Ministère de l'Energie, du Pétrole et du développement des Energies Renouvelables de la Côte d'Ivoire

MISE EN PLACE D'UN OUTIL DE DIMENSIONNEMENT MECANIQUE D'UNE LIGNE ELECTRIQUE HAUTE TENSION

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
DIPÔME D'INGENIEUR 2IE, AVEC GRADE MASTER
SPECIALITE : GENIE ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET INDUSTRIEL.

Présenté et soutenu publiquement le 02 novembre 2017 par

Mohamed SYLLA

Travaux dirigés par :

M. Olivier KOFFI
Chef de Service Transport et Réseau d'Interconnexion CI-ENERGIES

M. Moussa KADRI
Assistant d'Enseignant et de Recherche au Département GEEI 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Ahmed BAGRE

Membres et correcteurs : M. Justin BASSOLE
M. Moussa KADRI

Promotion [2015/ 2016]

I. DEDICACE

A ma mère et mon défunt père,

Pour tout l'amour et le soutien qu'ils m'ont offert, pour leurs conseils inestimables, symbole de tendresse profonde et permanente, ce mémoire est le fruit de leurs incommensurables sacrifices et leur amour éternel ;

- *A Ma sœur SYLLA NAFATOUMATA pour son engagement, sa disponibilité et surtout son soutien. Celle qui est un modèle pour moi, qui m'a montré le chemin à suivre et qui m'a toujours soutenu.*

- *A mes frères et sœurs ceux-là qui ont toujours cru en moi. Vous êtes ma raison de continuer le combat quand tout semble s'écrouler, je vous aime très fort ;*

Que DIEU, Le tout puissant m'accorde le succès afin que vous soyez honorés

II. REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier la Société des Energies de Côte d'Ivoire (CI-Energies) et particulièrement le Service de Transport et d'Interconnexion de la Direction de l'Equipement et du Développement, pour nous avoir accueilli et nous donné l'opportunité de découvrir les métiers d'ingénieur en transport d'électricité HTB durant ces six mois.

Nous avons une dette de reconnaissance intellectuelle toute particulière envers les auteurs des principaux ouvrages cités dans notre bibliographie.

Remerciements distingués à l'endroit du Directeur Général de CI-ENERGIES **M. Amidou TRAORE**, du Directeur de la Direction de l'Equipement et du Développement **M. Nagaky DIARRASSOUBA**, du chef de service transport et du réseau d'interconnexion (STRI)

M. Olivier KOFFI ainsi que tous les autres membres du personnel pour leur collaboration et leur grande courtoisie.

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude à tout le personnel de la société CI-ENERGIES, particulièrement à :

- **M. Abel KOUASSI**, Coordonnateur projet à la DED ;
- **M. Uriel ZOUGBO**, Ingénieur Projet pour nous avoir assisté tout au long du stage ;
- **M. Seydou KONE**, Ingénieur ligne ;
- **M. Nestor KOFFI** pour sa disponibilité et ses conseils ;
- **M. El Hadj Famatié KONE**, Ingénieur poste et responsable projet ;
- **M. Jackson ASSI**, Responsable projet.
- **M. N'CHOBY Anatole,** Consultant expert ligne.

Une pensée envers Mr. Moussa KADRI, Assistant d'Enseignant et de Recherche au Département GEEI 2iE pour son encadrement. Votre compréhension, vos conseils et encouragements au travail, votre promptitude mais surtout votre disponibilité m'ont amené à la réalisation de ce travail.

Nous témoignons également notre infini remerciement à l'endroit de tout le corps enseignant et administratif de 2iE et plus particulièrement à tous les professeurs du département du Génie Electrique et Energétique .

Nous remercions également toute la famille SYLLA et particulièrement :

- Professeur SYLLA Moussa, enseignant-chercheur à l'université FELIX HOUPHOUET BOIGNY ;
- SYLLA Alassan, SYLLA Souimbou ; KONE Barakissa et KONE Moussa.

Que toutes les personnes non citées, qui nous ont soutenus et qui continuent de nous soutenir par leurs prières et leurs actions, trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

III. AVANT-PROPOS

L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) est un établissement d'enseignement supérieur et de recherche basé à Ouagadougou au Burkina Faso. Sa création en 2006, résulte de la fusion et restructuration des écoles inter-États EIER (École d'Ingénieurs de l'Equipement Rural) et ETSHER (École des Techniciens de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural), créées respectivement en 1968 et 1970 par 14 États d'Afrique de l'Ouest et Centrale pour former des ingénieurs spécialisés dans les domaines de l'équipement et de l'hydraulique. Il s'agit d'un Partenariat Public Privé international entre des États africains, des entreprises, des acteurs techniques et financiers et des organismes académiques et scientifiques. 2iE dispense une formation de pointe dans les domaines de l'Eau, de l'Energie, du Génie Civil et de l'Environnement conformément au Processus de Bologne : Licence, Master, Doctorat ; en partenariat avec les meilleures universités du monde, offrant ainsi une grande mobilité aux étudiants.

En Afrique, les diplômes de 2iE sont reconnus par le Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur (CAMES). En Europe, ils sont labélisés EUR-ACE à travers l'accréditation par la Commission des Titres d'Ingénieur (Cti).

Dans un souci de former des Ingénieurs de Conception et des Techniciens Supérieurs hautement qualifiés et aptes à relever les challenges, les étudiants bénéficient d'une formation théorique et d'une formation pratique qui consiste en des travaux pratiques et visites sur site. Les formations pour le niveau master sont sanctionnées par des stages de production en entreprise ou dans un laboratoire de recherche en vue de la rédaction d'un mémoire.

IV. LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

CI-ENERGIES : Société des Energies de Côte d'Ivoire

SOGEPE : Société de Gestion du Patrimoine du Secteur de l'Electricité

SOPIE : Société d'Opération Ivoirienne d'Electricité

EECI : Energie électrique de Côte d'Ivoire

DED : Direction de l'Equipement et du Développement

STRI : Service Transport et Réseau d'Interconnexion

PURE : Programme d'Urgence de Réhabilitation du Secteur de l'Electricité

MPEDER : Ministère du Pétrole, de l'Energie et du Développement des Energies Renouvelables

CNEEC : China National Electric Engineering Corporation

EDS : Etat De Service

PRETD : Projet de Renforcement du réseau Electrique de Transport et de Distribution

HTB : Haute Tension classe B

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

EIER : École d'Ingénieurs de l'Equipement Rural

ETSHER : École des Techniciens de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural

CAMES : Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur

Cti : Commission des Titres d'Ingénieur

V. RESUME

Les conditions techniques de mise en place des conducteurs, la conception et la fabrication des pylônes etant rétenues pour causes de l'effondrement des pylônes sur le tronçon d'interconnexion Côte d'Ivoire-Burkina Faso en 1999, la CI-ENERGIES en tant que maitre d'oeuvre du projet de Developpement et de Réhabilitation du Réseau Electrique de la Côte d'Ivoire decide de mettre en place un moyen de vérification des notes de calcul proposées par l'entreprise soumissionnaire.

Ce mémoire porte essentiellement sur le dimensionnement mécanique des lignes électriques haute tension. Le travail a principalement consisté à mettre en place un outil de calcul de dimensionnement mécanique d'une ligne électrique aérienne haute tension, à savoir :

- Le poids équivalent des câbles;
- La tension mécanique ;
- La flèche médiane ;
- La longueur d'arc des câbles ;
- etc

La seconde partie consiste à déterminer à travers l'outil de calcul, les différentes charges transmises aux différents types de pylônes par les conducteurs, les câbles de garde, isolateur et accessoires, ceux en fonction des contraintes liées à l'action du vent.

Cet outil de calcul est une application EXCEL destinée à faciliter la détermination des grandeurs mécaniques nécessaire pour le dimensionnement des lignes aériennes de transport.

Pour aboutir à ce résultat, nous procédons comme suit :

- Recherche documentaire sur la construction des lignes hautes tensions
- Etude théorique et détermination des grandeurs mécaniques d'une ligne haute tension
- Conception du progiciel de dimensionnement mécanique d'une ligne haute tension

Mots clés : Conducteur, pylône, flèche, tension

ABSTRACT

The technical conditions for the installation of the conductors, the design and manufacture of the pylons being retained for causes of collapse of the pylons on the section of interconnection the Côte d'Ivoire - Burkina Faso in 1999, the CI-ENERGIES as a project manager of the project for the Development and Rehabilitation of the Electricity Network of the Côte d'Ivoire decide to find of a means of checking of the notes of calculation suggested by the company tenderer.

Our end study project is based on the mecanical sizing of the high votage grid. The goal of this work was to establish a work book allowing the sizing of the mecanical stress on the overhead grid namely :

- The cable's weight
- Mecanical stress
- The middle arrow
- Cable length

The next part deal with the load coming from the cables and the wind supported by the pylon

The software used to make the sizing of our work book is the microsoft product EXCEL.

To lead to this result, we proceed as follows:

- Information retrieval on the construction of the lines high voltages
- Theoretical study and determination of the mechanical magnitudes of a line high voltage
- Design of the mechanical software package of dimensioning of a line high voltage

Key words: Conductor, pylon, arrow, tension

Table des matières

I. DEDICACE i

II. REMERCIEMENT II

III. AVANT-PROPOS III

IV. LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES IV

V. RESUME V

INTRODUCTION ***1***

CHAPITRE 1 : GENERALITES ***2***

I. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE **2**

I.1. Cadre institutionnel du secteur d'électricité 2

I.2. Historique 3

I.3. Situation géographique 3

I.4. Valeurs et vision 3

I.5. Missions 4

I.6. Organisation 5

I.7. Présentation de la Direction de l'Equipement et du Développement (DED) 6

5.1. Organisation de la DED 6

5.2. Mission de la DED 6

5.3. Service d'accueil 6

II. PRESENTATION DU THEME **7**

II.1. Enoncé du thème 7

II.2. Contexte du thème et situation géographique du projet 7

II.3. Problématique 11

II.4. Objectifs du thème 11

a. Objectif général 11

b. Objectif spécifique 11

c. Travail demandé 11

d. Résultats attendus 12

II.5. Approche méthodologique 12

a. Recherche documentaire 12

b. Dimensionnement des grandeurs mécaniques d'une ligne électrique 225 kV 13

c. Conception du progiciel 13

CHAPITRE 2 : LES GRANDEURS CLES ET L'ETUDE THEORIQUE D'UNE LIGNE ELECTRIQUE A HAUTE TENSION 14

I. Généralité des lignes aériennes 14

I.1. Définition et caractéristiques 14

I.2. Les principaux constituants d'une ligne aérienne à haute tension 15

✓ Les conducteurs 15

✓ Les câbles de garde 15

✓ Les isolateurs 17

✓ Les supports 18

❖ La classification des pylônes en fonction de la disposition de leur console 18

❖ La classification selon la résistance aux efforts 19

II. LES STATISTIQUES ET L'ETAT DU RESEAU IVOIRIEN EN 2016 20

1. La production électrique en côte d'ivoire 20

1.1. Les barrages hydroélectriques 20

1.2. Les centrales thermiques 21

2. Les postes et les lignes de transport 22

3. Les caractéristiques des câbles utilisés sur le réseau ivoirien 22

4. Les caractéristiques des pylônes existant sur le réseau ivoirien 23

5. Réseau interconnecté de la Côte d'Ivoire 23

III. ETUDE THEORIQUE D'UNE LIGNE ELECTRIQUE 225 kV 23

1. Définition 23

a. Les notions essentielles pour le dimensionnement mécanique d'une ligne électrique à haute tension 23

b. La définition géométrique 24

2. Dimensionnement géométrique 26

2.1. Distance d'isolement 26

2.2. Espacement des conducteurs et des câbles de garde au milieu de la portée 26

3. L'Hypothèse générale d'étude 27

3.1. Données de base 27

3.2. Les contraintes météorologiques imposées 28

4. Choix du conducteur de phase et des câbles de garde 29

5. Calcul mécanique sur les conducteurs de phase et le câble de garde 30

c. Le poids équivalent 30

d. Tensions et flèche des câbles 31

6. Dimensionnement des isolateurs 35

6.1. Choix du matériau de fabrication d'isolateur 35

6.2. La ligne de fuite 36

6.3. Calcul de la longueur de la chaine 36

7. Calcul des charges transmises aux pylônes 36

e. Hypothèse de charge 36

7.1.1. Conducteurs et câble de garde 36

7.1.2. Quelques notions utilisées pour le calcul des charges 37

7.1.3. Les efforts transmis aux pylônes par les câbles 38

1. Cas des pylônes d'alignement 38

❖ **La charge verticale (V) dues aux conducteurs et aux câbles de garde** 38

❖ **Les charges horizontales transversales (H)** 39

❖ **Les charges longitudinales (L)** 39

2. Cas des pylônes d'angle et d'arrêt 40

❖ **La charge verticale (V) dues aux conducteurs et aux câbles de garde** 40

❖ **Les charges horizontales transversales (H)** 40

❖ **Les charges longitudinales (L)** 40

➲ **Cas de pylône d'angle** 40

➲ **Cas des supports d'arrêt** 41

CHAPITRE 3 : PRESENTATION DU PROGICIEL 42

1. Présentation de l'interface 42

2. La feuille 1 : Généralité 42

3. Feuille 2 : Conducteurs de phase 43

4. Feuilles 3 & 4 : Câble de garde ACS et OPGW 45

5. Feuille 5 : Charge des supports 46

6. Vérification de quelques notes de calcul 52

ETUDE COMPARATIVE 57

CONCLUSION 57

ANNEXES XII

ANNEXE 1 : LONGUEUR DE LA LIGNE DE FUITE DES CHAINES D'ISOLATEUR XIII

ANNEXE 2 : LE CHOIX D'ISOLATEUR EN FONCTION DES TENSIONS DE SERVICE... XIV

ANNEXE 3 : LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES POUR CONDUCTEUR XV

ANNEXE 4 : RESEAU D'INTERCONNECTE DE LA CÔTE D'IVOIRE 2015 XVI
ANNEXE 5 : RESEAU D'INTERCONNECTE DE LA CÔTE D'IVOIRE A L'HORIZON 2030 . XVII
ANNEXE 6 : QUELQUES FORMULES UTILISEES POUR LA CONCEPTION.....XVIII
DU SUR EXCEL XVIII

BIBLIOGRAPHIE ***..... XVIII***

WEBOGRAPHIE ***..... XVIII***

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : La liste des centrales thermiques Ivoirien 22
Tableau 2 : Caractéristique des câbles ASTER 570mm² et Phlox 94..... 22
Tableau 3 : Les valeurs d'isolement de référence (Source : technique de l'ingénieur) 26
Tableau 4 : Les hypothèses de base..... 27
Tableau 5 : Les contraintes météorologique 28
Tableau 6 : Les caractéristiques mécaniques des câbles 30
Tableau 7 : Les matériaux de fabrication d'isolateur..... 35

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cadre institutionnel du secteur d'électricité 2
Figure 2 : Présentation des différentes zones du projet Source : CI-ENERGIES..... 10
Figure 3: conducteur en alliage d'aluminium 15
Figure 4: Câble de garde OPGW 16
Figure 5: Isolateur en verre 17
Figure 6: Pylônes à étages différents 18
Figure 7: Pylône de type chat..... 19
Figure 8 : Pylône d'alignement Figure 9: Pylône d'angle Figure 10 : Pylône d'arrêt 19
Figure 11 : Un exemple de profile en long d'une ligne 25

Figure 12 : l'arc de courbure des câbles 32
Figure 13 : Les résultats obtenus 34
Figure 14 : Représentation de portée adjacente 39
Figure 15 : Présentation de l'interface 42
Figure 16 : Zone de saisir pour les conducteurs 43
Figure 17 : Zone d'affichage des grandeurs mécaniques sur une surface de niveau 44
Figure 18 : Zone d'affichage des grandeurs mécaniques sur une surface dénivelée 44
Figure 19 : Zone de calcul des flèches en fonction des températures et des portées 45
Figure 20 : Zone de résultat pour conducteur 45
Figure 21: Fenêtre de calcul des charges 46
Figure 22 : Zone de saisir du pylône d'alignement 47
Figure 23: Zone de saisir du pylône d'angle 47
Figure 24: Zone de saisir du pylône d'arrêt. 48
Figure 25 : Zone d'affichage des résultats de charge 48
Figure 26: Affectation des charges 51

LISTE DES ORGANIGRAMMES

Organigramme 1: Structure organisationnelle de la DED 6

*

INTRODUCTION

L'accès à l'électricité représente un important levier de croissance économique et participe au recul de la pauvreté. Par conséquent l'énergie électrique joue un rôle majeur dans le développement social et économique ainsi que dans le bien-être de la société. L'économie des pays d'Afrique ne cessant de croître, il est légitime de se soucier des défis énergétiques.

Dans l'optique de satisfaire les prévisions énergétiques, l'Etat ivoirien, pour son Programme d'Urgence de Réhabilitation du Secteur de l'Electricité (PURE), avec pour maître d'ouvrage le Ministère du Pétrole, de l'Energie et du Développement des Energies Renouvelables (MPEDER), a lancé un projet de développement du réseau de transport et d'électrification rurale avec pour objectif le renforcement des infrastructures de transport d'énergie en vue de compléter le réseau primaire, d'en assurer la pérennité et de répondre dans le même temps à la demande énergétique. Pour ce fait, l'Etat Ivoirien a signé un accord de prêt avec Eximbank Chine pour le financement de ce projet, dénommé « projet CNEEC ».

Chargé de la réalisation de ce projet, il importe pour CI-ENERGIES de trouver un moyen de vérification des notes de calcul afin d'assurer la durabilité, la solidité et garantir les ouvrages de transport électrique.

Il a donc été soumis à notre réflexion la « ***MISE EN PLACE D'UN OUTIL DE DIMENSIONNEMENT MECANIQUES D'UNE LIGNE ELECTRIQUE HAUTE TENSION*** » pour la vérification des notes de calcul.

