentiels tels que l'électricité, l'eau potable et, parfois, l'assainissement.

- **Les lotissements non approuvés** : ces zones correspondent à des extensions urbaines spontanées ou à des quartiers en cours de régularisation. Leur développement n'est pas encore encadré par les instruments d'aménagement officiels. On y observe souvent une densité d'habitat élevée, des voies non stabilisées et un accès limité aux services de base.
- **Les lotissements disposant de titres fonciers** : ces espaces sont juridiquement sécurisés et enregistrés auprès de l'administration foncière. Ils comprennent aussi bien des zones résidentielles que des terrains réservés à des infrastructures collectives ou industrielles.
- **Les zones d'aménagements spéciales** : elles regroupent les promotions immobilières, entrepôts, zones artisanales, infrastructures économiques ou sites industriels légers, dont la présence traduit la dynamique de périurbanisation de la commune de Songon.

Analyse de l'occupation du sol selon la typologie des lotissements

L'analyse de l'occupation du sol dans l'aire d'étude Yopougon 3 – Songon, d'une superficie totale d'environ 192,53 km², met en évidence une forte prédominance des zones non loties et des espaces naturels. Le tableau ci-dessous présente la répartition des différentes typologies de terrains selon leur statut foncier et leur usage.

Tableau 3: Détails des superficies des lotissements de l'aire d'étude Yopougon 3-Songon

	Toute la zone d'étude Yopougon3-Songon	
Typologie de lotissement	**Surface en km²**	**Surface en ha**
Lotissement approuvé	26,57	2656,86
Lotissement non approuvé	7,40	739,83
Parcelles ayant un titre foncier	0,56	56,41
Parcelles non loties et paysage	284,70	28470,20
Exploitation agricole CNRA	21,35	2134,85
Exploitation agricole PALMAFRIQUE	10,16	1016,34
Aire protégée	11,69	1168,99
Zone marécageuse	11,20	1120,36

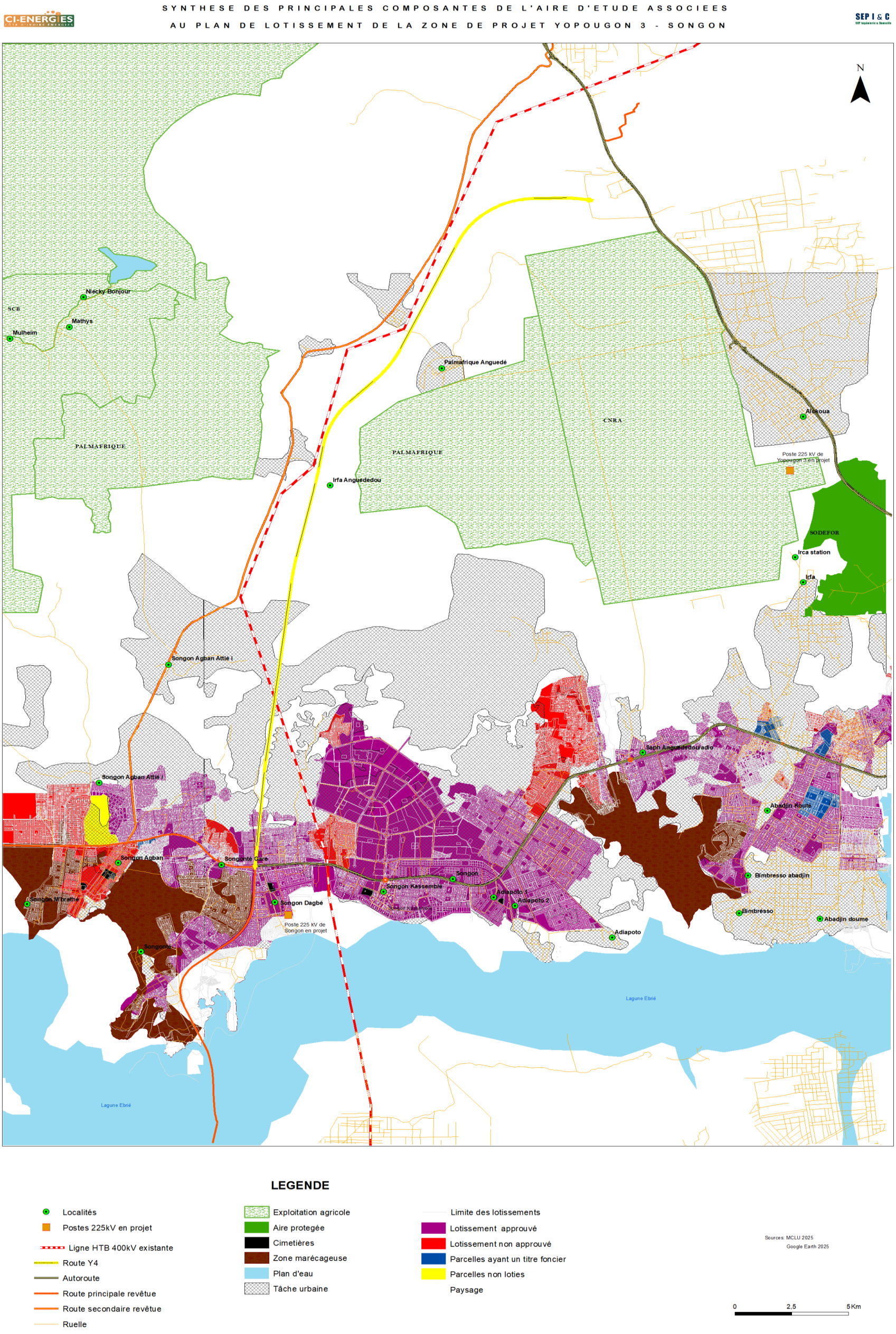


Figure 9: Synthèse des principales composantes de l'aire d'étude associée au plan de lotissement de la zone du projet

V.2 ÉLABORATION DES FUSEAUX DE TRACE ET DETERMINATION DU FUSEAU DE MOINDRE IMPACT POUR LA LIGNE 225 KV

V.3 DEFINITION

Un fuseau est une bande dans laquelle il est envisageable de faire passer l'ouvrage électrique au regard des préoccupations environnementales, techniques et économiques :

- En limitant l'impact de la future ligne électrique Yopougon 3-Songon (travaux et exploitation) sur son environnement
- Au sens large, en tenant compte des aménagements et infrastructures existants et en projet
- En maîtrisant et contrôlant les caractéristiques constructives de la future ligne électrique Yopougon 3-Songon

Dans les secteurs présentant de fortes contraintes, le fuseau peut être réduit à une centaine de mètres, tandis qu'il peut atteindre un kilomètre voire d'avantage dans les secteurs où les contraintes sont moindres. Cette notion de fuseau demeure essentielle, même si elle peut paraître insatisfaisante dans la mesure où elle ne permet pas de déterminer la localisation exacte du futur ouvrage. Elle offre néanmoins la possibilité de définir le cheminement général de la ligne.

Le tableau **ci-dessous** synthétise les composantes environnementales les plus déterminantes pour la définition de fuseaux au vu des enjeux et sensibilités identifiées plus haut. La prise en compte de ces éléments sera détaillée dans les prochaines étapes.

Tableau 4: Caractéristique de l'aire d'étude en fonction de ses composantes à la vue des enjeux et sensibilité

Milieu Concernée	Composantes déterminantes pour la création d'une ligne aérienne 225 kV
Milieu physique	- Zones marécageuses et Bas-fonds - Lagune Ebrié
Milieu naturel	- Espace boisé, Exploitation agricole (CNRA, PALMAFRIQUE, SODEFOR) - Aire protégée
Milieu humain	- Equipements éducatifs - Locaux administratifs d'état - Zone à usage mixte - Zone d'habitation dense - Cimetières - Zone à moyenne densité d'habitation - Lotissement approuvé - Lotissement non approuvé - Lotissement ayant un titre foncier - Ligne 400 kV Akoupé Zeudji-Taboth - Infrastructures routières (Autoroute Yopougon 3-Songon, Autoroute du nord, l'autoroute de la Y4).

V.3.1 PRINCIPE GENERAL

L'état initial de l'aire d'étude associé au plan de lotissement a montré la complexité du territoire étudié conduisant à une imbrication et/ou une superposition des contraintes.

Aussi, afin de traiter les éléments de l'aire d'étude de façon égale et dans l'objectif de définir des fuseaux de moindres impacts, une approche cartographique a été réalisée en créant deux grandes catégories d'enjeux :

- Les enjeux à éviter en priorité ;
- Les enjeux à éviter préférentiellement.

V.4 CARTOGRAPHIE DES ENJEUX A EVITER PRIORITAIREMENT

Les composantes identifiées comme présentant des enjeux majeurs à éviter correspondent à des zones où l'implantation d'une ligne électrique ou d'un poste 225 kV serait soit interdite, soit trop contraignante sur le plan technique, environnemental ou social. Ces secteurs sont donc considérés comme des zones d'exclusion ou à forte sensibilité, à prendre en compte dans la définition du fuseau de moindre impact.

L'analyse multicritère réalisée sur l'ensemble de l'aire d'étude a permis d'identifier les principales composantes présentant des enjeux à éviter prioritairement. Le tableau ci-après synthétise les résultats par type de milieu.

Tableau 5: Synthèse des composantes à éviter prioritairement dans l'aire d'étude Yopougon 3 – Songon

Milieu	Niveau d'enjeu / Observations
Milieu physique	Aucun enjeu physique prioritaire relevé dans notre aire d'étude *RAS*
Milieu naturel	Aucun enjeu naturel prioritaire n'apparait dans notre aire d'étude *RAS*
Milieu humain	- Zones d'habitation dense / agglomérations (promotions immobilières, constructions regroupées) - Parcelles ayant un titre foncier - Cimetières

V.4.1 DELIMITATION DES ESPACES INCOMPATIBLES AVEC LE PROJET

La détermination des composantes à éviter prioritairement s'appuie sur une analyse combinée des observations de terrain et de l'interprétation d'images satellitaires récentes (Google Earth, août 2025). Cette approche a permis de repérer, localiser et cartographier l'ensemble des zones présentant une forte densité d'habitations ou des aménagements incompatibles avec

l'implantation d'infrastructures électriques. Les espaces identifiés comme zones d'exclusion regroupent notamment les quartiers densément construits, les promotions immobilières, les parcelles à statut foncier régulier ainsi que les sites sensibles tels que les cimetières. Ces secteurs sont considérés comme inconstructibles pour le projet de ligne 225 kV, car toute intervention y engendrerait des impacts sociaux et fonciers majeurs, une difficulté technique d'exécution et un coût économique disproportionné.

L'ensemble de ces zones a ensuite été intégré dans la cartographie de synthèse des contraintes humaines (voir **Annexe 1**), afin de guider la définition du fuseau de moindre impact. Les autres milieux (physique et naturel), puisque ne présentant aucun enjeu prioritaire n'ont pas été cartographié.

V.5 CARTOGRAPHIE DES ENJEUX A EVITER PREFERENTIELLEMENT

Les composantes classées parmi les enjeux à éviter préférentiellement correspondent à des espaces présentant une certaine sensibilité environnementale, physique ou humaine, mais dans lesquels les travaux liés à l'implantation d'une ligne électrique peuvent être envisagés sous réserve de conditions spécifiques (études d'impact approfondies, mesures compensatoires, ou adaptation du tracé). L'analyse des composantes environnementales, physiques et humaines a également permis d'identifier les zones à éviter préférentiellement, dont les caractéristiques et contraintes sont résumées dans le tableau ci-dessous

Tableau 6: Synthèse des composantes à éviter préférentiellement dans l'aire d'étude Yopougon 3 – Songon

Milieu	Niveau d'enjeu / Observations
Milieu physique	- Zones marécageuses - Lagune Ébrié
Milieu naturel	- Espaces boisés et zones agricoles exploitées par le CNRA, PALMAFRIQUE et sous gestion de la SODEFOR.
Milieu humain	- Zones d'urbanisation effective (lotissements approuvés) disposant d'infrastructures de base.

V.5.1 APPROCHE D'IDENTIFICATION DES ZONES A ENJEUX PREFERENTIELS

L'identification des zones à éviter préférentiellement s'est appuyée sur les campagnes de reconnaissance de terrain menées dans le cadre de l'étude ainsi que sur l'analyse d'images satellitaires récentes (Google Earth, août 2025). Cette démarche a permis de repérer et cartographier les espaces faiblement urbanisés, et non concernés par des parcelles titrées, situés à l'intérieur du périmètre d'étude. Ces zones, généralement localisées en périphérie des agglomérations ou à proximité d'espaces naturels exploités, ont été considérées comme

potentiellement mobilisables pour l'implantation d'infrastructures électriques. Toutefois, leur utilisation reste soumise à certaines conditions techniques et environnementales, notamment la prise en compte des risques géotechniques, des contraintes écologiques locales, ainsi que la mise en œuvre de mesures préventives et compensatoires destinées à limiter les impacts éventuels sur les milieux concernés.

L'ensemble de ces zones a ensuite été intégré dans la cartographie de synthèse des contraintes préférentielles, (présentées aux **Annexe 2, Annexe 3, Annexe 4**), en vue d'orienter la définition du fuseau de moindre impact dans le corridor Yopougon 3 – Songon.

V.6 SYNTHESE CARTOGRAPHIQUE ET HYPOTHESE DES FUSEAUX

V.6.1 SYNTHESE CARTOGRAPHIQUE

- **Enjeux à éviter prioritairement**
  - Zone d'habitat dense /agglomérations (promotions immobilières, Constructions regroupées)
  - Parcelles ayant un titre foncier
  - Cimetières
- **Enjeux à éviter préférentiellement**
  - Zone d'urbanisation future (Lotissements approuvés)
  - Lagune Ebrié
  - Zone marécageuse
  - Espace boisé (Exploitation agricole, CNRA, PALMAFRIQUE, SODEFOR)

La superposition et l'analyse croisée des synthèses cartographiques des enjeux à éviter en priorité (**bleu foncé**) et celles des zones préférentielles de préservation (**bleu clair**) ont permis de produire la cartographie ci-après :

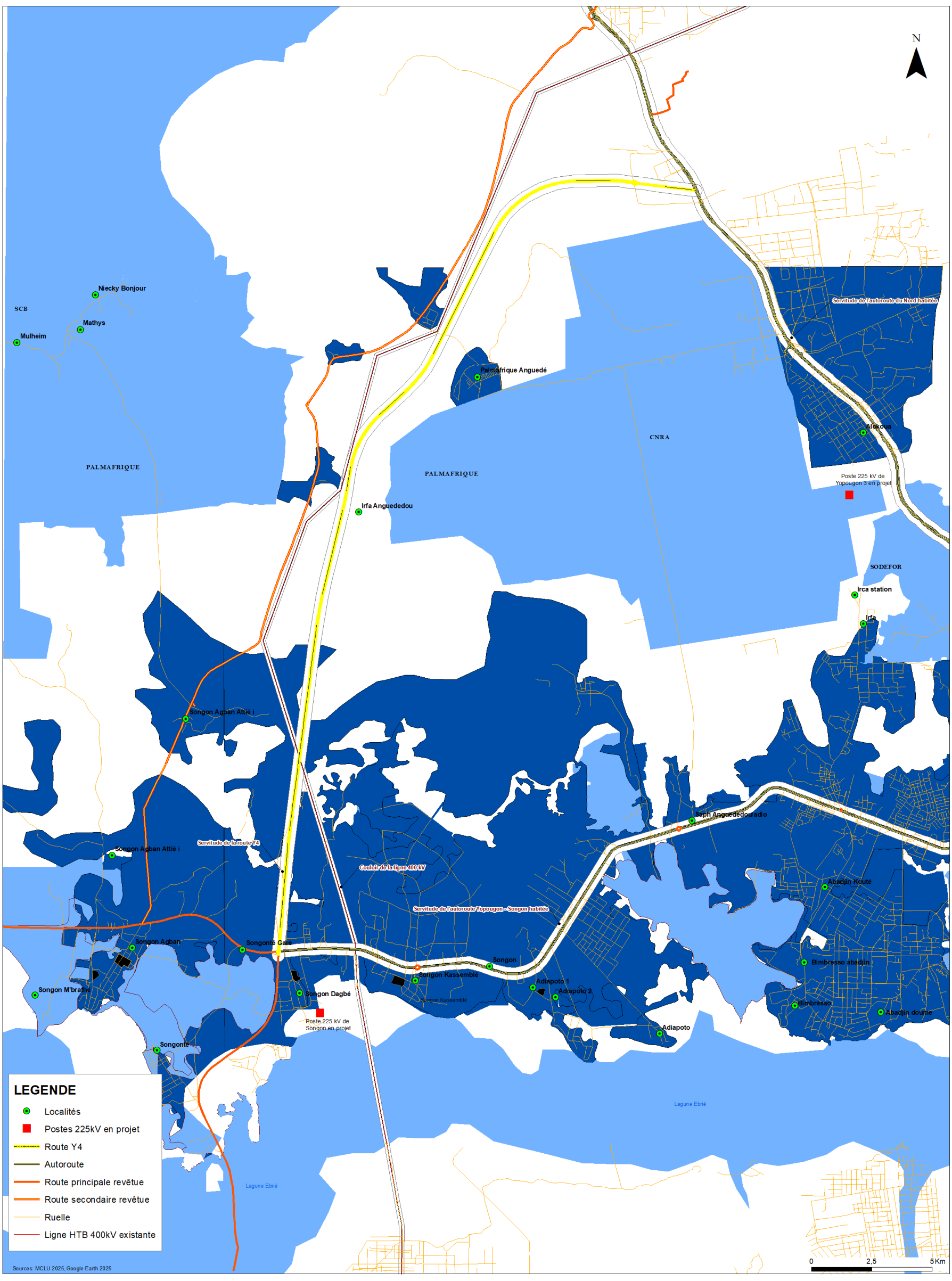


Figure 10: Synthèse cartographique des éléments à éviter prioritairement (bleu foncé) et préférentiellement (bleu clair)

V.6.2 HYPOTHESE DES FUSEAUX POTENTIELS

La combinaison des enjeux à éviter prioritairement et des enjeux à éviter préférentiellement permet de dégager trois couloirs potentiels susceptibles d'accueillir le tracé de la future ligne 225 kV. Chacun de ces fuseaux se distingue par son mode d'intégration dans l'environnement physique, naturel et humain, ainsi que par les infrastructures existantes qu'il mobilise.

- **Fuseau potentiel n°1**

Ce premier scénario s'appuie initialement sur la servitude de l'autoroute du Nord, offrant ainsi une première portion du tracé avec un minimum d'emprises nouvelles et une bonne compatibilité avec les infrastructures existantes. Le corridor bascule ensuite vers le couloir de la ligne 400 kV Akoupé Zeudji – Taboth, ce qui permet de mutualiser les linéaires et de réduire les impacts liés à l'occupation du sol. Cette stratégie optimise l'usage d'un axe électrique déjà aménagé, limitant l'ouverture de nouveaux passages. Dans sa dernière section, le fuseau rejoint la servitude de l'autoroute Y4 (liaison autoroute du Nord – route de Dabou), qui le conduit vers le site futur du poste 225 kV de Songon.

- **Fuseau potentiel n°2**

Dans ce deuxième scénario, le fuseau démarre sur le domaine du CNRA, qui constitue une première assise linéaire présentant peu de contraintes foncières directes. Il se poursuit en longeant le couloir de la ligne 400 kV Akoupé Zeudji – Taboth, permettant une meilleure cohérence du tracé et une minimisation de l'ouverture de nouveaux corridors. Enfin, le tracé s'oriente vers la servitude de l'autoroute Y4, jusqu'au futur poste 225 kV de Songon.

- **Fuseau potentiel n°3**

Cette troisième option débute également dans le domaine du CNRA, permettant de limiter les contraintes liées à l'occupation des sols dès la première portion du tracé. Le fuseau suit ensuite la servitude de la route Yopougon – Songon, assurant une logique d'intégration progressive dans un axe routier structurant, compatible avec l'implantation d'une infrastructure électrique aérienne. La dernière section conduit également au site projeté du poste 225 kV de Songon.

La carte suivante propose une représentation spatiale des trois fuseaux retenus à l'issue de l'analyse croisée des enjeux prioritaires et préférentiels. La représentation des fuseaux dans le plan de lotissement est présentée en **Annexe 5** .

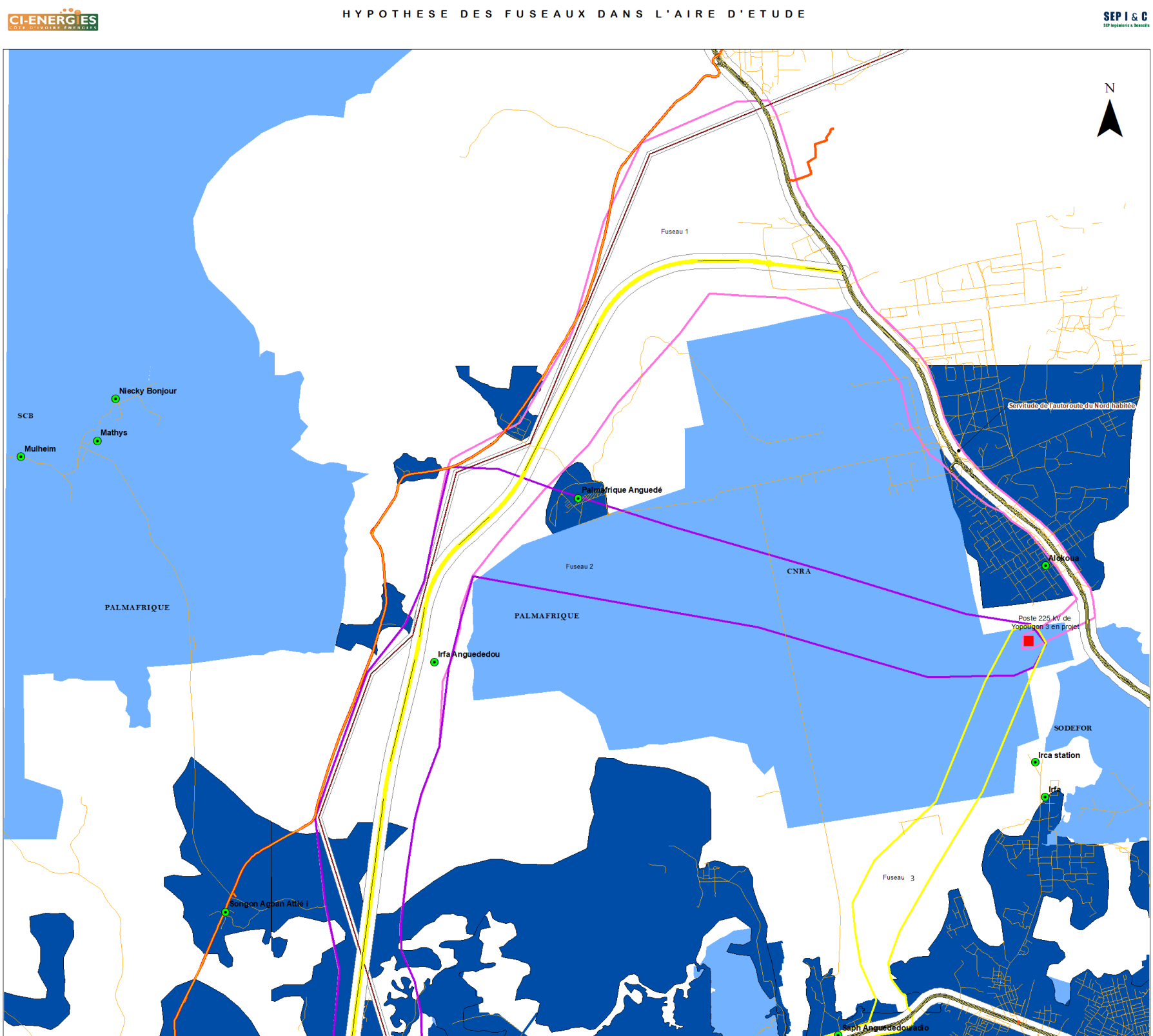


Figure 11 : Hypothèse des fuseaux dans l'aire d'étude

V.7 DETERMINATION DU FUSEAU DE MOINDRE IMPACT

V.7.1 APPROCHE

Une analyse multicritère a été menée sur les trois hypothèses de fuseaux pré-identifiés à partir des contraintes physiques, naturelles et humaines observées dans l'aire d'étude. Cette analyse comparative vise à confronter chaque fuseau aux enjeux majeurs du territoire (hydrogéologie, hydrologie, risques naturels, milieu naturel, occupation du sol, contraintes humaines, réseaux existants et infrastructures) afin d'identifier le corridor offrant le compromis le plus équilibré entre faisabilité technique, limitation des impacts environnementaux et minimisation des contraintes socio-foncières. Le **Tableau 7** détaille cette comparaison, tandis que la section suivante en expose les principaux enseignements pour éclairer le choix stratégique du fuseau à retenir.

V.7.2 ANALYSE SYNTHÉTIQUE DES TROIS FUSEAUX

L'examen des trois hypothèses montre que les fuseaux présentent globalement des contraintes physiques et hydrologiques similaires (leurs avantages et inconvénient sont répertoriés à l'**Annexe 6**). Aucun d'entre eux ne traverse de cours d'eau majeur et la vulnérabilité de la nappe reste majoritairement moyenne dans l'ensemble de l'aire d'étude. Les distinctions apparaissent principalement au niveau du milieu naturel et de l'occupation du sol. Le fuseau 3 traverse des zones marécageuses, ce qui introduit des contraintes techniques supplémentaires pour l'implantation des fondations des pylônes et augmente les risques d'impacts environnementaux. À l'inverse, les fuseaux 1 et 2 demeurent relativement exempts de zones humides.

Les différences les plus marquantes concernent toutefois le milieu humain et les enjeux fonciers.

