



**Recherche d'une configuration hybride
optimale pour l'alimentation électrique du
Lycée Professionnel de Kaya.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER II

SPECIALITE
GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

OPTION
ENERGIE RENOUVELABLE

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2020

par

M'Bio Arba Michel Patrick OUEDRAOGO (N°20150030)

Encadrant 2iE : Pr. Moussa Y. SORO (Chef du département génie électrique, énergétique et industriel)

Maître de stage : Charles Omar BAYERO, Directeur Général de la société SATEL SA.

Structure d'accueil : Société Africaine de Télécom et d'Electricité (SATEL SA.)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Daniel Nguewo YAMEUGEU

Membres et correcteurs : Pr. Daniel Nguewo YAMEGUEU

Dr. Marie SAWADOGO

Dr. Moussa KADRI

Promotion [2018-2019]

DEDICACES

Je dédie ce mémoire :

- Avant tous, à ceux qui ont guidé mes premiers pas sur le chemin du savoir et qui sacrifient tant pour ma réussite : Mon **Papa** et ma **Maman**
- A ma **petite sœur** et mon **petit frère**,
- A ma famille d'accueil à Kamboinsé la **famille SAWADOGO**.

Daignez voir en ce document, les prémices d'un succès, cultivé dans le terreau de vos contributions diverses et inestimables.

Je ne l'oublierai jamais.

REMERCIEMENTS

Ces premières lignes nous tiennent tout particulièrement à cœur car ce travail n'aurait pas vu le jour sans l'aide très précieuse de plusieurs personnes :

En premier lieu, nous tenons à manifester notre redevabilité envers l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), notre école de formation. Les quelques années que nous y avons passées, en plus de nous avoir apporté les bases du métier d'ingénieur, auront été une très riche expérience humaine tant du fait de la multi-culturalité de ses étudiants que de la grande ouverture d'esprit dont ont su faire montre les professeurs à travers la qualité de leurs enseignements.

Nos profonds remerciements vont tout particulièrement à l'endroit de notre encadreur le Professeur Y. Moussa SORO qui a bien voulu accepter de tuteurer ces travaux.

Nous voulons adresser un merci spécial à l'endroit de M. Adama OUEDRAOGO, fondateur et Président Directeur Général de la Société Africaine de Télécom et d'Electricité (SATEL), Chevalier de l'Ordre du Mérite du Burkina Faso, pour sa bienveillante attention, la patience et la considération toute particulière dont nous avons bénéficié auprès de lui.

Nous voulons aussi remercier très vivement M. Charles Omar BAYERO Directeur Général (2018-2019) de la société SATEL, notre mentor et maître de stage, qui nous a non seulement accueilli au sein de la société SATEL SA, mais nous a aussi coaché du haut de sa forte expérience en gestion de projet.

Nous poursuivons tout naturellement par l'adresse de notre reconnaissance à l'ensemble de nos collègues de travail de la société SATEL SA pour l'accueil, la confiance et la bonne collaboration.

Nous ne saurions terminer cette série de remerciements sans exprimer notre profonde gratitude à l'Office allemand d'échanges universitaires (DAAD), pour le financement de notre cursus de Master et au-delà, pour les nombreuses opportunités qu'elle nous aura ouvertes.

Merci à toutes les personnes dont les noms n'ont pu être cités mais qui, de près ou de loin, ont contribué par leurs actions multiformes, à la réussite de notre formation académique concrétisé par la production du présent document.

Nous osons espérer que vous trouverez en ce travail, un réel motif de satisfaction et de fierté.

RESUME

Ce mémoire se penche sur la conception d'un « **réseau basse tension alimenté par une source hybride** », dans le cadre du projet de « **construction d'un lycée professionnel à Kaya dans la région du Centre-Nord** », pour le compte du Ministère de l'Education nationale, de l'Alphabétisation et de la Promotion des Langues nationales (MENAPLN) du Burkina Faso. L'objectif est de déterminer la combinaison de source photovoltaïque, de stockage, de groupe électrogène et d'approvisionnement SONABEL répondant le mieux aux besoins électriques et économiques du lycée en réduisant au maximum sa dépendance aux ressources fossiles.