Il s'est agi pour nous, durant la période de stage qui s'est déroulé du 16 janvier au 31 juillet 2017, de proposer un outil de dimensionnement des grandeurs mécaniques (la tension, la flèche …) pour la construction d'une ligne aérienne haute tension

Le présent rapport de mémoire de stage a été rédigé autour de 3 chapitres :

- Chapitre 1 : Généralités
- Chapitre 2 : les grandeurs clés et l'étude théorique d'une ligne aérienne 225 kV
- Chapitre 3 : La présentation du progiciel

CHAPITRE 1 : GENERALITES

I. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

I.1. Cadre institutionnel du secteur d'électricité

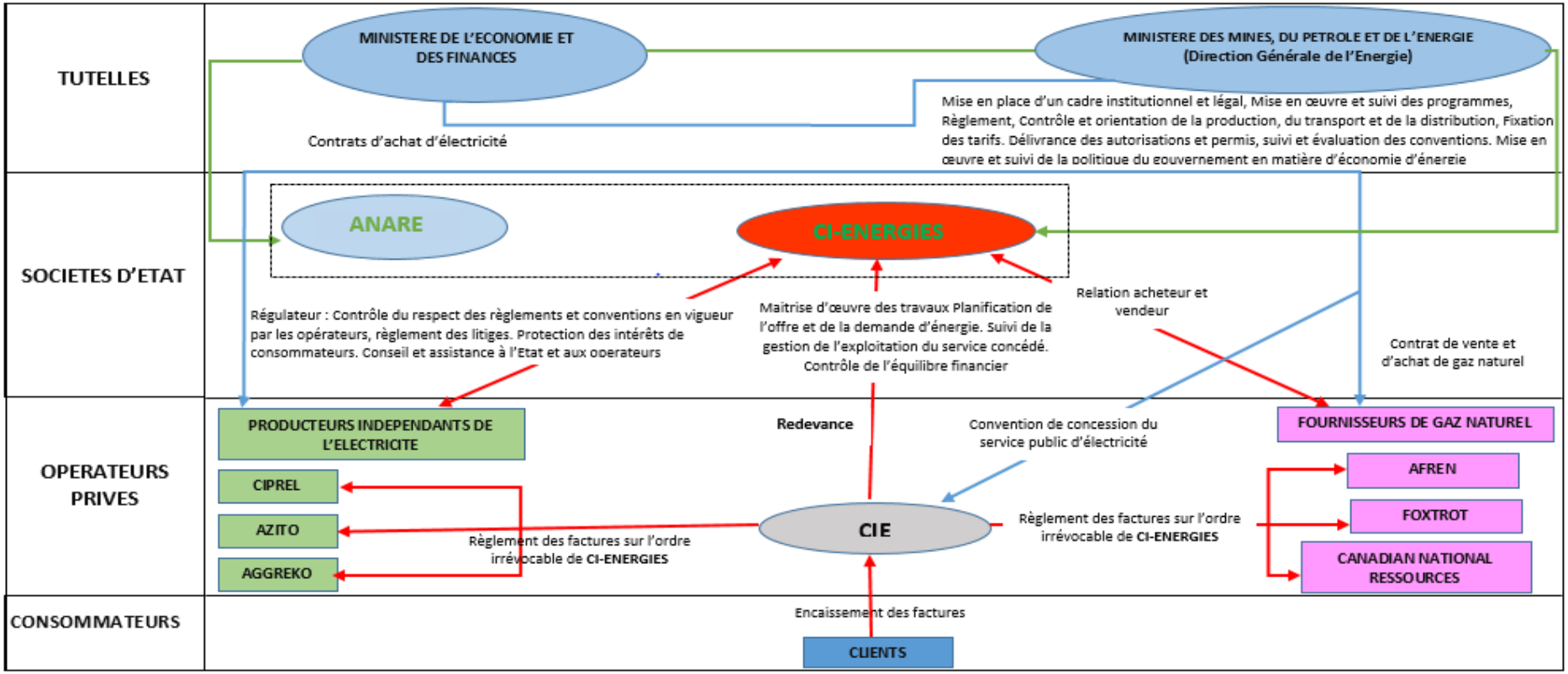


Figure 1: Cadre institutionnel du secteur d'électricité

I.2. Historique

La Société des Energies de Côte d'Ivoire (**CI-ENERGIES**) a été créée par décret n° 2011-472 du 21 décembre 2011. Elle est née de la fusion des Sociétés d'Etat dénommées Société de Gestion du Patrimoine du Secteur de l'Electricité (SOGEPE) et Société d'Opération Ivoirienne d'Electricité (SOPIE) lors du Conseil des Ministres du mercredi 21 décembre 2011. CI-ENERGIES est régie par les dispositions de la loi n° 70-633 du 5 novembre 1970 fixant le régime des sociétés d'Etat avec un capital de vingt milliards (20 000 000 000) de F CFA.

I.3. Situation géographique

CI-ENERGIES a son siège social fixé à Abidjan, en République de Côte d'Ivoire et plus précisément dans la commune du plateau, place de la république, immeuble EECI.

Son adresse est 01 BP 1345 Abidjan 01, téléphone : (225) 20 20 60 00, Fax : 20 33 26 82.

I.4. Valeurs et vision

Pour vision de **bâtir la Côte d'ivoire ''Electrique'' de demain**, CI-ENERGIES s'inscrit dans un Système de Management de la Qualité depuis le 18 février 2014, la société intègre les volets Hygiène, Sécurité et Environnement selon les références ISO 9001 ; 2008 OSHAS 18001 et ISO 14001. Les principaux axes stratégiques de cette démarche SMI-QSE sont les suivants :

Axe 1 : Rétablissement de l'équilibre financier et renforcement des capacités d'investigation ;

Axe 2 : Adéquation de l'offre et de la demande de l'énergie ;

Axe 3 : Développement de l'accès à l'électricité ;

Axe 4 : Développement des énergies nouvelles, des énergies renouvelables et des économies d'énergies ;

Axe 5 : Renforcement des capacités en ressources humaines et en moyens techniques ;

Axe 6 : Rationalisation du cadre institutionnel, renforcement du cadre normatif et règlementaire ;

Axe 7 : Conquête de confiance des bailleurs de fonds, des institutions et organismes nationaux et internationaux ;

Axe 8 : Renforcement des relations avec les producteurs indépendants, le concessionnaire et les gaziers.

Les valeurs de CI-ENERGIES sont : « Responsabilité, Engagement, Sens du Devoir, Ethique et Transparence ».

I.5. Missions

La société a pour objet d'assurer le suivi de la gestion des mouvements d'énergies électriques ainsi que la maîtrise d'œuvre des travaux revenant à l'Etat en tant qu'autorité concédante.

A cet effet, la société prend toutes les dispositions nécessaires pour assurer :

- La planification de l'offre et de la demande en énergie électrique, en coordination avec le ministère en charge de l'énergie ;
- La maîtrise d'œuvre des investissements en matière d'extension, de renforcement et de renouvellement du réseau de transport et d'électrification rurale ;
- Le suivi de la gestion des fonctions d'achat, de transport et de mouvement d'énergie électrique ;
- La gestion administrative, comptable et financière de l'ensemble des éléments formant le domaine public et privé, les ouvrages et les équipements constituant les actifs et immobilisations de l'Etat ;
- Le suivi de la gestion de l'exploitation du service concédé ;
- La maîtrise d'ouvrage des travaux relatifs aux infrastructures, ouvrages et équipements du secteur de l'électricité ;

- La gestion au nom et pour le compte de l'Etat de la redevance prévue par la convention de concession de service public de production, transport, distribution, importation et exportation de l'électricité ;
- La tenue des comptes consolidés et le contrôle de l'équilibre financier du secteur de l'électricité ;

I.6. Organisation

CI-ENERGIES est présidée par un conseil d'administration suivi de la direction générale, l'organe exécutif. Au sein de CI-ENERGIES, nous avons :

Au titre des Directions :

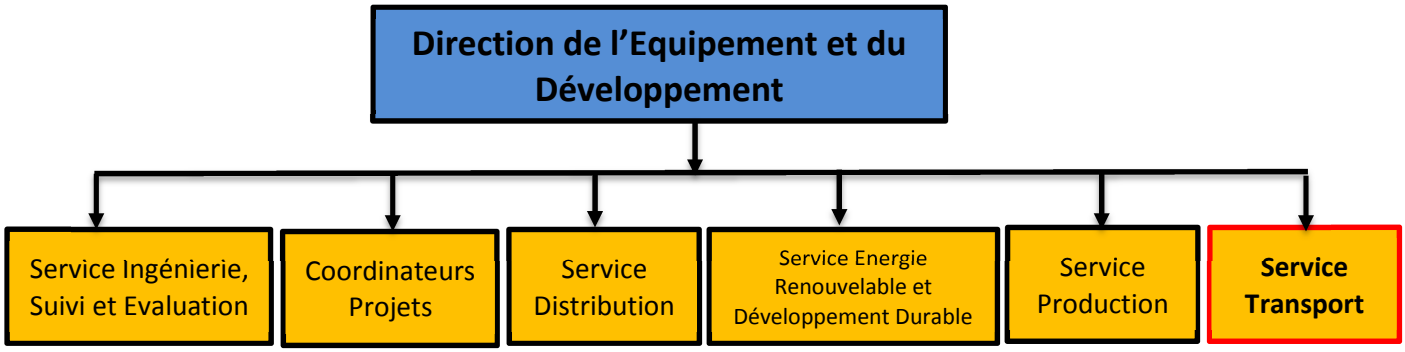
- ✓ Direction des Etudes et de la Planification ;
- ✓ Direction de l'Equipement et du Développement à laquelle nous avons été affectés ;
- ✓ Direction de l'exploitation ;
- ✓ Direction Financière et Comptable ;
- ✓ Direction des Marchés et de la logistique ;

Au titre des Services rattachés à la Direction Générale :

- ✓ Direction du projet SOUBRE ;
- ✓ Cellule Audit interne ;
- ✓ Cellule Juridique ;
- ✓ Cellule Business Unit ;
- ✓ Cellule Communication ;
- ✓ Cellule ressources humaines ;

I.7. Présentation de la Direction de l'Equipement et du Développement (DED)

5.1. Organisation de la DED



Service d'accueil

Organigramme 1: Structure organisationnelle de la DED

5.2. Mission de la DED

La Direction des Equipements et du Développement a pour missions :

- ✓ Assurer la maitrise d'œuvre des ouvrages de production, transport et distribution (développement, extension, renforcement, renouvellement du réseau et électrification rurale) ;
- ✓ Assurer le développement des énergies nouvelles, des énergies renouvelables et des activités d'économies d'énergies ;
- ✓ Réaliser les études d'ingénierie des projets ;
- ✓ Assurer le suivi et évaluation des projets ;
- ✓ Assurer la coordination générale des projets cofinancés par des bailleurs de fonds ;
- ✓ Mettre en œuvre les plans directeurs de développement du secteur électrique ;
- ✓ Disposer d'un bordereau de prix régulièrement mis à jour ;

5.3. Service d'accueil

Le Service de Transport et du réseau d'Interconnexion a pour mission au sein de la

DED d'assurer la maitrise d'œuvre des ouvrages de transport (développement, extension, renforcement et de mettre en œuvre les plans directeurs de développement pour le domaine du transport d'électricité HTB.

II. PRESENTATION DU THEME

II.1. Enoncé du thème

Le thème soumis à notre étude s'intitule: « **mise en place d'un outil de dimensionnement mécaniques d'une ligne électrique haute tension** ».

II.2. Contexte du thème et situation géographique du projet

Dans l'optique de satisfaire les prévisions énergétique, l'Etat Ivoirien, pour son Programme d'Urgence de Réhabilitation du Secteur de l'Electricité (PURE), avec pour maître d'ouvrage le Ministère du Pétrole, de l'Energie et du Développement des Energies Renouvelables (MPEDER), a lancé un projet de développement du réseau de transport et d'électrification rurale avec pour objectif le renforcement des infrastructures de transport d'énergie en vue de compléter le réseau primaire, d'en assurer la pérennité, de répondre dans le même temps à la demande énergétique .

La **CI-ENERGIES**, en charge d'assurer la planification, la maîtrise d'œuvre des projets relevant de l'Etat ivoirien en tant qu'autorité concédante, ainsi que le suivi de la gestion des mouvements d'énergie électrique , est aussi responsable de la maîtrise d'œuvre des investissements en matière de renforcement, de renouvellement et de développement des ouvrages pour le transport d'énergie.

- Dans le cadre de ce projet de Développement et de Réhabilitation du Réseau Electrique de la Côte d'Ivoire (dit Projet D2RECI CNEEC voir figure ci-dessous) au cours duquel l'Etat prévoit pour la partie ligne, la construction de 1682 km de ligne haute tension est réparti comme suit :
  - Lignes 225 kV : 946 km

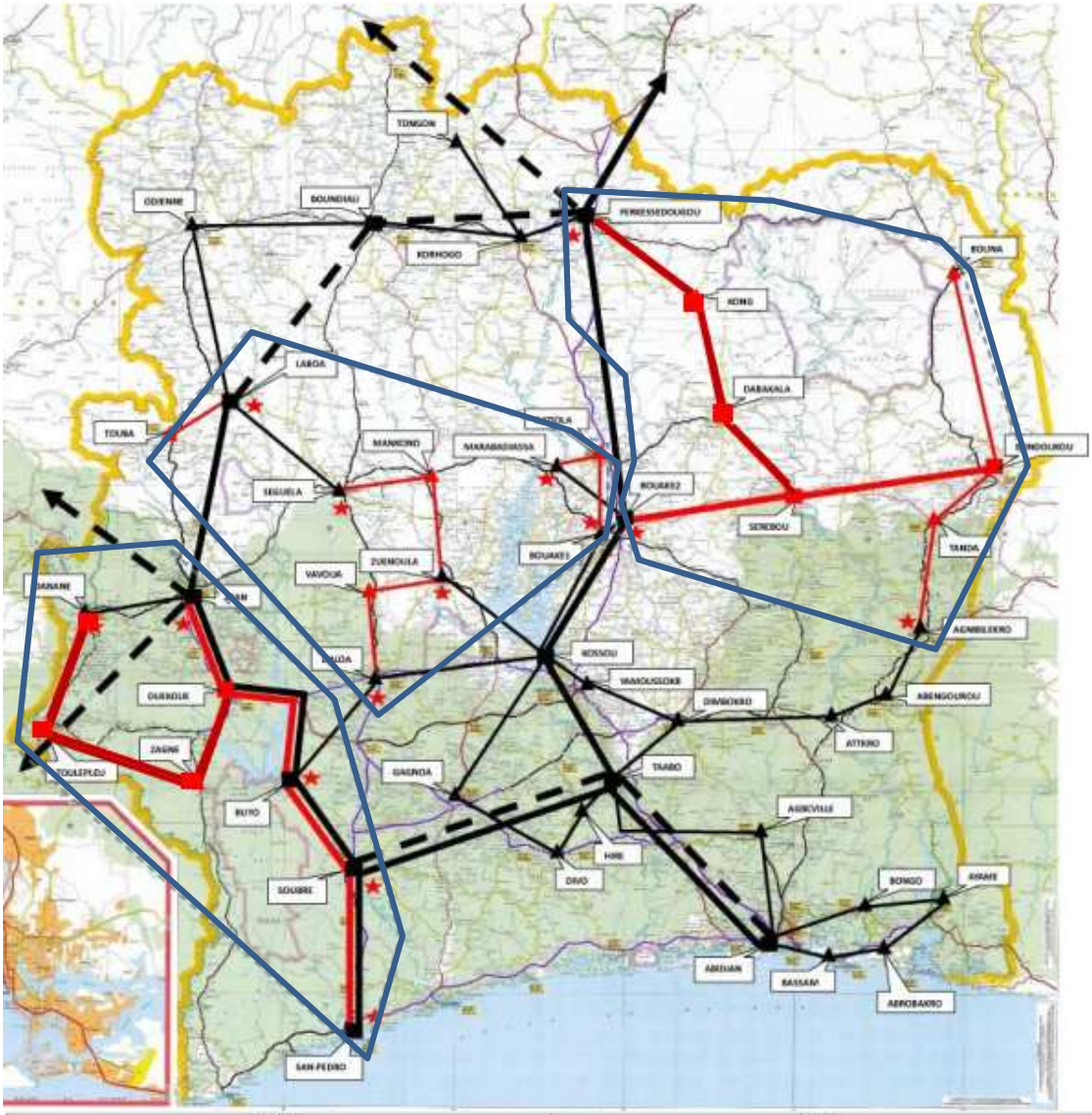
- Lignes 90 kV : 736 km

Ce projet touche trois (03) zones essentielles de la Côte d'Ivoire, à savoir :

- La zone Ouest, notamment dans les régions de TOMPKI, GUEMON et CAVALY, le projet consistera à :
  - ✓ La construction de la ligne 225 kV : Man-Duékoué, Duékoué-Buyo, Buyo-Soubré, et Zagné-Toulepleu.
  - ✓ La construction de la ligne 90 kV : Touleupleu_Mine d'Ity et Laboa-Touba.
- La zone Centre-Ouest, notamment dans les regions du HAUT-SASSANDRA, du WORADOUGOU, du BERE et de la MARAHOUE, le projet consistera à :
  - ✓ La construction de la ligne 225 kV : Duékoué-Buyo
  - ✓ La construction de la ligne 90 kV : Daloa-Vavoua, Vavoua-Zuenoula, Zuenoula-Mankono et Mankono-Séguéla.
- La zone Nord-Est, notamment dans les régions du GBEKE, d'IFFOU, d'INDENIE-DJUABLIN, du GONTOUGO, du BOUNKANI et du TCHOLOGO, le projet consistera à :
  - ✓ La construction de la ligne 225 kV : Bouake 2-Serebou, Serebou-Bondoukou, Serebou-Dabakala, Dabakala-Kong, Kong-Ferkessedougou.
  - ✓ La construction de la ligne 90 kV : Agnibilekro-Tanda, Tanda-Bondoukou, Bondoukou-Bouna.

Il importe pour CI-ENERGIES de mettre en place un outil de dimensionnement mécanique pour la vérification des notes de calcul afin d'assurer la durabilité, la solidité et garantir les ouvrages de transport électrique. Ceci permettra d'éviter l'effondrement des pylônes, comme survenu dans la nuit du 26/07/99 sur le tronçon d'interconnexion Côte d'Ivoire Burkina Faso par un vent nul à température de 24°C après la fin des travaux de déroulage et de mise en tension mécanique des câbles

intervenue dans la journée du 26/07/99. Ce projet permettra de satisfaire la demande d'énergie au plan national et d' interconnexions avec les pays voisins à court, moyen et long terme.



225KV	90KV
Poste existant	Poste existant
Poste en projet	Poste en projet
Ligne de transmission existante	Ligne de transmission existante
Ligne de transmission en projet	Ligne de transmission en projet
Poste à construire	Poste à construire
Poste à réaménager	Poste à réaménager
Ligne de transmission à construire	Ligne de transmission à construire

Figure 2 : Présentation des différentes zones du projet **Source** : CI-ENERGIES

C'est dans ce cadre que CI-ENERGIES à travers son Département d'Equipement et Développement et plus particulièrement son service de transport et Réseau d'interconnexion s'est engagé à faire l'étude suivante : « mise en place d'un outil de dimensionnement mécaniques d'une ligne électrique haute tension »

II.3. Problématique

La problématique qui suscite notre travail est la suivante :
Comment vérifier des calculs mécaniques des lignes hautes tensions afin d'éviter la reproduction du sinistre sur le tronçon d'interconnexion de la ligne 225 kV des réseaux électriques de la côte d'ivoire et du Burkina Faso.

II.4. Objectifs du thème

a. Objectif général

L'étude vise à trouver un moyen de vérification des notes de calcul proposés par différentes entreprises contractant pour la réalisation des différents ouvrages de construction de ligne haute tension.

b. Objectif spécifique

L'objectif poursuivi par ce stage est de mettre en place un outil de calcul des paramètres servant au dimensionnement mécaniques des lignes électriques (actualisation des caractéristiques techniques, calcul de grandeurs physiques, des charges transmises aux supports, etc.) de transport du réseau électrique ivoirien dans le cadre du projet dénommé <<CNEEC >>.
La mise en place de cet outil permettra d'obtenir une base de données des paramètres mécaniques des différents projets réalisés en Côte d'ivoire.

c. Travail demandé

Pour la réalisation de l'étude, il nous est demandé de :

- Définir les grandeurs intervenant dans le dimensionnement mécanique d'une ligne électrique aérienne ;
- Etudier la construction mécanique d'une ligne électrique 225 kV
- Réaliser un outil de dimensionnement mécanique d'une ligne aérienne

d. Résultats attendus

Les résultats attendus à l'issue de cette étude sont :

- Identification des principales caractéristiques techniques d'une ligne (Les caractéristiques des conducteurs, des câbles de garde, des isolateurs…)
- Mettre en place un progiciel de dimensionnement mécanique d'une ligne arienne.

II.5. Approche méthodologique

Pour mener à bien cette étude, l'approche méthodologique adoptée s'est articulée autour des principaux axes suivants :

- Revue documentaire sur la construction des lignes aériennes hautes tensions,
- Dimensionnement des grandeurs mécaniques d'une ligne électrique 225 kV,
- Conception d'un progiciel sous l'application EXCEL.

a. Recherche documentaire

La Revue documentaire a permis de se familiariser à la documentation nécessaire à la construction des lignes aériennes à haute tension incluant différente norme telle que EN 50341 relative à la construction des lignes électriques. Cette recherche documentaire a amélioré notre connaissance des différentes plages de tension, les éléments de protection nécessaires pour le dimensionnement mécanique d'une ligne aérienne haute tension. Elle nous a enseigné les différentes étapes de dimensionnement et les normes de sécurité à respecter.

b. Dimensionnement des grandeurs mécaniques d'une ligne électrique 225 kV

Cette rubrique a permis de déterminer de façon théorique toutes les grandeurs nécessaires au dimensionnement d'une ligne aérienne 225 kV. Les hypothèses météorologiques (température, pression….), le niveau de tension électrique et la tension de rupture de l'isolateur étant des données de base.

c. Conception du progiciel

Dans cette partie, nous concevons un outil de calcul sous l'application EXCEL permettant d'avoir en entrée les données météorologique (la température, la pression de la zone, la portée moyenne…) et en sortie les grandeurs mécaniques nécessaires et essentielles au dimensionnement d'une ligne aérienne à haute tension.