Le fuseau 1 présente une forte densité d'habitations dans le couloir existant de la ligne 400 kV, avec plus de 150 bâtiments identifiés, ce qui entraînerait des coûts élevés en indemnisations des impacts sociaux importants et des risques de conflits fonciers. À l'opposé, le fuseau 2, bien qu'il traverse des zones agricoles exploitées (CNRA, PALMAFRIQUE), affecte un volume d'habitations nettement inférieur et se situe majoritairement en dehors des zones urbanisées à croissance rapide. Quant au fuseau 3, il traverse des secteurs en cours d'urbanisation dense le long de l'autoroute Songon–Dabou, ce qui introduit des contraintes d'aménagement importantes ainsi qu'un potentiel conflit avec les dynamiques urbaines actuelles.

Tableau 7: Comparatif des hypothèses de fuseaux

Thème	Sous thème	Hypothèse de fuseau 1	Hypothèse de fuseau 2	Hypothèse de fuseau 3
Hydrogéologie	**Vulnérabilité de la nappe**	La vulnérabilité de la nappe est majoritairement moyenne sur l'ensemble du fuseau.	La vulnérabilité de la nappe est majoritairement moyenne sur l'ensemble du fuseau.	La vulnérabilité de la nappe est majoritairement moyenne sur l'ensemble du fuseau.
Hydrologie	**Réseau hydrographique**	Pas de passage de cours d'eau dans le fuseau	Pas de passage de cours d'eau dans le fuseau	Pas de passage de cours d'eau dans le fuseau
Risques naturels	**Inondation**	Pas soumis aux inondations	Pas soumis aux inondations	Pas soumis aux inondations
Milieu naturel	**Zonage de protection**	Pas de réserves naturelles dans le fuseau	Pas de réserves naturelles dans le fuseau	Pas de réserves naturelles dans le fuseau
	Zone marécageuses	Pas de zone marécageuse le long du fuseau	Pas de zone marécageuse le long du fuseau	Présence de zone marécageuse dans le fuseau
Paysage et patrimoine	**Paysage**	Le paysage est caractérisé par de grandes ouvertures et un paysage relativement plat. Ces éléments renforcent la visibilité de la ligne et des pylônes électriques.	Le paysage est caractérisé par de grandes ouvertures et un paysage relativement plat. Ces éléments renforcent la visibilité de la ligne et des pylônes électriques.	Le paysage est caractérisé par de grandes ouvertures et un paysage relativement plat. Ces éléments renforcent la visibilité de la ligne et des pylônes électriques.
	Site patrimonial et archéologiques	Le fuseau ne traverse pas de site patrimonial et archéologiques	Le fuseau ne traverse pas de site patrimonial et archéologiques	Le fuseau ne traverse pas de site patrimonial et archéologiques
Milieu humain	**Habitats**	Présence environ C**ent cinquante-deux (152)** bâtiments dont **57** duplex moyen standing d'au moins de 200 m^2 et 95 maisons basses d'au moins 150 m^2 et un entrepôt de 500 m dans le couloir de la ligne existante 400 kV Terrains clôturés : **22** Terrains en chantier : **7**	<u>Terrains impactés</u> Terrain bâti : **40 bâtiments moyen** standing d'au moins 100 m^2 dans la zone de Songon du fuseau. Terrains clôturés : **10 Terrains clôturés dans la zone de Songon du fuseau** Terrains en chantier : **4 Terrains en chantier dans la zone de Songon du fuseau**	Présence d'environ **230 bâtiments** de moyen standing d'au moins 100 m^2 dans la servitude de l'autoroute Songon-Dabou
	Equipements services et activités économiques	Le fuseau n'est présent sur aucun équipement ou service.	Le fuseau n'est présent sur aucun équipement ou service.	Le fuseau n'est présent sur aucun équipement ou service.
	Projets urbains à proximité	Le fuseau traverse quelques projets urbains. CI-Energies devra prendre en compte les mesures compensatoires des projets environnants Dans couloir de 40 m environ 20 ha des lots sont approuvés et 35 ha sont non approuvés	Le fuseau traverse quelques projets urbains sont prévues. Dans couloir de 40 m environ 9 ha des lots sont approuvés et 14 ha sont non approuvés	Le fuseau traverse des projets en étude/réalisation CI-Energies devra prendre en compte les mesures compensatoires des projets environnants Dans un couloir de 40 m environ 25,45 ha des lots sont approuvés
	Occupation du sol	Le fuseau traverse une légère partie du CNRA, Dans un couloir de 40 m environ 11,23 ha du CNRA sera impacté et sur la vue planimétrique de 120 m environ 33,24 ha du CNRA sera impacté. Environ 6 pylônes seront implantés dans le CNRA pour une distance maximale de séparation de 450 m entre 2 pylônes	Le fuseau traverse en pleine milieux majoritairement des terres agricoles (CNRA et PALMAFRIQUE). Dans un couloir de 40 m environ 15,62 ha du CNRA et 7,84 ha de PALMAFRIQUE sera impacté et sur la vue planimétrique de 120 m environ 47,22 ha du CNRA et 23,51 ha de PALMAFRIQAUE sera impacté. Pour une distance maximale de séparation de 450 m entre 2 pylônes environ 8 pylônes seront implantés dans le CNRA et 5 pylônes dans PALMAFRIQUE	Le fuseau traverse le CNRA, Dans un couloir de de 40 m environ 8,93 ha du CNRA sera impacté et sur la vue planimétrique de 120 m environ 27,18 ha du CNRA sera impacté. Environ 4 pylônes seront implantés dans le CNRA pour une distance maximale de séparation de 450 m entre 2 pylônes Présence de bâtis dans la servitude de l'autoroute Yopougon- Songon . Les terres sont des lotis avec approbations
	Réseaux et servitudes	Concernant les réseaux, le fuseau comprend : • Une ligne aérienne 400 kV et pylônes et ligne HTA. La servitude de l'autoroute du Nord et la servitude de l'autoroute de la Y4 Autoroute du Nord-Dabou	Concernant les réseaux, le fuseau comprend : • Une ligne aérienne 400 kV et pylônes et ligne HTA la servitude de la Y4 et le couloir de la ligne 400 kV existante.	Concernant les réseaux, le fuseau comprend : • Une ligne aérienne 400 kV et pylônes et ligne HTA
	Infrastructures routières et électriques	Le fuseau passe dans le couloir de la ligne 400 kV existante et traversera l'autoroute Songon-Dabou.	Le fuseau traverse l'autoroute Songon-Dabou et passera en dessous de la ligne 400 kV existante.	Le fuseau traverse l'autoroute Songon-Dabou et passera en dessous de la ligne 400 kV existante.
Technique	**Nombre angle**	17 angles dont 1 angle fort	5 angles faibles	7 angles faibles

Enjeux
Enjeu environnemental faible +
Enjeu environnemental moyen
Enjeu environnemental fort
Enjeu environnemental très fort

V.7.3 SYNTHÈSE DU CHOIX DU FUSEAU

Au terme de cette analyse, le fuseau 2 apparaît comme le corridor présentant le moindre impact global et le meilleur compromis entre les impératifs techniques, environnementaux et socio-fonciers.

Il se distingue notamment par :

- Un périmètre maîtrisé et compatible avec les objectifs d'optimisation des coûts et des ouvrages
- Un nombre réduit d'angles (cinq angles faibles), garantissant une meilleure performance mécanique et une exploitation plus fiable de la ligne
- Des coûts d'investissement intermédiaires, mais cohérents au regard de la stabilité foncière et environnementale du corridor
- Une faible interaction avec les zones densément urbanisées, limitant les déplacements de populations et les indemnisations
- Une relative continuité des occupations agricoles, dont les impacts restent plus maîtrisables que ceux sur les quartiers habités
- Une bonne compatibilité avec les dynamiques actuelles d'aménagement du territoire, en évitant les zones d'expansion urbaine récente
- Une exploitation efficiente des couloirs et servitudes déjà disponibles

Ainsi, le fuseau 2 est retenu comme fuseau de moindre impact et constitue la base du tracé à développer dans le cadre de l'Avant-Projet Définitif (APD).

V.8 PROPOSITION DES TRACÉS RETENUS DANS LE FUSEAU DE MOINDRE IMPACT (FUSEAU 2)

Dans le fuseau 2, retenu comme fuseau de moindre impact, deux tracés potentiels ont été identifiés. Dans le présent mémoire, la numérotation originale issue de l'étude de référence est conservée. Ainsi, les deux tracés du fuseau 2 sont désignés comme Proposition 4 et Proposition 5, conformément aux cartes et documents techniques produits lors de la phase APS.

Ces deux propositions représentent les variantes possibles pour l'implantation de la future ligne 225 kV, chacune s'appuyant sur des logiques d'optimisation distinctes. Leur représentation dans le fuseau 2 est à voir en **Annexe 7**.

Les sections suivantes présentent ces deux tracés, leurs caractéristiques principales ainsi qu'une analyse comparative permettant d'identifier celui offrant la meilleure compatibilité avec les objectifs de l'étude.

V.9 DESCRIPTION DES VARIANTES DE TRACÉS ÉTUDIÉES

Proposition 4 : Tracé aérien optimisé le long des emprises existantes

Le tracé de la Proposition 4 s'étend sur environ 18,36 km, constituant l'un des tracés les plus courts étudiés dans le fuseau 2. Son développement s'organise en plusieurs segments successifs

- Traversée des domaines agricoles du CNRA et de PALMAFRIQUE, avec une emprise linéaire nécessitant des procédures de compensation et des ajustements fonciers maîtrisés.
- Longe la servitude de la nouvelle voie Y4, axe structurant reliant l'autoroute du Nord à la route de Dabou, ce qui permet de minimiser l'ouverture de nouvelles emprises.
- Suit ensuite le couloir existant de la ligne 400 kV Akoupé Zeudji – Taboth, garantissant une cohérence avec le corridor électrique existant et limitant les impacts environnementaux et sociaux.
- Déviation finale vers le futur poste 225 kV de Songon, par un alignement aérien direct.

Cette variante présente plusieurs avantages majeurs : une longueur réduite, une exploitation maximale des zones déjà anthropisées et une simplicité technique grâce à un tracé entièrement aérien. Elle impose néanmoins une gestion attentive des enjeux fonciers au sein des périmètres agricoles traversés.

Proposition 5 : Tracé mixte incluant un passage souterrain

La Proposition 5 développe un tracé d'une longueur totale d'environ 18,57 km, soit un allongement limité de 0,21 km par rapport à la Proposition 4. Elle reprend, sur la majeure partie de son linéaire, les mêmes axes structurants que le tracé aérien optimisé :

- Traversée des domaines du CNRA et de PALMAFRIQUE ;
- Alignement sur la servitude de la voie Y4 ;
- Proximité immédiate du corridor de la ligne aérienne 400 kV Akoupé Zeudji – Taboth.

La différence majeure réside dans la configuration de la partie terminale du tracé. Afin de faciliter l'insertion de la ligne dans un environnement plus contraint à l'approche du futur poste

de Songon, la Proposition 5 intègre un passage souterrain d'environ 592 m, réalisé le long d'une ruelle existante d'environ 12 m de largeur.

Cette section souterraine nécessiterait la mise en œuvre de câbles 225 kV isolés, associés à :

- Deux Ouvrages De Transition Aérien–Souterrain (Terminaisons),
- Au Minimum Une Boîte De Jonction Intermédiaire,
- Des Dispositions Spécifiques Liées Au Génie Civil (Tranchée, Remblai Thermique, Protections Mécaniques).

Sur le plan fonctionnel, cette variante présente des avantages notables en matière d'intégration urbaine et foncière, en réduisant les conflits d'usage du sol et les servitudes visuelles à proximité du poste. Elle permet également d'améliorer l'acceptabilité du projet dans un environnement potentiellement sensible. En revanche, elle introduit une complexité technique accrue, tant en phase de construction qu'en phase d'exploitation, du fait de la présence d'ouvrages souterrains sensibles aux conditions thermiques du sol et aux contraintes de maintenance.

V.9.1 ETUDE ESTIMATIVE DU SEGMENT SOUTERRAIN

Tableau 8: Ouvrages spécifiques – partie souterraine (592 m)

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Total (FCFA)
1	Études spécifiques souterrain (géotechnique, thermique)	Forfait	1	80 000 000	80 000 000
2	Terrassement, tranchée ordinaire et busée + grillage	ml	592	650 000	384 800 000
3	Fourniture câble HTB souterrain	m	592	1 250 000	740 000 000
4	Pose et remblaiement du câble	m	592	420 000	248 640 000
5	Boîtes de jonction HTB+ borne de direction + jeu EUI	Ens	2	120 000 000	240 000 000
Total ouvrages souterrains					**1 693 440 000**

V.9.2 TABLEAU COMPARATIF DES PROPOSITIONS DE TRACÉS 4 ET 5

Avant de sélectionner la variante finale à retenir, une comparaison multicritère a été réalisée. Le tableau ci-dessous synthétise les principaux éléments discriminants entre les deux propositions.

Tableau 9: Comparatif des propositions 4 et 5

Critères	Proposition 4	Proposition 5
Longueur du tracé	Environ 18,36 km (plus court)	Environ 18,57 km (+0,21 km)
Type de tracé	Entièrement aérien	Mixte (aérien + 592 m souterrain)
Emprises utilisées	CNRA, PALMAFRIQUE, Y4, couloir 400 kV	CNRA, PALMAFRIQUE, Y4, couloir 400 kV
Intégration urbaine	Moins adaptée en zone dense	Améliorée grâce au passage souterrain
Contraintes foncières	Traversée de domaines agricoles	Réduction des conflits fonciers en zone terminale
Complexité technique	Faible à modérée	Élevée sur la section souterraine
Exploitation et maintenance	Simple et rapide	Plus complexe (localisation et réparation des défauts)
Coût d'investissement	Faible à modéré	Plus élevé du fait du souterrain

V.9.3 DISCUSSION POUR LE CHOIX DU TRACÉ DÉFINITIF

L'analyse comparative met en évidence que la Proposition 5 présente des atouts indéniables en termes d'intégration urbaine et de réduction des contraintes foncières à l'approche du poste de Songon. Le recours à une section souterraine permet de s'affranchir des servitudes aériennes dans une zone potentiellement sensible et constitue, d'un point de vue territorial, une solution techniquement pertinente. Cependant, les retours d'expérience issus de projets comparables de réseaux de transport d'électricité indiquent que les liaisons souterraines 225 kV présentent des coûts d'investissement nettement supérieurs à ceux des lignes aériennes, avec des ordres de grandeur compris entre 2 et 5 MUSD/km, contre 0,25 à 0,6 MUSD/km pour une ligne aérienne de même niveau de tension (Mott MacDonald & IET, 2025). Ainsi, malgré une longueur limitée à environ 592 m, la section souterraine représente un surcoût significatif à l'échelle du projet. Sur le plan technique, la présence d'ouvrages de transition aérien–souterrain et de boîtes de jonction constitue des points singuliers sensibles, tant pour l'exploitation que pour la maintenance. En cas de défaut, les délais de localisation et de réparation d'une liaison souterraine peuvent s'étendre sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines, ce qui constitue une contrainte majeure pour un réseau de transport haute tension. Au regard de ces éléments, et en tenant compte des prédispositions du maître d'ouvrage, la Proposition 4, correspondant à un tracé entièrement aérien optimisé le long des emprises existantes, apparaît comme la solution offrant le meilleur compromis technico-économique, tout en garantissant un niveau de fiabilité élevé et une exploitation simplifiée du réseau.

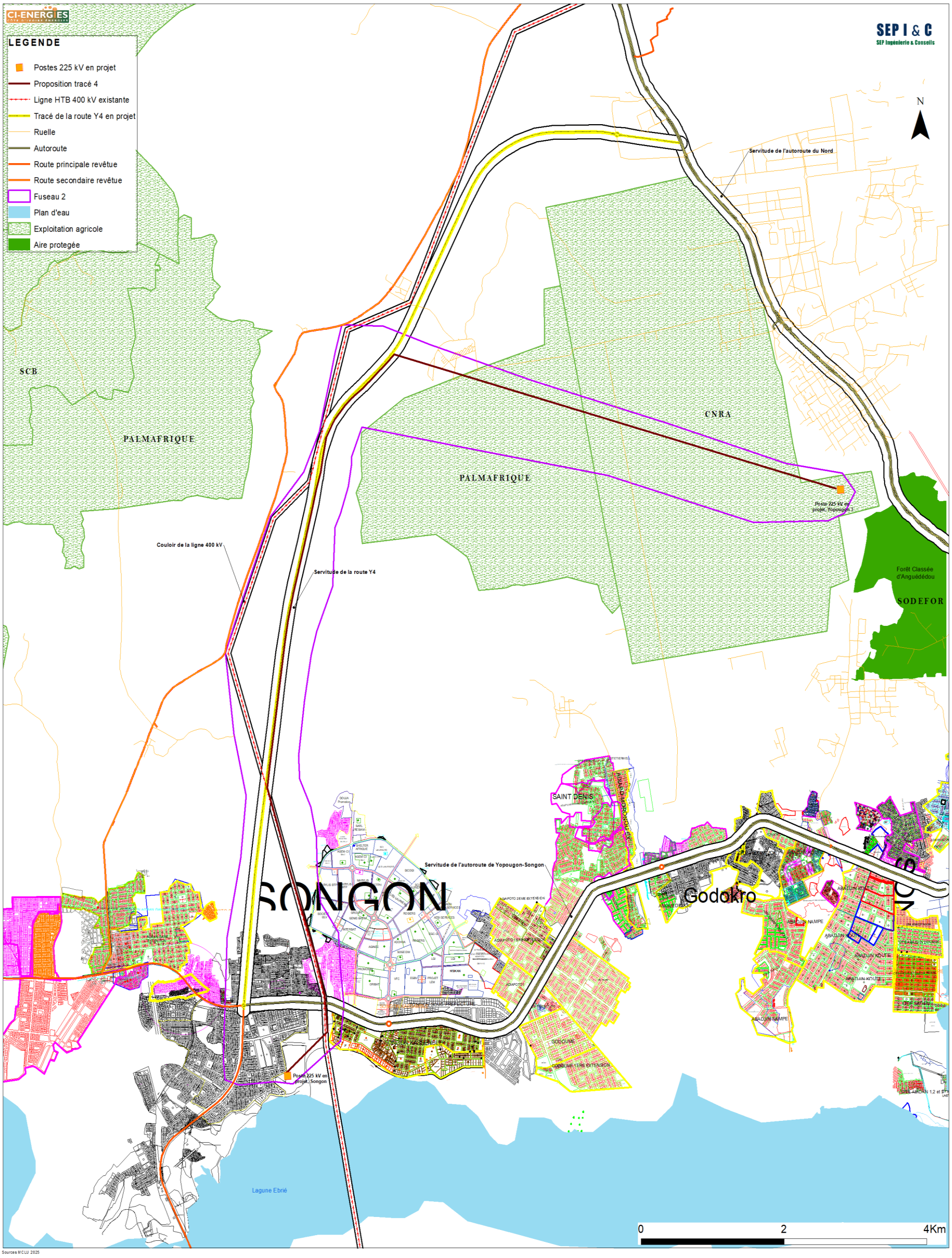


Figure 12: Illustration du tracé 4 (tracé de moindre impact) dans le fuseau 2 de moindre impact

VI. ETUDE AVANT PROJET DETAILLE DE LE LIGNE 225KV YOPOUGON 3 - SONGON

VI.1 DESCRIPTION DU TRACE RETENU (PROPOSITION 4)

Le tracé retenu pour la future ligne 225 kV Yopougon 3 – Songon correspond à la Proposition 4, identifiée comme la variante présentant le moindre impact à l'issue de la phase APS. Il s'étend sur une longueur totale d'environ 18,36 km et s'inscrit majoritairement dans des emprises existantes ou faiblement urbanisées, ce qui permet de limiter les contraintes foncières, techniques et environnementales.

VI.1.1 TRAVERSÉE DES ZONES LOTIES

Le tracé interfère ponctuellement avec des zones urbanisées, notamment :

- 9,67 ha dans la bande planimétrique de 120 m
- 3,03 ha dans le couloir opérationnel de 40 m

- Dans des lotissements non approuvés, représentant :
  - 9,18 ha dans la bande planimétrique de 120 m
  - 3,10 ha dans le couloir opérationnel de 40 m

Ces emprises restent limitées en proportion du linéaire total et ne compromettent pas l'intégrité du tracé. Toutefois, elles nécessiteront des démarches foncières encadrées lors des phases ultérieures.

VI.1.2 TRAVERSEE DES ZONES AGRICOLES DU CNRA ET DE PALMAFRIQUE

- Dans le CNRA, les superficies concernées sont de :
  - 47,22 ha dans la planimétrie de 120 m,
  - 15,62 ha dans le couloir de 40 m.
- Dans PALMAFRIQUE, les superficies concernées sont de :
  - 23,51 ha dans la planimétrie de 120 m,
  - 7,84 ha dans le couloir de 40 m.

VI.1.3 IMPLANTATION EN ZONES NON LOTIES

En dehors des secteurs structurés (lotissements, zones agricoles, servitudes routières), une grande partie du tracé traverse des terrains non lotis ou faiblement occupés. Ces zones bénéficient de conditions favorables en matière d'accessibilité, d'emprise foncière et de minimisation des impacts sociaux.

VI.1.4 SYNTHESE DE LA PROPOSITION 4

Le tracé de la Proposition 4 présente une structure linéaire cohérente, compatible avec les contraintes environnementales, foncières et techniques de l'aire d'étude. Sa répartition équilibrée entre zones agricoles, zones non loties et bordures de lotissements validés permet une implantation optimisée pour la future ligne 225 kV. Les éléments quantitatifs présentés constituent la base nécessaire à l'ouverture de la phase de dimensionnement électrique et mécanique détaillée.

VI.2 DIMENSIONNEMENT ELECTRIQUE DE LA LIGNE 225 KV

VI.2.1 METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT ELECTRIQUE DE LA LIGNE 225 KV

La méthodologie de dimensionnement électrique adoptée pour notre ligne 225 kV repose sur une approche progressive et cohérente, combinant calculs analytiques et simulation numérique. Elle s'articule autour des étapes principales suivantes :

- **Estimation de la puissance à transiter**, à partir d'une charge de référence et de son évolution future
- **Détermination du courant nominal** correspondant à la puissance projetée, sur la base du niveau de tension de la ligne et du facteur de puissance retenu
- **Évaluation des courants de court-circuit**, afin de vérifier la tenue thermique des conducteurs en situation de défaut
- **Choix du type et de la section des conducteurs de phase**, en cohérence avec les pratiques du réseau ivoirien de transport et les recommandations issues des études de référence
- **Vérification des critères électriques fondamentaux**, notamment le courant admissible, la tenue au court-circuit et la chute de tension admissible
- **Sélection du câble de garde**, assurant la protection contre les surtensions atmosphériques et la compatibilité mécanique avec le conducteur de phase

- **Dimensionnement des chaînes d'isolateurs**, en tenant compte des conditions environnementales (salinité, pollution), des contraintes électriques (BIL) et mécaniques (traction maximale)
- **Validation du dimensionnement électrique par simulation numérique**, à l'aide du logiciel DIgSILENT PowerFactory, à travers un calcul de flux de puissance permettant d'évaluer la chute de tension et le taux de charge de la ligne

VI.2.2 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT

VI.2.3 DETERMINATION DE LA PUISSANCE NOMINAL TRANSITE PAR LA LIGNE

La ligne doit être en mesure d'assurer un transit compatible avec les besoins actuels tout en intégrant la croissance anticipée des charges alimentées depuis les postes. À l'année de référence, la puissance initialement estimée sur cette liaison est de 50 MVA (issue du DAO). Afin de projeter la charge à long terme, CI-ENERGIES envisage une croissance nationale de 5,2 %/an à long terme (The World Bank, 2022). La formule utilisé pour le calcul est la suivante (Université de Liège, s.d.) :

$$\boldsymbol{P_T = P_0 \times (1 + a)^T} \quad (1)$$

Avec :

- $\boldsymbol{P_T}$: Charge projetée à l'année T [MW]
- $\boldsymbol{P_0}$: Charge à l'année de référence [MW]
- $\boldsymbol{a}$: Taux de croissance annuel pris à 5,2 %
- $\boldsymbol{T}$: horizon d'études pris à 20 ans

Ainsi, la puissance à transiter sur les 20 ans est de **137,81 MW.**

VI.2.4 DETERMINATION DU COURANT NOMINAL

Le courant nominal correspondant à cette puissance est déduit de l'expression :

$$I_n = \frac{P_T}{\sqrt{3} \times U \times \cos(\varphi)} \quad (2)$$

Avec :

- U**= 225 kV,** la tension de la ligne ;
- $cos(\varphi)$ **= 0,9 :** le facteur de puissance issu de la documentation technique du maitre d'ouvrage ;

Le courant nominal attendu sur chaque phase est donc de **392,91 A**

VI.2.5 DETERMINATION DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

Le courant de court-circuit se détermine au travers de la formule :

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \times U} \quad (3)$$

Avec :

- S_{cc} **:** la puissance de court-circuit [MVA] ;

Deux modes de calculs nous permettent de déterminer la puissance de court-circuit, à savoir l'équation de la tendance et l'interpolation des valeurs. Dans notre cas, nous utiliserons l'équation de la tendance dont la marge d'erreur se situe dans l'intervalle [-1,7962 ;2,2291] (Al-Aziz, 2021) qui est la suivante :

$$y = 0,2193x^2 + 20,503x - 9,1166 \quad (4)$$

Les variables x et y désignent respectivement la puissance de court-circuit et le niveau de tension. Ainsi, on obtient pour x **= 225 kV,**

$$y = S_{cc} = 15\,706,12 \text{ MVA}$$

On en déduit alors I_{cc} **= 40,3 kA**.