Nous abordons maintenant la deuxième partie présentant quelques généralités des lignes aériennes et le dimensionnement théorique d'une ligne aérienne 225 kV

CHAPITRE 2 : LES GRANDEURS CLES ET L'ETUDE THEORIQUE D'UNE LIGNE ELECTRIQUE A HAUTE TENSION

I. Généralité des lignes aériennes

I.1. Définition et caractéristiques

Les lignes électriques très hautes tension assurent le transport de grandes quantités d'énergie par ligne sur de grandes distances depuis les grandes centrales de production vers les grands postes régionaux. Elles servent aussi à l'interconnexion des réseaux électriques et permettent aussi la réalisation des grandes connexions internationales. Ces lignes peuvent être aériennes, souterraines ou même parfois sous-marines et fonctionnent généralement en courant alternatif triphasé, biphasé, mais peuvent être aussi en courant continu.

Les lignes électriques très hautes tension ont pour but de réduire les pertes en ligne par l'élévation de la tension permettant ainsi de réduire le courant dans les conducteurs. Ces pertes dépendent de deux (02) critères : ***La résistance de la ligne et le courant dans la ligne.***

L'utilisation de la haute tension permet, à puissance transportée équivalente, de diminuer le courant dans la ligne et donc les pertes. Par ailleurs, pour diminuer la résistance, il n'y a que deux facteurs, la résistivité des matériaux utilisés pour fabriquer les câbles de transport, et la section de ces câbles. Ces lignes HTB font partir du domaine qui comprend les valeurs de tension supérieures à 50 kV en courant alternatif.

Elles ont une tension de fonctionnement de catégorie 3, c'est-à-dire :

63 kV, 90 kV, 225 kV, 400 kV etc

En Côte d'Ivoire, les lignes hautes tension sont caractérisées par deux niveaux de tension qui sont : le 225 kV et le 90 kV avec une projection pour les projets future de 330 kV et 400kV.

I.2. Les principaux constituants d'une ligne aérienne à haute tension

Les lignes électriques aériennes hautes tension comprennent essentiellement quatre éléments :

✓ Les conducteurs

Ils constituent l'élément de base du transport d'énergie, c'est-à-dire l'élément métallique assurant la liaison et le passage du courant électrique. Ils sont généralement constitués de métaux de bonne conductivité électrique. Pour la production des conducteurs, les métaux les plus utilisés sont le cuivre ; l'aluminium, l'acier et enfin l'almelec qui est un alliage d'aluminium. Le tableau 1 en annexe 3 présente les caractéristiques de ces métaux.

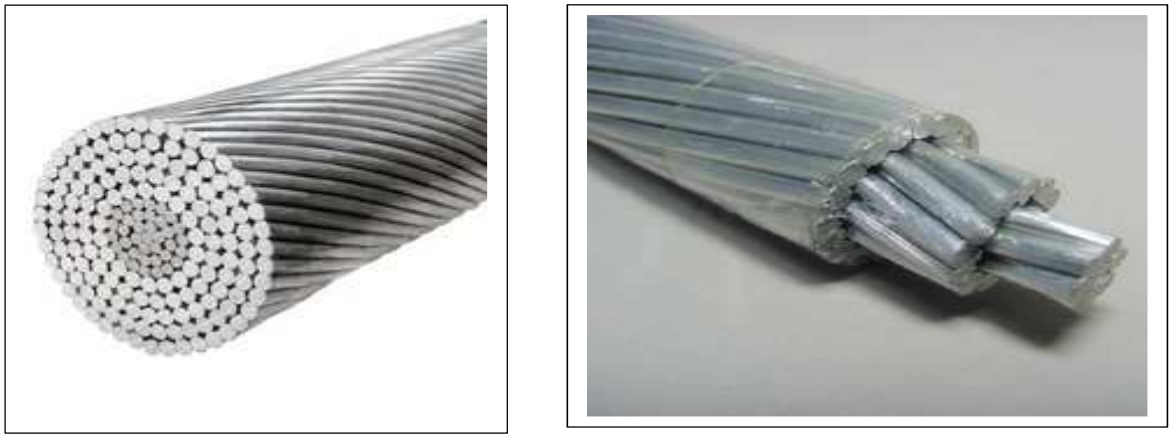


Figure 3: conducteur en alliage d'aluminium

✓ Les câbles de garde

Placés au-dessus des conducteurs de phase, les câbles de garde jouent un rôle important dans la qualité de service des lignes :

- ils protègent les conducteurs contre les coups de foudre directs et diminuent le nombre des défauts affectant les lignes à haute tension ;
- ils assurent l'interconnexion des mises à la terre dans les zones où les résistances de mises à la terre sont élevées,

- ils diminuent l'élévation du potentiel des supports au moment d'un défaut car le courant monophasé se répartit entre plusieurs prises de terre ; ils améliorent, de ce fait, la sécurité des personnes se trouvant à proximité ;
- ils diminuent, enfin, l'induction dans les circuits de télécommunication ou les canalisations enterrées qui présentent un parallélisme avec la ligne aérienne.

Pour toutes ces raisons, les câbles de garde sont systématiquement installés sur les lignes à haute tension HTB, en respectant les mêmes règles de dimensionnement mécanique que les conducteurs de phase. Les vérifications électriques et mécaniques doivent être faites systématiquement dans chaque projet.

Ils existent deux (2) types de câble de garde qui sont :

➲ Câbles de garde almélec-acier (Le phlox 94) :

Dans le but d'obtenir des câbles très résistants mécaniquement pour les zones fortement givrées ou les lignes de montagne, des câbles almélec-acier sont réalisés avec des fils d'almélec et de l'acier à très haute résistance mécanique.

➲ Câble de garde à fibres optiques incorporées (OPGW) pour la télécommunication.

Les câbles comportant des fibres optiques installées presque systématiquement sur les lignes HTB permettent des longueurs importantes de transmission et ont l'avantage d'être indifférents à tout phénomène électrique.

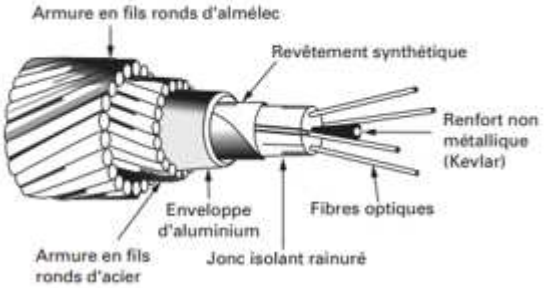


Figure 4: Câble de garde OPGW

✓ Les isolateurs

Réalisés en verre, en céramique ou en matériau synthétique, les isolateurs servent d'élément de fixation entre les conducteurs et les pylônes.

Ils ont une double fonction :

- *Electrique* : ils empêchent que les conducteurs nus soient en contact avec les supports ou entre eux, évitant ainsi des défauts graves de fonctionnement ou de pertes exagérées ; ils assurent l'isolement électrique des conducteurs et les autres équipements à la masse.
- *Mécanique* : il doit résister aux efforts transmis par les câbles (poids propre, vent, givre…) et aux réactions des supports.

Caractéristiques des isolateurs

Les grandeurs électriques les plus utiles pour définir une chaîne d'isolateurs ou un isolateur sont :

- la tension de tenue au choc à sec
- la tension de tenue à fréquence industrielle sous pluie
- la tension de tenue sous pollution qui est la valeur prépondérante pour le choix de l'isolateur

Les grandeurs mécaniques pour définir le choix d'une chaîne d'isolateurs sont :

- La résistance mécanique à la traction
- La résistance mécanique à la flexion

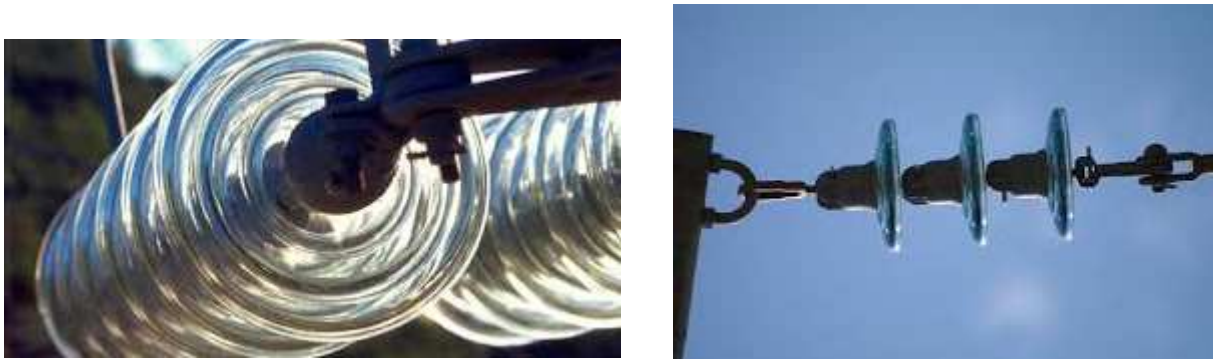


Figure 5: Isolateur en verre

✓ Les supports

Les supports de lignes en général, les pylônes et les poteaux en particulier sont des maillons nécessaires à la constitution des lignes aériennes de transport et de distribution de l'électricité. De forme et d'importance très variées, les supports peuvent aller des simples poteaux en bois ou en béton, d'une douzaine de mètres en hauteur, aux constructions métalliques des pylônes treillis d'acier, de plus de 50 m de hauteur pour maintenir les conducteurs à une distance de sécurité par rapport au sol. Les supports sont définis en fonction des contraintes mécaniques principalement créées par les conducteurs qu'ils supportent et en fonction des contraintes d'isolement électrique.

De façon générale le transport des lignes de la troisième catégorie (HTB) se fait en utilisant les supports en acier. Ces supports sont généralement des pylônes en treillis de toutes formes et de toutes dimensions. Formés d'assemblage de cornières ou de tubes assemblés par boulon ou rivet, Ils peuvent se transporter et se monter par élément.

❖ La classification des pylônes en fonction de la disposition de leur console

Parmi les types de console utilisés on distingue deux grandes classes :

- L'une dans laquelle les conducteurs sont disposés à des étages différents. Pylônes triangle, drapeau, double drapeau, double triangle.

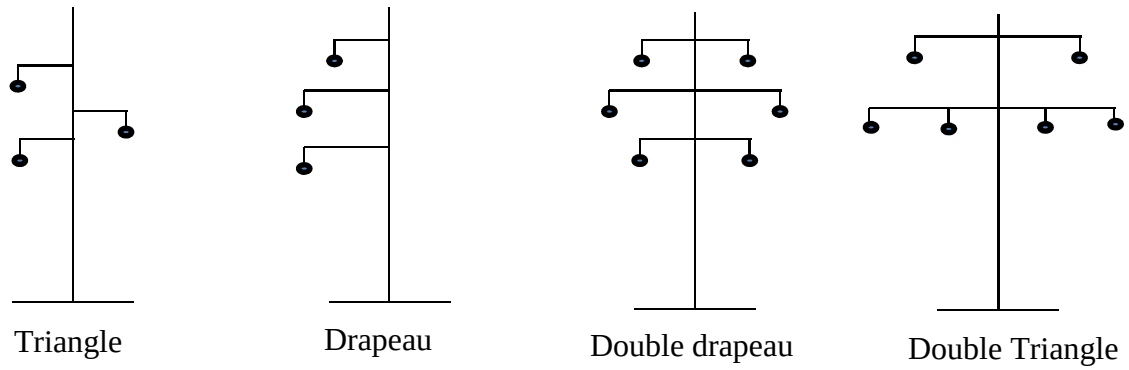


Figure 6: Pylônes à étages différents

- L'autre dans laquelle les conducteurs sont disposés au même niveau ou à des niveaux peu différents. Pylônes de type chat, pylônes à nappe horizontale.

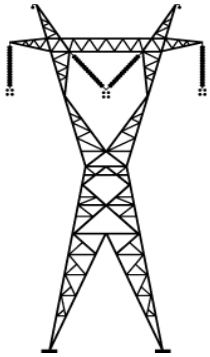


Figure 7: Pylône de type chat

- La classification selon la résistance aux efforts

La famille de pylône est constituée par un ensemble de supports ayant les silhouettes voisines mais présentant des résistances mécaniques différentes. Suivant leur fonction sur la ligne les pylônes sont dimensionnés pour résister à un certain effort.

- Pylône type A : Les pylônes d'alignement utilisés pour les angles faibles de 0 à 3° et toujours situés sur la ligne droite d'un canton.
- Pylône type B : Les pylônes d'angle de 3 à 30°, pouvant être utilisés comme pylônes d'arrêt, sont généralement situés entre deux cantons.
- Pylône type C : Les pylônes d'angle de 30 à 60°, pouvant être utilisés comme pylônes d'arrêt.

Figure 8 : Pylône d'alignement **Figure 9:** Pylône d'angle **Figure 10 :** Pylône d'arrêt

II. LES STATISTIQUES ET L'ETAT DU RESEAU IVOIRIEN EN 2016

Dans le cadre de notre stage sur les lignes électriques de transport, il nous paraît judicieux de prendre connaissance du réseau électrique existant avant toute étude sur les lignes électriques en Côte d'Ivoire.

Une fois produite, l'énergie électrique ne peut se conserver. Ainsi nous passons directement à la distribution dans les différents points d'utilisation via les lignes électriques de transport et les postes de transformation. Ce qui confère au réseau électrique ivoirien un patrimoine riche de six (06) barrages hydroélectriques et de quatre (04) centrales thermiques pour la production, de quarante-huit (48) postes de transformation 225 kV et 90 kV, dix (10) postes de transformation 33/15 kV et des lignes électriques pour le transport et la distribution.

1. La production électrique en côte d'ivoire

La production d'énergie électrique en Côte d'Ivoire se fait par l'entremise de barrages hydroélectriques et de centrales thermiques.

1.1. Les barrages hydroélectriques

Les barrages hydroélectriques produisent l'énergie électrique par la chute d'une retenue d'eau en altitude sur les aubes d'une turbine qui, accouplée à un alternateur produit cette énergie électrique.

Les barrages hydroélectriques dont dispose le réseau électrique ivoirien sont :

- Sur le fleuve la Bia, les barrages d'Ayamé 1 et 2.
  - Ayamé 1 mis en service en 1959 délivre une puissance totale de 20 MW
  - Ayamé 2 mis en service en 1965 délivre une puissance totale de 30 MW ;
- Sur les rapides du Grah, le barrage de Faye mis en service en 1983 avec une puissance installée de 5 MW ;
- Sur le fleuve Sassandra, le barrage de Buyo mis en service en 1980 et délivre 165 MW ;

➲ Sur le fleuve Bandaman, le barrage de Kossou et de Taabo

- le barrage de Kossou mis en service en 1972 délivre 174 MW
- le barrage de Taabo mis en service en 1979 délivre 210 MW

1.2. Les centrales thermiques

Au niveau des centrales thermiques, l'énergie est produite à partir de la combustion du gaz naturel par l'air comprimé et une étincelle d'amorçage. La détente de ce gaz chaud sur les ailettes d'une turbine lui restitue son énergie thermique. La turbine est alors entraînée par les gaz d'échappement dans un mouvement de rotation et acquiert ainsi de l'énergie mécanique. L'accouplement de la turbine à un alternateur transforme cette énergie mécanique en énergie électrique. Ci-dessous est présenté le parc de production thermique ivoirien.

Centrale	**Année de mise en service**	**Puissance installée (MW)**
Vridi TAG	1984	100
Ciprel 1	1995	105
Ciprel 2	1998	115
Azito 1	1999	148
Azito 2	2000	148
Ciprel 3	2009	115
Aggreko 1	2010	74
Aggreko 2	2012	37
Ciprel 4	2013	115
Aggreko 3	2013	99
Ciprel TAV	2015	119
Azito TAV	2015	145
Puissance totale installée (MW)		**1 320**

Tableau 1 : La liste des centrales thermiques Ivoirien

2. Les postes et les lignes de transport

Pour assurer l'acheminement de toute l'énergie produite au niveau des barrages et centrales thermiques vers les points d'utilisations, le réseau électrique dispose d'un ensemble de postes de transformation et de lignes électriques, les postes de transformation étant utilisés pour changer le niveau de tension. Le réseau électrique ivoirien dispose de quarante-huit (48) postes de transformation haute tension et de lignes constituées de :

- 15 postes de 225 kV
- 33 postes de 90 kV
- 2 469 km de lignes 225 kV ;
- 2 664 km de lignes 90 kV ;

Les longueurs des lignes et câbles en moyenne et basse tension sont repartis comme suit :

- 23 516 km de câbles 15 kV et 33 kV
- 20 746 km de câbles Basse tension

Cependant l'élément essentiel assurant la transition du courant électrique entre les postes est le conducteur.

3. Les caractéristiques des câbles utilisés sur le réseau ivoirien

Le tableau suivant donne les caractéristiques principales de ces câbles conformes à la norme française NFC34-125.

Tableau 2 : Caractéristique des câbles ASTER 570mm² et Phlox 94

CARACTERISTIQUES	UNITES	ASTER 570	PHLOX 94	OPGW

Section nominale	mm²	570	94	93,31
Section effective almélec	mm²	570,22	51,95	
Section effective acier	mm²	-	42,12	
Section totale	mm²	570,22	94,07	
Diamètre extérieur	Mm	31,1	12,70	13,20
Poids moyen non graissé	daN/m	1,574	0,481	0,490
Module d'élasticité final	daN/mm²	5500	11600	12700
Coefficient de dilatation linéaire	10^{-6}/°C	23,0	14,7	14,7
Charge de rupture calculée	daN	18360	8035	8000
Résistance ohmique en CC à 20 °C	Ω/km	0,058	0,642	0,48
Intensité admissible en régime permanent	A	840		
Nombre de fils almélec	-	61	15	
Diamètre des fils almélec	Mm	3,45	2,10	
Nombre de fils d'acier	-	-	19	
Diamètre des fils d'acier	Mm	-	1,68	

4. Les caractéristiques des pylônes existant sur le réseau ivoirien

Les pylônes utilisés sur le réseau ivoirien en fonction des études de tracé des lignes et de la topologie des terrains traversés, sont de trois types :

- Pylône type A : pylône de suspension en alignement : angle 0 à 3°
- Pylône type B : pylône d'ancrage et anti-cascade en alignement : angle 3 à 30°
- Pylône type C : pylône d'ancrage en angle : angle 30 à 60°

- Pylône type D : pylône d'arrêt : angle 30 à 60°

5. Réseau interconnecté de la Côte d'Ivoire

Le système électrique ivoirien intégré au réseau interconnecté Ouest Africain doit permettre au secteur de l'électricité de satisfaire la demande nationale et d'honorer pleinement ses engagements d'exportation ou en provenance des pays voisins notamment :

- le Burkina et le Mali à partir du poste de Ferké ;
- le Liberia, la Sierra Leone et la Guinée grâce au projet d'interconnexion Côte d'Ivoire – Liberia -Sierra Leone-Guinée (CLSG) en cours de mise en œuvre ;
- le Ghana, le Togo et le Bénin grâce au renforcement de l'interconnexion Côte d'Ivoire - Ghana par la construction d'une ligne à 330 kV.

Les annexes 4 et 5 présentent le réseau interconnecté de la côte d'Ivoire en 2015 et à l'horizon 2030

III. ETUDE THEORIQUE D'UNE LIGNE ELECTRIQUE 225 kV

Notre dimensionnement se portera sur l'étude électrique et mécanique d'une ligne 225 kV et sera basée sur les caractéristiques du réseau existant et des projets de construction en Côte d'Ivoire.

Nous présenterons tout d'abord la méthodologie de dimensionnement et ensuite les différents calculs pour l'étude électrique et mécanique d'une ligne aérienne haute tension.

1. Définition

a. Les notions essentielles pour le dimensionnement mécanique d'une ligne électrique à haute tension

Avant le dimensionnement d'une ligne électrique, il faudra d'abord un tracé préliminaire de la ligne permettant la détermination des points d'angle et la distance

totale de la ligne. Déterminer les différents points d'implantation des pylônes après le levé topographique, l'étude géotechnique et en fonction des obstacles rencontrés.
La caractéristique principale de la ligne électrique est sa tension entre phase qui définit l'isolement de la ligne en toutes circonstances, entre les conducteurs de phase, entre les conducteurs et les équipements au potentiel de terre par des intervalles d'air soumis en permanence à la tension de ligne.

b. La définition géométrique

Afin de garantir la stabilité des lignes électriques aériennes, en particulier des pylônes, il est nécessaire d'effectuer un calcul minutieux sur des grandeurs intervenant au niveau de l'étude mécanique. Parmi ces grandeurs, nous avons :

- C_1 : La distance minimale entre phase (pylônes) (m)
- C_2 : La distance minimale entre phase – câble de garde (m)
- f : La flèche (m)
- Li : Longueur de la chaîne de suspension (m)
- a : Portée c'est la distance entre deux supports (m)
- Pv : Portée vent est la distance entre les milieux de deux portées consécutives (m)
- Pp : Portée poids est la distance entre les points les plus bas de deux portées consécutives (m)
- Profil en long : représentation d'une coupe verticale suivant l'axe de la ligne

Nous présentons un exemple de profil en longs expliquant les différents éléments cités au-dessus.

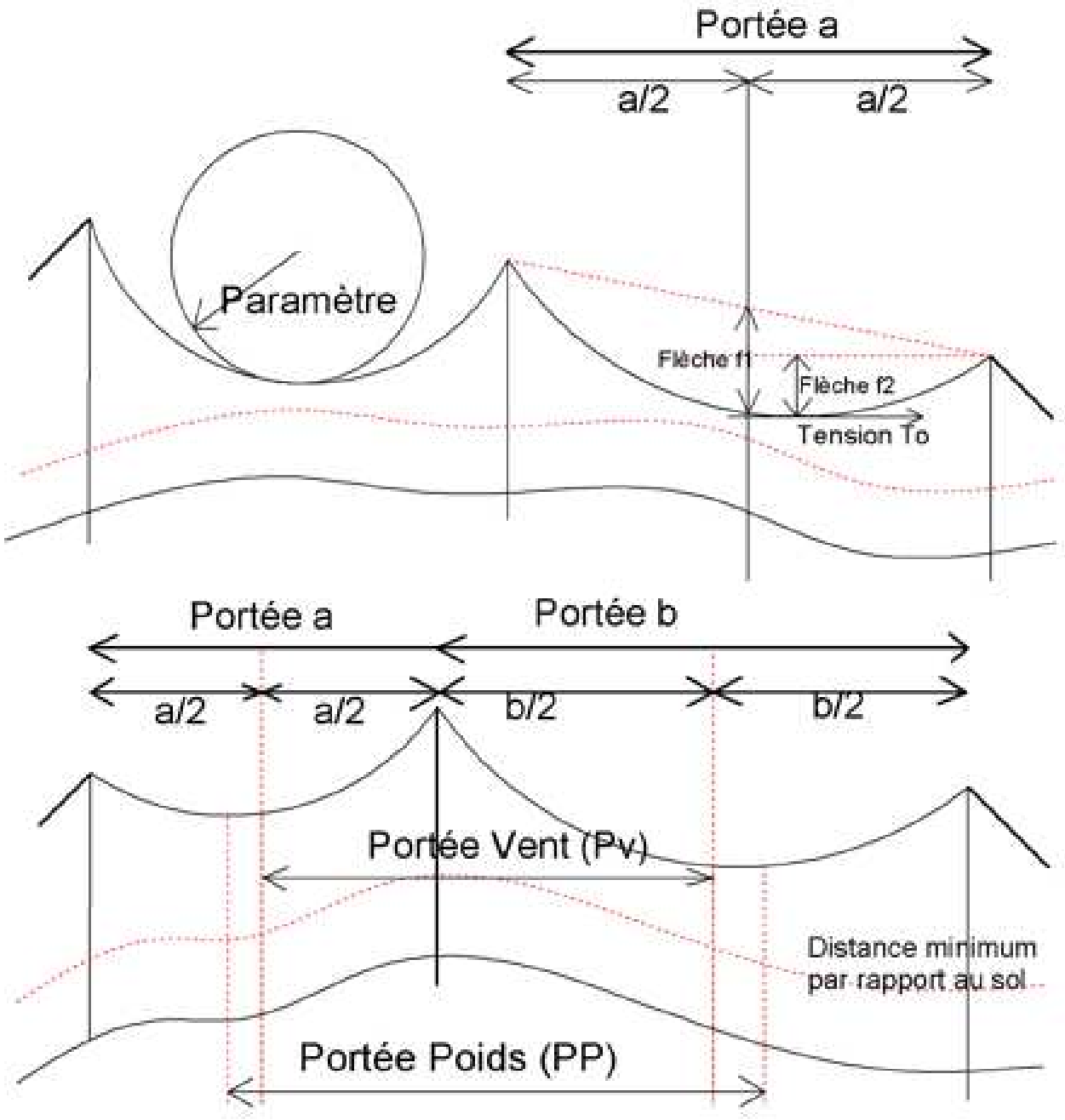


Figure 11 : Un exemple de profile en long d'une ligne

2. Dimensionnement géométrique

2.1. Distance d'isolement

La détermination de la distance d'isolement est complexe, sur la base de certaines hypothèses, l'arrêté technique français nous donne des distances minimales à respecter entre le conducteur et son environnement. Dans le tableau ci-dessous, nous présentons les valeurs données par l'arrêté technique interministériel du 17 mai 2001 de la France, qui sont les valeurs minimales à respecter et elles peuvent augmenter selon les exigences du maitre d'ouvrage.

Nature de surplomb	**Valeur de l'arrêté technique (m)**	
	90 kV	**225 kV**
Terrains ordinaires	6,5	7
Terrains agricoles	7	7,5
Voies de circulation normales	8,5	8,5
Cours d'eau non navigable	3,5	4
Maison et immeuble	4	5,5

Tableau 3 : Les valeurs d'isolement de référence (**Source** : technique de l'ingénieur)

Dans le cas de notre projet la distance minimale à respecter tout au long de la ligne par rapport au sol est $D_{min} = 7{,}5\ m$ (HTB) avec une majoration 1,75 m au niveau des traversées de voies publiques. Nous choisissons cette valeur $D_{min} = 7{,}5\ m$, car après la construction de la ligne certaines populations reviennent cultiver (cultures vivrières) sous la ligne.

2.2. Espacement des conducteurs et des câbles de garde au milieu de la portée

Selon la norme EN 50341-1, la distance minimale est calculée selon les formules suivantes :

$C_1 = k\sqrt{f_{max} + l_k} + k_1 \times D_{pp}$; La distance minimale entre phase (1)

$C_3 = k\sqrt{f_{max} + l_k} + k_1 \times D_{el}$; La distance minimale entre phase et câble de garde (2)

f_{max}: Le Fléchissement maximal (m) ;

l_k: Longueur de la chaîne d'isolateurs (m)

k: Coefficient, voir la norme EN 50341,

k_1 : On adopte 0,75

D_{pp}: Valeur de l'entrefer à air minimal (interphase), voir la norme EN 50341,

D_{el}: Valeur de l'entrefer à air minimal (phase contre terre), voir la norme EN 50341,

3. L'Hypothèse générale d'étude

3.1. Données de base

- La tension du réseau prise en compte est 225 kV
- La portée nominale est de : a = 400 m
- La portée équivalente de référence est : 475 m

Tableau 4 : Les hypothèses de base[1]

Pression du vent maximale	680 Pa
Pression du vent (vitesse de vent normale)	240 Pa
Epaisseur de glace	0 mm
Niveau de contamination	31 mm/kV (contamination grave)
Niveau iso-kéraunique	120
Pluviométrie moyenne	1900 mm/an
Altitude au-dessus du niveau moyen de la mer	1000 m

[1] Hypothèses Imposées par le maître d'ouvrage dans l'appel d'offre pour projet CNEEC

Taux d'humidité relative maximum de l'air	100%
Taux d'humidité relative minimum de l'air	80%

3.2. Les contraintes météorologiques imposées

Soumise à l'action des variations climatiques durant toute sa durée de vie, les lignes électriques doivent être dimensionnées en fonction du climat de la zone. Les conditions météorologiques jouent un rôle important dans la conception d'une ligne électrique. Il est donc impératif d'en tenir compte pendant la phase d'études car elles permettent la détermination des grandeurs mécaniques. Dans le cadre du projet SINOMACH/CNEEC, les hypothèses qui ont été prises en compte sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Hypothèses	**Conditions**	**Température (°C)**	**Pression (N/m)**	**Tension finale**
A	Etat De Service (EDS)	Température Moyenne : 30	0	≤ 20% tension de rupture
B	Température Minimum	10	240	≤ 40% tension de rupture
C	Vent maximum	Température Moyenne : 30	680	≤ 40% tension de rupture
D	Température Maximale de fonctionnement	75	0	

Tableau 5 : Les contraintes météorologique

Hypothèse A : (la condition de tous les jours)

- Les conducteurs sont à la température moyenne annuelle de la zone
- La pression du vent est nulle

- La tension mécanique admissible ne doit pas dépasser les 20% de la tension de rupture du conducteur

Hypothèse B : (la condition à température minimale)

- La température du conducteur est minimale
- La pression du vent est réduite
- La tension mécanique admissible ne doit pas dépasser les 40% de la tension de rupture du conducteur

Hypothèse C (la condition à plein vent)

- Les conducteurs sont à la température moyenne annuelle de la zone
- La pression du vent est maximale
- La tension mécanique admissible ne doit pas dépasser les 40% de la tension de rupture du conducteur

Hypothèse D (la condition à la température de fonctionnement)

- Les conducteurs sont à la température moyenne annuelle de la zone
- La pression du vent est nulle

4. Choix du conducteur de phase et des câbles de garde

Pour l'étude mécanique au niveau des conducteurs et les câbles de garde, le choix du matériau est très important.

Les câbles de conducteurs de phase sont constitués de l'aluminium-magnésium-silicium ; l'alliage d'aluminium de type ALMELEC ou ASTER : AAAC et au niveau des câbles de garde on a ACS et OPGW.

En Côte d'Ivoire, les ASTER 570 mm² sont utilisés en 225 kV et les ASTER 228 mm² en 90 kV car on fait circuler de façon respective un courant d'intensité maximale de 840A et 480 A qui sont très inférieur au courant admissible. Cependant ces sections peuvent supporter des courants respectifs de 1200 A et 800 A. Les caractéristiques de ces câbles sont conformes à la norme française NF C 34-125.

Nous présentons dans le tableau ci-dessous les caractéristiques du câble de phase

ASTER 570 mm² et les câbles de garde qui seront utilisés dans le Projet de Développement et de Renforcement (PDR) du réseau ivoirien.

Tableau 6 : Les caractéristiques mécaniques des câbles

CARACTERISTIQUES	Conducteur	ACS	OPGW
Nom :	AAAC-570	ACS-95	OPGW-94 (24-âme)
Diamètre : mm	31,1	12,48	13,2
Surface de section : mm²	570.2	95	93,31
Poids unitaire : kg/m	1,576	0,6332	0,525
Résistance à la traction ultime : N	185330	101040	74500
Coefficient de dilatation linéaire : 1/°C	0,000023	0,000013	0,0000147
Module élastique : N/mm²	54000	147200	121800

5. Calcul mécanique sur les conducteurs de phase et le câble de garde

c. Le poids équivalent

Les conducteurs que nous utilisons sont caractérisés par leur charge linéique et donc par leur poids propre ω (N/m). Par ailleurs l'action des facteurs atmosphériques tels que le vent, constitue une surcharge pour ces conducteurs et impose aux chaines d'isolateurs un angle d'inclinaison φ(°). Les supports étant utilisés pour retenir ces conducteurs à une certaine hauteur afin d'assurer la sécurité, il convient de prendre en compte ce poids appelé poids équivalent $p_{équi}$ (N/m) et cet angle d'inclinaison appelé angle de balancement.

[3] Ce qui donne finalement :

(3)

$$p_{équi} = \sqrt{\left(\left(\omega + 0{,}9 \times \pi \times e \times \frac{(e+d)}{1000}\right) \times g\right)^2 + \left(P \times \frac{(2e+d)}{1000}\right)^2}$$ et

$$\varphi = arctan\left(\frac{P \times d}{P_{équi1}}\right)$$

Avec :

ω : le poids lineique du conducteur (kg/m)

e : l'epaisseur de glace (mm)

d : le diamètre du conducteur (mm)

g : le champs gravitationnel (m/s²)

P : la pression du vent (N/m²)

d. Tensions et flèche des câbles

A ce niveau on détermine pour la portée moyenne considérée, la tension dans les câbles et la flèche résultante et ce, dans chacune des hypothèses météorologiques retenues. L'hypothèse de référence étant l'hypothèse EDS dont les détails sont au-dessus. On connaît alors la tension, la température et le poids équivalent dans l'hypothèse 1. Il reste alors à déterminer la tension dans les autres hypothèses ce qui nous conduira aux flèches des conducteurs.

[4] Pour ce faire, on sait que la longueur d'arc d'une portée de niveau (sous l'hypothèse d'un arc de forme parabolique) s'écrit :

$$s = a + \frac{a^3}{24.P^2} \quad (4)$$

Source : Charles AVRIL, éditions Eyrolles (1974)

Si $\boldsymbol{a}$ est la longueur de la portée et $\boldsymbol{P}$ le rapport de la tension (T) du conducteur sur son poids apparent ($p_{équ}$) : $P = T/p$.

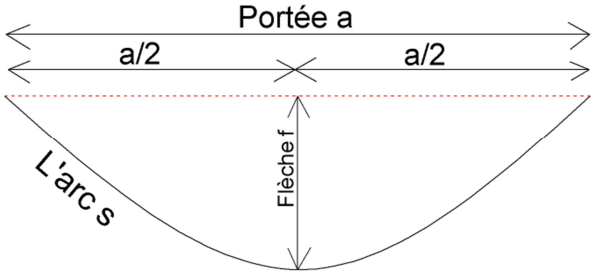


Figure 12 : l'arc de courbure des câbles

[1] La condition de référence (état 1) étant connue, la différence de longueur d'arc **s** entre l'état 2 et l'état 1 correspond à la somme algébrique de l'allongement élastique Δ_1 et de l'allongement thermique Δ_2 , avec:

$$\Delta_1 = s_1 \frac{T_2 - T_1}{ES} \quad \text{et} \quad \Delta_2 = s_1 \alpha(\theta_2 - \theta_1) \tag{5}$$

Où E est le module d'élasticité de Young en (N/mm²) ; α le coefficient de dilatation linéaire en (°C^{-1}) ; S la section en (mm²) ; T_1 *et* T_2 respectivement les tensions du conducteur dans les états 1 et 2 et θ_1 *et* θ_2 les températures les états 1 et 2.
Par cette variation, nous pouvons écrire que :

$$\frac{{p_{equi2}}^2 . a^3}{24 . {T_2}^2} - \frac{{p_{equi1}}^2 . a^3}{24 . {T_1}^2} = s_1 \frac{T_2 - T_1}{ES} + s_1 \alpha(\theta_2 - \theta_1) \tag{6}$$

Avec l'indice 1 pour les paramètres de l'état 1 et l'indice 2 ceux de l'état 2.
La division des deux membres de l'équation par $\boldsymbol{a}$ et en faisant l'hypothèse que $\frac{s_1}{a} \cong 1$, nous obtenons l'équation d'état :

$$\alpha(\theta_2 - \theta_1) = \left(\frac{{p_{equi2}}^2 . a^2}{24 . {T_2}^2} - \frac{T_2}{ES}\right) - \left(\frac{{p_{equi1}}^2 . a^2}{24 . {T_1}^2} - \frac{T_1}{ES}\right) \tag{7}$$

L'objectif de cette étude étant la détermination des paramètres dans l'état 2, nous

(8)

pouvons écrire l'équation 2 sur la forme suivante appelée l'équation de changement d'état :

$$T_2{}^3 + T_2{}^2\left(\frac{p_{equi1}{}^2.a^2}{24.T_1{}^2}ES + \alpha(\theta_2 - \theta_1)ES - T_1\right) = \frac{p_{equi2}{}^2.a^2}{24}ES$$

[1] Son expression en fonction de la tension unitaire t (N/mm²) du conducteur s'écrit :

$$t_2{}^3 + t_2{}^2\left(\frac{\omega_1{}^2.a^2}{24.t_1{}^2}E + \alpha(\theta_2 - \theta_1)E - t_1\right) = \frac{\omega_2{}^2.a^2}{24}E \quad (9)$$

Avec :

t : la tension unitaire du conducteur (N/mm²)

ω : le poids spécifique du conducteur (N/m.mm²)

$T = t \times S$

Connaissant les conditions de l'état de référence 1, la résolution de l'équation de changement d'état (l'équation de degré 3 en T_2) permet la détermination de la tension T_2.

La flèche étant liée à la tension, elle s'obtient par :

$$f = \frac{a^2}{8 \times P} \quad (10)$$

Source : [4]

ou

$$f = \frac{t}{\omega}\left(\cosh\left(\frac{\omega \times a}{2 \times t}\right) - 1\right) \quad (11)$$

Source : [1]

Avec : $P = \frac{t}{\omega}$

Après les calculs pour les hypothèses météorologiques, le type de conducteur, de câble de garde ci-dessus, nous résumons les résultats dans le tableau 13. Avec une tension mécanique admissible de 20% pour les conducteurs et 18% pour les câbles de garde.

Figure 13 : Les résultats obtenus

Hypothèse	Tension admissible (N)			Temp.	Conducteur		ACS		OPGW	
	Cond.	ACS	OPGW	°C	Tension (N)	Flèche (m)	Tension (N)	Flèche (m)	Tension (N)	Flèche (m)
A	20%	18%	18%	30	37 066	8,35	18 187	6,83	13 410	7,68
	37 066	18 187	13 410							
B	40%	40%	40%	10	45 171	7,61	21 001	6,57	16 170	7,48
	74 132	40 416	29 800							
C	40%	40%	40%	30	52 487	9,99	24 496	8,59	20 868	9,93
	74 132	40 416	29 800							
D	40%	40%	40%	75[2]	28 769	10,76	16 651	7,46	12 261	8,41
	74 132	40 416	29 800							

[2] Cette valeur est de 50°C pour les câbles ACS ET OPGW

6. Dimensionnement des isolateurs

Pour le dimensionnement d'un isolateur, il est important de faire un choix du matériau de fabrication en fonction des solutions technico-économiques.

6.1. Choix du matériau de fabrication d'isolateur

Tableau 7 : Les matériaux de fabrication d'isolateur

	Avantage	**Inconvénient**
Céramique	✓ Supporte des contraintes mécaniques importantes	✓ Coût très élevé
Verre	✓ Observation des défauts facile ✓ Coût faible ✓ Supporte des variations de température brusques ✓ Supporte les contraintes mécaniques très élevées	✓ Lourd ✓ Difficilement manipulable
Composite	✓ Bon pour les zones à forte pollution ✓ Léger ✓ Supporte des contraintes mécaniques importantes	✓ Vieillissement invisible ✓ Coût élevé

Pour le matériau de fabrication, notre choix se portera sur l'isolateur en verre (précisément en verre trempé) du fait de son coût, de l'observation facile des défauts et surtout de sa capacité à supporter les variations brusques de température. De plus ce type d'isolateur existe déjà sur le réseau.