VI.2.6 CHOIX DE LA NATURE DES CABLES POUR LES CONDUCTEURS DE PHASE ET CABLES DE GARDES

- **Choix de la nature et la section de câble pour les conducteurs de phase**

Selon l'étude préparatoire du projet de renforcement du corridor nord (JICA, Côte d'Ivoire), les conducteurs utilisés pour la majorité des lignes 225 kV en Côte d'Ivoire sont de type AAAC [16]. Dans cette dynamique, notre choix se tourne également vers ce type de câble. Le choix de la section du conducteur n'a pas été effectué sur la base des critères de givre, ceux-ci étant spécifiques aux régions tempérées et non applicables au contexte climatique de la Côte d'Ivoire. Conformément aux recommandations des normes internationales, le dimensionnement de la section repose principalement sur des critères mécaniques et électriques. Partant de ce fait, pour des projets similaires en Côte d'Ivoire et dans un souci de compatibilité et d'uniformisation des lignes du réseau électrique de transport, les sections utilisées pour ce niveau de tension comme mentionnée dans l'étude préparatoire du projet de renforcement du corridor nord (JICA, Côte d'Ivoire) sont l'Aster 366 et l'Aster 570.

Les caractéristiques plus en détail de ces conducteurs sont répertoriés à l'**Annexe 9**.

Le choix définitif du câble sera guidé par la vérification de certains paramètres prépondérant A savoir :

- Le courant admissible du conducteur
- Le courant de court-circuit
- La chute de tension admissible

❖ **Vérification du courant admissible par le conducteur**

La littérature technique fournit différentes approximations pour estimer le courant admissible d'un conducteur nu. Pour les conducteurs en alliage d'aluminium (AAAC), l'expression empirique couramment utilisée est :

$$I_{admissible} = K \times S^{0,62} \quad (5)$$

- K : coefficient dépendant du type de câble, [17,1 pour l'almélec] (BEHIBRO, 2023)
- S : section du conducteur en mm^2

Le résultat de l'application numérique nous donne une valeur de **874,46 A** pour l'Aster 570 et **664,51 A** pour l'Aster 366. Ainsi, on peut en déduire que $I_{admissible}$ *(874,46 A)* > I_n *(392,91 A)* pour l'Aster 570 et $I_{admissible}$ *(664,51 A)* > I_n *(392,91 A)* pour l'Aster 366. Les conducteurs peuvent alors évacuer en toute sécurité le courant de transit attendu.

❖ Vérification du courant de court-circuit admissible par les conducteurs

La formule utilisée pour le calcul du court-circuit admissible est la suivante :

$$\boldsymbol{Icc_{max} = \frac{a \times S}{\sqrt{t_{cc}}}\ ; (t < 5s)} \quad (6)$$

- $\mathbf{t_{cc}}$ est le temps d'élimination des défauts. Pour une ligne de 225 kV, il équivaut à 0,5 s.
- **a** est un paramètre qui dépend de la nature du conducteur, pour l'almélec a=61,98

On obtient après application numérique $\boldsymbol{Icc_{max} = 49,981\ kA}$ **,** pour l'Aster 570 et $\boldsymbol{Icc_{max} = 32,081\ kA}$ pour l'Aster 366. D'où, l'Aster 570 uniquement peut supporter sans détérioration le courant de court-circuit.

❖ Vérification de la chute de tension admissible

On obtient la valeur approximative de la chute de tension admissible via la formule suivante :

$$\boldsymbol{\Delta U = \sqrt{3} \times I_n(R_{75°C} \times cos\varphi + X\ sin\varphi) \times L} \quad (7)$$

Avec :

- $\boldsymbol{In}$: courant par phase (A).
- $\boldsymbol{L}$: longueur de la ligne (km)
- Et $\boldsymbol{R_{75°C} = R_{20} \times (1 + \alpha(T - 20))}$avec $\alpha \approx$ 0,0039 /°C pour l'aluminium. A 75°C, on obtient $R_{75°C}$ = 0,0601 Ω/km
- $\boldsymbol{X}$: réactance par km [Ω/km], (valeur indicative selon espacement) on prendra $X \approx 0{,}33\ \Omega/\text{km}$.

On en déduit au final la chute de tension pour l'Aster 570 : $\boldsymbol{\Delta U = 2490,07\ V; soit\ 1,106\%}$ et l'Aster 366 : $\boldsymbol{\Delta U = 3434,17\ V; soit\ 1,52\%}$ donc inférieur à la valeur limite de 5% recommandée.

A la lumière de ces calculs effectués, nous pouvons justifier pleinement le choix de l'Aster 570 comme conducteur de phase de notre ligne 225 kV. Aussi, son intégration dans le réseau ivoirien est également recommandée car exigée pour toute nouvelle construction de ligne HTB 225 kV.

- **Choix de la nature du câble de garde**

Dans les lignes aériennes haute tension 225 kV, le câble de garde occupe une fonction essentielle dans la protection de l'infrastructure. Il constitue la première barrière contre les surtensions atmosphériques, notamment les coups de foudre. En plus des considérations de dimensionnement aux courants de défaut et aux exigences de sécurité mécanique, le câble de garde ne peut être choisi indépendamment du conducteur qu'il protège. Il faut en effet vérifier que le câble de garde et le conducteur présentent un comportement géométrique comparable.

Le **Tableau 10** donne l'association mécanique entre câble de garde et conducteur, pour éviter les risques d'amorçage.

Tableau 10: Association conducteurs/ câbles de garde

<table>
<tr><th rowspan="2">Niveau de tension</th><th rowspan="2">Conducteurs</th><th colspan="2">Câbles de garde</th></tr>
<tr><th>Classique</th><th>A circuit de télécommunication incorporé</th></tr>
<tr><td rowspan="4">63 kV ou 90 kV</td><td>Aster 228</td><td>Phlox 94,1</td><td>Thym 107</td></tr>
<tr><td>Aster 366</td><td>Phlox 116,2</td><td>Thym 157,4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Aster 570</td><td rowspan="2">Phlox 116,2</td><td>Thym 107</td></tr>
<tr><td>Thym 157,4</td></tr>
<tr><td rowspan="3">225 kV</td><td rowspan="2">Aster 366</td><td>Phlox 116,2</td><td rowspan="2">Thym 157,4</td></tr>
<tr><td>Phlox 147,1</td></tr>
<tr><td>Aster 570</td><td>Phlox 147,1</td><td>Thym 157,4</td></tr>
<tr><td>400 kV</td><td>Aster 570</td><td>Phlox 228</td><td>Thym 157,4</td></tr>
</table>

Ainsi pour le conducteur de phase Aster 570 sous 225 kV, correspond le câble de garde classique **Phlox 147,1** et celui à circuit de télécom incorporé, **Thym 157,4.** Leurs caractéristiques sont définies à l'**Annexe 10**.

VI.2.7 DIMENSIONNEMENT DES ISOLATEURS

Les isolateurs, leur rôles et type ont été définis au titre **III.3.5** du présent mémoire. La méthodologie utilisée par la suite est celle développée par le service de Transport et Distribution de l'Energie Electrique (TDEE) de l'Université de Liège (RTE, 2019).

- **Détermination de la tension de contournement**

On détermine la tension de contournement en fonction du niveau de salinité et de pollution de la zone. Le tableau ci-dessous, extrait de la norme CEI 61466 nous permet de faire ce choix

Tableau 11: Tension de contournement en fonction du degré de salinité et de la zone de pollution

Zone	**I**	**II**	**III**
Degré de salinité [kg/m^3]	7	20	80
Niveau de pollution	Faible	Moyenne	Elevé
Localisation	Majeure partie du territoire	Zone éloignée de quelques kilomètres du bord de mer ou des industries	Bord de mer et proximité d'industrie
β [cm /kV]	1,48	1,83	2,34

Notre aire d'étude se situe de quelques kilomètres de la mer et avoisine quelques industries comme celle de Palmafrique. Elle est alors considérée étant une zone de classe II avec un degré de salinité de 20 kg/m^3. On en déduit ainsi sa tension de contournement qui est de **β=1,83 cm /kV.**

- **Détermination de la longueur de la ligne de fuite des isolateurs**

On détermine la longueur de la ligne de fuite via la formule suivante :

$$L_f = 1,1 \times U_M \times \beta \qquad (8)$$

Avec U_M : la tension la plus élevée pour le matériel ; pour une tension nominale de 225 kV, la tension U_M = 245 kV

L'application numérique nous donne **L_f =4931,85 mm**

- **Détermination de la tension de tenue aux chocs de foudre (BIL)**

On détermine la tension nominale de tenue aux chocs de foudre à partir de la tension la plus élevée pour le matériel U_M consultable à **Annexe 11**.

On obtient ainsi une tension de tenue aux chocs de foudre de 750 kV**.** Cette valeur est en déca de celle fixée par la norme CEI 60060-1, étant de 850 kV.

- **Détermination de la tension de traction par les conducteurs**

La tension de traction par les conducteurs désigne l'effort de traction maximale par les conducteurs, agissant sur les têtes d'isolateurs. Sa valeur permet de déterminer par la suite le type d'assiette que la chaine d'isolateur devra supporter. Selon la norme, la formule de calcul est la suivante :

$$\boldsymbol{T_{max} \geq \frac{1}{3} \times T_{rupture}} \quad (9)$$

Avec : $\boldsymbol{T_{rupture}}$, la charge de rupture du conducteur de phase. Pour l'Aster 570, la charge de rupture est de 18 530 daN

L'application numérique nous donne $\boldsymbol{T_{max}}$ **= 6 176,66 daN**

- **Détermination de la chaine d'isolateur**

Pour le choix de la chaîne d'isolateur, dans un premier temps nous considérons les assiettes de type « standard ». Ensuite, au regard de la tension de traction Tmax, nous choisirons l'assiette ayant le plus petit pas parmi les modèles d'assiettes convenantes répertoriées à l'**Annexe 13**.

Ainsi, notre choix porte sur l'assiette standard **F70/127.**

Dans un deuxième temps, on détermine le nombre d'assiettes N1 nécessaire, à partir du modèle d'assiette « le pas » et du « BIL » en se référant à **Annexe 14**.

On obtient alors par interpolation pour un pas de 127 mm et un BIL de 750 kV, un nombre **N1=12 assiettes** environ.

Dans un troisième temps, on détermine le nombre **N2** en vérifiant la suffisance de la longueur de la ligne de fuite L_f via la formule suivante :

$$\boldsymbol{N_2 = \frac{L_f}{longueur\ de\ fuite\ effective\ d'une\ assiette}} \quad (10)$$

L'application numérique nous donne **N2 ~ 16 assiettes**

Le module |N1−N2| nous donne **3,41,** donc inférieur à 5. Par conséquent on prendra N2 comme nombre d'assiette pour notre chaîne d'isolateurs. Dans le cas contraire, les conditions auraient été reconsidérées et le choix des assiettes serait de type « antifog ». En conclusion, nous recapitulons les spécifications de notre chaîne d'isolateurs dans le

Tableau 12**.**

Tableau 12: Récapitulatif des spécifications de la chaîne d'isolateur

Type standard	**F70/127**
Nombre d'assiettes	16
Pas [mm]	127
Longueur de la ligne de fuite réelle totale [mm]	5120
Longueur totale de la chaîne « SL » [mm]	2032
Tenue aux chocs de foudre [kN]	1120
Masse de la chaîne [kg]	56

VI.3 ANALYSE ELECTRIQUE DE LA LIGNE 225 KV

VI.3.1 OBJECTIF DE L'ANALYSE ELECTRIQUE

L'analyse électrique de la ligne a pour objectif de vérifier l'aptitude de la future ligne 225 kV reliant les postes de Yopougon 3 et Songon à assurer le transit de la puissance prévue dans des conditions satisfaisantes de qualité et de sécurité de l'énergie électrique.

Elle vise principalement à :

- Vérifier la chute de tension le long de la ligne
- Apprécier le transit de puissance dans le conducteur retenu
- Confirmer l'adéquation du conducteur choisi au regard des contraintes électriques
- S'assurer du respect des limites admissibles en réseau HTB

Les postes de Yopougon 3 et de Songon sont considérés comme des nœuds de raccordement 225 kV, sans étude détaillée de leur configuration interne, conformément au périmètre de l'étude centrée sur la ligne.

VI.3.2 PRESENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION

Afin de mener l'analyse électrique de la ligne, le logiciel **DIgSILENT PowerFactory** a été utilisé. Ce logiciel est largement employé par les bureaux d'étude et les gestionnaires de réseaux de transport pour :

- La modélisation des réseaux HTB/HTA/BT
- Le calcul de flux de puissance (load flow)
- L'analyse des chutes de tension et des pertes
- L'évaluation du comportement des lignes électriques

PowerFactory permet une représentation fiable des lignes de transport à partir de leurs paramètres électriques, ainsi que des nœuds de raccordement.

VI.3.3 METHODOLOGIE DE MODELISATION DU RESEAU

VI.3.3.1 HYPOTHESES GENERALES

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour la modélisation :

- La ligne est modélisée comme une ligne aérienne 225 kV de longueur réelle issue de l'étude de tracé
- Le conducteur retenu est celui sélectionné à l'issue du dimensionnement électrique
- Le facteur de puissance est pris égal à cos φ = 0,9, comme mentionné lors du dimensionnement
- Le poste de Yopougon 3 est modélisé comme une source 225 kV
- Le poste de Songon est modélisé comme une barre réceptrice 225 kV, alimentée par la ligne
- Le régime étudié correspond à un fonctionnement normal du réseau
- Une puissance de 137,81 MW a été retenue comme calculée lors du dimensionnement

Ainsi, le réseau modélisé est représenté à la **Figure 13**



Figure 13: Modélisation du réseau sur PowerFactory

VI.3.4 RESULTATS DE LA MODELISATION

Le model de notre réseau après simulation nous donnes les résultats ci-après sur la



Figure 14: Résultats du model après calcul du flux de puissance

VI.3.4.1 ANALYSE DE LA SIMULATION

Les résultats montrent que la tension au poste amont de Yopougon 3 est maintenue à la valeur nominale de 225 kV, tandis que la tension au poste aval de Songon s'établit à 222,5 kV. La chute de tension le long de la ligne est donc de 2,5 kV, correspondant à une chute relative d'environ 1,1 % par rapport à la tension nominale. Cette valeur est largement inférieure aux limites admissibles pour les lignes de transport HTB 225 kV, fixées à environ 5 % en régime normal. Ce qui démontre également la concordance entre les résultats analytiques et numériques

Les résultats générés par le calcul du flux de puissance sont à **l'Annexe** 12

VI.3.5 SYNTHESE DU DIMENSIONNEMENT ELECTRIQUE

Le dimensionnement électrique de la ligne aérienne 225 kV Yopougon 3 – Songon a conduit à des résultats selon des projections faites. Cette projection a conduit à une puissance de transit d'environ 137,81 MW, représentative des besoins futurs du réseau. Le choix du conducteur AAAC Aster 570 s'est avéré pertinent au regard des critères électriques fondamentaux. Les vérifications effectuées montrent que le conducteur est en mesure de supporter, en toute sécurité, aussi bien le courant de fonctionnement normal que les sollicitations en situation de court-circuit. Le calcul analytique de la chute de tension a conduit à une valeur d'environ 1,106 %, largement inférieure à la limite admissible de 5 % recommandée pour les réseaux de transport HTB. Cette faible chute de tension traduit une bonne rigidité électrique de la ligne et confirme l'adéquation du niveau de tension et du conducteur choisis. Le dimensionnement des câbles de garde et des chaînes d'isolateurs a été réalisé en cohérence avec les conditions environnementales de la zone d'étude, caractérisée par une pollution de classe II et une salinité modérée. Les paramètres retenus assurent une protection efficace contre les surtensions atmosphériques et une tenue électrique et mécanique satisfaisante de l'ouvrage. Et, la modélisation de la ligne sous DIgSILENT PowerFactory et le calcul de flux de puissance ont permis de valider l'ensemble des résultats analytiques. La simulation met en évidence une tension de 225 kV au poste amont de Yopougon 3 et une tension d'environ 222,5 kV au poste aval de Songon, correspondant à une chute relative de l'ordre de 1,1 %, en parfaite concordance avec les résultats analytiques.

VI.4 DIMENSIONNEMENT MECANIQUE DE LA LIGNE 225 KV

VI.4.1 METHODOLOGIE DU DIMENSIONNEMENT MECANIQUE DE LA LIGNE 225 KV

Le dimensionnement mécanique de la ligne aérienne 225 kV a été conduit afin de garantir la tenue des conducteurs, des câbles de garde et des pylônes face aux sollicitations mécaniques et climatiques auxquelles l'ouvrage sera soumis durant toute sa durée de service. La démarche adoptée repose sur une approche normative et progressive, structurée autour des grandes étapes suivantes :

- **Définition des hypothèses climatiques de calcul**, représentatives des conditions les plus défavorables de la zone d'étude (température, vent), servant de base aux vérifications mécaniques
- **Dimensionnement géométrique de la ligne**, permettant de déterminer les portées caractéristiques, les flèches maximales, la longueur réelle des conducteurs ainsi que le respect des distances minimales réglementaires entre phases, câble de garde, sol et ouvrages environnants
- **Évaluation des sollicitations mécaniques sur les conducteurs et les câbles de garde**, incluant le poids propre, l'effet du vent et les efforts résultants transmis aux chaînes d'isolateurs
- **Application de l'équation d'état de Blondel**, afin de déterminer la portée critique, la constante mécanique associée, les tensions dans les câbles et les flèches correspondantes pour les différentes hypothèses climatiques
- **Vérification des distances de sécurité électriques**, conformément aux normes en vigueur pour les lignes HTB 225 kV
- **Analyse de l'effet couronne**, par l'évaluation du champ électrique maximal au voisinage des conducteurs, afin de s'assurer que les valeurs restent inférieures au seuil disruptif
- **Étude mécanique relative aux pylônes**, consistant à définir la portée retenue, le type de pylône approprié, la répartition des supports par cantons et le calcul des charges verticales, transversales et longitudinales transmises aux pylônes
- **Génération de profil en long,** Les altitudes des points du tracé ont été extraites à partir du Modèle Numérique de Terrain SRTM. Les coordonnées planimétriques issues du tracé ont été enrichies par les valeurs altimétriques du MNT afin d'établir les profils en long du terrain naturel. Ils sont à voir à l'**Annexe 19.**

- **Approche générale du dimensionnement mécanique**

Le dimensionnement mécanique d'une ligne aérienne 225 kV consiste à vérifier que l'ensemble des éléments constituant l'ouvrage (conducteurs, câbles de garde, armements et pylônes) peut résister aux sollicitations auxquelles ils seront soumis tout au long de leur durée de service, tout en tenant compte des conditions climatiques spécifiques à la zone du projet.

L'étude mécanique repose sur deux volets complémentaires :

VI.4.2 DIMENSIONNEMENT GEOMETRIQUE

Il permet d'établir :

- Les Portées (Portée Moyenne, Portée Vent, Portée Poids)
- Les flèches maximales
- La longueur réelle du conducteur
- Les distances minimales réglementaires :
  - Entre conducteurs
  - Entre phase et câble de garde
  - Entre conducteurs et le sol.

VI.4.3 VERIFICATION DES CHARGES SUR LES PYLONES

Cette vérification consiste à :

- Déterminer les efforts transmis aux supports par les conducteurs et le câble de garde
- Considérer les charges climatiques (vent, température, etc.)
- S'assurer que les pylônes supportent les tensions maximales des équipements extérieurs.

VI.4.4 NOTIONS DE BASE UTILISEES POUR LE DIMENSIONNEMENT

Afin de mener les calculs mécaniques, les paramètres suivants sont utilisés :

- Flèche (f) : déformation verticale maximale du conducteur par rapport à une ligne droite imaginaire reliant les points d'ancrage de ce câble.
- Flèche maximale (f_{max}) : valeur limite à ne pas dépasser afin de garantir les distances de sécurité.
- Portée (P) : distance horizontale entre deux pylônes successifs.

- Portée poids (P_p) : somme des distances équivalente entre le pylône et les points les plus bas des deux portées adjacentes utilisée lors des calculs mécaniques en charge verticale
- Portée vent (P_v) : distance équivalente utilisée lors du calcul des charges horizontales liées au vent
- Portée moyenne (P_{moy}) : distance moyenne entre supports, représentative d'une zone homogène.

VI.4.5 HYPOTHESES CLIMATIQUES RETENUES POUR L'ETUDE

Les performances mécaniques d'une ligne aérienne sont fortement influencées par les conditions météorologiques de son environnement. Il est donc essentiel d'intégrer dans les calculs les caractéristiques climatiques mesurées dans la zone d'implantation.

Tableau 13: Hypothèse climatique de l'étude

Condition	Définition	Température (°C)	Vent (m/s)	Tension maximale admissible
A – Condition normale (Tous les jours)	Situation courante	28 °C	0	15–20 % de la résistance mécanique
B – Vent maximal	Charge extrême	28 °C	36	≤ 40 % de la résistance mécanique
C – Température minimale + vent	Retrait maximal du conducteur	23 °C	21,6	≤ 40 % de la résistance mécanique
D – Température maximale/ Canicule	Dilatation maximale	75 °C	0	Détermination de la flèche max

Source : Adapté de Al-Aziz., « *Dimensionnement électrique et mécanique d'une ligne aérienne 225 kV, cas de la ligne Ziniaré-Kaya* » Mémoire d'ingénieur 2ie, 2021.

Ainsi dans le cadre de notre étude, nous considérons les hypothèses des données les plus défavorables pour le calcul de la résistance mécanique de l'ouvrages.

VI.4.6 DISTANCES DE SECURITE (RTE, 2019)

C'est la distance à respecter entre les câbles conducteurs nus sous tension d'une ligne aérienne et le sol ou une installation quelconque.

- **Principe des distances de sécurité**

La distance de sécurité est égale à la somme :

- D'une distance dite "de base" (b) qui prend en compte la nature du surplomb (affectation du sol, nature des installations qu'il comporte, encombrements)

- D'une distance dite "de tension" (t), qui prend en compte la probabilité d'apparition d'une surtension et de la présence simultanée d'une personne ou d'un objet au voisinage de la ligne.

Trois distances de tension sont définies :

- t1 = 0,0025 U pour une faible probabilité de voisinage,
- t2 = 0,0050 U pour une probabilité de voisinage moyenne,
- t3 = 0,0075 U pour une probabilité de voisinage forte.

t1, t2, t3 sont exprimés en mètres et U, la tension nominale (entre phases) du réseau, en kV.

Tableau 14: Distance de protection contre les risques électriques & probabilité simultanée de présence

U	63 / 90 kV	225 kV	400 kV
t1	0,2 m	0,6 m	1,0 m
t2	0,5 m	1,1 m	2,0 m
t3	0,7 m	1,7 m	3,0 m

On trouvera à l'**Annexe 15** le tableau contenant les distances à respecter en fonction de la nature du sol et des obstacles.

VI.4.7 CALCULS MECANIQUES SUR LES CONDUCTEURS ET CABLES DE GARDE

Il est nécessaire d'évaluer les sollicitations appliquées aux conducteurs de phase dans le cadre du dimensionnement mécanique de la ligne 225 kV. Les paramètres retenus dans les différents calculs sont exprimés à la température de référence 20 °C, à l'exception du poids linéique, qui dépend du type de conducteur choisi, les autres paramètres restent constants d'une hypothèse climatique à une autre. Les valeurs obtenues pour chaque hypothèse sont reportées en **Annexe 16.**

- **Détermination du poids spécifique du conducteur**

Ce paramètre constitue la charge verticale principale appliquée au conducteur. La relation utilisée est :

$$\boldsymbol{P = m_T \times g} \qquad (11)$$

Avec :

- $\mathbf{m_T}$: masse linéique totale du conducteur [kg/m], et du poids linéique de la graisse généralement estimée à 48 kg/km
- **g** = 9,81 m/s² : accélération de la pesanteur.

- **Détermination de la pression dynamique du vent q**

La pression dynamique du vent est évaluée afin de quantifier la charge horizontale exercée sur le conducteur. La pression dynamique de base est définie par :

$$q_b = 0,5\rho_{air} \times V^2 \quad (12)$$

Où :

- ρ_{air} = 1,225 kg/m³ : densité de l'air au niveau de la mer ;
- **V** : vitesse du vent (m/s) selon l'hypothèse étudiée.

La pression dynamique appliquée au conducteur devient alors :

$$q = f_c \times q_b \quad (13)$$

Avec :

- f_c = **1** pour les portées supérieures à 100 m pour le vent horizontal exceptionnel.(RTE, 2019)

- **Détermination de l'effort du vent Fv**

La force linéaire exercée par le vent sur le conducteur représente l'action horizontale appliquée sur chaque mètre de câble. Elle est déterminée par :

$$F_V = C_x \times q \times d \quad (14)$$

Où :

- C_x = **1** : coefficient de traînée du câble ;
- **d** : diamètre extérieur du conducteur.

VI.4.8 CALCULS DU POIDS EQUIVALENT ET DE L'ANGLE D'INCLINAISON

- **Détermination de l'angle d'inclinaison**

Sous l'effet combiné du vent et du poids propre du conducteur, la chaîne d'isolateurs n'est plus verticale ; elle s'incline et forme un angle de pivotement. Cet angle permet d'évaluer l'effort résultant transmis au pylône. Les valeurs obtenues pour chaque hypothèse sont reportées en **Annexe 16**.

L'angle d'inclinaison est obtenu par :

$$\varphi = \tan^{-1}(\frac{F_V}{p}) \quad (15)$$

- **Détermination du poids équivalent**

Il se détermine par application de la formule :

$$P_{eqv} = P\cos\varphi + F_V \sin\varphi \quad (16)$$

VI.4.9 PORTEE CRITIQUE ET CHOIX DE LA CONSTANTE

- **Portée critique**

Elle correspond à la portée pour laquelle deux conditions climatiques extrêmes conduisent à une tension identique dans le câble. Autrement dit, c'est la portée qui équilibre les contraintes mécaniques entre deux hypothèses défavorables.

La portée critique est obtenue à partir de l'équation d'état de Blondel, qui relie la tension dans un conducteur aux variations de température et au poids équivalent. L'expression utilisée est :

$$P_{c,i} = \sqrt{\frac{24\alpha(\theta_i - \theta_{ref})T_{max}^2}{P_{eqv}^2 - P_i^2}} \quad (17)$$

Avec :

- $\mathbf{T_{max}}$: tension maximale admissible dans le conducteur (N), généralement fixée à un tiers de la charge de rupture du conducteur
- $\boldsymbol{\alpha}$: coefficient de dilatation thermique du conducteur ($°C^{-1}$)
- $\boldsymbol{\theta_i}$: température associée à l'hypothèse climatique considérée (°C)
- $\boldsymbol{\theta_{ref}}$: température de référence du conducteur (20 °C dans notre étude)
- $\mathbf{P_{équi,i}}$: poids équivalent du conducteur dans l'hypothèse considérée (N/m)
- $\mathbf{P_i}$: poids propre du conducteur (N/m)

La portée critique est déterminée pour deux hypothèses extrêmes, car ce sont elles qui minimisent ou maximisent simultanément les effets combinés du vent et de la température :

- **Hypothèse HB (vent maximal)**
  - Température : $\boldsymbol{\theta_B}$ = 28 °C
  - Poids équivalent : $\mathbf{P_{équi,B}}$ = 29,29 N/m
- **Hypothèse HC (température minimale)**
  - Température : $\boldsymbol{\theta_C}$ = 23 °C

- Poids équivalent : $\mathbf{P_{équi,C}}$ = 18,2 N/m

Ces valeurs permettent de calculer les portées critiques P_B et P_C associées à chacune des deux hypothèses. Les résultats détaillés sont présentés dans **Annexe 16.**

- **Choix de la constante a**

Elle sert à exprimer la relation d'état (équation de Blondel) liant la tension dans le conducteur à la température et au poids équivalent. Sa valeur conditionne ensuite le calcul des tensions et des flèches pour l'ensemble des hypothèses climatiques retenues.

Principe de choix

- Calculer les portées critiques P_c pour les deux hypothèses extrêmes (H_B et H_C).
- Comparer la portée moyenne P_{moy} au(x) $P_c$obtenu(s).
- Si $P_{moy} < P_c$alors on retient la constante a associée à l'hypothèse **C**.
- Sinon (si $P_{moy} \geq P_c$) on retient la constante a associée à l'hypothèse **B**.

Les résultats de la portée critique Pc indique qu'elle est inférieure à la portée moyenne. Par conséquent, c'est la constante associée à l'hypothèse B qui sera retenue. Et dans le cas de notre projet, la portée moyenne est prise à 450 m.

La formule servant au calcul de la constante est :

$$\boldsymbol{a = \frac{P_{eqv}^2 \times P_{moy}^2}{24 \times T_{max}^2} - \frac{T_{max}}{E \times S} - (\alpha \times \theta)} \quad (18)$$

Avec :

- $\boldsymbol{P_{moy}}$: la portée moyenne (m) ;
- **E:** Module d'élasticité (N/mm^2) ;
- $\boldsymbol{S}$: Section du conducteur en (mm^2).

Les valeurs de ces calculs sont également répertoriées à l'**Annexe 16**.

VI.4.10 TENSIONS DANS LES CABLES ET FLECHE MAXIMALE

- **Tension dans les câbles**

La détermination de la tension mécanique dans le conducteur permet de vérifier la tenue du câble dans l'ensemble des hypothèses climatiques. L'objectif est de s'assurer que, pour chaque cas, la tension réelle reste inférieure à la tension maximale admissible définie par les caractéristiques mécaniques du conducteur. Elle est obtenue à partir d'une autre forme de l'équation d'état de Blondel, sous forme d'un polynôme du troisième degré :

$$-\frac{\boldsymbol{T^3}}{\boldsymbol{E \times S}} - (\boldsymbol{a + \alpha\theta})\boldsymbol{T^2} + \frac{\boldsymbol{P_{eqv}^2 \times P_m^2}}{\boldsymbol{24}} = \boldsymbol{0} \quad (19)$$

L'équation (19) est un polynôme cubique dont la résolution donne systématiquement trois solutions :

- Une Solution Réelle, Représentant La Tension Mécanique Physiquement Admissible Dans Le Câble ;
- Deux Solutions complexes, sans signification physique, qui sont donc ignorées.

Pour chaque hypothèse, seule la solution réelle positive est retenue. Les résultats de ces résolutions sont présentés en **Annexe 16**

- **Fleche maximale**

Elle est déterminée en fonction de la tension, sous l'hypothèse la plus contraignante (l'hypothèse D dans notre étude) via la formule suivante :

$$\boldsymbol{f_{max}} = \frac{\boldsymbol{P_{eqv} \times P_{moy}^2}}{\boldsymbol{8 \times T_{HD}}} \quad (20)$$

Avec :

- $f_{\max}$: flèche maximale (m),
- T_{HD}: tension horizontale dans le conducteur pour l'hypothèse étudiée (N).

Les valeurs de flèches obtenues sont présentées en **Annexe 16**

VI.4.11 DISTANCES ENTRES LES CABLES ET LES STRUCTURES A RESPECTER

- **Distance verticale entre conducteurs de phase**

L'écartement verticale minimale entre deux phases est donnée par la relation suivante :

$$E_{v.p,p} = C_{FI} \times \sqrt{S.L \times f_{max}} + \frac{U_n}{150} \quad (21)$$

Avec :

- **C_{FI}** : coefficient dépendant de la nature du conducteur, pris égal à **1** pour les conducteurs de type AAAC/ACSR
- **SL** : longueur de la chaîne d'isolateurs (m)
- **f_{max}** : flèche maximale dans l'hypothèse D (m)
- **U_n** : tension nominale de la ligne (225 kV dans notre cas)

L'application numérique nous donne $\boldsymbol{E_{v.p,p} = 5,13\ m}$

- **Distance verticale entre conducteur et câble de garde**

La distance verticale entre la phase supérieure et le câble de garde doit satisfaire :

$$E_{v.p,cg} \geq 0,678 \times \sqrt{f_{max} \times L_i} \times C \quad (22)$$

Où :

- **Li** : longueur de la chaîne d'isolateurs (m) ;
- **C** : coefficient multiplicateur, pris égal à 0,6 pour les lignes 225 kV entre phase et câble de garde.

On obtient $\boldsymbol{E_{v.p,cg} \geq 1,44\ m}$

- **Distance verticale entre conducteur de phase et terre**

La formule utilisée est :

$$E_{v.p,T} = \frac{U_n}{150} \quad (23)$$

Pour une tension nominale de **225 kV**, la distance minimale phase–terre est donc :

$$E_{v\text{-}p,T} = 1,5\ \text{m}$$

- **Distance horizontale entre câble de garde et conducteur de phase/ entre câble de garde**

La distance horizontale minimale entre phase et câble de garde ou entre deux câbles de garde doit satisfaire :

$$\boldsymbol{d_{h\text{-}p,\,CG,CG} \;\geq\; E_{v\text{-}p,p} \times 0,8 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \qquad (24)$$

Avec :

- **β** : angle de déflexion du pylône (°), **80°** pour les pylônes d'angle dans ce projet ,**0°** pour les pylônes de suspension ou d'ancrage.

L'application numérique nous donne $\boldsymbol{d_{h\text{-}p,\,CG,CG} \geq 5,13\ m}$

NB : Afin de garantir une compatibilité avec l'un ou l'autre de ces câbles de garde, la distance horizontale retenue doit être au moins égale à la valeur la plus défavorable, c'est-à-dire correspondant au câble ayant le plus grand diamètre.

- **Hauteur minimale des conducteurs**

Elle est déterminée via la formule :

$$\boldsymbol{H_{min} = f_{max} + G_{sol} + majoration} \qquad (25)$$

Avec :

- $\boldsymbol{H_{min}}$ **:** hauteur sous console [m]
- $\boldsymbol{G_{sol}}$ **:** Garde au sol, égale à 7,5 m
- $\boldsymbol{majoration}$: pour une tension supérieure à 50 kV **; m=** $\frac{U-50}{100}$ **= 1,75**

D'où, $\boldsymbol{H_{min}}$ **= 15,75 m**

- **Profondeur d'enfouissement**

On a :

$$\boldsymbol{P_{enf} = \frac{H_{min}}{10} + 1} \qquad (26)$$

L'application numérique nous donne : $\boldsymbol{P_{enf} = 2,58\ m}$

VI.4.12 EVALUATION DE L'EFFET COURONNE

L'effet couronne est un phénomène électrique qui apparaît lorsque le champ électrique autour d'un conducteur dépasse un seuil critique, entraînant l'ionisation de l'air. Ce phénomène est généralement observé sur les lignes à très haute tension et se traduit par :

- Des pertes d'énergie par décharges
- Un bruit audible (crépitements)
- L'émission d'ondes radioélectriques
- Une possible dégradation des conducteurs à long terme

Dans le cadre des lignes haute tension 225 kV, l'étude du champ électrique autour des conducteurs permet de vérifier que celui-ci reste inférieur au champ disruptif de couronne, garantissant ainsi des pertes négligeables et une exploitation conforme aux normes.

- **Champ électrique maximal au voisinage du conducteur**

Le champ électrique maximal apparaît à la surface du conducteur. Il peut être estimé par la formule dérivée de la méthode de l'image, intégrant l'effet du sol :

$$E_{max} = \frac{\mathbf{V_{eff}}}{\mathbf{r}.\ln \frac{2 \times \mathbf{H_{min}} \times \mathbf{E_{v,p.p}}}{\mathbf{r} \times \sqrt{4 \times \mathbf{H_{min}^2} + \mathbf{E_{v,p.p}^2}}}} \quad (27)$$

S'il reste bien inférieur à 18 kVeff/cm, alors nous pouvons considérer son effet comme négligeable. (Al-Aziz, 2021)

Avec :

- $\mathbf{V_{eff}}$: tension efficace phase–terre (kV)
- $\boldsymbol{r}$: rayon extérieur du conducteur (m)
- $\boldsymbol{H_{min}}$**:** hauteur minimale du conducteur au-dessus du sol (m)
- $\mathbf{E_{v,p.p}}$: écartement entre phases (m)

On obtient une valeur de l'ordre de 7 kVeff/cm, d'où son effet est négligeable en condition normale.

VI.4.13 ETUDE MECANIQUE RELATIVE AUX PYLONES

Cette section présente l'évaluation des charges appliquées aux pylônes et propose un gabarit structurel adapté à la ligne 225 kV Yopougon 3 – Songon. L'objectif est d'établir les efforts normatifs (vertical, transversal, longitudinal).

VI.4.13.1 PORTEE RETENUE ET CHOIX DU TYPE DE PYLONE

- **Portée retenue**

Bien que les conducteurs du type Aster 570 (et les câbles de garde Phlox/Thym) puissent théoriquement supporter des portées très longues (jusqu'à 700 m selon le pylône), et pour des raisons de tenue mécanique et de coût, notre présente étude retient une portée moyenne de 450 m pour le calcul des charges et la répartition des supports sur le tracé.

- **Choix du type de pylône**

Après inventaire des pratiques courantes sur le réseau HTB ivoirien et en conformité avec le DAO, les types de pylônes envisagés pour cette ligne sont :

- Pylônes en treillis biternes (double terne) : choisis comme solution prioritaire pour les lignes HTB 225 kV en zone périurbaine et longues portées (bonne résistance, faible prise au vent, coût maîtrisé)
- Pylônes chat, convient aussi aux terrains très accidentés. Facilité d'assemblage
- Pylônes monopode (muguet), plus adapté pour les milieux urbains

Notre choix définitif se tournera vers les pylônes de type treillis six triangles, du fait de leur avantages cités ci-dessus.

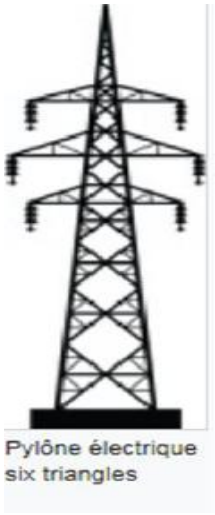


Figure 15: Pylône treillis 6 triangles *source « cours présentation ingénierie des réseaux, Ing. Ulrich PODA »* **(PODA, s.d.)**

VI.4.13.2 REPARTITION DES SUPPORTS SUR LE TRACE

- **Caractéristiques linéaires et distribution des supports**

En considérant une portée moyenne de 450 m, le tracé se constitue de 7 cantons pour un total de 44 supports dont 35 de type A, 6 de type B et 1 de type C, répartis selon les typologies suivantes *(avec* ***β****, l'angle de déflexion)* :

Tableau 15: Répartition des pylônes sur le tracé

Canton	Pylône début	Pylône fin	Nombre de portées	Longueur du canton (m)	Type de pylône (A) 0°≤β≤2°	Type de pylône (B) 0°≤β≤30°	Type de pylône (C) 30°≤β≤70°
1	P1	P4	3	943,64	2	1	0
2	P4	P6	2	513,99	1	1	0
3	P6	P13	7	3 108,41	6	1	0
4	P13	P18	5	2 309,85	4	1	0
5	P18	P24	6	2 771,39	5	1	0
6	P24	P28	4	1 605,63	2	2	0
7	P28	P44	16	7 097,49	14	1	1

La répartition des pylônes et des cantons sur tous le long du tracé est représenté à la figure **ci-dessous.** Les coordonnées plus en détail de chaque pylône sont consultables à l'**Annexe 17.**

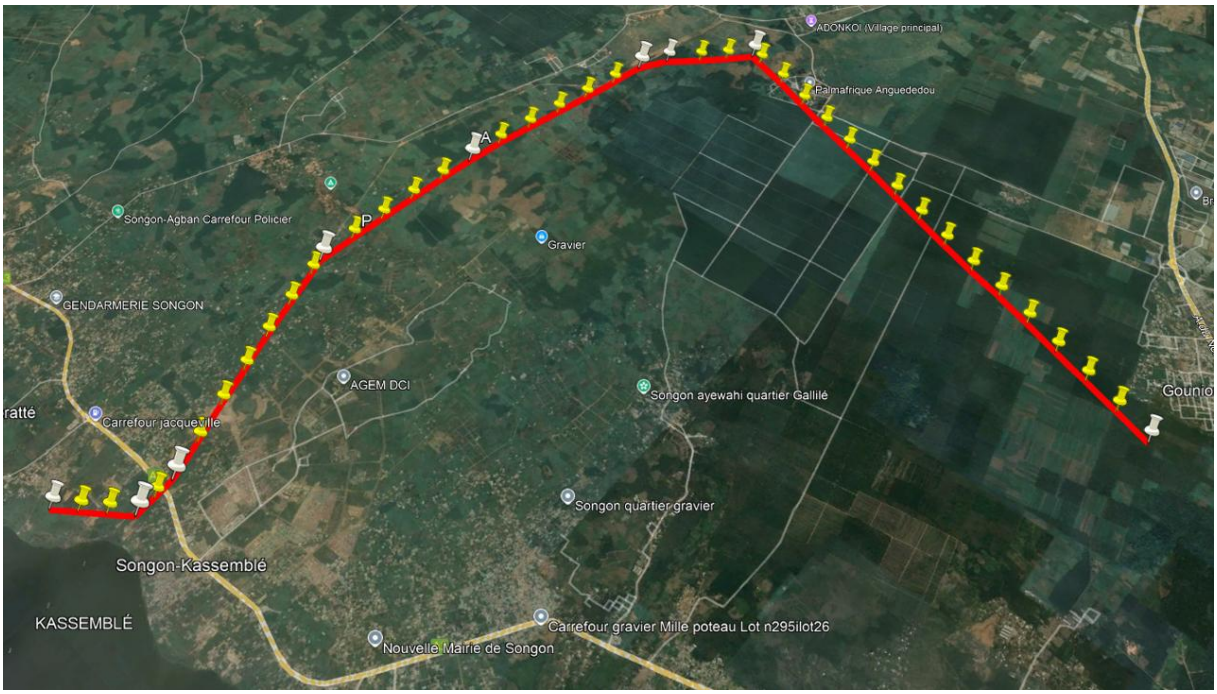


Figure 16: Répartition des pylônes sur le tracé et vue sur les cantons

VI.4.13.3 DETERMINATIONS DES DIFFERENTES EFFORTS APPLIQUES AU PYLONE

- **Charges verticales sur les pylônes d'alignement et d'arrêt**

Ce sont les charges verticales transférées au niveau des pylônes d'arrêts et d'alignement (type B). Elles prennent en compte le poids propre des conducteurs, des isolateurs, et la composante verticale des tensions lorsque la topographie l'exige. La relation utilisée est (BSI, 2013):

$$V_B = m \times \omega \times \frac{a_1 + a_2}{2} + T\left(\frac{Z}{a_1} + \frac{Z}{a_1}\right) + p_I \quad (28)$$

Avec :

- **m** : coefficient de surcharge, pris égal à 1 pour les pays subsahariens
- **ω** : le poids linéique du câble [daN/m]
- **T** : tension horizontale appliquée aux câbles
- a_1 et a_2 : les portées adjacentes (de gauche et de droite) du pylône dont on veut calculer la charge verticale [m]
- **Z** : élévation. Z est positif si le pylône en question est à un niveau d'élévation supérieur de ceux des portées adjacentes, négatif dans le cas contraire. Z est nul si le terrain est plat [m]
- P_i : poids de la chaîne d'isolateurs [kg]

Les résultats des charges verticales sont à consulter à **l'Annexe 20**

Charges horizontales transversales

Ce sont les charges exercées par le vent sur la ligne et transférées sur les pylônes d'alignement et d'angle. Les formules utilisées pour leur calcul sont :

- **Pour les pylônes d'alignement :**

$$H_V = F_V \times \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (29)$$

- **Pour les pylônes d'angle :**

$$H_a = 2T \times \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (30)$$

- **Pour les pylônes d'alignement et d'angle :**

$$H_T = F_V \times \frac{(a_1 + a_2)}{2} + 2T \times \sin(\frac{\beta}{2}) \quad (31)$$

Les résultats de calcul des charges horizontales transversales sont répertoriés à l'**Annexe 21.**

- **Charges longitudinales**

Ce sont des charges qui sont principalement causées par effet thermique ou variations des efforts de tensions causées par les surcharges dans les câbles. Elles sont calculées pour les pylônes d'arrêt. La relation utilisée pour le calcul est :

$$L = 2T \times \sin(\frac{\beta}{2}) \quad (32)$$

Avec en récapitulatif :

- H_V **:** Charge horizontale pour pylône d'alignement ;
- H_a **:** Charge horizontale pour pylône d'angle ou d'ancrage ;
- H_T **:** Charge horizontale totale ;
- L : Charge longitudinale pour pylône d'arrêt.

Les résultats de calcul des charges longitudinales sont à consulter à l'**Annexe 22**

VI.4.14 SYNTHESE DE L'ETUDE MECANIQUE

L'étude mécanique de la ligne a permis de vérifier la capacité des conducteurs, des câbles de garde et des pylônes à résister aux sollicitations mécaniques et climatiques les plus défavorables de la zone d'étude. Les calculs réalisés ont montré que les tensions dans les conducteurs restent inférieures aux limites admissibles pour l'ensemble des hypothèses considérées, garantissant ainsi la sécurité mécanique de l'ouvrage. Les flèches maximales obtenues respectent les distances réglementaires vis-à-vis du sol, des ouvrages et entre conducteurs, assurant la conformité aux exigences de sécurité électrique et mécanique. Les charges verticales, transversales et longitudinales transmises aux pylônes ont été évaluées et confirment l'adéquation du type de pylône retenu et de la portée moyenne adoptée. Ainsi, le dimensionnement mécanique réalisé valide la faisabilité et la robustesse de la ligne 225 kV projetée, et constitue une base fiable pour les phases ultérieures de conception détaillée et de réalisation de l'ouvrage.

VI.5 ESTIMATION FINANCIERE DU PROJET

Le choix du tracé définitif ayant été arrêté au terme de l'analyse comparative des variantes, la suite de l'étude porte sur l'évaluation financière de la solution retenue. L'estimation financière développée dans le présent chapitre s'appuie sur une structuration par postes de coûts directement issue du devis EPC de référence à l'**Annexe 18**. À ce titre, un ratio de référence de l'ordre de 100 millions FCFA par kilomètre, couramment observé pour des projets similaires de lignes HTB 225 kV en Côte d'Ivoire, a été utilisé comme valeur indicative initiale. Ce ratio constitue une moyenne globale intégrant différents contextes de tracé (milieux urbains, périurbains et ruraux).

Tableau 16: Estimation financière du projet

N°	Postes de coûts	Coût total (FCFA)
1	Conducteurs de phase (Aster 570)	642 600 000
2	Câbles de garde (Phlox / Thym)	183 600 000
3	Isolateurs et accessoires de ligne	146 880 000
4	Tirage, déroulage et réglage des conducteurs	275 400 000
5	Fourniture et montage des pylônes	528 000 000
6	Mis à la terre	765 000 000
7	Fondations des pylônes	264 000 000
8	Accès chantier et pistes temporaires	150 000 000
9	Logistique, sécurité et supervision	120 000 000
10	Autres accessoires	12 162 800
Coût total		**3 087 642 800**

L'estimation obtenue conduit à un coût unitaire moyen d'environ 168 millions FCFA par kilomètre, supérieur au ratio de référence. Cet écart s'explique principalement par la prise en compte explicite de postes de coûts souvent lissés ou sous-estimés dans les ratios globaux, notamment :

- La mise à la terre, particulièrement dimensionnante pour une ligne HTB 225 kV,
- Les fondations de pylônes, impactées par la géométrie du tracé et la présence de pylônes d'angle,
- Les accès chantier et pistes temporaires, rendus nécessaires par le contexte périurbain et urbanisé de certaines zones traversées,
- La logistique, la sécurité et la supervision, accrues en environnement contraint

Nota : Les coûts liés aux études environnementales et sociales (EIES, PAR), aux indemnisations foncières, aux postes électriques, ainsi qu'aux taxes ne sont pas inclus dans la présente estimation, conformément au périmètre de l'étude centré sur la ligne de transport.

VII. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DU PROJET

VII.1 OBJECTIF ET PORTEE

La description de l'état initial de l'environnement (milieux physique, biologique et humain) a été réalisée de manière approfondie lors de la phase APS, à travers l'analyse des enjeux environnementaux et sociaux ayant conduit à la définition du fuseau de moindre impact.

Cette analyse a permis d'orienter le choix du fuseau et du tracé retenu, en intégrant dès l'amont les contraintes environnementales, foncières et sociales du projet.

En conséquence, la présente partie ne reprend pas de manière détaillée l'état initial déjà établi, mais s'appuie sur ces résultats pour analyser spécifiquement les impacts potentiels liés au tracé retenu et proposer des mesures de prévention, de réduction et, le cas échéant, de compensation.

VII.2 CADRE JURIDIQUE ET CLASSIFICATION DU PROJET

Le projet de ligne électrique 225 kV relève de la catégorie des projets de grande infrastructure de transport d'énergie (catégorie A), selon la Loi n° 2023-900 portant Code de l'environnement, et doit ainsi faire l'objet d'une Étude d'Impact Environnementale et Sociale (EIES) conformément aux décrets d'application n°96-894 du 8 novembre 1996.

Les dispositions spécifiques suivantes s'appliquent directement au projet :

- Loi n° 2023-900 (Code de l'environnement) : obligations de réalisation d'une étude d'impact, consultation publique, et mesures de prévention et compensation environnementales.
- Loi n° 2023-902 (Code de l'eau) : encadre la protection des ressources hydriques lors des travaux de terrassement et des traversées de cours d'eau.
- Loi n° 2019-868 relative au foncier rural : encadrement des acquisitions foncières, compensations et droits des propriétaires.
- Décret n° 96-894 : procédure et méthodologie de l'étude d'impact, exigences de suivi et contrôle.

Ainsi, chaque mesure environnementale ou sociale proposée dans ce mémoire se réfère explicitement à la loi correspondante pour garantir la conformité réglementaire du projet.

VII.2.1 CADRE INSTITUTIONNEL

Au niveau institutionnel, la mise en œuvre du projet impliquera plusieurs structures nationales publiques et privées et leurs antennes qui constituent les parties prenantes du projet.

Les principales structures liées au projet sont les suivantes :

- Le Ministère des Mines, du Pétrole et de l'Energie, maître d'ouvrage, et CI-ENERGIES, sous sa supervision, est le maître d'œuvre délégué
- Le ministère d'État, ministre de l'agriculture et du développement rural
- Le ministère de l'Environnement, du Développement durable et de la Transition écologique, est impliqué dans le projet par l'intermédiaire du CIAPOL et de l'ANDE pour le suivi des aspects environnementaux
- Le ministère de la santé, de l'hygiène publique et de la couverture sanitaire universelle
- Le ministère de l'emploi et de la protection sociale
- Le ministère de la construction, du logement et du développement urbain
- Le ministère des eaux et forêts
- Le ministère des transports
- Le bureau d'étude ou de maîtrise d'œuvre des travaux
- L'entreprise chargée des travaux

VII.3 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX

Les principaux enjeux environnementaux et sociaux du projet sont :

- La contribution au renforcement de l'alimentation en électricité
- Les retombées économiques et sociales
- Le respect des us et coutumes
- La mauvaise gestion des déchets
- Les pertes de cultures maraichères, des cultures pérennes, des lots et de bâtis

VII.3.1 IMPACTS POSITIFS

- L'amélioration des conditions économiques par la création d'emplois
- L'amélioration de la qualité de l'énergie dans la zone desservie
- L'avantage économique pour le secteur électrique
- L'amélioration de la desserte nationale en énergie électrique
- L'augmentation des gains économiques
- L'optimisation de la coordination entre la production et la consommation d'électricité

VII.3.2 IMPACTS NEGATIFS

- Impact négatif sur le milieu biophysique, risque de pollution du sol, des eaux de surfaces et souterraines par le déversement accidentel d'hydrocarbures, etc.
- La pollution de l'air par les NOX, la poussière, les COV
- La destruction de la flore terrestre (CNRA)
- La perturbation du cadre de vie faunique
- La destruction d'habitat faunique
- La destruction de la faune aviaire (oiseaux)
- La destruction de la communautés avifaune (oiseaux)

VII.3.2.1 IMPACTS NEGATIFS SUR LE MILIEU HUMAIN

- La destruction des cultures saisonnières et pérennes, des lots et des habitations
- La restriction d'usage de terres culturales
- Les risques d'accident de travail (chute, etc.)
- La dégradation du cadre de vie (production de déchets, émission de bruit, émission de
- Vibrations, risque d'incendie, explosion, risques sanitaires

Les impacts du projet en phase de pré-construction sont répertoriés à l'**Annexe 23**

VII.4 MESURES D'ATTENUATION

Les mesures adoptées sont consultables à l'**Annexe 24**

VII.5 SYNTHESE DES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

L'analyse des impacts environnementaux et sociaux du projet met en évidence une prédominance d'impacts positifs. Les impacts négatifs identifiés demeurent essentiellement localisés, temporaires et maîtrisables, et concernent le milieu biophysique et le milieu humain. La mise en œuvre rigoureuse des mesures d'atténuation proposées permettra de limiter ces effets et de garantir la compatibilité du projet avec les exigences environnementales et sociales en vigueur.