Il est composé :

- d'une partie isolante en verre trempé ;
- d'un capot en alliage métallique ;
- d'une tige en acier galvanisé ;

- d'un dispositif de verrouillage-goupillage en alliage métallique.

6.2. La ligne de fuite

Les zones où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle sont localisées par la classe de pollution 3. La ligne de fuite spécifique de cette classe est

$\beta = 31$ mm/kV ; voir le tableau en annexe 1 qui nous permet d'avoir pour une tension nominale de 225 kV, une tension assignée maximale de 245 kV.

La longueur de fuite se calcul par la formule suivante :

$l_f = 1{,}1 \times U_M \times \beta$; (12)

Ce qui nous permet d'avoir $\boldsymbol{l_f = 8\,354{,}5\ mm}$

6.3. Calcul de la longueur de la chaine

La longueur de chaine d'isolateur est fonction de la tenue à la tension maximale de service à fréquence industrielle ou aux ondes de choc dues à la foudre ou aux surtensions provoquées par des manœuvres sur le réseau. La norme CEI (voir tableau en annexe 2) nous donne 14 éléments pour une tension maximale de 245 kV, mais pour plus de sécurité, nous retiendrons **une chaine de 15 éléments** correspondant à 2 190 mm pour un pas de 146 mm.

7. Calcul des charges transmises aux pylônes

Les hypothèses de calcul des charges des pylônes sont identiques aux hypothèses météorologiques de base présentées ci-dessous. Nous retiendrons l'hypothèse la plus défavorable pour le calcul des charges transmises.

e. Hypothèse de charge

7.1.1. Conducteurs et câble de garde

Hypothèse 1 : EDSQ (Etat De Service) à +30°C sans vent. Effort de tension = 37 066 N dans le conducteur, 18 187 N dans le câble de garde ACS et 13 410 N.

Hypothèse 2 : Pression de vent réduite, 240 N/m² (coefficient de traction pour le conducteur ou le câble de garde inclus), à température minimum +10°C.

Hypothèse 3: Pression de vent maximum, 680 N/m² (coefficient de traction pour le conducteur ou le câble de garde inclus), et température moyenne +30°C

Hypothèse 4: Température maximum: +75°C.

Hypothèse 2x: Pression de vent réduite à 50%, 680*0.50 = 340 N/m² (coefficient de traction pour le conducteur ou le câble de garde inclus), à +30°C, pour le calcul de vent à 45°.

7.1.2. Quelques notions utilisées pour le calcul des charges

La portée moyenne (P_m) d'un pylône est par définition la demi somme des portées adjacentes. En terrain plat, pour un pylône de hauteur donnée, la portée moyenne est la longueur de câble maximum que peut supporter un pylône. Elle est fonction essentiellement du paramètre du câble et de la distance de garde par rapport au sol.

$$P_m = \frac{a_1 + a_2}{2} \qquad (13)$$

La portée vent est la somme des deux demi portées adjacentes au pylône. Elle correspond à la portée à considérer pour le calcul des efforts en tête du pylône.

La portée poids c'est la somme des distances entre le pylône et les points les plus bas des deux portées adjacentes. Cette valeur est utilisée pour déterminer le poids mort que représentent les conducteurs sur le support.

Si la portée vent doit être supérieure à la portée moyenne en terrain plat pour que le pylône s'adapte au profil, de même la portée poids doit être supérieure pour tenir compte des surcharges verticales dues aux dénivellations des pylônes les uns par rapport aux autres.

7.1.3. Les efforts transmis aux pylônes par les câbles

***Les charges verticales (V)* :** elles constituent l'ensemble des composantes verticales de la tension des conducteurs, des câbles de garde, du poids de l'isolateur.

***Les charges horizontales transversales (H)* :** elles constituent l'ensemble des efforts perpendiculaires à la ligne dues à l'action du vent sur les conducteurs, les câbles de garde et les isolateurs

***Les charges horizontales longitudinales (L)* :** elles constituent l'ensemble des efforts parallèles à la ligne.

1. Cas des pylônes d'alignement

❖ **La charge verticale (V) dues aux conducteurs et aux câbles de garde**

Pour déterminer les réactions d'appui dans le plan des conducteurs et câbles de garde, nous utilisons un paramètre Z qui tient compte des dénivellations de part et d'autre du pylône considéré. Le calcul de ces charges verticales s'effectue à condition d'avoir défini préalablement les tensions horizontales des conducteurs et câble de garde par l'équation de changement d'état.

[1] Cette charge et donnée par la formule :

$$V = m\omega \times \frac{a_1 + a_2}{2} + T\left(\frac{Z}{a_1} + \frac{Z}{a_1}\right) \qquad (14)$$

Avec : m : le coefficient de surcharge, m = 1 dans les régions subsahariennes

T : la tension horizontale

A cette charge verticale ***V***, il faut ajouter le poids des isolateurs pour déterminer la charge verticale totale.

- Z positif si le pylône considéré est au-dessus des pylônes adjacents ;
- Z négatif si le pylône considéré est en-dessous des pylônes adjacents.
- Z= 0 pour les appuis de niveau

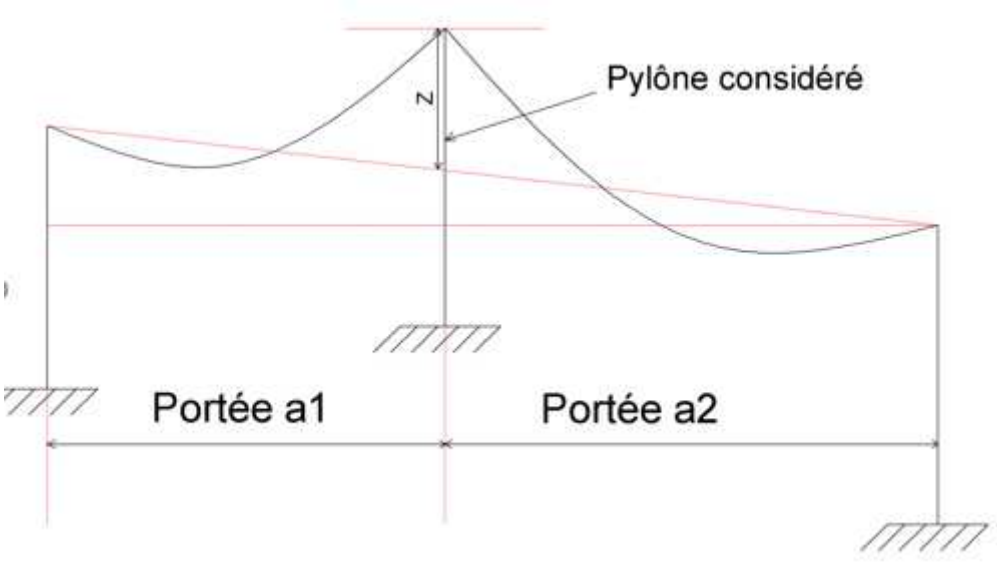


Figure 14 : Représentation de portée adjacente

❖ Les charges horizontales transversales (H)

Elles sont dues à l'action du vent soufflant normalement à la ligne et sont fonction de :

- La pression dynamique P du vent sur les conducteurs et câbles de garde
- La portée moyenne considérée P_m
- Du diamètre d des conducteurs et/ou câble de garde

[1] L'effort du vent transmis par chaque conducteur au pylône situé entre deux portées de longueur a_1 et a_2 est donné par :

$$H = \frac{a_1 + a_2}{2} P \times d \qquad (15)$$

❖ Les charges longitudinales (L)

Dans une ligne qui assure un service normal, sans surcharges mécaniques d'aucune sorte, les variations de température créent entre les portées de longueur inégales des différences de tension qui se traduisent par de faibles déviations des chaînes d'isolateurs dans le sens de la ligne. Ces différences de tension soumettent le pylône à des charges longitudinales continuelles, mais d'importances tout à fait mineures. Dans la pratique on n'y tient pas compte.

2. Cas des pylônes d'angle et d'arrêt

Les pylônes d'angle et d'arrêt sont appelés à soutenir des efforts permanents importants dus aux angles du tracé ou à l'arrêt des câbles. Ensuite par leur orientation répond à des exigences particulières.

❖ **La charge verticale (V) dues aux conducteurs et aux câbles de garde**

[1] Les charges verticales dans ce cas sont les mêmes que celles des pylônes d'alignement c'est-à-dire :

$$V = m\omega \times \frac{a_1 + a_2}{2} + T\left(\frac{Z}{a_1} + \frac{Z}{a_2}\right) \quad (16)$$

❖ **Les charges horizontales transversales (H)**

[1] Ces charges dirigées suivant l'angle intérieur, comprennent en plus de l'action du vent, l'effet d'angle dû à la tension maximale des câbles de part et d'autre du pylône dans l'hypothèse la plus défavorable. On obtient :

$$H = \frac{a_1 + a_2}{2} P \times d + (T_2 + T_2')\sin\frac{\alpha}{2} \quad (17)$$

Avec α : l'angle dans l'hypothèse la plus défavorable

❖ **Les charges longitudinales (L)**

➲ **Cas de pylône d'angle**

Si les valeurs des tensions des câbles de part et d'autre du pylône ne sont pas égales, la différence des tensions n'est pas nulle et donne une composante longitudinale :

[1] $$L = (T_2' - T_2)\cos\frac{\alpha}{2} \quad (18)$$

Avec α : l'angle dans l'hypothèse la plus défavorable

➲ **Cas des supports d'arrêt**

En tenant compte de l'implantation effective des pylônes sur le terrain, la décomposition des tensions des conducteurs suivant les directions principales du pylône permet d'obtenir la charge longitudinale de la forme :

[1]
$$L = T_2' \cos\beta - T_2 \cos\alpha \tag{19}$$

Après la présentation du dimensionnement théorique d'une ligne aérienne 225 kV, nous présentons pour la troisième partie quelques fonction et méthode de conception du progiciel.

CHAPITRE 3 : PRESENTATION DU PROGICIEL

1. Présentation de l'interface

Cet outil de calcul est une application EXCEL destinée à faciliter la détermination des grandeurs mécaniques nécessaire pour le dimensionnement des lignes aériennes de transport HTB. Il a été mise en place dans le cadre du projet de renforcement du réseau électrique de transport et de distribution (PRETD) de la république de Côte d'Ivoire en vue de permettre la vérification des différents calculs présentés par les consultants au niveau de CI-ENERGIES.

2. La feuille 1 : Généralité

Les informations dont la saisie est obligatoire pour le dimensionnement mécanique d'une ligne sont le niveau de tension, la portée moyenne, la température minimale, la température moyenne annuelle, la température maximale de la zone, la température maximale de fonctionnement, la pression maximale, la pression réduite et en fin l'isolateur utilisé sur la ligne électrique.

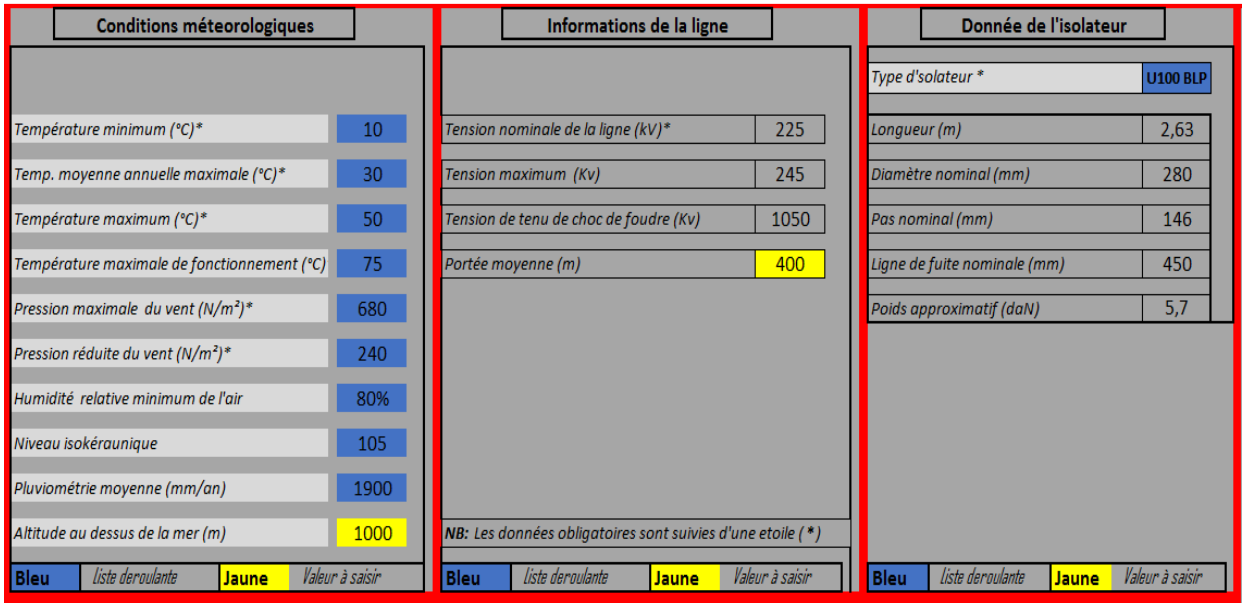


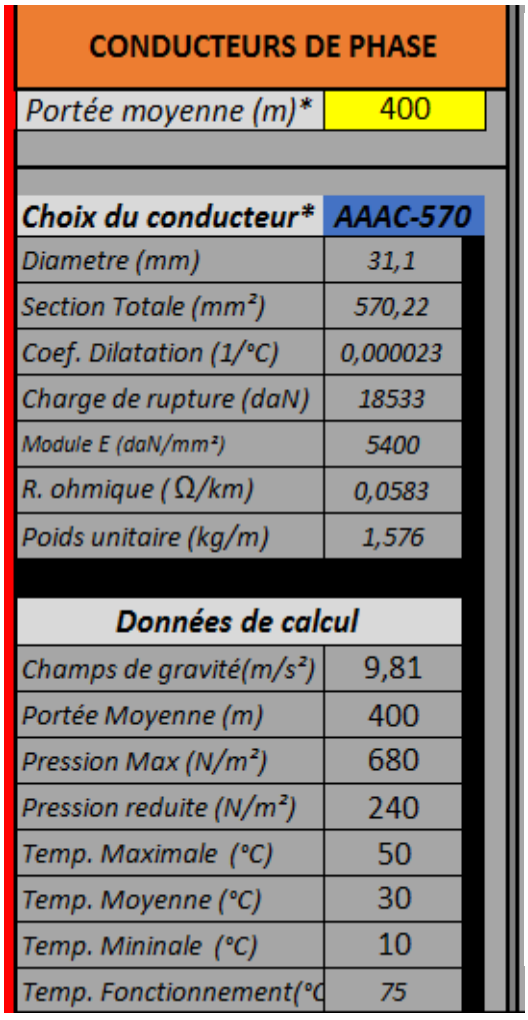
Figure 15 : Présentation de l'interface

Sous la feuille EXCEL, les informations suivies d'une étoile sont obligatoire pour le dimensionnement.

3. Feuille 2 : Conducteurs de phase

Cette partie sert au dimensionnement du conducteur par la détermination des grandeurs mécaniques usuelles. Constituée de deux (02) parties, nous avons :

- La première partie ou colonne :



CONDUCTEURS DE PHASE	
Portée moyenne (m)*	400
Choix du conducteur*	**AAAC-570**
Diametre (mm)	31,1
Section Totale (mm²)	570,22
Coef. Dilatation (1/°C)	0,000023
Charge de rupture (daN)	18533
Module E (daN/mm²)	5400
R. ohmique (Ω/km)	0,0583
Poids unitaire (kg/m)	1,576
Données de calcul	
Champs de gravité(m/s²)	9,81
Portée Moyenne (m)	400
Pression Max (N/m²)	680
Pression reduite (N/m²)	240
Temp. Maximale (°C)	50
Temp. Moyenne (°C)	30
Temp. Mininale (°C)	10
Temp. Fonctionnement(°C	75

Pour la détermination des grandeurs mécaniques au niveau du conducteur, la donnée principale à saisir est la portée moyenne et surtout le choix du conducteur. Notre outil de calcul contient une base de données de conducteur de type AAAC dont les sections varient de 22 mm² à 851 mm².

Après le choix du conducteur à travers une liste déroulante, les informations telles que le diamètre, la section, le coefficient de dilatation, la charge de rupture, le module d'élasticité, le poids unitaire qui sont nécessaires pour le dimensionnement apparaissent et en dessous dans la partie « **Données de calcul** » sont rappelés les données météorologiques saisies au niveau des généralités (Feuille 1)

Figure 16 : Zone de saisir pour les conducteurs

Nous rappelons aussi que les saisis obligatoires sont suivis d'une étoile

- La seconde partie ou colonne

  - Cette seconde partie donne les grandeurs mécaniques telles que la tension mécanique, la flèche médiane, le coefficient de sécurité, la longueur du conducteur et l'angle de balancement pour une portée de niveau et ceux pour différents hypothèses retenues.

	PORTEE SIMPLE OU DE NIVEAU									
Hypotèse	Temp (°C)	Epaisseur givre (mm)	Facteur vent (%)	Pression du vent (N/m²)	poids unitaire (N/m)	Tension (N)	Flèche mediane (m)	Coef.de securité	longueur d'arc (m)	angle de balancement (degré)
Condition initiale (EDS)	30	0		0	15,46	37 066	8,35	20%	400,46	0,0
Temp. min. et vent reduit	10	0	35,3%	240	17,17	45 171	7,61	24%	400,39	23,5
Temp. moy. et vent max	30	0	100,0%	680	26,20	52 487	9,99	28%	400,66	38,9
Temp. moy. et vent reduit	30	0	35,3%	240	17,17	39 715	8,65	21%	400,50	23,5
Temp.moy et sans vent	30	0	50,0%	340	18,73	42 061	8,91	23%	400,53	29,4
temp. Max et sans vent	50	0	0,0%	0	15,46	32 799	9,43	18%	400,59	0,0
Temp.fonctionnement et sans vent	75	0	0,0%	0	15,46	28 769	10,76	16%	400,77	0,0

Figure 17 : Zone d'affichage des grandeurs mécaniques sur une surface de niveau

  - Pour les mêmes hypothèses, cette partie donne aussi la possibilité de déterminer les mêmes grandeurs mécaniques pour une portée dénivelée en saisissant la hauteur de dénivellation entre les deux (02) supports situés à l'extrémité de la portée.

PORTEE DENIVELEE					
La hauteur de denivelé h (m)			2		
Abscisse du Point bas (m)	Flèche Basse (m)	Flèche Haute (m)	longueur d'arc (m)	Tension appuis bas (N)	Tension appuis haut (N)
188,03	7,38	9,38	400,47	37 067	37 071
186,86	6,64	8,64	400,39	45 172	45 175
190,00	9,02	11,02	400,67	52 488	52 492
188,45	7,68	9,68	400,50	39 716	39 719
188,79	7,94	9,94	400,53	42 062	42 065
189,41	8,46	10,46	400,60	32 800	32 804
190,71	9,78	11,78	400,78	28 770	28 774

Figure 18 : Zone d'affichage des grandeurs mécaniques sur une surface dénivelée

- Le dernier tableau en dessous donne la possibilité à l'utilisateur de saisir plusieurs valeurs de la portée et avoir les différentes flèches en fonction des températures allant de 10 à 75°C avec un pas de 5°C.