VIII. CONCLUSION

Le présent mémoire avait pour objectif de réaliser une étude APS/APD du tracé et du dimensionnement électrique et mécanique de la ligne aérienne HTB 225 kV reliant les postes de Yopougon 3 et de Songon, dans un contexte de renforcement et de sécurisation du réseau de transport d'électricité en Côte d'Ivoire. Cette étude s'inscrit dans la dynamique nationale visant à améliorer la fiabilité de l'alimentation électrique et à accompagner la croissance continue de la demande en énergie.

La démarche adoptée a permis, dans un premier temps, de conduire une étude de tracé rigoureuse, intégrant les contraintes physiques, environnementales et humaines, afin d'identifier les fuseaux de moindre impact et de retenir un tracé techniquement et environnementalement optimal. Cette approche progressive a contribué à la limitation des emprises nouvelles et à la réduction des impacts fonciers et environnementaux. Sur la base du tracé retenu, le dimensionnement électrique de la ligne a été réalisé en tenant compte des besoins actuels et futurs du réseau. Le choix du conducteur Aster 570 et des câbles de garde associés a été justifié par la vérification des critères électriques réglementaires, notamment le courant admissible, le courant de court-circuit et la chute de tension. L'analyse électrique réalisée à l'aide du logiciel DIgSILENT PowerFactory a confirmé la conformité du comportement de la ligne en régime normal d'exploitation. Le dimensionnement mécanique a ensuite permis de vérifier la tenue de l'ouvrage face aux sollicitations climatiques et mécaniques, en considérant les portées, les flèches, les distances de sécurité et les efforts transmis aux pylônes. Les hypothèses climatiques retenues, adaptées au contexte local, ont conduit à des résultats satisfaisants garantissant la sécurité et la durabilité de la ligne. Une répartition cohérente des supports et un type de pylône approprié ont ainsi été proposés. Par ailleurs, une estimation financière détaillée a permis d'évaluer le coût global du projet à un niveau compatible avec les ordres de grandeur observés pour des projets similaires de lignes HTB 225 kV en Côte d'Ivoire. Enfin, l'analyse environnementale et sociale, conduite sous la forme d'une Notice d'Impact Environnemental et Social, a montré que les impacts négatifs du projet restent localisés et maîtrisables, tandis que les bénéfices socio-économiques liés au renforcement de l'alimentation électrique sont significatifs. En conclusion, cette étude met en évidence la faisabilité technique, économique et environnementale du projet de ligne 225 kV Yopougon 3 – Songon. Elle constitue une base technique solide pour la poursuite du projet vers les phases ultérieures, notamment la réalisation de l'EIES complète et les études d'exécution.

IX. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achuo, P.C.A. epse *et al.* (2024) « Contribution à la caractérisation lithostratigraphique, granulométrique et morphoscopique des sédiments du Continental Terminal de la région du Sud-Comoé (Côte d'Ivoire) à partir de données de forage et de diagraphie », *ESI Preprints (European Scientific Journal, ESJ)*, 31, p. 414-414.

Al-Aziz, T. (2021) « DIMENSIONNEMENT ELECTRIQUE ET MECANIQUE D'UNE LIGNE AERIENNE 225 kV : CAS DE LA LIGNE ZINIARE-KAYA », p. 55-58.

BEHIBRO, J.E.Y. (2023) « Dimensionnement électrique et mécanique de la ligne haute tension (HTB) 225 kV reliant les postes de'ANANI 1 à GRAND-BASSAM 2 en passant par le futur poste d'ANANI 2 », p. 39-43.

Bonnaud, S. *et al.* (2024) « 3.2. Le vent », *Hors collection*, p. 128-137.

BSI (2013) *Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV General requirements. Common specifications*. Under Review.

CARRIVE, P. (1991) « Réseaux de distribution - Structure et planification ». Disponible sur: https://doi.org/10.51257/a-v1-d4210.

Chanal, A. et Lévêque, J.-P. (2003) « Lignes aériennes : matériels. - Conducteurs et câbles de garde », *Réseaux électriques et applications* [Preprint]. Disponible sur: https://doi.org/10.51257/a-v2-d4422.

Didierlaurent, J.-F. (2005) « Lignes aériennes : matériels - Supports », *Réseaux électriques et applications* [Preprint]. Disponible sur: https://doi.org/10.51257/a-v3-d4424.

Ducouret, X. (2004) « Lignes aériennes : matériels - Isolateurs », *Réseaux électriques et applications* [Preprint]. Disponible sur: https://doi.org/10.51257/a-v1-d4423.

JICA (2019) « Diagnostic du secteur de l'énergie en Côte d'Ivoire ». Asia Egineering Consultant Co. Ltd. Disponible sur: https://openjicareport.jica.go.j/pdf/12333902.pdf?utm (Consulté le: 18 décembre 2025).

MERKEL, A. (2016) *Climat du Plateau: température moyenne par mois, température de l'eau de Le Plateau.*, *Climate Data*. Disponible sur: https://fr.climate-data.org/afrique/cote-d-ivoire/abidjan/le-plateau-883883/ (Consulté le: 4 février 2026).

Mott MacDonald & IET (2025) *A comparison of electricity transmission technologies: Costs and characteristics*. Disponible sur: https://www.theiet.org/impact-society/sustainability-and-climate-change/iet-electricity-transmission-technologies-report (Consulté le: 9 février 2026).

Naud, D. (2004) « Lignes aériennes : matériels - Fondations des supports », *Réseaux électriques et applications* [Preprint]. Disponible sur: https://doi.org/10.51257/a-v1-d4425.

PODA, U.G. (s.d.) « Présentation Ingénierie des réseaux électriques ».

Roose, E. *et al.* (1966) « Les sols du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire », *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie*, 4(2). Disponible sur: https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:18307 (Consulté le: 4 février 2026).

RTE (2019) « Cahier des Charges Générales Ligne aérienne HTB ». Disponible sur: https://www.cre.fr/fileadmin/Documents/Deliberations/import/CCG-LA_2019.pdf (Consulté le: 18 décembre 2025).

The World Bank (2022) « Côte d'Ivoire background notes : Country climate and development report ». WBG. Disponible sur: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099112223090537113/pdf/P17953304fb0f70f10a64e0ec2e678e931f.pdf (Consulté le: 24 novembre 2025).

UN DESA (2006) « Technical Aspects of Grid Interconnection », in *Multi-Dimensional Issues in International Electric Power Grid Interconnections*. New-York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs. Disponible sur: https://energypedia.info/wiki/Technical_Aspects_of_Grid_Interconnection?utm (Consulté le: 30 octobre 2025).

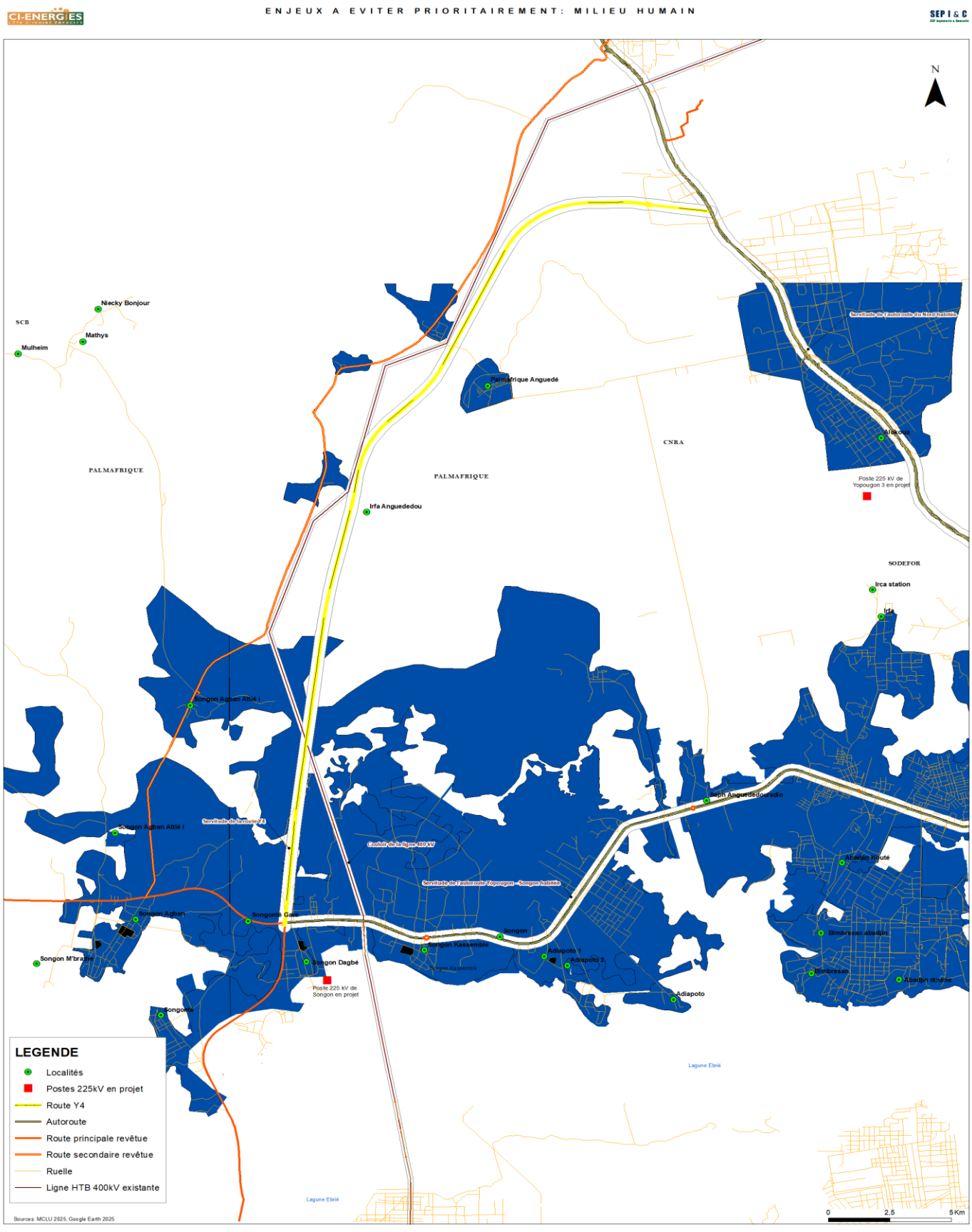
Université de Liège (s.d.) « Calcul d'une ligne aérienne ». TDEE. Disponible sur: https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/liaison_aerienne.pdf (Consulté le: 24 novembre 2025).

Zouzou, A. et Kanoune, M.Y. (2017) *Analyse par simulation des courants de court-circuit survenant dans les réseaux électriques*. Thesis. Disponible sur: http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/15241 (Consulté le: 30 octobre 2025).

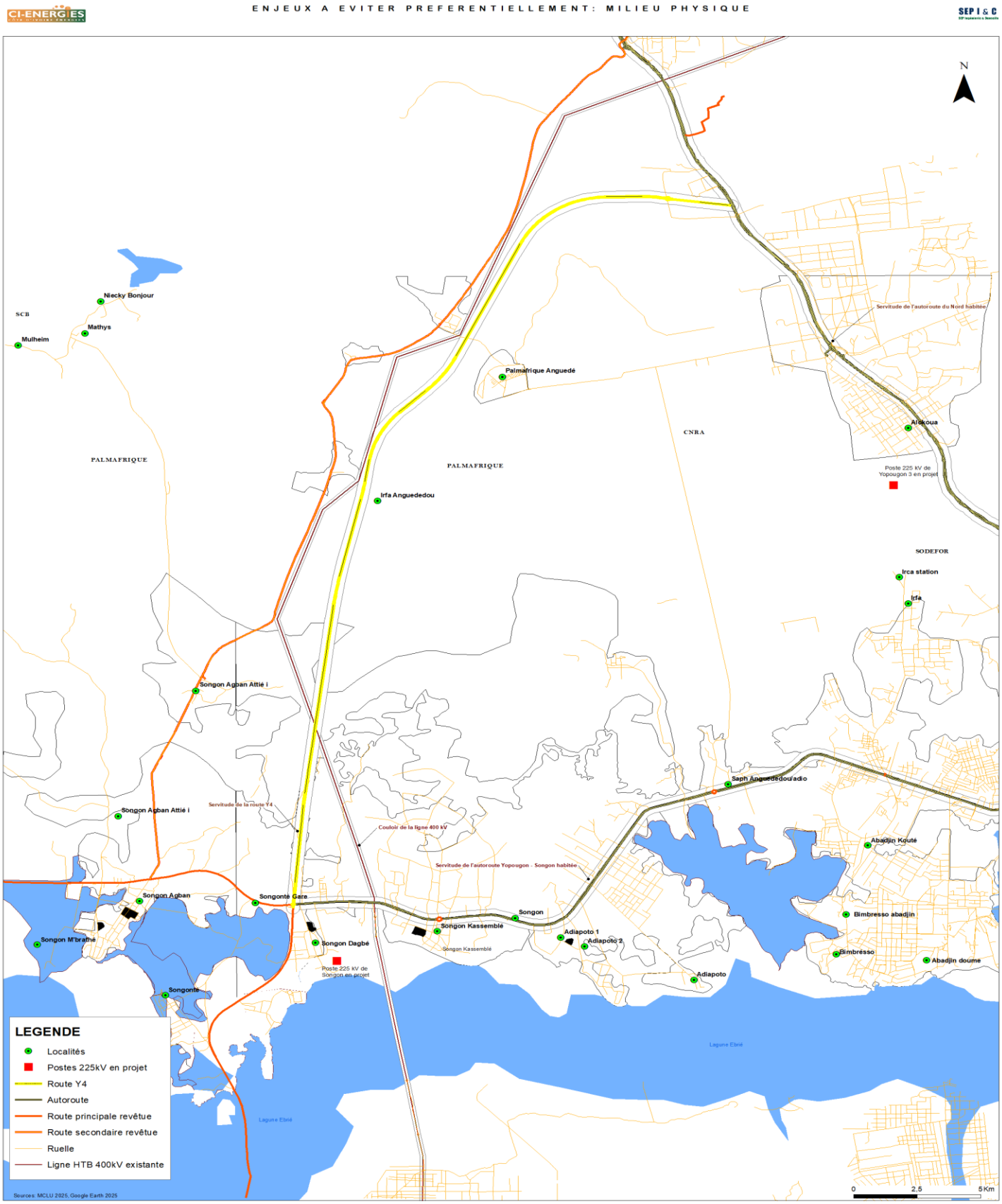
X. ANNEXES

Annexe 1: Enjeux à éviter prioritairement : Milieu Humain II
Annexe 2: Enjeux à éviter préférentiellement : Milieu Physique III
Annexe 3: Enjeux à éviter préférentiellement : Milieu Naturel IV
Annexe 4 : Enjeux à éviter préférentiellement : Milieu Humain V
Annexe 5 : Hypothèse des fuseaux dans le plan de lotissemen VI
Annexe 6: Avantages et inconvénients des hypothèses de fuseau..... VII
Annexe 7: Illustration des propositions des tracés 4 et 5 dans le fuseau 2 IX
Annexe 8: Conducteurs utilisés pour les lignes HTB suivant les zones de givre X
Annexe 9: Caractéristiques des câbles homogènes en alliage d'aluminium les plus utilisés X
Annexe 10: caractéristique des câbles de garde XI
Annexe 11: Tension maximale de tenue aux chocs de foudre en fonction de la tension la plus élevée du matériel..... XI
Annexe 12: Résultats du flux de puissance de la modélisation du réseau XII
Annexe 13: Caractéristiques des assiettes standard XIII
Annexe 14: BIL vs Nombre d'assiettes standard..... XIII
Annexe 15: Distance minimales à respecter pour les lignes HTB 225 kV XIII
Annexe 16: Résultats des calculs mécaniques sur les conducteurs par hypothèse XIV
Annexe 17: Répartition des supports sur le tracé XV
Annexe 18: Devis estimatif de construction de la ligne..... XVI
Annexe 19: Profils en long du tracé 4 par canton XVII
Annexe 20:Résultat des charges verticales appliquées aux pylônes d'arrêts et d'alignement XXIV
Annexe 21: Résultat des charges transversale appliquées aux pylônes d'angle et d'alignement XXVII
Annexe 22: Résultat des charges longitudinales appliquées aux pylônes d'arrêts XXX
Annexe 23: Impact du projet en phase de pré-construction XXXV
Annexe 24: Mesures d'atténuations des impacts XXXVIII

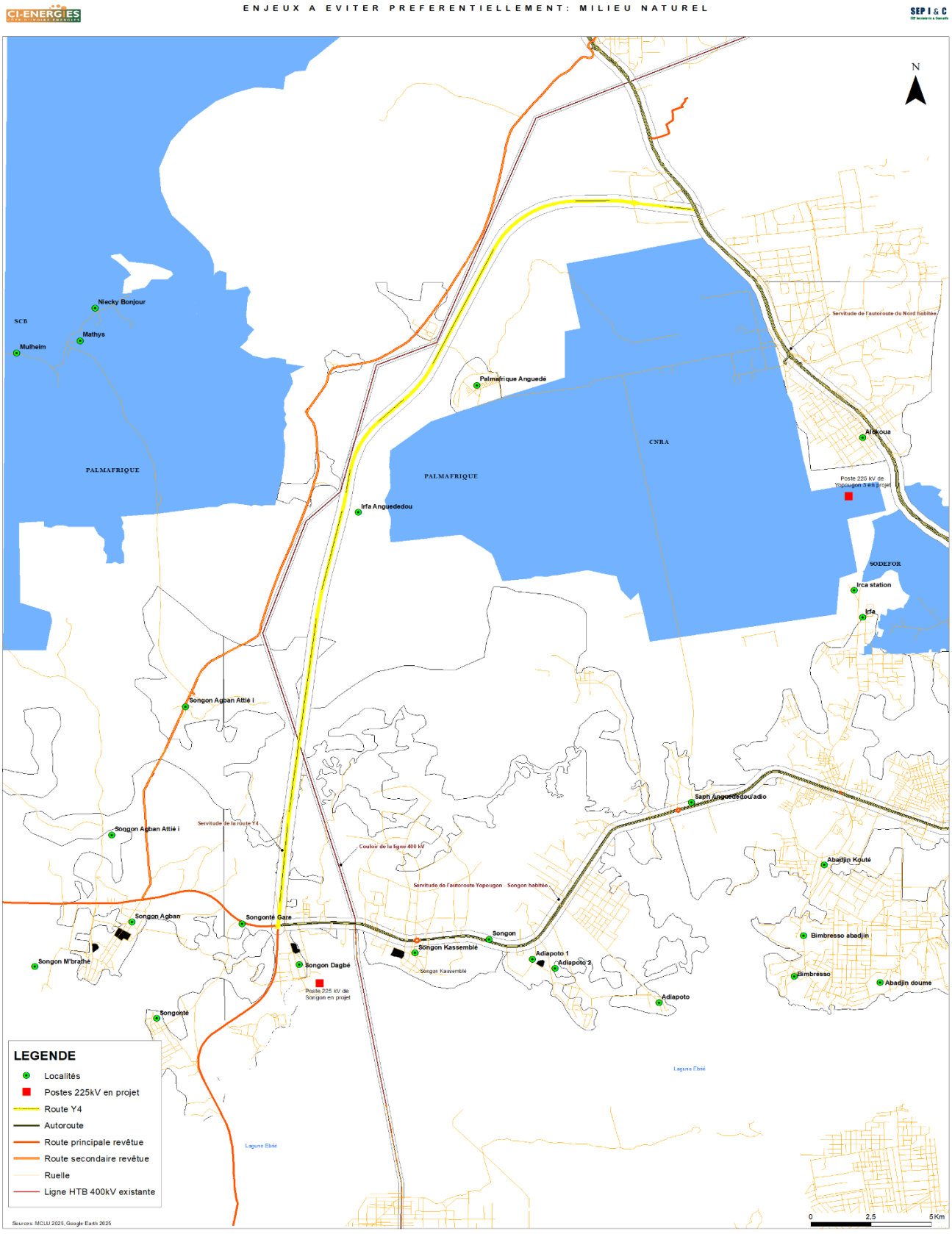
Annexe 1: Enjeux à éviter prioritairement : Milieu Humain



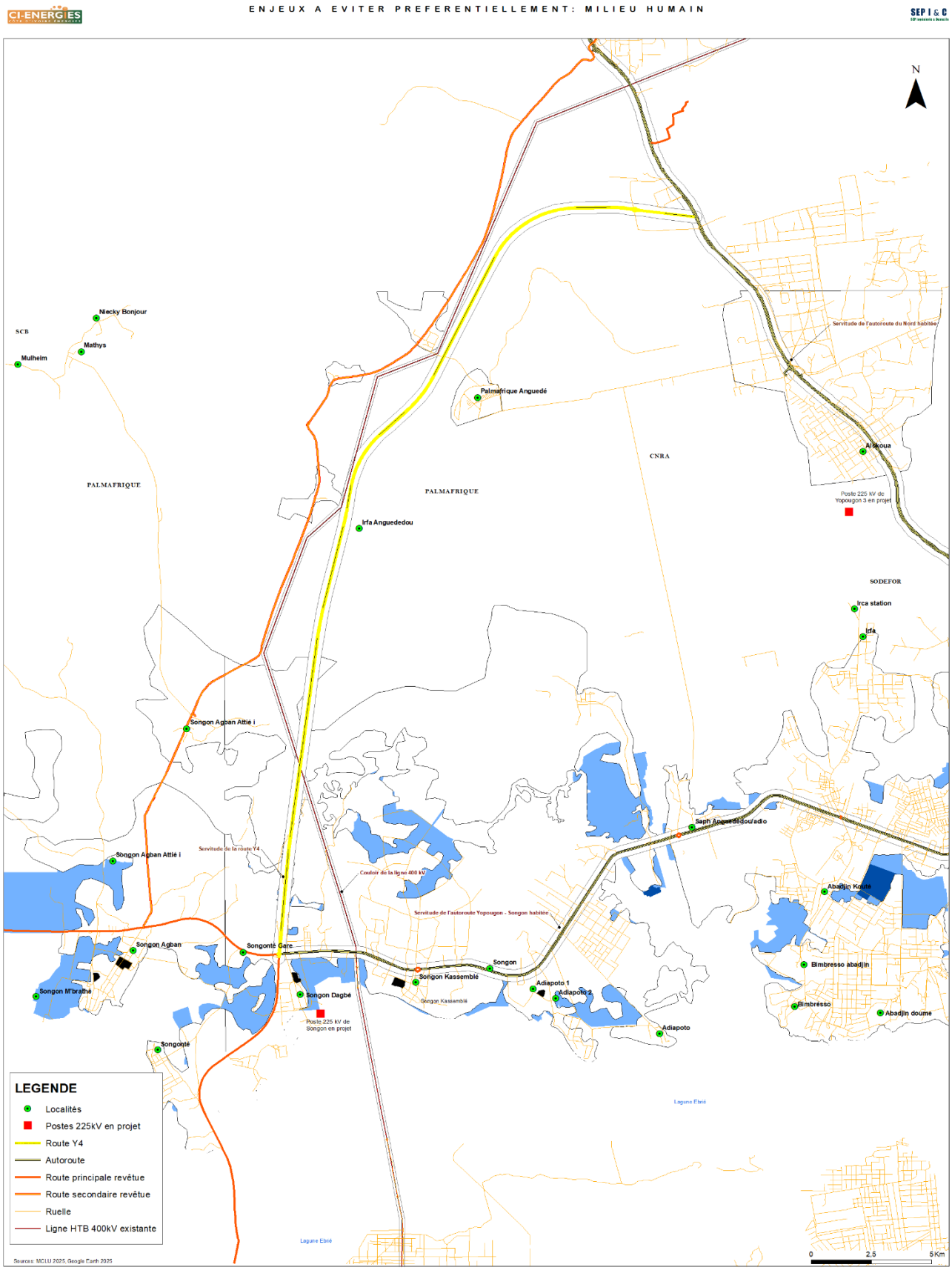
Annexe 2: Enjeux à éviter préférentiellement : Milieu Physique



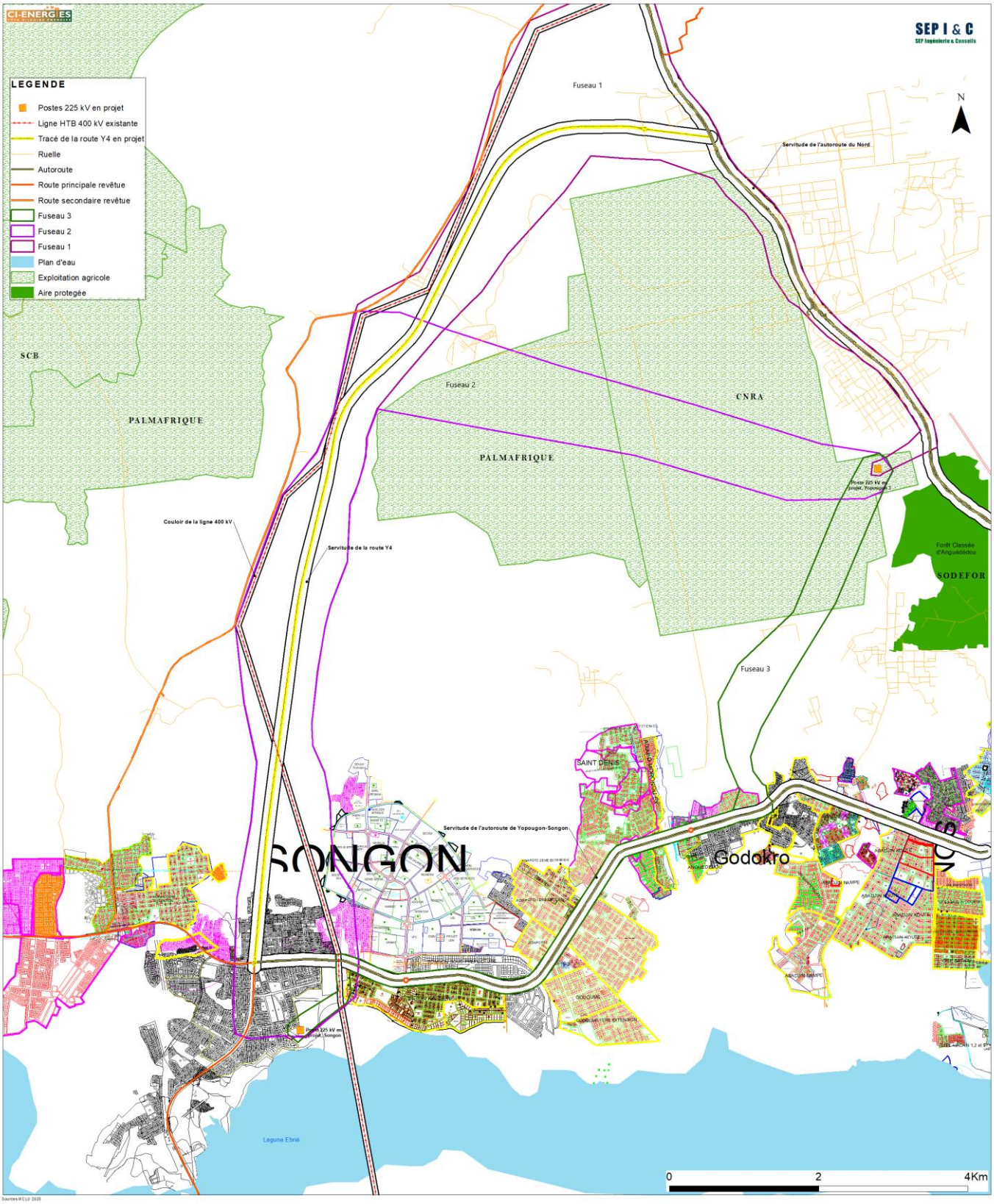
Annexe 3: Enjeux à éviter préférentiellement : Milieu Naturel



Annexe 4 : Enjeux à éviter préférentiellement : Milieu Humain



Annexe 5 : Hypothèse des fuseaux dans le plan de lotissemen



Annexe 6: Avantages et inconvénients des hypothèses de fuseau

Tableau 14 : Avantages et inconvénients de l'hypothèse de fuseau 1

Avantages	Inconvénients
Le fuseau 1 se distingue par une conception qui capitalise sur les infrastructures existantes et limite fortement les impacts fonciers. En s'appuyant d'abord sur la servitude de l'autoroute du Nord, il réduit au minimum la création de nouvelles emprises. Son passage dans le couloir de la ligne 400 kV Akoupé Zeudji – Taboth permet de rationaliser le tracé, en exploitant un corridor déjà technique et en atténuant les contraintes liées à l'occupation des sols. Enfin, son alignement sur la servitude de l'autoroute Y4, reliant l'autoroute du Nord à la route de Dabou, assure une connexion directe et optimisée avec le futur poste 225 kV de Songon. Cette configuration intégrée se traduit par des longueurs de ligne optimisées, une insertion harmonieuse dans le tissu spatial environnant et une réduction notable des impacts fonciers, sociaux et environnementaux.	**Le fuseau 1** traverse une zone fortement occupée, ce qui constitue un facteur limitant majeur. En effet, on y recense environ 152 bâtiments, dont 57 duplex de moyen standing (≥ 200 m²), 95 maisons basses (≥ 150 m²) ainsi qu'un entrepôt de 500 m² implanté dans le couloir de la ligne 400 kV existante. À cela s'ajoutent 22 terrains déjà clôturés et 7 terrains en chantier, traduisant une dynamique urbaine active et donc des contraintes accrues pour le projet. Par ailleurs, près de 20 hectares de lots sont approuvés dans le couloir de 40 m et 35 ha non encore approuvés, accentuant les risques de conflits fonciers, de coûts de compensation élevés et de délais supplémentaires.

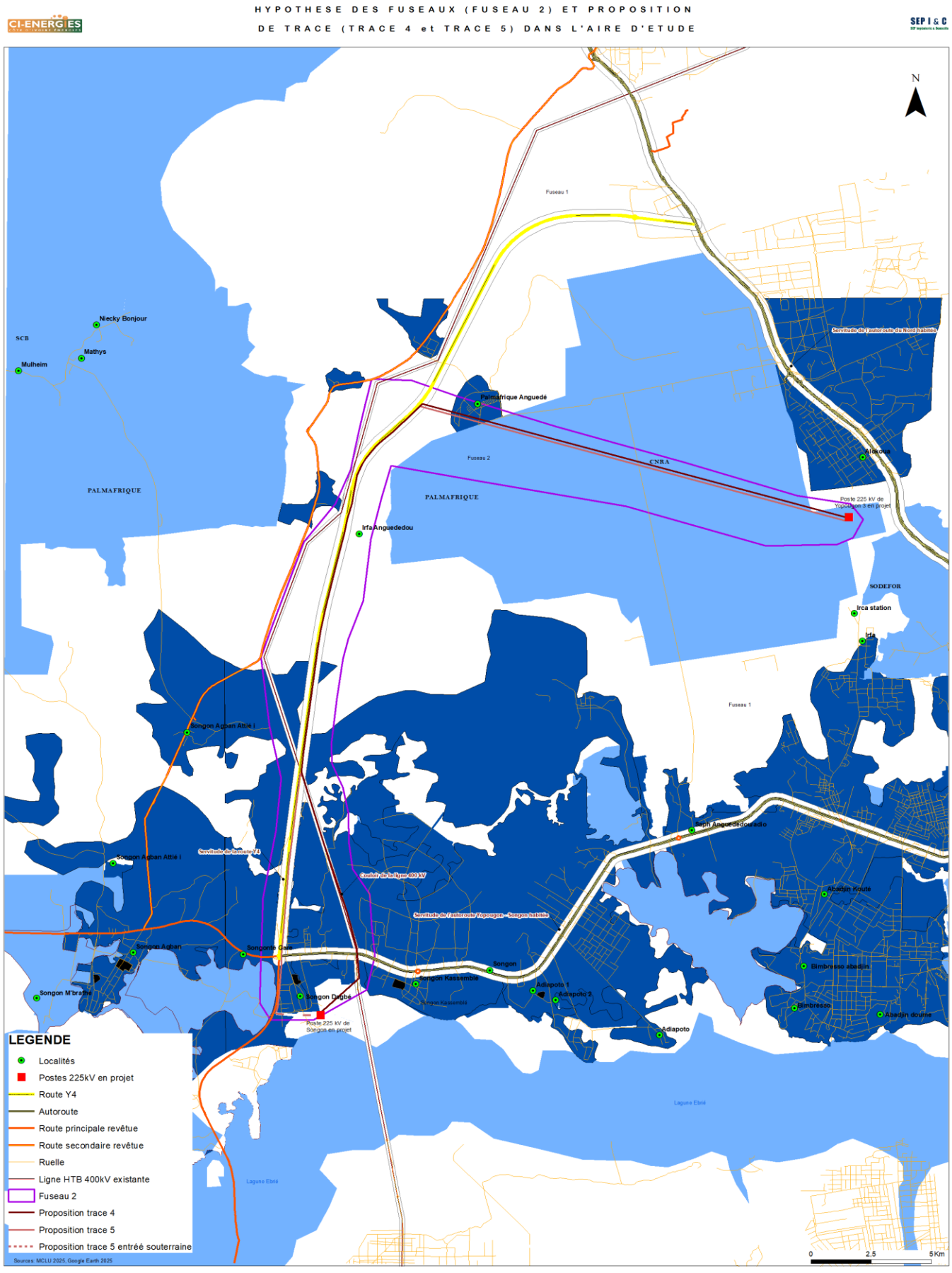
Tableau 15 : Avantages et inconvénients de l'hypothèse de fuseau 2

Avantages	Inconvénients
Le fuseau 2 bénéficie d'un tracé particulièrement optimisé grâce à l'utilisation d'infrastructures et de domaines existants. En s'appuyant d'abord sur le domaine du CNRA, il réduit considérablement les contraintes foncières directes dès son entame. Son passage dans le couloir de la ligne 400 kV Akoupé Zeudji – Taboth rationalise le tracé en exploitant un corridor déjà technique, limitant ainsi l'ouverture de nouvelles emprises. Enfin, son alignement sur la servitude de l'autoroute Y4 assure une connexion fluide et directe avec le futur poste 225 kV de Songon. Cette configuration garantit une continuité de corridor efficace, une réduction significative des coûts liés aux acquisitions foncières et une meilleure maîtrise des impacts sociaux et environnementaux, renforçant ainsi la viabilité et la durabilité du projet.	**Le fuseau 2** traverse une zone déjà partiellement urbanisée à Songon, avec la présence d'environ 40 bâtiments. Cette occupation du sol engendre des contraintes importantes en termes de dégagement de l'emprise. Dans le couloir de 40 m, environ 9 ha approuvés et 14 ha non approuvés. Cette situation accroît les risques de conflits fonciers, entraîne des coûts de compensation potentiellement élevés et peut générer des retards significatifs dans la mise en œuvre du projet.

Tableau 16 : Avantages et inconvénients de l'hypothèse de fuseau 3

Avantages	Inconvénients
Le fuseau 3 présente une configuration particulièrement favorable grâce à l'utilisation d'infrastructures déjà existantes. En s'appuyant sur le domaine du CNRA, il bénéficie d'une assise initiale limitant les contraintes foncières directes. Son passage le long de la servitude de la route Yopougon – Songon assure une continuité de tracé et favorise une intégration harmonieuse dans le tissu spatial environnant. Enfin, son raccordement au futur poste 225 kV de Songon s'effectue de manière fluide et optimisée. Ce positionnement permet de réduire les besoins en nouvelles emprises, de rationaliser le corridor électrique et de maîtriser les impacts fonciers et environnementaux, tout en renforçant la cohérence technique du projet.	**Le fuseau 3** est fortement contraint par la densité de l'occupation urbaine le long de l'autoroute Yopougon – Songon. On y dénombre près de 230 bâtiments de moyen standing (≥ 100 m²) implantés directement dans la servitude de l'autoroute Songon – Dabou, rendant le dégagement de l'emprise particulièrement complexe. Par ailleurs, environ 25,45 hectares de lots déjà approuvés se trouvent dans le couloir de 40 m, accentuant les risques de conflits fonciers, de coûts de compensation élevés et de retards potentiels dans la réalisation du projet.

Annexe 7: Illustration des propositions des tracés 4 et 5 dans le fuseau 2



Annexe 8: Conducteurs utilisés pour les lignes HTB suivant les zones de givre

Tension (kV)	Givre léger	Givre moyen	Givre lourd
63 ou 90	Aster 228 Aster 366 Aster 570	Pastel 288 Pastel 299 Pastel 412 Pétunia 612	Pastel 299 Pastel 412 Pétunia 612
225	Aster 570 2 Aster 570	Pétunia 612 2 Pétunia 612	Pétunia 612 2 Pétunia 612 ou 1 Aster 1 600
400	2 Aster 570 3 Aster 570 4 Aster 570 (1)	2 Pétunia 612 2 Aster 1 144 2 Aster 1 600	2 Pétunia 612 2 Aster 1 600

(1) Par suite des contraintes d'environnement et des difficultés de construction d'ouvrages neufs, les ouvrages à 400 kV sont, le plus souvent, équipés de faisceaux de 4 Aster 570.

Annexe 9: Caractéristiques des câbles homogènes en alliage d'aluminium les plus utilisés

Désignation	Section	Composition		Diamètre extérieur	Charge de rupture assignée	Résistance linéique électrique à 20 °C	Masse linéique sans graisse	Module d'élasticité	Coefficient de dilatation linéaire
		Nombre de fils	Diamètre nominal des fils						
	(mm^2)		(mm)	(mm)	(daN)	(Ω/km)	(kg/km)	(MPa)	($10^{-6}\ K^{-1}$)
Aster 34,4	34,36	7	2,5	7,5	1 175	0,958	94	62 000	23
Aster 54,6	54,55	7	3,15	9,45	1 775	0,603	149	62 000	23
Aster 75,5	75,54	19	2,25	11,25	2 455	0,438	208	60 000	23
Aster 148	148,01	19	3,15	15,75	4 810	0,224	407	60 000	23
Aster 228	227,83	37	2,8	19,6	7 405	0,146	627	57 000	23
Aster 288	288,34	37	3,15	22,05	9 370	0,115	794	57 000	23
Aster 366	366,22	37	3,55	24,85	11 535	0,0905	1 009	57 000	23
Aster 570	570,22	61	3,45	31,05	18 530	0,0583	1 574	54 000	23
Aster 1 144	1 143,51	91	4,0	44	36 020	0,0292	3 164	52 500	23
Aster 1 600	1 595,93	127	4,0	52	50 270	0,0206	4 425	50 500	23

Annexe 10: caractéristique des câbles de garde

Désignations	Phlox 147,1	Thym 157,4	Unités
Résistance linéique en continu à 20 °C	0,467	0,330	Ω/km
Section de l'almélec	71,57	100,9	mm^2
Section de l'acier	75,54	56,5	mm^2
Composition de l'almélec	18 × 2,25	19 × 2,60	mm^2
Composition de l'acier	19 × 2,25	18 × 2,0	mm^2
Diamètre extérieur	15,75	19,2	mm^2
Masse linéique sans graisse	0,790	0,90	kg/m
Charge de rupture assignée	13 280	11 500	daN
Module d'élasticité	124 000	103 000	MPa
Coefficient de dilatation linéaire	14,2	15,8	$10^{-6}. C^{-1}$

Annexe 11: Tension maximale de tenue aux chocs de foudre en fonction de la tension la plus élevée du matériel

	Tension la plus élevée pour le matériel U_M (kV)	Tension nominale de tenue aux chocs de foudre BIL ($kV_{crête}$)
Classe A : 1 ≤ Um ≤ 52	3,6 7,2 12 17,5 24 36	40 60 75 95 125 170
Classe B : 52 ≤ Um ≤ 300	52 72,5 123 145 170 **245**	250 325 450 550 650 **750**

Annexe 12: Résultats du flux de puissance de la modélisation du réseau

Nom	U, JDB 225kV YOP3	U, JDB 225kV SONGON	Charge	Pertes réactives	Chute de tension
Unités	p.u.	p.u.	%	Mvar	%
Ligne 225kV	1	0,989	39,7	2,9	1,1

Nom	Tens. L-L nom.	UI, amplitude	UI, amplitude	U, angle
Unité	kV	kV	p.u.	deg
JDB 225 kV SONGON	225	222,5	0,989	-0,9
JDB 225 kV YOP3	225	225	0	0

Annexe 13: Caractéristiques des assiettes standard

TYPE STANDARD							
Effort en tête [kN]	**70**	100	120	160	210	240	300
Caractéristiques d'une assiette	**F70/127**	F100/127	F120/127	F160/146	F210/170	F240/170	F300/195
Pas [mm]	**127**	127	127	146	170	170	190
Ligne de fuite [mm]	**320**	318	315	380	380	380	485
Masse [kg]	**3,5**	3,7	3,8	6	7,1	7,4	10,9

Annexe 14: BIL vs Nombre d'assiettes standard

Pas [mm]	**127**	**146**	**170**
Nombre d'assiettes	**BIL [kV]**		
2	190	190	205
3	260	270	285
4	320	340	340
5	380	410	440
6	435	480	520
7	490	550	600
8	550	620	675
9	615	690	755
10	675	760	835
11	735	830	915

Annexe 15: Distance minimales à respecter pour les lignes HTB 225 kV

Nature du surplomb	**Distances minimales à respecter [m]**
Distance par rapport au sol	
Terrains ordinaires (non cultivés, présence de personne exceptionnelle)	7
Terrains agricoles et terrains occupés ou utilisés de façons diverses	7,5
Voies de circulation	8,5
Itinéraire pour véhicule de grande hauteur (H=hauteur du véhicule)	H+2,5
Traversée et voisinage de chemins de fer et autres voies rigides pour véhicules guidés	4,5
Voie navigable	10,7
Croisement de ligne de transport (225 kV- 90 kV)	3,5
Croisement de ligne de transport (225 kV- 33 kV)	3,4
Croisement de ligne de transport ou de télécommunication (225 kV- 90 kV)	3,1
Distances horizontales	
Croisement de lignes de communication	20
Chemins agricoles, chemins de terre, routes charretières	20
Distance du conducteur	14
Plans d'eau	65

Annexe 16: Résultats des calculs mécaniques sur les conducteurs par hypothèse

Hypothèse	P [N/m]	q [N/m²]	Fv [N/m]	ϕ [°]	Peqv [N/m]	Pc [m]	Comparaison	a	T [N]	T/Trupture [%]	Fmax [m]
Aster 570											
A	15,90201	0	0	0	15,90201	-		-0,0013411	61851,08	33,37888829	6,507883583
B	15,90201	793,8	24,6078	57,128717	29,2987669	143,244004	Pmoy >Pc	-0,0013158	61810,87	33,35718834	11,99049455
C	15,90201	285,768	8,858808	29,1216248	18,2030877	283,7321656	Pmoy >Pc	-0,0018373	61842,43	33,37422018	7,449597598
D	15,90201	0	0	0	15,90201	-		-0,0013411	61851,08	33,37888829	6,507883583
Thym 157,4											
A	9,29988	0	0	0	9,29988	-		-0,0031919	38333,14	20,68706962	6,140984341
B	9,29988	793,8	15,24096	58,6088794	17,8542608	118,9664309	Pmoy >Pc	-0,0027841	38335,59	20,6883918	11,78969365
C	9,29988	285,768	5,4867456	30,5397658	10,7977843	330,462308	Pmoy >Pc	-0,0035015	37002,019	19,96870966	7,1300946
D	9,29988	0	0	0	9,29988	-		-0,0031919	38333,14	20,68706962	6,140984341
Phlox 147,1											
A	8,22078	0	0	0	8,22078	-		-0,004697	44266,88	23,88930383	4,700771632
B	8,22078	793,8	12,50235	56,6735289	14,9629536	158,7672661	Pmoy >Pc	-0,0048287	44266,67	23,8891905	8,556052789
C	8,22078	285,768	4,500846	28,7005385	9,37223765	441,0201836	Pmoy <Pc	-0,0050173	44266,69	23,8892013	5,359193272
D	8,22078	0	0	0	8,22078	-		-0,004697	44266,88	23,88930383	4,700771632

Annexe 17: Répartition des supports sur le tracé

N°	Pylônes	Coord_X	Coord_Y	Longitude	Latitude	Portée [m]	Portée cumulée [m]
1	Pylône 1	364 093,21	587 362,68	-4,22650147	5,31268311	0,00	0,00
2	Pylône 2	364 348,36	587 546,63	-4,22420249	5,31435141	314,55	314,55
3	Pylône 3	364 603,51	587 730,58	-4,2219035	5,3160197	314,55	629,09
4	Pylône 4	364 858,66	587 914,53	-4,21960449	5,31768799	314,55	943,64
5	Pylône 5	364 842,25	588 171,00	-4,21975708	5,32000732	256,99	1200,63
6	Pylône 6	364 825,85	588 427,47	-4,21990967	5,32232666	256,99	1457,62
7	Pylône 7	364 675,60	588 885,36	-4,22127355	5,32646536	481,91	1939,54
8	Pylône 8	364 527,11	589 343,83	-4,22262163	5,33060925	481,91	2421,45
9	Pylône 9	364 378,15	589 802,13	-4,22397402	5,33475167	481,90	2903,35
10	Pylône 10	364 227,73	590 259,91	-4,22533952	5,33888932	481,86	3385,21
11	Pylône 11	364 091,35	590 722,12	-4,22657849	5,34306729	481,91	3867,12
12	Pylône 12	363 954,67	591 184,24	-4,22782014	5,34724446	481,91	4349,03
13	Pylône 13	363 891,54	591 391,86	-4,22839356	5,34912109	217,00	4566,03
14	Pylône 14	363 947,78	591 864,73	-4,22789462	5,35339901	476,21	5042,24
15	Pylône 15	364 007,30	592 308,49	-4,22736556	5,35741363	447,73	5489,97
16	Pylône 16	364 068,71	592 766,37	-4,22681966	5,36155605	461,98	5951,96
17	Pylône 17	364 130,12	593 224,26	-4,22627376	5,36569846	461,98	6413,94
18	Pylône 18	364 198,14	593 681,16	-4,22566817	5,36983213	461,94	6875,88
19	Pylône 19	364 287,18	594 134,42	-4,22487291	5,37393316	461,91	7337,79
20	Pylône 20	364 396,48	594 583,25	-4,22389469	5,37799461	461,95	7799,75
21	Pylône 21	364 507,32	595 031,74	-4,22290254	5,38205296	461,98	8261,73
22	Pylône 22	364 614,65	595 481,04	-4,2219421	5,38611851	461,93	8723,67
23	Pylône 23	364 724,26	595 929,48	-4,22096099	5,39017644	461,65	9185,31
24	Pylône 24	364 807,85	596 383,81	-4,22021484	5,39428711	461,96	9647,27
25	Pylône 25	365 011,47	596 741,07	-4,21838379	5,39752197	411,21	10058,48
26	Pylône 26	365 334,04	597 056,79	-4,21547844	5,40038336	451,37	10509,85
27	Pylône 27	365 603,81	597 312,11	-4,21304847	5,40269746	371,44	10881,28
28	Pylône 28	365 865,30	597 576,16	-4,21069336	5,40509033	371,62	11252,90
29	Pylône 29	366 020,30	597 532,69	-4,20929377	5,40470003	160,98	11413,88
30	Pylône 30	366 465,57	597 407,84	-4,20527324	5,4035788	462,43	11876,31
31	Pylône 31	366 910,83	597 282,99	-4,20125272	5,40245754	462,43	12338,75
32	Pylône 32	367 356,09	597 158,14	-4,19723221	5,40133624	462,43	12801,18
33	Pylône 33	367 801,35	597 033,29	-4,19321171	5,40021492	462,43	13263,61
34	Pylône 34	368 246,61	596 908,43	-4,18919122	5,39909357	462,43	13726,05
35	Pylône 35	368 691,87	596 783,58	-4,18517073	5,39797219	462,43	14188,48
36	Pylône 36	369 137,13	596 658,73	-4,18115026	5,39685078	462,43	14650,92
37	Pylône 37	369 582,39	596 533,88	-4,1771298	5,39572934	462,43	15113,35
38	Pylône 38	370 027,65	596 409,02	-4,17310934	5,39460787	462,43	15575,78
39	Pylône 39	370 472,91	596 284,17	-4,1690889	5,39348637	462,43	16038,22
40	Pylône 40	370 918,17	596 159,32	-4,16506846	5,39236484	462,43	16500,65
41	Pylône 41	371 363,43	596 034,47	-4,16104804	5,39124328	462,43	16963,08
42	Pylône 42	371 808,69	595 909,62	-4,15702762	5,39012169	462,43	17425,52
43	Pylône 43	372 253,95	595 784,76	-4,15300721	5,38900007	462,43	17887,95
44	Pylône 44	372 699,21	595 659,91	-4,14898682	5,38787842	462,43	18350,39

Annexe 18: Devis estimatif de construction de la ligne

№	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Total (FCFA)
1	Conducteurs de phases Aster 570 mm²	kml	180	3 408 750	613 575 000
2	Câble de garde conventionnel Phlox 147,1	kml	25	4 131 000	103 275 000
3	Câble de garde à fibre optique Thym 157,4	kml	25	4 374 000	109 350 000
Total conducteurs et câbles de garde					**826 200 000**
4	Bloc d'ancrage simple – conducteur de phases	Ens	234	141 614	33 137 600
5	Bloc d'ancrage simple – câble de garde Phlox	Ens	39	94 241	3 675 400
6	Bloc d'ancrage simple – câble de garde Thym	Ens	39	79 900	3 675 400
7	Bloc d'ancrage double – conducteur de phases	Ens	60	201 800	4 843 200
8	Bloc d'ancrage double – câble de garde Phlox	Ens	10	56 000	448 000
9	Bloc d'ancrage double – câble de garde Thym	Ens	10	56 000	448 000
10	Boîte de jonction câbles de garde	Ens	10	115 900	10 894 600
11	Chaîne de suspension – conducteurs de phases	Ens	502	119 700	60 059 400
12	Chaîne de suspension – câble de garde Phlox	Ens	167	79 300	13 243 100
13	Chaîne de suspension – câble de garde Thym	Ens	167	79 300	13 243 100
14	Manchon de raccordement conducteurs	U	135	23 300	3 145 500
Total accessoires et isolateurs					**146 880 000**
15	Pylône d'alignement 0–2° type A	U	39	9 742 051	379 940 000
17	Pylône d'ancrage 0–30° type B	U	4	31 200 000	124 800 000
18	Pylône d'ancrage 30–70° type C	U	2	11 630 000	23 260 000
Total pylônes et embases					**528 000 000**
19	Bloc simple et accessoires	Ens	44	2 603 864	114 570 000
20	Bloc double et accessoires	Ens	7	7 571 429	53 000 000
21	Câblette de terre + accessoires	km	44	13 555 227	596 430 000
Total mise à la terre					**765 000 000**
22	Amortisseurs vibration – conducteurs phases	U	528	14 091	7 440 000
23	Amortisseurs vibration – câbles de garde	U	84	53 067	4 457 600
24	Balise diurne	U	6	4 000	24 000
25	Plaque numérotation et danger	U	20	5 160	103 200
26	Plaque repérage hélicoptère	U	5	27 600	138 000
Total autres accessoires					**12 162 800**
27	Fondation des pylônes	U	44	6 000 000	264 000 000
28	Logistique, accès chantier, sécurité et supervision	Ens	1	-	270 000 000
29	Tirage, déroulage et réglage des conducteurs	Ens	1	-	275 400 000
Total					**3 087 642 800**