	La flèche (m) en foction de la température et la portée (sans vent)													
Temp. (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Portée (m) 250	2,61	2,76	2,92	3,08	3,26	3,44	3,63	3,82	4,01	4,21	4,41	4,61	4,81	5,00
300	3,88	4,07	4,27	4,48	4,69	4,91	5,13	5,35	5,58	5,80	6,03	6,25	6,47	6,69
350	5,43	5,66	5,90	6,14	6,39	6,63	6,88	7,13	7,38	7,63	7,88	8,12	8,37	8,61
400	7,26	7,53	7,80	8,07	8,34	8,61	8,89	9,16	9,43	9,70	9,96	10,23	10,49	10,75
450	9,38	9,68	9,97	10,26	10,56	10,85	11,14	11,43	11,72	12,00	12,29	12,57	12,85	13,12
500	11,78	12,10	12,41	12,72	13,03	13,34	13,65	13,96	14,26	14,56	14,86	15,15	15,44	15,73

Figure 19 : Zone de calcul des flèches en fonction des températures et des portées

La présentation générale de la seconde partie

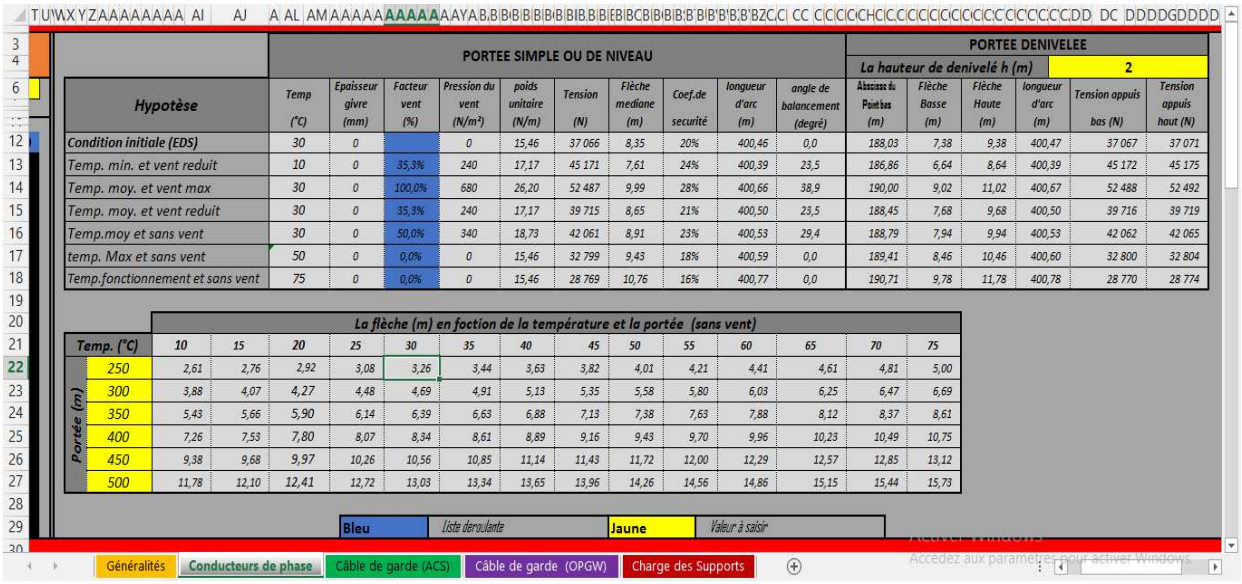


Figure 20 : Zone de résultat pour conducteur

4. Feuilles 3 & 4 : Câble de garde ACS et OPGW

Les feuilles 3 et 4 permettent respectivement le dimensionnement des câbles de garde ACS et OPGW. Elles fonctionnent de façon identique que la feuille des

conducteurs et contiennent une base de données sur les câbles ACS et OPGW. L'utilisation doit obligatoirement saisir la portée et choisir le câble correspondant.

5. **Feuille 5 :** Charge des supports

Cette feuille de calcul permet la détermination des différentes charges appliquées aux supports par les conducteurs, le câble de garde ACS et OPGW. Elle déterminité en fonction des données en entrée, les charges verticales, transversales et longitudinales des différents types de pylônes (alignement, d'angle ou d'arrêt). La vue générale de cette fenêtre est représentée sur la figure ci-dessous.

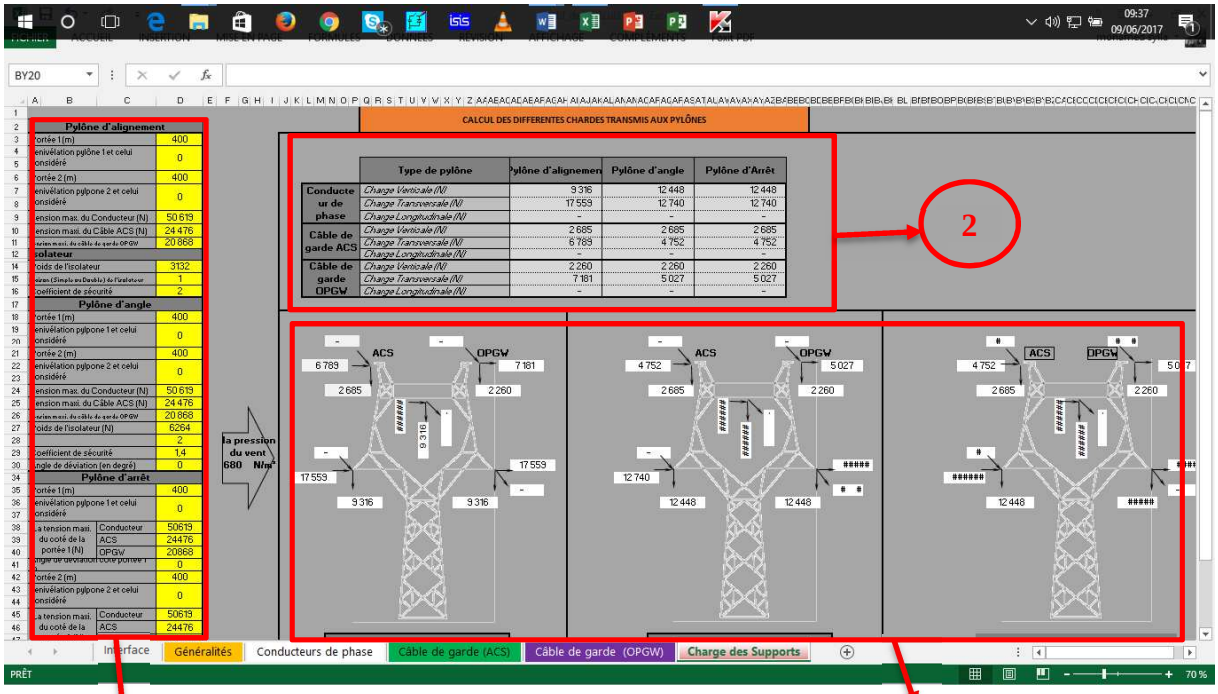


Figure 21: Fenêtre de calcul des charges

1 : Données de base : elle représente la zone de saisir des données de base des

trois (03) types de pylônes dans notre hypothèse.

- *Pylône d'alignement* :

Pylône d'alignement	
Portée 1 (m)	400
denivélation pylône 1 et celui considéré	0
Portée 2 (m)	400
denivélation pylpone 2 et celui considéré	0
Tension max. du Conducteur (N)	50 619
Tension maxi. du Câble ACS (N)	24 476
Tension maxi. du câble de garde OPGW	20 868
Isolateur	
Poids de l'isolateur	3132
Liaison (Simple ou Double) de l'isolateur	1
Coefficient de sécurité	2

Figure 22 : Zone de saisir du pylône d'alignemer

Comme présenté sur la figure, l'utilisateur doit saisir la valeur des deux portées adjacentes au pylône considéré, la dénivellation entre le pylône et ceux des deux extrémités ainsi que la tension maximale des différents câbles.

Le calcul prend en compte le poids de l'isolateur sélectionné (feuille 1) en fonction de la longueur de chaine et donne la possibilité à l'utilisateur de saisir un coefficient de sécurité.

- *Pylône d'angle* :

Pylône d'angle	
Portée 1 (m)	400
denivélation pylpone 1 et celui considéré	0
Portée 2 (m)	400
denivélation pylpone 2 et celui considéré	0
Tension max. du Conducteur (N)	50 619
Tension maxi. du Câble ACS (N)	24 476
Tension maxi. du câble de garde OPGW	20 868
Poids de l'isolateur (N)	6264
Liaison (Simple ou Double) de l'isolateur	2
Coefficient de sécurité	1,4
Angle de déviation (en degré)	0

Figure 23: Zone de saisir du pylône d'angle

Cette zone de saisir pour les pylônes d'angle est similaire à cette des pylônes d'alignement à la différence de tenir compte de l'angle de déviation et de la liaison de la chaine d'isolateur (double ou simple liaison).

- *Pylône d'arrêt* :

Pylône d'arrêt		
Portée 1 (m)		400
denivélation pylpone 1 et celui considéré		0
La tension maxi. du coté de la portée 1 (N)	Conducteur	50619
	ACS	24476
	OPGW	20868
Angle de deviation coté portée 1 (°)		0
Portée 2 (m)		400
denivélation pylpone 2 et celui considéré		0
La tension maxi. du coté de la portée 2 (N)	Conducteur	50619
	ACS	24476
	OPGW	20 868
Angle de deviation coté portée 2 (°)		-
Poids de l'isolateur (N)		6 264
Liaison (Simple ou Double) de l'isolateur		2
Coefficient de sécurité		1,4

Pour le pylône d'arrêt, en plus des portées, de la différence de hauteur, le coefficient de sécurité, l'utilisateur doit saisir les valeurs en degré des angles de déviation, les tensions mécaniques des différents câbles agissant de part et d'autre du pylône.

Figure 24: Zone de saisir du pylône d'arrêt.

2 : Zone d'affichage des différentes charges en fonction des câbles.

	Type de pylône	Pylône d'alignement	Pylône d'angle	Pylône d'Arrêt
Conducteur de phase	*Charge Verticale (N)*	9 316	12 448	12 448
	Charge Transversale (N)	17 559	12 740	12 740
	Charge Longitudinale (N)	-	-	-
Câble de garde ACS	*Charge Verticale (N)*	2 685	2 685	2 685
	Charge Transversale (N)	6 789	4 752	4 752
	Charge Longitudinale (N)	-	-	-
Câble de garde OPGW	*Charge Verticale (N)*	2 260	2 260	2 260
	Charge Transversale (N)	7 181	5 027	5 027
	Charge Longitudinale (N)	-	-	-

Figure 25 : Zone d'affichage des résultats de charge

3 : Zone d'affectation des charges aux supports.

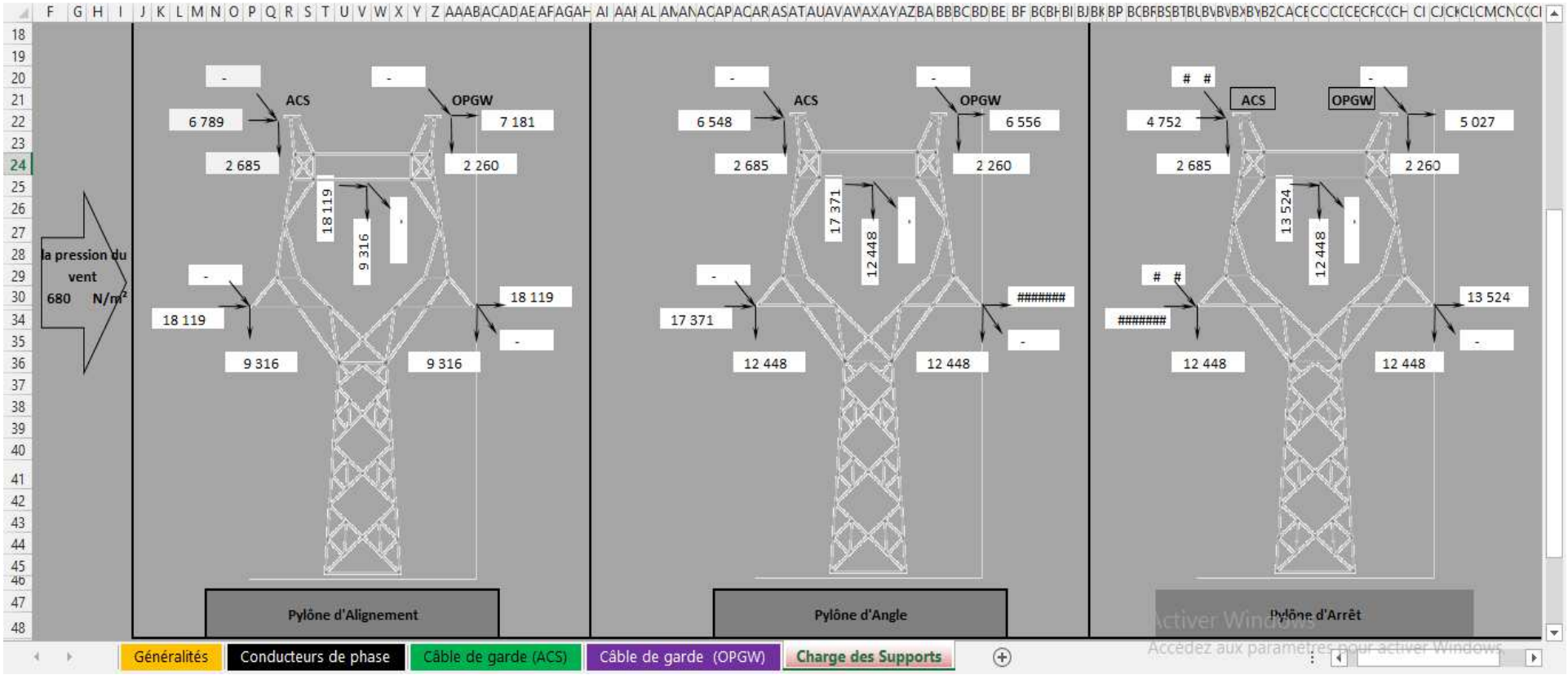


Figure 26: Affectation des charges

6. *Vérification de quelques notes de calcul*

❖ Exemple de notes de calcul présentées par l'entrepreneur sur les conducteur AAAC 570

TITRE:	**Calculs de tension de fléchissement pour conducteur de 225KV, fil de masse &OPGW**
NO. DU DOSSIER:	**----------6**
NO. DE REVISION:	**0**
NOMBRE DE PAGES:	**9**
S/SOU T/L:	**T/L**
PHASE DE CONCEPTION:	**Design conceptuel**
Maître d'ouvrage	CI-ENERGIES SOCIETE DES ENERGIES DE COTE D'IVOIRE
Entreprise de Conseil	
Entrepreneur	国机集团 SINOMACH 中电 CEEC
Entreprise d'étude	长江勘测规划设计研究有限责任公司 CHANGJIANG SURVEY, PLANNING, DESIGN AND RESEARCH CO., LTD.
PROJET:	**Développement et Réhabilitation du Réseau Electrique de la Côte d'Ivoire**
Calculs de tension de fléchissement pour conducteur de 225KV, fil de masse &OPGW	

flèche - calcul de tension

calcul pour: conducteur

critère de conception:

Travée Basique	=	364 m
Pression du vent plein	=	680,0 N/m2
densité de glace	=	900 kg/m3
température de compensation de retrait	=	22 ℃
accélération gravifique	=	9,80665 m/s2

détails de fil:

nom	=	AAAC-570
diamètre	=	31,1 mm
aire de section	=	570,2 mm2
poids unitaire	=	1,576 kg/m
force maximale	=	185330 N
coefficient d'expansion	=	0,000023 1/℃
module élastique	=	54000 N/mm2

flèche - calcul de tension

	Description	Temp. [℃]	épaisseur de glace [mm]	facteur du vent [%]	pression du vent [N/m2]	charge unitaire [N/m]	Tension [N]	flèche [m]	F.O.S.
	# condition initiale	**30**	**0**	**0,0%**	**0,0**	**15,455**	**37066**	**6,909**	**5,00**
	Min. Temp., le vent réduit, Initial	10	0	35,3%	240,0	17,163	54262	5,240	3,42
	Min. Temp., le vent réduit, finale	10	0	35,3%	240,0	17,163	45677	6,226	4,06
	Eve. Temp., le vent plein, Initial	30	0	100,0%	680,0	26,194	57892	7,498	3,20
	Eve. Temp., le vent plein, finale	30	0	100,0%	680,0	26,194	51495	8,431	3,60
	Eve. Temp., le vent oblique 45°, Initial	30	0	50,0%	340 ,0	18,726	48468	6,402	3,82
	Eve. Temp., le vent oblique 45°,finale	30	0	50,0%	340,0	18,726	41735	7,435	4,44
	Eve. Temp., le vent réduit, Initial	30	0	35,3%	240,0	17,163	46375	6,132	4,00
	Eve. Temp., le vent réduit, finale	30	0	35,3%	240,0	17,163	39540	7,193	4,69
	Eve. Temp., pas du vent, Initial	30	0	0,0%	0,0	15,455	44033	5,815	4,21
#	Eve. Temp., pas du vent,finale	30	0	0,0%	0,0	15,455	37066	6,909	5,00
	Max. Env. Temp., pas du vent, Initial	50	0	0,0%	0,0	15,455	37619	6,807	4,93
	Max. Env. Temp., pas du vent, finale	50	0	0,0%	0,0	15,455	32290	7,932	5,74
	Max. Con. Temp., pas du vent, Initial	75	0	0,0%	0,0	15,455	31680	8,085	5,85
	Max. Con. Temp., pas du vent, finale	75	0	0,0%	0,0	15,455	27880	9,189	6,65

NOTES:

1.facteur de sécurité pour conducteur de phase:
(a) température 30℃, air calme, tension finale, Tension <= 20% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité .>=5.0)
(b) @ la pire condition , Tension <= 40% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité >=2.5)
(c) la température de la flèche finale sous la condition maximale sera calculé en 75℃.
2. facteur de sécurité pour fil de masse:
(a) température 30℃, air calme, tension finale, Tension <= 20% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité .>=5.0)
(b) la pire condition, , Tension <= 33.3% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité >=3.0)
(c) flèche de fil de masse <= 90% flèche de conducteur.
3. # indiquer la condition initiale
4. L'équation caténaire est appliquée et la température de compensation de retrait est soustrait pour la fuite lors de la chute (flèche).

flèche - calcul de tension

calcul pour: conducteur

critère de conception:

Travée Basique	=	400 m
Pression du vent plein	=	680,0 N/m2
densité de glace	=	900 kg/m3
température de compensation de retrait	=	22 ℃
accélération gravifique	=	9,80665 m/s2

détails de fil:

nom	=	AAAC-570
diamètre	=	31,1 mm
aire de section	=	570,2 mm2
poids unitaire	=	1,576 kg/m
force maximale	=	185330 N
coefficient d'expansion	=	0,000023 1/℃
module élastique	=	54000 N/mm2