Annexe 19: Profils en long du tracé 4 par canton

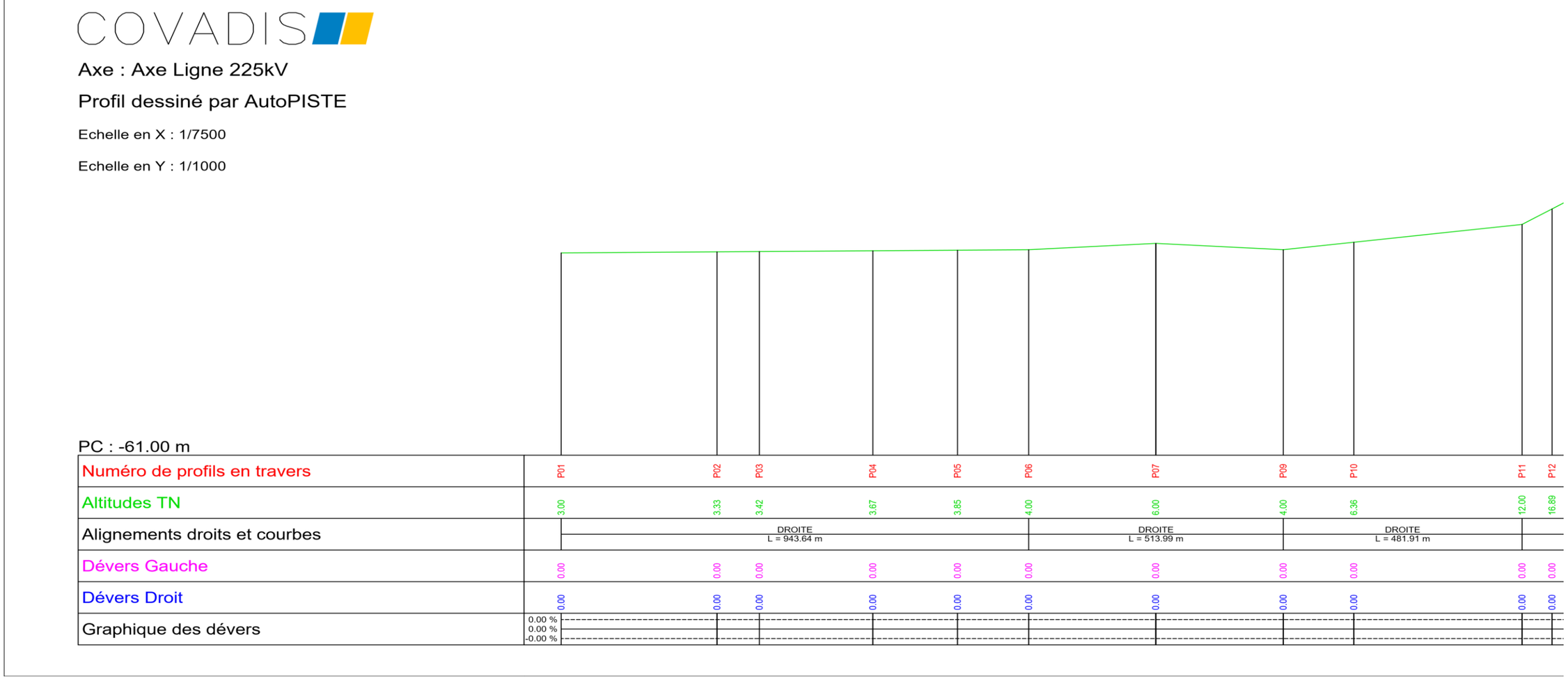


Figure 16 : Profil en long du canton 1

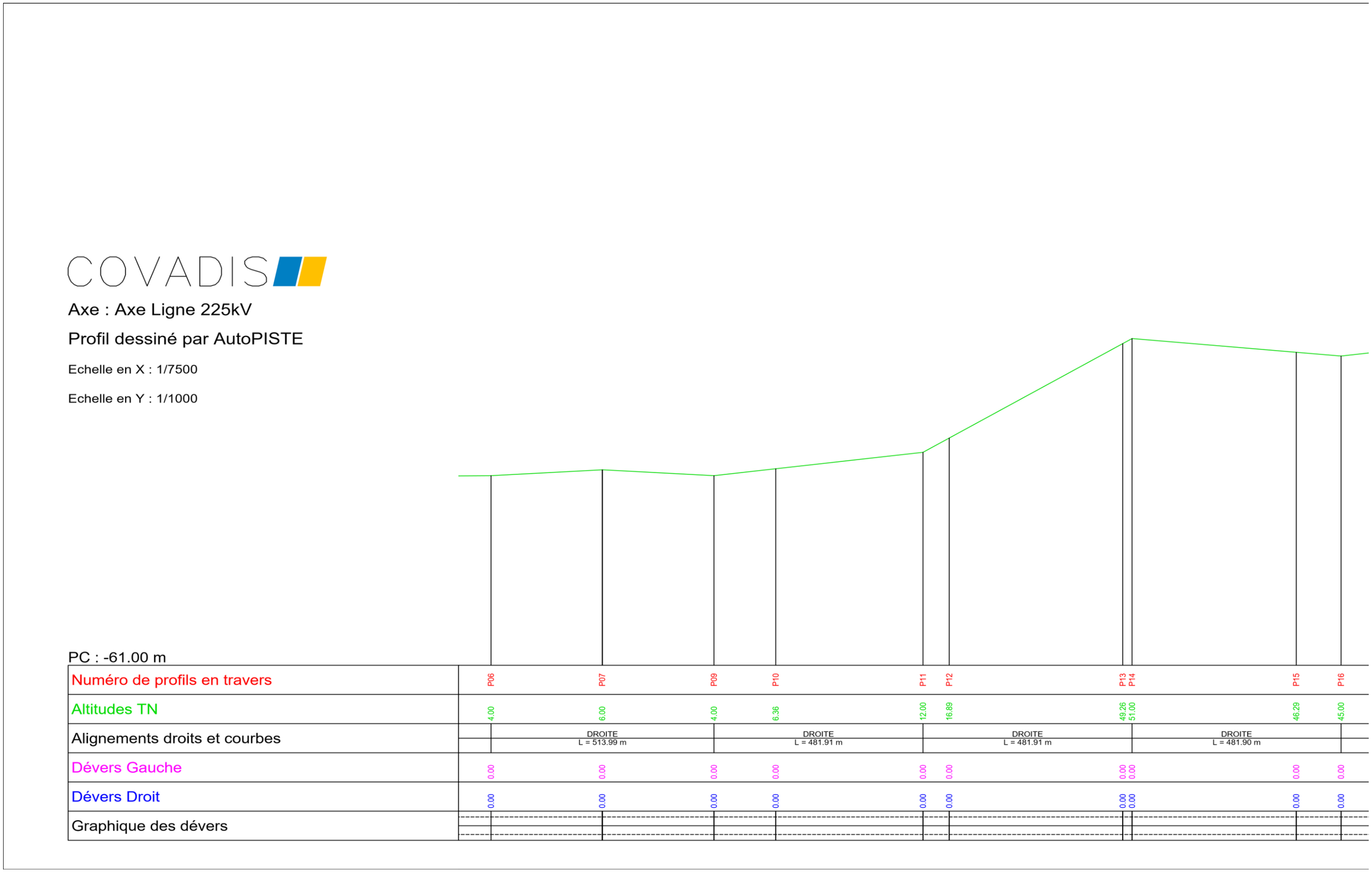


Figure 17 : Profil en long du canton 2

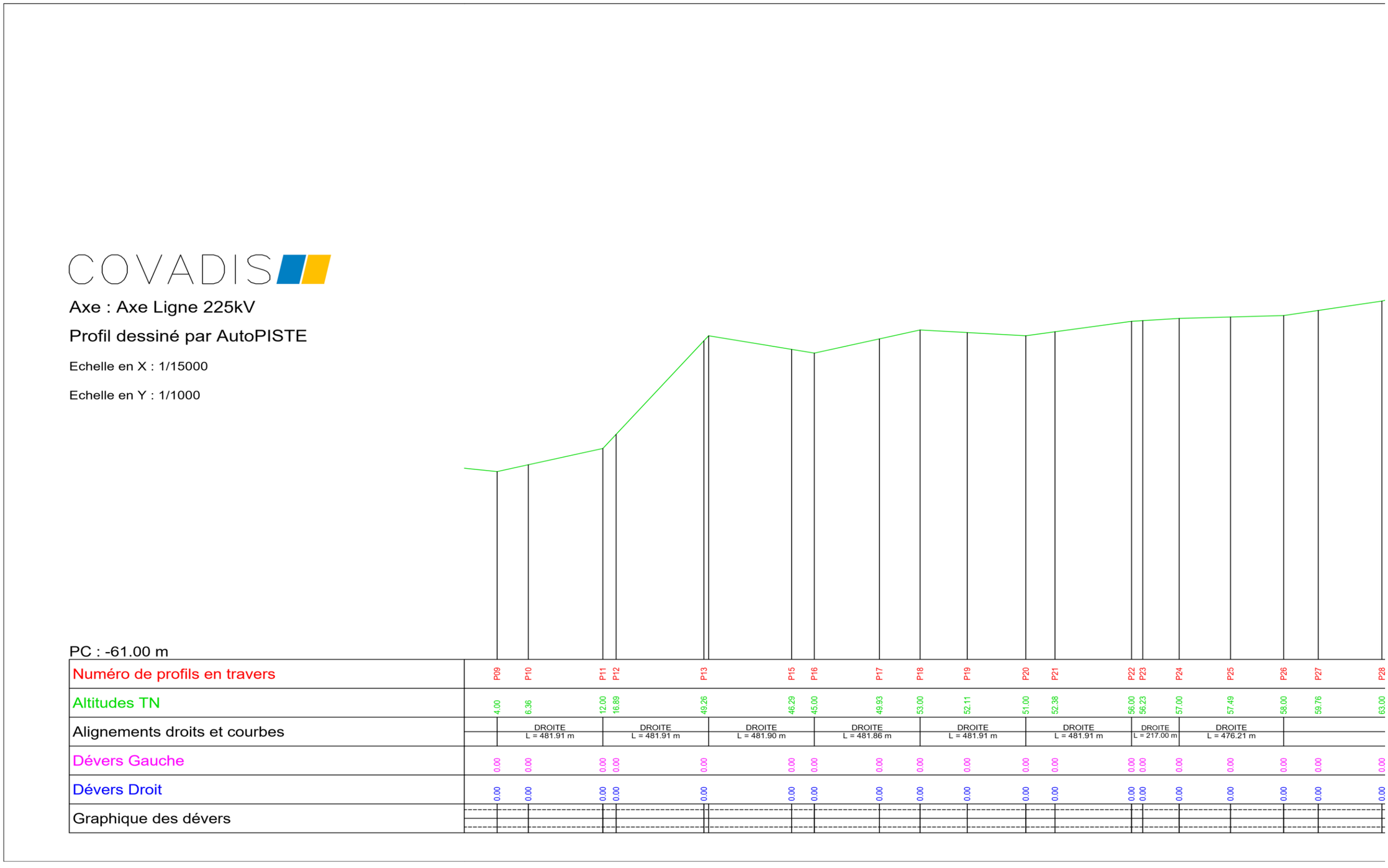


Figure 18 : Profil en long du canton 3

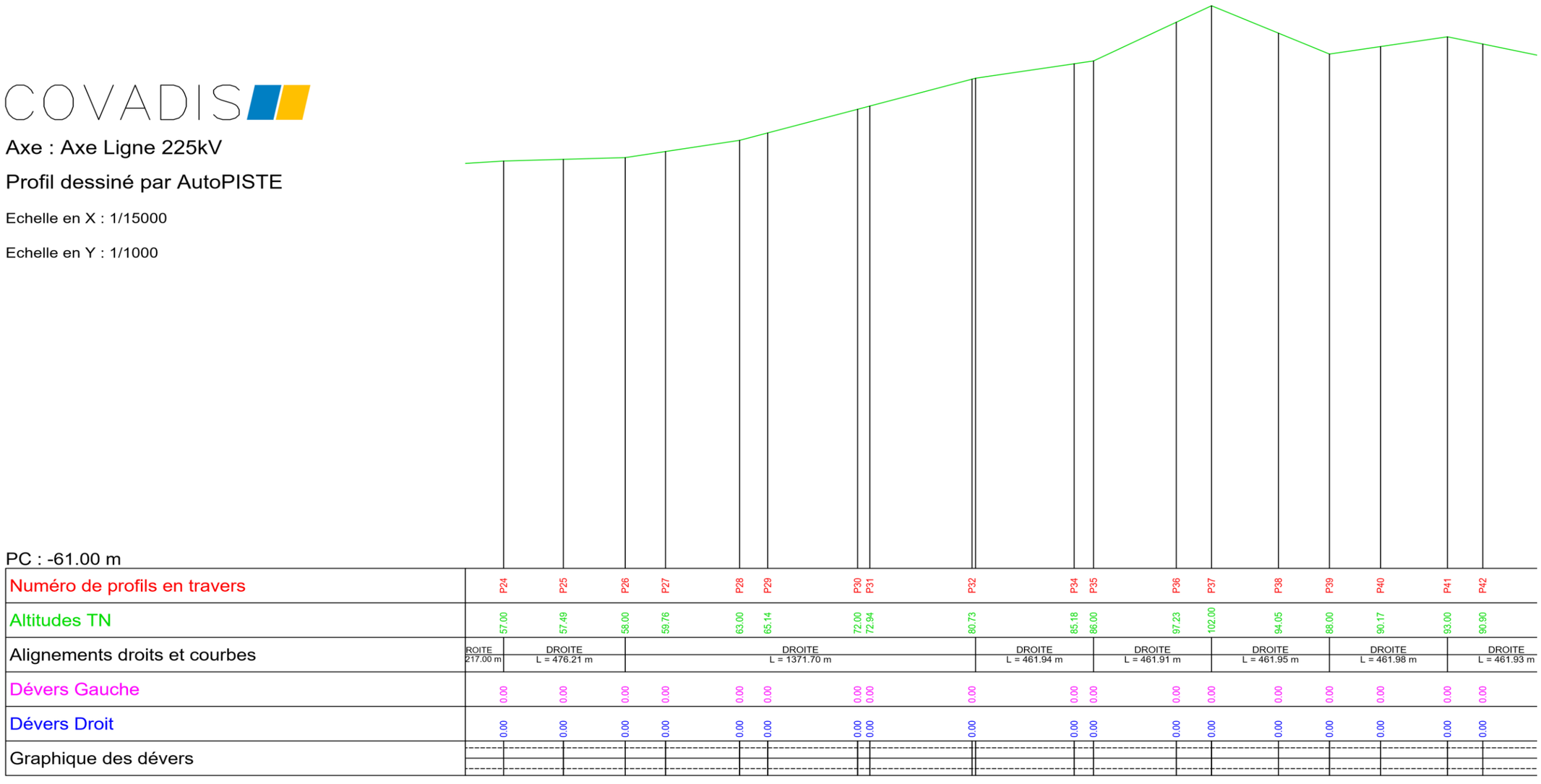


Figure 19 : Profil en long du canton 4

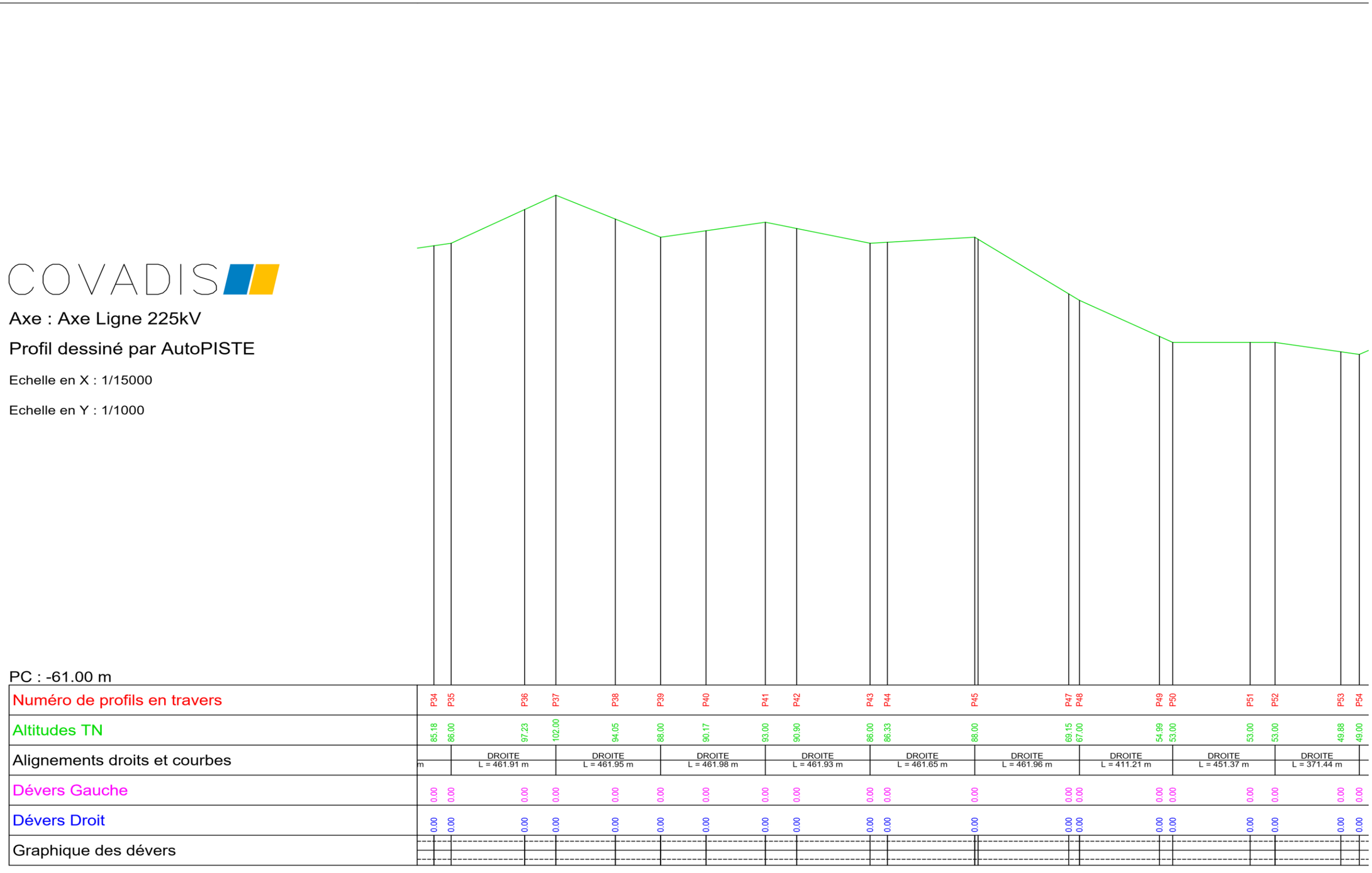


Figure 20 : Profil en long du canton 5

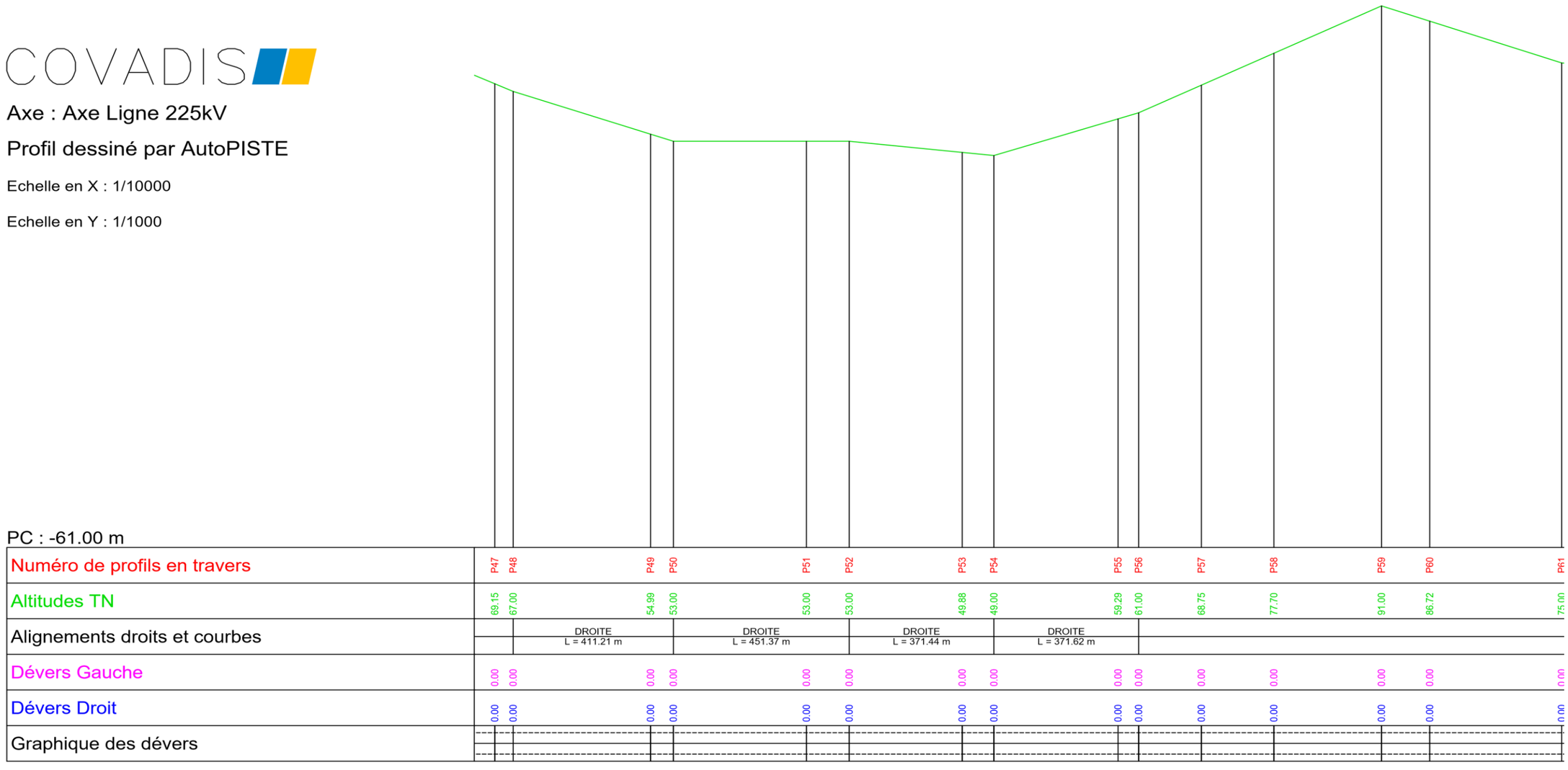


Figure 21 : Profil en long du canton 6

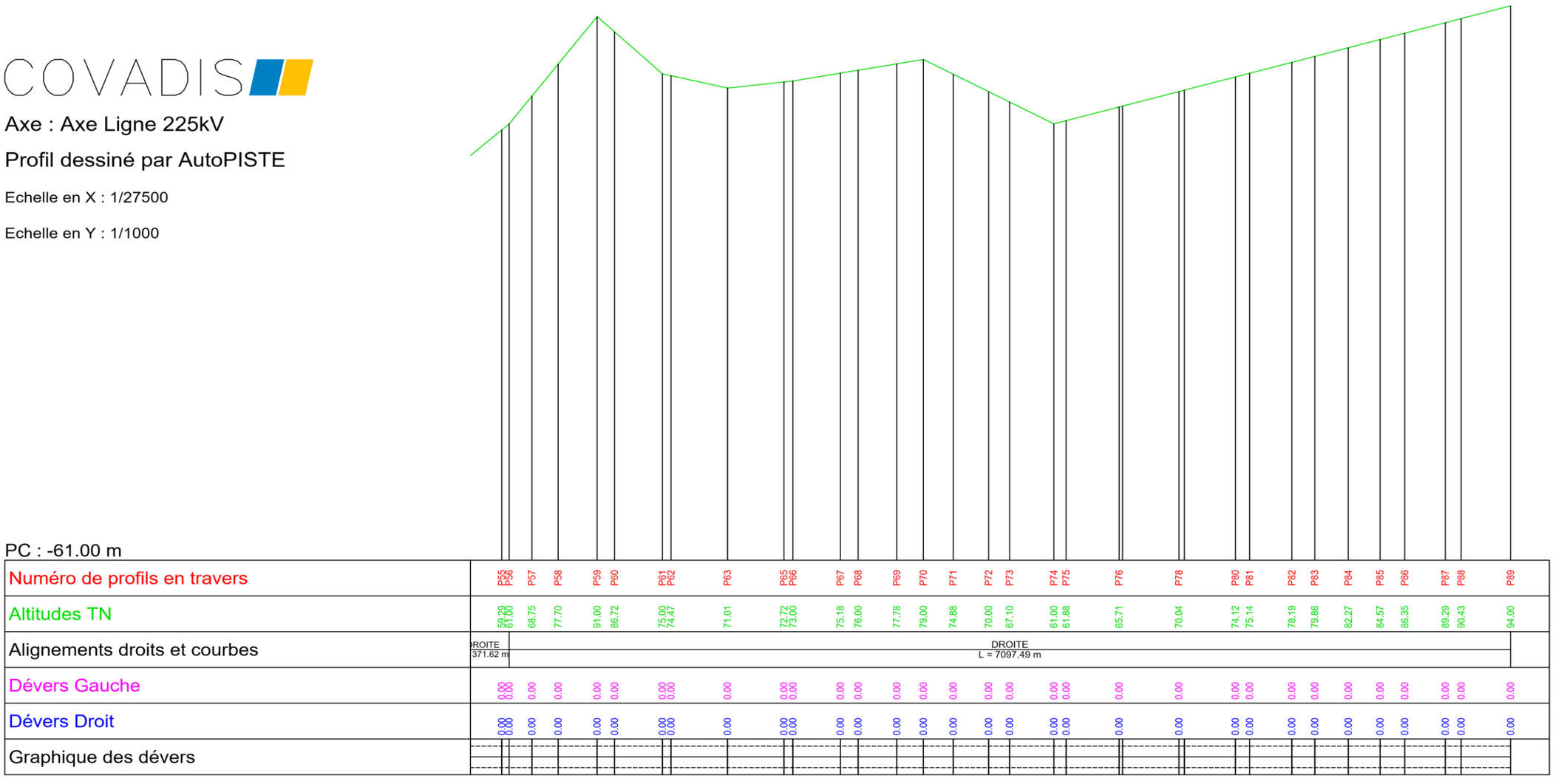


Figure 22 : Profil en long du canton 7

Annexe 20:Résultat des charges verticales appliquées aux pylônes d'arrêts et d'alignement

Tableau 14 : Charges verticales sur les pylônes d'alignement par conducteur Aster 570

Pylônes d'alignement	m	ω [daN/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	P_i [kg]	V_B [daN]
P.AL 1	1	1,59	314,54	314,54	56	556,1186
P.AL 2	1	1,59	256,99	256,99	56	464,6141
P.AL 3	1	1,59	481,91	481,91	56	822,2369
P.AL 4	1	1,59	476,2	447,73	56	790,50845
P.AL 5	1	1,59	461,93	461,98	56	790,50845
P.AL 6	1	1,59	451,37	371,43	56	710,126
P.AL 7	1	1,59	462,43	462,43	56	791,2637

Tableau 15 : Charges verticales sur les pylônes d'arrêts par conducteur Aster 570

Pylônes d'arrêt/d'angle	m	ω [daN/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	P_i [kg]	V_B [daN]
P.AR 1	1	1,59	0	314,54	56	306,0593
P.AR 2	1	1,59	314,54	256,99	56	510,36635
P.AR 3	1	1,59	256,99	481,91	56	643,4255
P.AR 4	1	1,59	217	476,21	56	790,4846
P.AR 5	1	1,59	461,94	461,94	56	790,4846
P.AR 6	1	1,59	461,94	411,2	56	750,1463
P.AR 7	1	1,59	371,22	160,97	56	479,09105
P.AR 8	1	1,59	462,43	0	56	423,63185
P.AN 1	1	1,59	411,2	451,37	56	741,74315

Tableau 16 : Charges verticales sur les pylônes d'alignement par câble de garde Thym 157,4

Pylônes d'alignement	m	ω [daN/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	P_i [kg]	V_B [daN]
P.AL 1	1	0,929	314,54	314,54	56	348,20766
P.AL 2	1	0,929	256,99	256,99	56	294,74371
P.AL 3	1	0,929	481,91	481,91	56	503,69439
P.AL 4	1	0,929	476,2	447,73	56	485,1562
P.AL 5	1	0,929	461,93	461,98	56	485,1562
P.AL 6	1	0,929	451,37	371,43	56	438,1906
P.AL 7	1	0,929	462,43	462,43	56	485,59747

Tableau 17 : Charges verticales sur les pylônes d'arrêt/ d'angle par câble de garde Thym 157,4

Pylônes d'arrêt/d'angle	m	ω [daN/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	P_i [kg]	V_B [daN]
P.AR 1	1	0,929	0	314,54	56	202,10383
P.AR 2	1	0,929	314,54	256,99	56	321,47569
P.AR 3	1	0,929	256,99	481,91	56	399,21905
P.AR 4	1	0,929	217	476,21	56	485,14226
P.AR 5	1	0,929	461,94	461,94	56	485,14226
P.AR 6	1	0,929	461,94	411,2	56	461,57353
P.AR 7	1	0,929	371,22	160,97	56	303,20226
P.AR 8	1	0,929	462,43	0	56	270,79874
P.AN 1	1	0,929	411,2	451,37	56	456,66377

Tableau 19 : Charges verticales sur les pylônes d'alignement par câble de garde Phlox 147,1

Pylônes d'alignement	m	ω [daN/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	P_i [kg]	V_B [daN]
P.AL 1	1	0,822	314,54	314,54	56	314,55188
P.AL 2	1	0,822	256,99	256,99	56	267,24578
P.AL 3	1	0,822	481,91	481,91	56	452,13002
P.AL 4	1	0,822	476,2	447,73	56	435,72701
P.AL 5	1	0,822	461,93	461,98	56	435,72701
P.AL 6	1	0,822	451,37	371,43	56	394,1708
P.AL 7	1	0,822	462,43	462,43	56	436,11746

Tableau 19 : Charges verticales sur les pylônes d'arrêt/ d'angle par câble de garde Phlox 147,1

Pylônes d'arrêt/d'angle	m	ω [daN/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	P_i [kg]	V_B [daN]
P.AR 1	1	0,822	0	314,54	56	185,27594
P.AR 2	1	0,822	314,54	256,99	56	290,89883
P.AR 3	1	0,822	256,99	481,91	56	359,6879
P.AR 4	1	0,822	217	476,21	56	435,71468
P.AR 5	1	0,822	461,94	461,94	56	435,71468
P.AR 6	1	0,822	461,94	411,2	56	414,86054
P.AR 7	1	0,822	371,22	160,97	56	274,73009
P.AR 8	1	0,822	462,43	0	56	246,05873
P.AN 1	1	0,822	411,2	451,37	56	410,51627

Annexe 21: Résultat des charges transversale appliquées aux pylônes d'angle et d'alignement

Tableau 20 : Charges transversale appliquées aux pylônes d'angle et d'alignement par Aster 570

Pylônes d'alignement/ d'angle	Hypothèses	F_V [N/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	H_V[N]	H_α [N]	H_T [N]
P.AL 1	A	0	314,54	314,54	0	2158,90037	2158,900373
	B	24,6078	314,54	314,54	11610,206	1078,7895	12688,99562
	C	8,858808	314,54	314,54	4179,6742	2158,59845	6338,272649
	D	0	314,54	314,54	0	2158,90037	2158,900373
P.AL 2	A	0	256,99	256,99	0	2158,90037	2158,900373
	B	24,6078	256,99	256,99	9485,9378	2157,49685	11643,43463
	C	8,858808	256,99	256,99	3414,9376	2158,59845	5573,536049
	D	0	256,99	256,99	0	2158,90037	2158,900373
P.AL 3	A	0	481,91	481,91	0	19,4310895	19,43108953
	B	24,6078	481,91	481,91	17788,117	77,6738288	17865,79118
	C	8,858808	481,91	481,91	6403,7222	38,8567441	6442,578989
	D	0	481,91	481,91	0	38,8621791	38,86217907
P.AL 4	A	0	476,2	447,73	0	917,570829	917,5708287
	B	24,6078	476,2	447,73	17227,06	916,974307	18144,03381
	C	8,858808	476,2	447,73	6201,7414	917,442505	7119,183927
	D	0	476,2	447,73	0	917,570829	917,5708287
P.AL 5	A	0	461,93	461,98	0	474,981029	474,9810293
	B	24,6078	461,93	461,98	17051,237	474,672239	17525,90902
	C	8,858808	461,93	461,98	6138,4452	474,914602	6613,359842
	D	0	461,93	461,98	0	474,981029	474,9810293
P.AL 6	A	0	451,37	371,43	0	2007,79112	2007,791119
	B	24,6078	451,37	371,43	15677,26	2006,48583	17683,7461
	C	8,858808	451,37	371,43	5643,8137	2007,51033	7651,32402
	D	0	451,37	371,43	0	2007,79112	2007,791119
P.AL 7	A	0	462,43	462,43	0	1079,49129	1079,49129
	B	24,6078	462,43	462,43	17069,077	1078,7895	18147,86693
	C	8,858808	462,43	462,43	6144,8679	1079,34032	7224,208197
	D	0	462,43	462,43	0	1079,49129	1079,49129
P.AN 1	A	0	411,2	451,37	0	17141,18	17141,18004
	B	24,6078	411,2	451,37	15672,339	17130,0364	32802,37509
	C	8,858808	411,2	451,37	5642,0419	17138,7828	22780,82475
	D	0	411,2	451,37	0	17141,18	17141,18004

Tableau 21 : Charges transversale appliquées aux pylônes d'angle et d'alignement par Thym 157,4

Pylônes d'alignement/ d'angle	Hypothèses	F_V [N/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	H_V[N]	H_α [N]	H_T [N]
P.AL 1	A	0	314,54	314,54	0	2158,9004	2158,9004
	B	15,24096	314,54	314,54	7190,8373	1078,7895	8269,6268
	C	5,4867456	314,54	314,54	2588,7014	2158,5984	4747,2999
	D	0	314,54	314,54	0	2158,9004	2158,9004
P.AL 2	A	0	256,99	256,99	0	2158,9004	2158,9004
	B	15,24096	256,99	256,99	5875,1615	2157,4969	8032,6583
	C	5,4867456	256,99	256,99	2115,0581	2158,5984	4273,6566
	D	0	256,99	256,99	0	2158,9004	2158,9004
P.AL 3	A	0	481,91	481,91	0	19,43109	19,43109
	B	15,24096	481,91	481,91	11017,157	77,673829	11094,83
	C	5,4867456	481,91	481,91	3966,1764	38,856744	4005,0331
	D	0	481,91	481,91	0	38,862179	38,862179
P.AL 4	A	0	476,2	447,73	0	917,57083	917,57083
	B	15,24096	476,2	447,73	10669,663	916,97431	11586,637
	C	5,4867456	476,2	447,73	3841,0786	917,4425	4758,5211
	D	0	476,2	447,73	0	917,57083	917,57083
P.AL 5	A	0	461,93	461,98	0	474,98103	474,98103
	B	15,24096	461,93	461,98	10560,766	474,67224	11035,438
	C	5,4867456	461,93	461,98	3801,8758	474,9146	4276,7904
	D	0	461,93	461,98	0	474,98103	474,98103
P.AL 6	A	0	451,37	371,43	0	2007,7911	2007,7911
	B	15,24096	451,37	371,43	9709,787	2006,4858	11716,273
	C	5,4867456	451,37	371,43	3495,5233	2007,5103	5503,0336
	D	0	451,37	371,43	0	2007,7911	2007,7911
P.AL 7	A	0	462,43	462,43	0	1079,4913	1079,4913
	B	15,24096	462,43	462,43	10571,816	1078,7895	11650,605
	C	5,4867456	462,43	462,43	3805,8537	1079,3403	4885,194
	D	0	462,43	462,43	0	1079,4913	1079,4913
P.AN 1	A	15,24096	411,2	451,37	9706,7388	17141,18	26847,919
	B	5,4867456	411,2	451,37	3494,426	17130,036	20624,462
	C	0	411,2	451,37	0	17138,783	17138,783
	D	0	411,2	451,37	0	17141,18	17141,18

Tableau 22 : Charges transversale appliquées aux pylônes d'angle et d'alignement par Phlox 147,1

Pylônes d'alignement/ d'angle	Hypothèses	F_V [N/m]	a_1 [m]	a_2 [m]	H_V[N]	H_α [N]	H_T [N]
P.AL 1	A	0	314,54	314,54	0	2158,9004	2158,9004
	B	12,50235	314,54	314,54	5898,7338	1078,7895	6977,5233
	C	4,500846	314,54	314,54	2123,5442	2158,5984	4282,1426
	D	0	314,54	314,54	0	2158,9004	2158,9004
P.AL 2	A	0	256,99	256,99	0	2158,9004	2158,9004
	B	12,50235	256,99	256,99	4819,4684	2157,4969	6976,9652
	C	4,500846	256,99	256,99	1735,0086	2158,5984	3893,6071
	D	0	256,99	256,99	0	2158,9004	2158,9004
P.AL 3	A	0	481,91	481,91	0	19,43109	19,43109
	B	12,50235	481,91	481,91	9037,5112	77,673829	9115,1851
	C	4,500846	481,91	481,91	3253,504	38,856744	3292,3608
	D	0	481,91	481,91	0	38,862179	38,862179
P.AL 4	A	0	476,2	447,73	0	917,57083	917,57083
	B	15,24096	476,2	447,73	10669,663	916,97431	11586,637
	C	5,4867456	476,2	447,73	3841,0786	917,4425	4758,5211
	D	0	476,2	447,73	0	917,57083	917,57083
P.AL 5	A	0	461,93	461,98	0	474,98103	474,98103
	B	12,50235	461,93	461,98	8663,1284	474,67224	9137,8006
	C	4,500846	461,93	461,98	3118,7262	474,9146	3593,6408
	D	0	461,93	461,98	0	474,98103	474,98103
P.AL 6	A	0	451,37	371,43	0	2007,7911	2007,7911
	B	12,50235	451,37	371,43	7965,0596	2006,4858	9971,5455
	C	4,500846	451,37	371,43	2867,4215	2007,5103	4874,9318
	D	0	451,37	371,43	0	2007,7911	2007,7911
P.AL 7	A	0	462,43	462,43	0	1079,4913	1079,4913
	B	12,50235	462,43	462,43	8672,1926	1078,7895	9750,9821
	C	4,500846	462,43	462,43	3121,9893	1079,3403	4201,3296
	D	0	462,43	462,43	0	1079,4913	1079,4913
P.AN 1	A	0	411,2	451,37	0	17141,18	17141,18
	B	12,50235	411,2	451,37	7962,5592	17130,036	25092,596
	C	4,500846	411,2	451,37	2866,5213	17138,783	20005,304
	D	0	411,2	451,37	0	17141,18	17141,18

Annexe 22: Résultat des charges longitudinales appliquées aux pylônes d'arrêts

Tableau 23 : Charges longitudinales appliquées aux pylônes d'arrêts par Aster 570

Pylônes d'arrêt et d'angle	Hypothèses	Tension de l'hypothèse considérée [N]	Charge pylône d'angle 30° [N]	Charge pylône d'angle 70° [N]
P.AR 1	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441
P.AR 2	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441
P.AR 3	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441
P.AR 4	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441
P.AR 5	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441
P.AR 6	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441
P.AR 7	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441
P.AR 8	A	61851,08	32016,4749	70952,6441
	B	61810,87	31995,6607	70906,5171
	C	61842,43	32011,9974	70942,7212
	D	61851,08	32016,4749	70952,6441

Tableau 24 : Charges longitudinales appliquées aux pylônes d'arrêts par Thym 157,4

Pylônes d'arrêt et d'angle	Hypothèses	Tension de l'hypothèse considérée [N]	Charge pylône d'angle 30° [N]	Charge pylône d'angle 70° [N]
P.AR 1	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972
P.AR 2	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972
P.AR 3	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972
P.AR 4	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972
P.AR 5	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972
P.AR 6	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972
P.AR 7	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972
P.AR 8	A	38333,14	19842,693	43973,972
	B	38335,59	19843,962	43976,782
	C	37002,019	19153,654	42446,972
	D	38333,14	19842,693	43973,972

Hggg

Tableau 25 : Charges longitudinales appliquées aux pylônes d'arrêts par Phlox 147,1

Pylônes d'arrêt et d'angle	Hypothèses	Tension de l'hypothèse considérée [N]	Charge pylône d'angle 30° [N]	Charge pylône d'angle 70° [N]
P.AR 1	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879
P.AR 2	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879
P.AR 3	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879
P.AR 4	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879
P.AR 5	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879
P.AR 6	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879
P.AR 7	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879
P.AR 8	A	44266,88	22914,223	50780,879
	B	44266,67	22914,115	50780,638
	C	44266,69	22914,125	50780,661
	D	44266,88	22914,223	50780,879

Annexe 23: Impact du projet en phase de pré-construction

ZONE CONCERNEE	ACTIVITES SOURCE D'IMPACT	COMPOSANTE DU MILIEU AFFECTEE			NATURE DE L'EFFET	IMPACT CORRESPONDANT	TYPOLOGIE DE L'EFFET (Positif, Négatif)	EVALUATION DE L'IMPORTANCE DES IMPACTS			
		PHYSIQUE	BIOLOGIQUE	HUMAIN				**Intensité** (Faible, Moyenne, Forte)	**Portée** (Locale, Zonale, Régionale))	**Durée** (Courte, Moyenne, Longue)	**Importance de l'impact** (Mineure, Moyenne, Majeure)
Sites du Projet	- Installations du chantier - Amenée et repli du matériel - Nettoyage, débroussaillage, décapage des talus amont et aval y compris abattage et déracinement des arbres et arbustes - Libération des emprises de la zone d'extension	Sol et sous-sol			Déversement accidentel de carburant, d'huiles lubrifiantes, et autres produits	Pollution du sol et du sous-sol	Négatif	Faible	Locale	Courte	Mineure
					Production d'eaux usées	Pollution du sol et du sous-sol	Négatif	Faible	Locale	Courte	Mineure
					Modification de la surface du sol et du sous-sol	Modification de la structure du sol	Négatif	Moyenne	Locale	Courte	Mineure
Sites du Projet	- Nettoyage, débroussaillage, décapage des talus amont et aval y compris abattage et déracinement des arbres et arbustes - Déplacement des véhicules et engins - Installations du chantier	Air			Emission de NO_X et COV (moteur des engins)	Pollution de l'air	Négatif	Faible	Locale	Courte	Mineure
		Air			Emission de poussière	Pollution de l'air	Négatif	Faible	Locale	Courte	Mineure
		Eau			Production des déchets	Pollution de l'eau	Négatif	Faible	Locale	Courte	Mineure
		Paysage			Modification du paysage	Atteinte à la vision visuelle	Négatif	Faible	Locale	Courte	Mineure

ZONE CONCEREE	ACTIVITES SOURCE D'IMPACT	COMPOSANTE DU MILIEU AFFECTEE			NATURE DE L'EFFET	IMPACT CORRESPONDANT	TYPOLOGIE DE L'EFFET (Positif, Négatif)	EVALUATION DE L'IMPORTANCE DES IMPACTS			
		PHYSIQUE	BIOLOGIQUE	HUMAIN				**Intensité** (Faible, Moyenne, Forte)	**Portée** (Locale, Zonale, Régionale))	**Durée** (Courte, Moyenne, Longue)	**Importance de l'impact** (Mineure, Moyenne, Majeure)
	- Nettoyage, débroussaillage, décapage des talus amont et aval y compris abattage et déracinement des arbres et arbustes de l'emprise du site - Déplacement des véhicules et engins - Installations du chantier	Ambiance sonore			Emission sonore	Nuisance sonore	Négatif	Faible	Locale	Courte	Mineure
			Biodiversité		Eloignement des animaux Destruction de la faune terrestre Destruction de la faune aviaire (oiseaux)	Atteinte à la biodiversité	Négatif	Faible	Locale	Longue	Moyenne
					Perte du couvert végétal	Atteinte à la biodiversité	Négatif	Faible	Locale	Longue	Moyenne
Zone du Projet	– Transport et manutention des engins, machinerie et équipement ; – Construction des bases de chantier, ouverture des emprises – Recrutement de personnels			Personnel	Risque d'accident de travail	Atteinte à la sécurité au travail	Négatif	Forte	Locale	Courte	Moyenne
				Personnel et voisinage immédiat	Production de déchets de chantier (débris de démolition, rebut de bois, rebut de métaux, emballages perdus)	Dégradation du cadre de vie	Négatif	Forte	Locale	Longue	Majeure
Zone d'emprise directe et indirecte du Projet	– Réception du matériel, des matériaux et des équipements du travail – Nettoyage, débroussaillage, décapage des talus amont et aval y compris abattage et déracinement des arbres et arbustes de l'emprise du site – Déplacement des véhicules et engins – Installations du chantier			Personnel et voisinage immédiat	Propagation d'Infections Sexuellement Transmissibles (IST/VIH SIDA)	Atteinte à la santé	Négatif	Faible	Locale	Moyenne	Moyenne
					Intensification du trafic routier et accidents de circulation	Atteinte à la santé	Negatif	Locale	Courte	Courte	Moyenne
					Risque de Violence Basé sur la Genre (VBG) et Traite des personnes et Harcèlement sexuel	Dégradation des conditions socio-économiques	Forte	Locale	Courte	Moyenne	Forte
Zone d'emprise directe et	- Réception du matériel, des matériaux et des équipements du travail			Socio-économique	Perte d'activité économique	Dégradation des conditions socio-économiques	Négatif	Forte	Locale	Longue	Majeure

ZONE CONCEREE	ACTIVITES SOURCE D'IMPACT	COMPOSANTE DU MILIEU AFFECTEE			NATURE DE L'EFFET	IMPACT CORRESPONDANT	TYPOLOGIE DE L'EFFET (Positif, Négatif)	EVALUATION DE L'IMPORTANCE DES IMPACTS			
		PHYSIQUE	BIOLOGIQUE	HUMAIN				**Intensité** (Faible, Moyenne, Forte)	**Portée** (Locale, Zonale, Régionale))	**Durée** (Courte, Moyenne, Longue)	**Importance de l'impact** (Mineure, Moyenne, Majeure)
Indirecte du Projet	- Nettoyage, débroussaillage, décapage des talus amont et aval y compris abattage et déracinement des arbres et arbustes de l'emprise du site - Déplacement des véhicules et engins - Installations du chantier - Libération de l'emprise du site				Risque de conflits sociaux en cas de non emploi local	Dégradation des conditions socio-économiques	Négatif	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
					Transgression des valeurs coutumières	Dégradation des conditions sociales	Négatif	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
Zone d'emprise directe et indirecte du Projet	– Transport et manutention des engins, machinerie et – Réception du matériel, des matériaux et des équipements du travail – Recrutement de personnels – Présence du personnel			Socio-économique	Risques d'emploi et de travail des enfants	Dégradation des conditions socio-économiques	Négatif	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
					Création d'emplois temporaires	Amélioration des conditions social-économiques	Positif	Moyenne	Locale	Moyenne	Moyenne
					Brassage culturel	Amélioration des conditions sociales et culturelles	Négatif	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
					Développement des Activités Génératrices de Revenus	Amélioration des conditions social-économiques	Négatif	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
					Accroissement du flux monétaire	Amélioration des conditions social-économiques	Positif	Moyenne	Locale	Moyenne	Moyenne
					Opportunité d'affaires	Amélioration des conditions social-économiques	Positif	Moyenne	Locale	Moyenne	Moyenne
					Augmentation des recettes fiscales	Amélioration des conditions économiques	Positif	Moyenne	Locale	Courte	Mineure

Annexe 24: Mesures d'atténuations des impacts

ZONE CONCERNE	ACTIVITE/ SOURCE D'IMPACT	COMPOSANTE DU MILIEU AFFECTEE	Nature de l'effet	Mesures d'atténuation proposées	Objectifs de la mesure	Activités relatives à la mesure	Période de mise en œuvre	Indicateur de l'effectivité de la mesure	Moyen de vérification	Fréquence de surveillance
Ligne + Voies d'accès	Ouverture des voies d'accès Réception du matériel et des équipements de travail	Air	Pollution de l'air par les émissions de NOX et COV (moteur des engins)	- Faire le contrôle technique des engins avant leur utilisation - Faire une révision spontanée des véhicules avant le démarrage	Maintenir le niveau de NOX et COV à un niveau acceptable	- Faire des affiches de sensibilisation - Sensibiliser le personnel	Pendant les travaux d'aménagement	Etat des engins (ex. quantité de fumées émises) Etat des engins (ex. quantité de fumées émises) Nombre d'EPI en stock, distribués, usagés	Attestation de visite technique Registre interne de révision des engins Registre interne des EPI	1 fois/mois
	Travaux de terrassement généraux Assainissement Ouverture des voies d'accès	Flore Faune	- Destruction de la vegetation - Destruction d'habitats d'animaux (petits animaux, reptiles, oiseaux, insectes)n	-Demander l'avis d'un expert floristique lorsque le site abrite une végétation, -Choisir un site sans enjeux pour la flore (un site nu par exemple). -Interdire au personnel de chantier la chasse et l'abattage d'animaux durant les travaux d'aménagement -limiter les zones utilisées pour les installations de la base-chantier uniquement sur le périmètre dédié au Projet	Protéger la biodiversité terrestre	- Recrutement d'un expert floristique - Faire des affiches de sensibilisation - Sensibiliser le personnel	Pendant les travaux d'aménagement	- CV de l'expert - Surface utilisée - Nombre de personne sensibilisée - Panneaux d'interdiction - Affiche de sensibilisation	- Rapport de l'expert - Planning détaillé des travaux - Liste de présence	1 fois/mois

ZONE CONCERNE	ACTIVITE/ SOURCE D'IMPACT	COMPOSANTE DU MILIEU AFFECTEE	Nature de l'effet	Mesures d'atténuation proposées	Objectifs de la mesure	Activités relatives à la mesure	Période de mise en œuvre	Indicateur de l'effectivité de la mesure	Moyen de vérification	Fréquence de surveillance
Ligne + Voies d'accès	Travaux de terrassement généraux Assainissement Ouverture des voies d'accès	Sol/sous-sol	Modification de la structure du sol	- Respecter les superficies délimitées pour les fouilles - Limiter les modifications au stricte nécessaire - Réhabiliter les zones creusées accidentellement	Limiter les modifications	- Sensibiliser le personnel - Elaborer un plan de réhabilitation des zones creusées accidentellement	Pendant les travaux d'aménagement	-Surface modifiée -Surface réhabilité	Planning détaillé des travaux	1 fois/mois