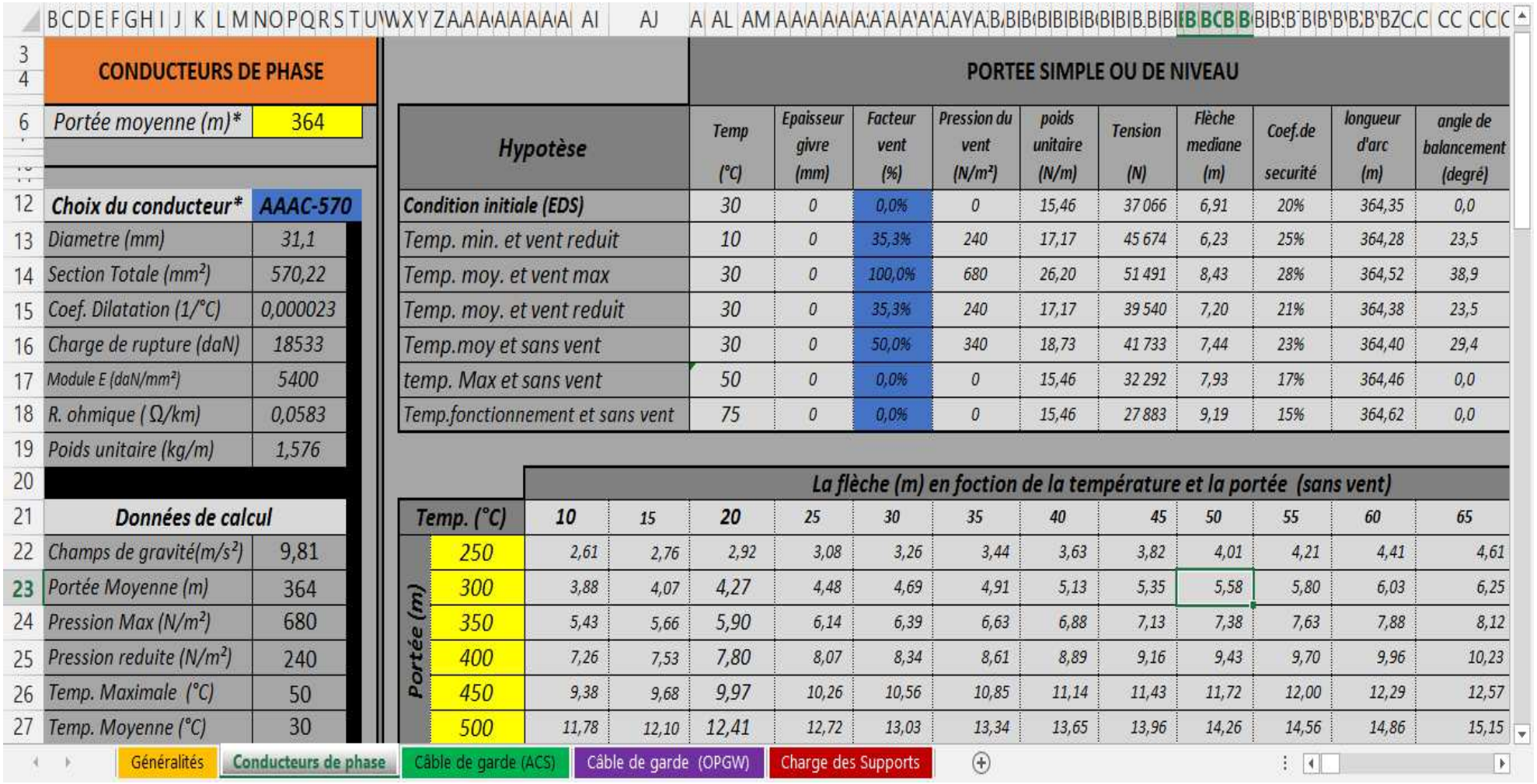
flèche - calcul de tension

	Description	Temp. [℃]	épaisseur de glace [mm]	facteur du vent [%]	pression du vent [N/m2]	charge unitaire [N/m]	Tension [N]	flèche [m]	F.O.S.
	# condition initiale	**30**	**0**	**0,0%**	**0,0**	**15,455**	**37066**	**8,344**	**5,00**
	Min. Temp., le vent réduit, Initial	10	0	35,3%	240,0	17,163	52806	6,503	3,51
	Min. Temp., le vent réduit, finale	10	0	35,3%	240,0	17,163	45173	7,603	4,10
	Eve. Temp., le vent plein, Initial	30	0	100,0%	680,0	26,194	58339	8,986	3,18
	Eve. Temp., le vent plein, finale	30	0	100,0%	680,0	26,194	52491	9,988	3,53
	Eve. Temp., le vent oblique 45°, Initial	30	0	50,0%	340 ,0	18,726	48087	7,792	3,85
	Eve. Temp., le vent oblique 45°,finale	30	0	50,0%	340,0	18,726	42063	8,910	4,41
	Eve. Temp., le vent réduit, Initial	30	0	35,3%	240,0	17,163	45793	7,500	4,05
	Eve. Temp., le vent réduit, finale	30	0	35,3%	240,0	17,163	39715	8,649	4,67
	Eve. Temp., pas du vent, Initial	30	0	0,0%	0,0	15,455	43214	7,156	4,29
#	Eve. Temp., pas du vent,finale	30	0	0,0%	0,0	15,455	37066	8,344	5,00
	Max. Env. Temp., pas du vent, Initial	50	0	0,0%	0,0	15,455	37556	8,235	4,93
	Max. Env. Temp., pas du vent, finale	50	0	0,0%	0,0	15,455	32797	9,432	5,65
	Max. Con. Temp., pas du vent, Initial	75	0	0,0%	0,0	15,455	32246	9,593	5,75
	Max. Con. Temp., pas du vent, finale	75	0	0,0%	0,0	15,455	28766	10,756	6,44

NOTES:

1.facteur de sécurité pour conducteur de phase:
(a) température 30℃, air calme, tension finale, Tension <= 20% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité .>=5.0)
(b) @ la pire condition , Tension <= 40% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité >=2.5)
(c) la température de la flèche finale sous la condition maximale sera calculé en 75℃.
2. facteur de sécurité pour fil de masse:
(a) température 30℃, air calme, tension finale, Tension <= 20% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité .>=5.0)
(b) la pire condition, , Tension <= 33.3% de la résistance maximale à la traction (facteur de sécurité >=3.0)
(c) flèche de fil de masse <= 90% flèche de conducteur.
3. # indiquer la condition initiale
4. L'équation caténaire est appliquée et la température de compensation de retrait est soustrait pour la fuite lors de la chute (flèche).

❖ Les résultats obtenus par notre progiciel



CONDUCTEURS DE PHASE

Portée moyenne (m)*	364
Choix du conducteur*	**AAAC-570**
Diametre (mm)	31,1
Section Totale (mm²)	570,22
Coef. Dilatation (1/°C)	0,000023
Charge de rupture (daN)	18533
Module E (daN/mm²)	5400
R. ohmique (Ω/km)	0,0583
Poids unitaire (kg/m)	1,576

Données de calcul	
Champs de gravité(m/s²)	9,81
Portée Moyenne (m)	364
Pression Max (N/m²)	680
Pression reduite (N/m²)	240
Temp. Maximale (°C)	50
Temp. Moyenne (°C)	30

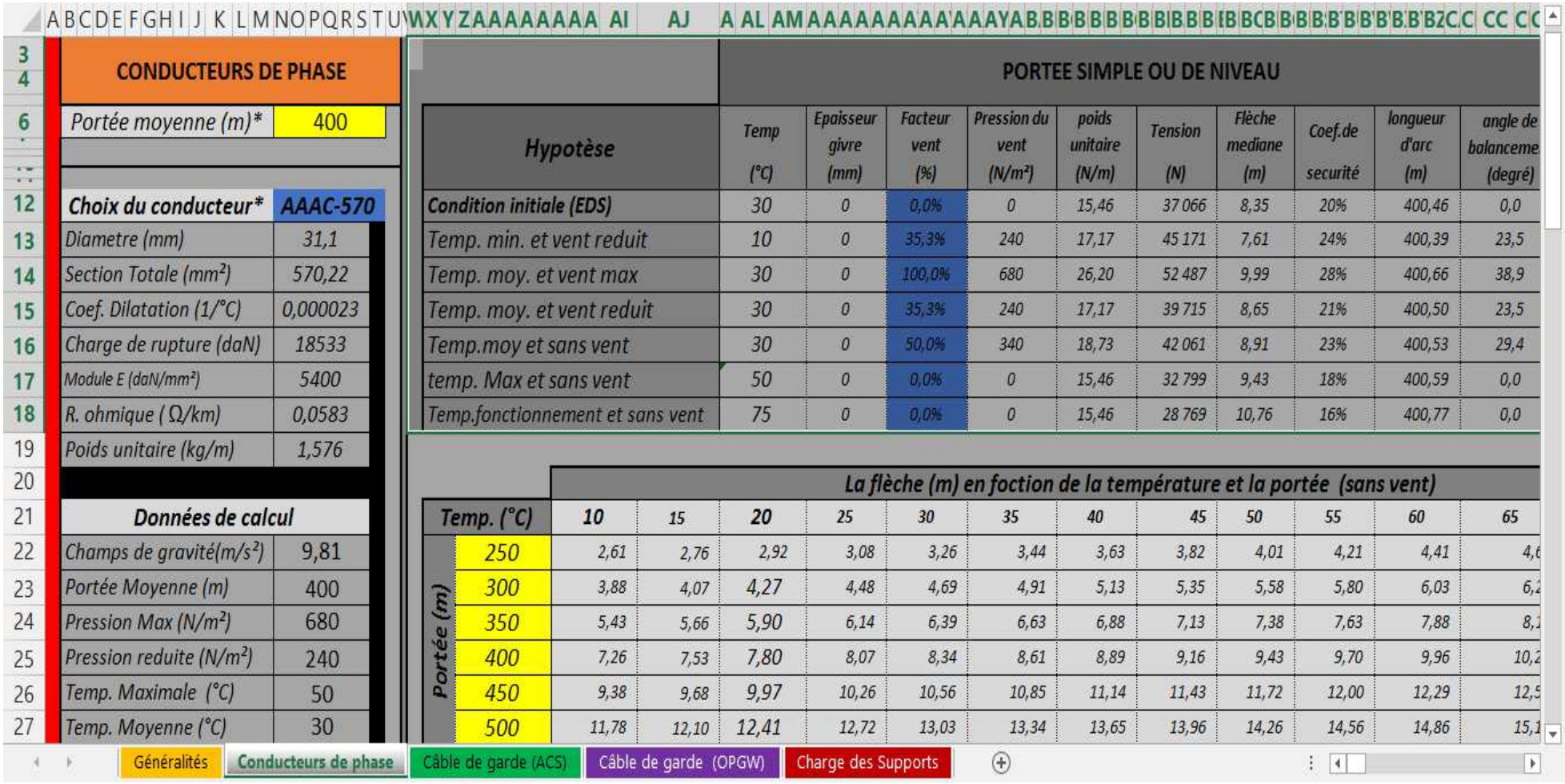
PORTEE SIMPLE OU DE NIVEAU

Hypotèse	Temp (°C)	Epaisseur givre (mm)	Facteur vent (%)	Pression du vent (N/m²)	poids unitaire (N/m)	Tension (N)	Flèche mediane (m)	Coef.de securité	longueur d'arc (m)	angle de balancement (degré)
Condition initiale (EDS)	30	0	0,0%	0	15,46	37 066	6,91	20%	364,35	0,0
Temp. min. et vent reduit	10	0	35,3%	240	17,17	45 674	6,23	25%	364,28	23,5
Temp. moy. et vent max	30	0	100,0%	680	26,20	51 491	8,43	28%	364,52	38,9
Temp. moy. et vent reduit	30	0	35,3%	240	17,17	39 540	7,20	21%	364,38	23,5
Temp.moy et sans vent	30	0	50,0%	340	18,73	41 733	7,44	23%	364,40	29,4
temp. Max et sans vent	50	0	0,0%	0	15,46	32 292	7,93	17%	364,46	0,0
Temp.fonctionnement et sans vent	75	0	0,0%	0	15,46	27 883	9,19	15%	364,62	0,0

La flèche (m) en foction de la température et la portée (sans vent)

Portée (m) \ Temp. (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
250	2,61	2,76	2,92	3,08	3,26	3,44	3,63	3,82	4,01	4,21	4,41	4,61
300	3,88	4,07	4,27	4,48	4,69	4,91	5,13	5,35	5,58	5,80	6,03	6,25
350	5,43	5,66	5,90	6,14	6,39	6,63	6,88	7,13	7,38	7,63	7,88	8,12
400	7,26	7,53	7,80	8,07	8,34	8,61	8,89	9,16	9,43	9,70	9,96	10,23
450	9,38	9,68	9,97	10,26	10,56	10,85	11,14	11,43	11,72	12,00	12,29	12,57
500	11,78	12,10	12,41	12,72	13,03	13,34	13,65	13,96	14,26	14,56	14,86	15,15

Généralités | Conducteurs de phase | Câble de garde (ACS) | Câble de garde (OPGW) | Charge des Supports



CONDUCTEURS DE PHASE

Portée moyenne (m)*	400
Choix du conducteur*	**AAAC-570**
Diametre (mm)	31,1
Section Totale (mm²)	570,22
Coef. Dilatation (1/°C)	0,000023
Charge de rupture (daN)	18533
Module E (daN/mm²)	5400
R. ohmique (Ω/km)	0,0583
Poids unitaire (kg/m)	1,576

Données de calcul	
Champs de gravité(m/s²)	9,81
Portée Moyenne (m)	400
Pression Max (N/m²)	680
Pression reduite (N/m²)	240
Temp. Maximale (°C)	50
Temp. Moyenne (°C)	30

PORTEE SIMPLE OU DE NIVEAU

Hypotèse	Temp (°C)	Epaisseur givre (mm)	Facteur vent (%)	Pression du vent (N/m²)	poids unitaire (N/m)	Tension (N)	Flèche mediane (m)	Coef.de securité	longueur d'arc (m)	angle de balanceme (degré)
Condition initiale (EDS)	30	0	0,0%	0	15,46	37 066	8,35	20%	400,46	0,0
Temp. min. et vent reduit	10	0	35,3%	240	17,17	45 171	7,61	24%	400,39	23,5
Temp. moy. et vent max	30	0	100,0%	680	26,20	52 487	9,99	28%	400,66	38,9
Temp. moy. et vent reduit	30	0	35,3%	240	17,17	39 715	8,65	21%	400,50	23,5
Temp.moy et sans vent	30	0	50,0%	340	18,73	42 061	8,91	23%	400,53	29,4
temp. Max et sans vent	50	0	0,0%	0	15,46	32 799	9,43	18%	400,59	0,0
Temp.fonctionnement et sans vent	75	0	0,0%	0	15,46	28 769	10,76	16%	400,77	0,0

La flèche (m) en foction de la température et la portée (sans vent)

Portée (m) \ Temp. (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
250	2,61	2,76	2,92	3,08	3,26	3,44	3,63	3,82	4,01	4,21	4,41	4,6
300	3,88	4,07	4,27	4,48	4,69	4,91	5,13	5,35	5,58	5,80	6,03	6,2
350	5,43	5,66	5,90	6,14	6,39	6,63	6,88	7,13	7,38	7,63	7,88	8,1
400	7,26	7,53	7,80	8,07	8,34	8,61	8,89	9,16	9,43	9,70	9,96	10,2
450	9,38	9,68	9,97	10,26	10,56	10,85	11,14	11,43	11,72	12,00	12,29	12,5
500	11,78	12,10	12,41	12,72	13,03	13,34	13,65	13,96	14,26	14,56	14,86	15,1

Généralités | Conducteurs de phase | Câble de garde (ACS) | Câble de garde (OPGW) | Charge des Supports

ETUDE COMPARATIVE

➲ Les données d'entrées

Nous faisons une comparaison pour les mêmes données d'entrées en ce qui concerne le choix du conducteur, les données météorologiques, la portée avec le même champ de pesanteur :

❖ Entrée entrepreneur

flèche - calcul de tension

calcul pour: conducteur

critère de conception:

Travée Basique	=	364 m
Pression du vent plein	=	680,0 N/m2
densité de glace	=	900 kg/m3
température de compensation de retrait	=	22 °C
accélération gravifique	=	9,80665 m/s2

détails de fil:

nom	=	AAAC-570
diamètre	=	31,1 mm
aire de section	=	570,2 mm2
poids unitaire	=	1,576 kg/m
force maximale	=	185330 N
coefficient d'expansion	=	0,000023 1/°C
module élastique	=	54000 N/mm2

❖ Entrée du progiciel

CONDUCTEURS DE PHASE	
Portée moyenne (m)*	364
Choix du conducteur*	**AAAC-570**
Diametre (mm)	31,1
Section Totale (mm²)	570,22
Coef. Dilatation (1/°C)	0,000023
Charge de rupture (daN)	18533
Module E (daN/mm²)	5400
R. ohmique (Ω/km)	0,0583
Poids unitaire (kg/m)	1,576
Données de calcul	
Champs de gravité(m/s²)	9,81
Portée Moyenne (m)	364
Pression Max (N/m²)	680
Pression reduite (N/m²)	240
Temp. Maximale (°C)	50
Temp. Moyenne (°C)	30
Temp. Mininale (°C)	10
Temp. Fonctionnement(°C)	75

➲ Comparaison des résultats obtenus

	PORTEE SIMPLE OU DE NIVEAU									
Hypotèse	Temp (°C)	Epaisseur givre (mm)	Facteur vent (%)	Pression du vent (N/m²)	poids unitaire (N/m)	Tension (N)	Flèche mediane (m)	Coef.de securité	longueur d'arc (m)	angle de balancement (degré)
Condition initiale (EDS)	30	0	0,0%	0	15,46	37 066	6,91	20%	364,35	0,0
Temp. min. et vent reduit	10	0	35,3%	240	17,17	45 674	6,23	25%	364,28	23,5
Temp. moy. et vent max	30	0	100,0%	680	26,20	51 491	8,43	28%	364,52	38,9
Temp. moy. et vent reduit	30	0	35,3%	240	17,17	39 540	7,20	21%	364,38	23,5
Temp.moy et sans vent	30	0	50,0%	340	18,73	41 733	7,44	23%	364,40	29,4
temp. Max et sans vent	50	0	0,0%	0	15,46	32 292	7,93	17%	364,46	0,0
Temp.fonctionnement et sans vent	75	0	0,0%	0	15,46	27 883	9,19	15%	364,62	0,0

# condition initiale	**30**	**0**	**0.0%**	**0.0**	15,455	37066	6,909	5,00
Min. Temp., le vent réduit,	10	0	35.3%	240.0	17,163	45677	6,226	3,42
Eve. Temp., le vent plein,	30	0	100.0%	680.0	26,194	51495	8,431	3,20
Eve. Temp., le vent réduit,	30	0	35.3%	240.0	17,163	39540	7,193	4,00
Eve. Temp., le vent oblique 45°,	30	0	50.0%	340.0	18,726	41735	7,435	4,44
Max. Env. Temp., pas du vent,	50	0	0.0%	0.0	15,455	32290	7,932	4,93
Max. Con. Temp., pas du vent,	75	0	0.0%	0.0	15,455	27880	9,189	5,85

CONCLUSION

Après s'être familiarisé avec l'environnement de travail, nous avons étudié les différentes méthodes de dimensionnement mécanique des lignes aériennes dans son ensemble. Ceci nous a permis de déceler les différentes étapes de dimensionnement d'une ligne et suscité en nous une attention particulière à cause de sa complexité.

Nous avons pu mettre à la disposition de la CI-ENERGIES une interface afin de discuter les notes de calcul des entrepreneurs.

Ce qu'il faut retenir de ce travail, c'est qu'il nous a permis de :

- Calculer le poids équivalent des conducteurs et des câbles de garde ;
- Calculer la tension mécanique des conducteurs et câbles de garde ;
- Calculer la flèche au milieu des portées ;
- Calculer la longueur de l'arc des conducteurs et câbles de garde ;
- Calculer les charges transmises aux pylônes
- Déterminer le coefficient de sécurité en fonction des conditions météorologiques ;

Il est important de noter que tout dimensionnement des grandeurs mécaniques doit est précédé d'une étude topographique après la détermination du profil en long de la ligne.

En somme nous pouvons dire que ce projet de fin d'étude nous a permis d'acquérir une grande connaissance sur le domaine des réseaux de transport haute tension cependant notre outil de calcul peut être amélioré en enrichissant la base de données et étendre le dimensionnement à la fouille et la fondation des pylônes.

- Nous recommandons à CI-ENERGIES de comparer les résultats du progiciel avec un outil professionnel de dimensionnement mécanique pour sa validation.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LONGUEUR DE LA LIGNE DE FUITE DES CHAINES D'ISOLATEUR

ANNEXE 2 : LE CHOIX D'ISOLATEUR EN FONCTION DES TENSIONS DE SERVICE

ANNEXE 3 : LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES POUR CONDUCTEUR

ANNEXE 4 : LE RESEAU D'INTERCONNEXION DE LA CÔTE D'IVOIRE 2015

ANNEXE 5 : LE RESEAU D'INTERCONNEXION DE LA CÔTE D'IVOIRE A L'HORIZON 2030

ANNEXE 6 : QUELQUES FORMULES UTILISEES POUR LA CONCEPTION SUR EXCEL

ANNEXE 7 : CADRE INSTITUTIONEL DE L'ELECTRICITE

ANNEXE 1 : LONGUEUR DE LA LIGNE DE FUITE DES CHAINES D'ISOLATEUR

Tableau 3 – Longueur minimale de la ligne de fuite des chaînes d'isolateurs pour des lignes HTB

Classe de pollution	Tenue au brouillard (kg de sel/m³)	Ligne de fuite spécifique entre phases (mm/kV)	Tension nominale du réseau (kV)			
			63	90	225	400
			Tension la plus élevée pour le matériel (kV)			
			73	100	245	420
			Ligne de fuite minimale (mm)			
1	< 7	16	1 170	1 600	3 920	6 720
2	< 20	20	1 460	2 000	4 900	8 400
3	< 80	25	1 830	2 500	6 130	10 500

Nota : pour les lignes HTA, une chaîne de 2 éléments U 40 correspond à une classe de pollution 1 et une chaîne de 3 éléments U 40 à une classe de pollution 3.

Source : *Technique de l'ingénieur*

ANNEXE 2 : LE CHOIX D'ISOLATEUR EN FONCTION DES TENSIONS DE SERVICE

Tension de service (kV)	Tension maximale de service (kV)	Tension (kV) à fréquence industrielle de tenue sous pluie recommandé par CEI		Tension (KV) tenue aux chocs recommandés par la CEI		Isolateurs composant les chaines verticales des lignes de l'E.D. F			
		Isolation réduite	Isolation pleine	Isolation réduite	Isolation pleine	Nombre d'élément	Diamètre (mm)	Pas (mm)	Longueur Totale
63	72,5	-	140	-	325	4	254	127	508
90	100	150	185	380	450	6	254	127	762
150	170	275	325	650	750	10	254	127	1270
225	245	395	460	900	1050	14	254	127	1778
380	420	680	-	1550		21	280	146	3066

Source : Charles AVRIL (Editions Eyrolles 1974)

ANNEXE 3 : LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES POUR CONDUCTEUR

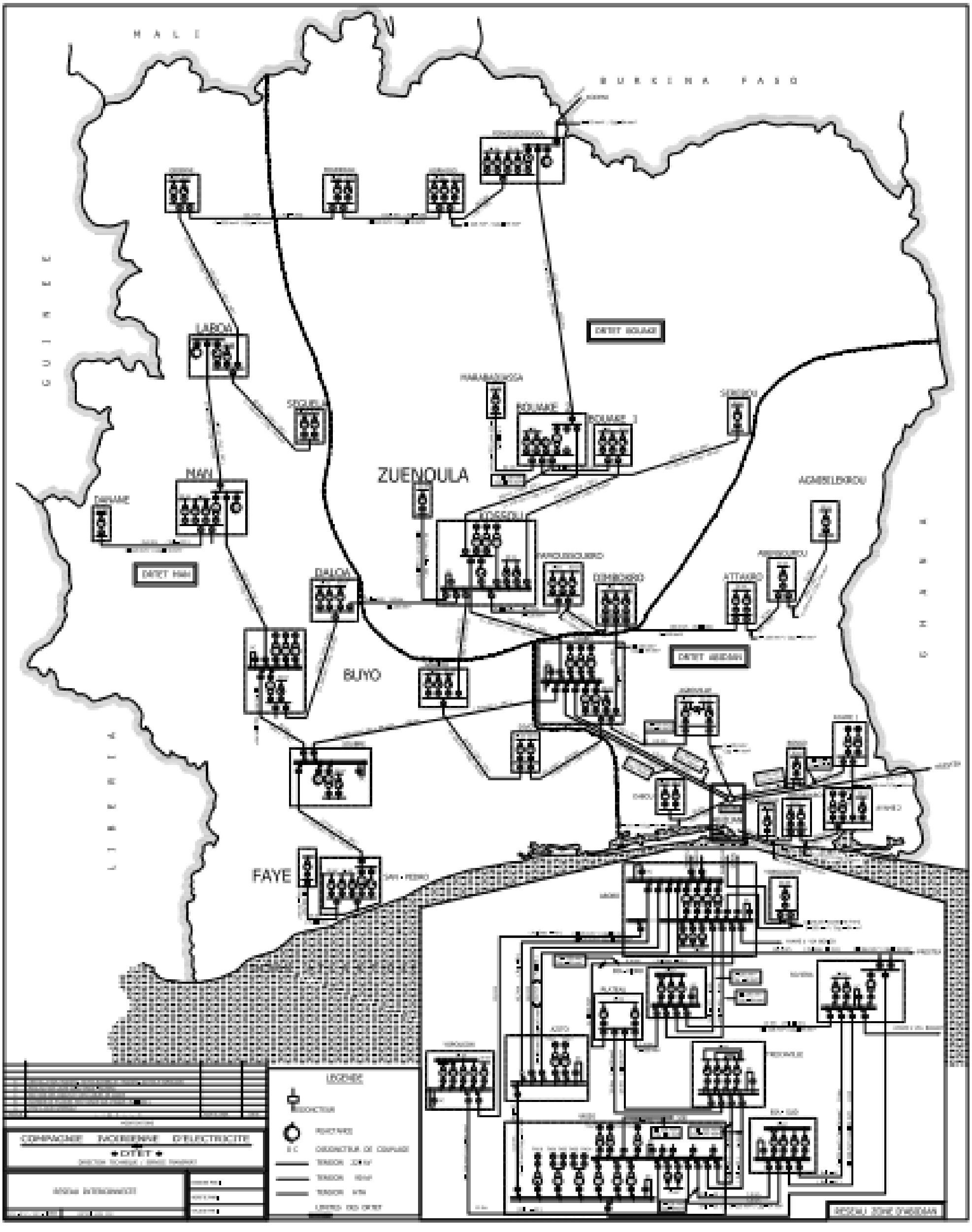
Tableau 1 – Caractéristiques comparées des matériaux utilisés

Caractéristique	Cuivre (1)	Almélec	Aluminium	Acier
Résistivité à 20 °C ..... (10^{-8} Ω.m)	1,72	3,26	2,82	~ 15
Coefficient de température ..... (10^{-3} K^{-1})	4,1	3,6	4	
Masse volumique ..... (kg.m^{-3})	8 890	2 700	2 700	7 800
Contrainte à la rupture en traction (2) ..... (MPa)	380 à 450	320 à 380	150 à 190	1 410 à 1 450 (2)
Module d'élasticité ..... (MPa)	câble : 105 000 fil : 120 000	câble : 60 000	câble : 60 000 fil : 65 000	câble : 185 000 fil : 200 000
Coefficient de dilatation linéique ..... (10^{-6} K^{-1})	17	23	23	11,5

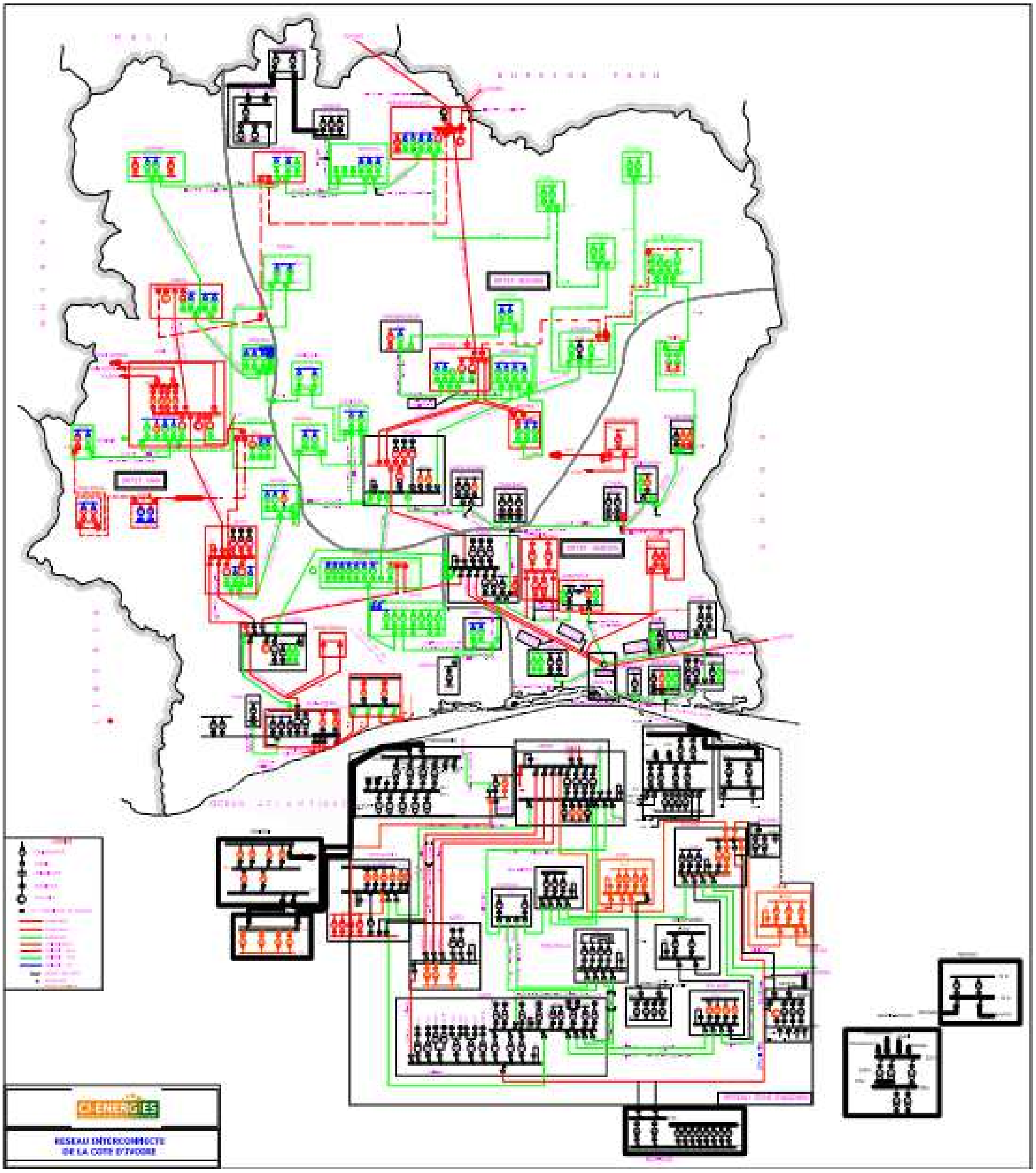
(1) pour mémoire.
(2) acier à très haute résistance mécanique ; contrainte minimale à 1 % d'allongement.

Source : Technique de l'ingénieur

ANNEXE 4 : RESEAU D'INTERCONNECTE DE LA CÔTE D'IVOIRE 2015



ANNEXE 5 : RESEAU D'INTERCONNECTE DE LA CÔTE D'IVOIRE A L'HORIZON 2030



ANNEXE 6 : QUELQUES FORMULES UTILISEES POUR LA CONCEPTION DU SUR EXCEL

Exemple de calcul du poids unitaire et de la tension mécanique du conducteur

Les caractéristiques mécaniques du conducteur

Soit

N13 : le diamètre (mm)

N14 : La section totale (mm²)

N15 : Le coefficient de dilatation (1/°C)

N16 : La charge de rupture (daN)

N17 : Le module d'élasticité

N18 : la résistance ohmique (ohm/km)

N19 : le poids unitaire (kg/m)

Données de base
N6 : Portée moyenne (m)
N22 : Le champ gravitationnel g (m/s²)
N24 : Pression maximale (N/m²)
N25 : Pression réduite (N /m²)
N26 : Température maximale (°C)
N27 : Température moyenne (°C)
N28 : Température minimale (°C)
N29 : Température de fonctionnement (°C)
AX12 : La pression du vent

Calcul du poids unitaire du conducteur

BC12=RACINE((($N$19+0,9*3,1416*AN12*(AN12+$N$13)/1000)*$N$22)^2+(AX12*($N$13+2*AN12)/1000)^2)

BC13=RACINE((($N$19+0,9*3,1416*AN13*(AN13+$N$13)/1000)*$N$22)^2+(AX13*($N$13+2*AN13)/1000)^2)

BC14=RACINE((($N$19+0,9*3,1416*AN14*(AN14+$N$13)/1000)*$N$22)^2+(AX14*($N$13+2*AN14)/1000)^2)

BC15=RACINE((($N$19+0,9*3,1416*AN15*(AN15+$N$13)/1000)*$N$22)^2+(AX15*($N$13+2*AN15)/1000)^2)

BC16=RACINE((($N$19+0,9*3,1416*AN16*(AN16+$N$13)/1000)*$N$22)^2+(AX16*($N$13+2*AN16)/1000)^2)

BC17=RACINE((($N$19+0,9*3,1416*AN17*(AN17+$N$13)/1000)*$N$22)^2+(AX17*($N$13+2*AN17)/1000)^2)

BC18=RACINE((($N$19+0,9*3,1416*AN18*(AN18+$N$13)/1000)*$N$22)^2+(AX18*($N$13+2*AN18)/1000)^2)

Calcul de la tension mécanique

Soit la tension initiale T1<=20% équivaut à T1=BH12 = 0,2*N16*10

Poids spécifique = DQ15 = BC12/$N$14 avec BC12 = Poids unitaire

Tension unitaire = DR15 = BH12/$N$14 avec BH12 = tension initiale

Poids spécifique (N/m.mm²)

DQ15 =BC12/$N$14

DQ16 =BC13/$N$14

DQ17 =BC14/$N$14

DQ18 =BC15/$N$14

DQ19 =BC16/$N$14

DQ20 =BC17/$N$14

DQ21 =BC18/$N$14

L'équation de changement d'état s'écrit sous la forme : $T_2^3 + A * T_2^2 = B$

$A = DT16 = (\$N\$6\text{^}2 * \$DQ\$15\text{^}2 * \$N\$17 * 10)/(24 * \$DR\$15\text{^}2)) - \$DR\$15 + \$N\$17 * 10 * \$N\$15 * (AK13 - \$AK\$12)$

$A' = DV16 = abs(DT16)$

$A/A' = DW16 = DT16/DV16$

$B = DU16 = (DQ16\text{^}2 * \$N\$6\text{^}2 * \$N\$17 * 10)/24$

$\Delta = DX16 == 13{,}5 * \frac{DU16}{DV16^3} - DW16$

$\Delta_1 = DY16 = (DU16)\text{^}(1/3)$; Si A=0 ;

$\Delta_2 = DZ16 = DV16/3 * (2 * COSH(ACOSH(DX16)/3) - DW16))$ Si A<>0 et $\Delta \geq 1$

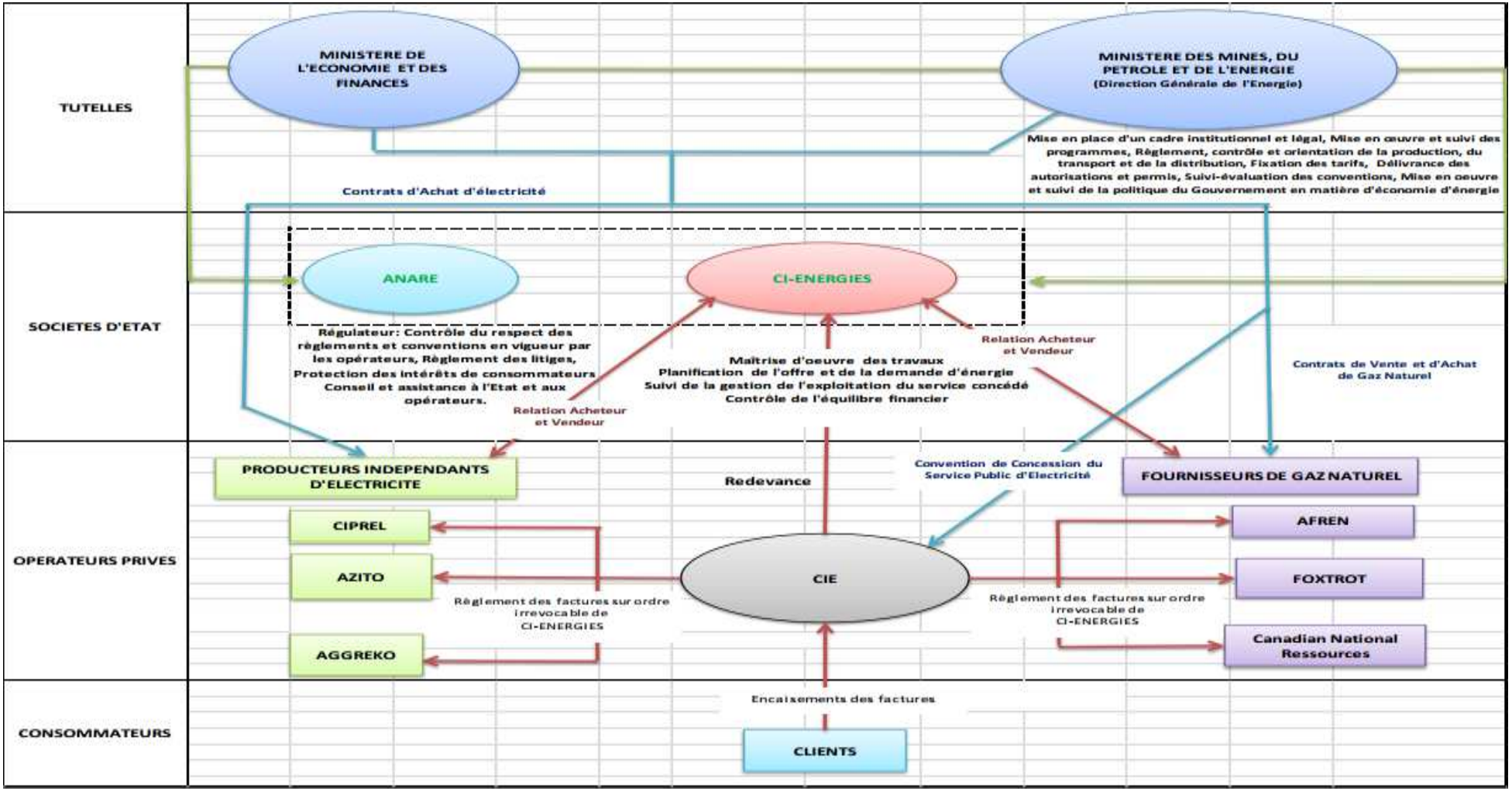
$\Delta_3 = EA16 = DV16/3 * (2 * COS(ACOS(DX16)/3) - DW16)$ Si A<>0 et $\Delta \leq 1$

La tension unitaire est t (N/mm²)

$t = DR16 = SI(DV16 = 0; DY16; SI(DX16 >= 1; DZ16; SI(R30 <= 1; EA16; FAUX)))$

$T_2 = BH13 = DR16 * \$N\$14$

ANNEXE 7 : CADRE INSTITUTIONNEL DE L'ELECTRICITE



BIBLIOGRAPHIE

[1] CHARLES AVRIL, « Construction des lignes aériennes à haute tension », technique française d'études et de réalisation – Editions Eyrolles (1974)

[2] BS EN 50341-1:2012, Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV - Part 1: General requirements — Common specifications

[3] J. Bradbury, « Sag and tension calculations for mountainous terrain », Dip. Tech. (Eng.), G. F. Kuska, C. Eng., M.I.E.E., and D. J. Tarr

[4] M. Jean-Jacques Graff, « Calcul mécanique des lignes aériennes, tome 3 », cours électrification rural de 2IE.

[5] Vanille Sandra TEFEGUIM, « Construction d'une ligne électrique haute tension 90kV », mémoire de fin de cycle 2IE

WEBOGRAPHIE

[6] http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/6.pdf

[7] http://197.14.51.10:81/pmb/ELECTRONIQUE/Materiels%20et%20ouvrages/d4429.pdf