Le calcul des performances de chaque configuration possible faisant intervenir de façon complexe une multitude de paramètres climatiques, électriques et économiques, nous avons conçu un modèle et l'algorithme qui lui correspond afin de calculer, de façon automatique et aussi exacte que nos connaissances le permettent, la consommation du lycée et la contribution de chaque source heure par heure sur une période de dix (10) années correspondant à la durée d'enregistrement météorologique à laquelle nous avons eu accès. Les critères de sélection de la configuration idéale étaient, par ordre d'importance décroissante, le taux de couverture des besoins électriques, le coût de revient du kWh et le taux de pénétration de la source PV. Les simulations ont porté sur les configurations Réseau seul, photovoltaïque seul, photovoltaïque couplé au réseau (commutation et parallèle), photovoltaïque couplé à un groupe (commutation et parallèle) et sur la proposition du dossier d'appel d'offre (DAO), chacune pour des puissances photovoltaïques de 12,5 à 692 kWc et des capacités de stockage de 0 à 76200 Ah.

Les résultats obtenus indiquent que la configuration du DAO permet de réduire de 12,13% la production de CO₂ et donne une autosuffisance électrique de 22,55% au lycée. Cependant, du fait de l'utilisation de batteries de stockage et de la possibilité offerte de les recharger par les sources thermiques, le kWh revient à 239,877FCFA soit 29,54% plus cher que le kWh obtenu par une classique connexion au réseau SONABEL via un poste de livraison. Et cet écart de coût s'accroît avec le temps.

L'étude a aussi réussi à identifier la configuration répondant le mieux aux critères de sélection : la configuration photovoltaïque couplé à un groupe parallèle (122kWc ; 215kVA ; sans stockage). Elle permet de réduire de 55,67% la production de CO₂ du lycée et lui donne une autosuffisance électrique de 60,97%. En outre elle offre un kWh à 168,107FCFA soit 9,22% moins cher qu'un raccordement au réseau SONABEL, et cet écart positif de coût augmente avec le temps.

Mots clés : Système hybride ; Groupe électrogène ; Photovoltaïque ; Stockage ; Retour sur investissement ; Impact environnemental.

ABSTRACT

This thesis focuses on the design of a “**low voltage installation powered by a hybrid source**”, as part of the project of “**construction of a professional high school in Kaya in the Center-North region**”, on behalf of the Ministry of National Education, Literacy and Promotion of National Languages (MENAPLN) in Burkina Faso. The objective is to determine the combination of photovoltaic source, storage, generator and SONABEL supply that best meets the electrical and economic needs of the school in order to minimize its dependence on fossil resources.

The calculation of the performances of each possible configuration consisting in a complex association of a multiple climatic, electrical and economic parameters, we have designed a model and the algorithm which corresponds to it in order to calculate, automatically and as exactly as our knowledge allows it, the consumption of the school and the contribution of each source hour by hour over a period of ten (10) years corresponding to the duration of meteorological recording to which we had access. The criteria for selecting the ideal configuration were, in decreasing order of importance, the rate of coverage of electrical needs, the cost price per kWh and the penetration rate of the PV source. The simulations focused on the Grid only, photovoltaic only, photovoltaic connected to grid (switching and parallel mode), photovoltaic connected to generator (switching and parallel mode) configurations and on the proposal of the tender document, each of them for different PV powers (from 12.5 to 692kWp) and different storage capacities (from 0 to 76200Ah).

The results obtained indicate that the configuration of the tender document allow to reduce the production of CO₂ by 12.13% and gives electrical self-sufficiency of 22.55% to the high school. However, due to the use of storage batteries and the possibility of recharging them by thermal sources, the kWh comes up to 239.877FCFA or 29.54% more expensive than the kWh obtained by a traditional connection to the SONABEL grid by a delivery station. And this gap widens over time.

The study also succeeded to identify the configuration that best meets the selection criteria: the parallel photovoltaic connected to generator configuration (122kWp; 215kVA; without storage). It reduces the high school's CO₂ production by 55.67% and gives it 60.97% electrical self-sufficiency. In addition, it offers a kWh at 168,107FCFA or 9.22% cheaper than a connection to the SONABEL grid, and this positive cost difference increases over time.

Keywords: Hybrid system; Generator; Photovoltaic; Storage; Return on investment; Environmental impact.

LISTE DES ABREVIATIONS

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

A

A: Ampère

AC : Courant alternatif

Ah : Ampère-heure

AIE : Agence Internationale pour l'Energie

Alt : Altitude du site

A_{ut} : Autonomie du stockage

B

Bi : Rayonnement direct incident dans le plan orienté optimal

BT : Basse tension

C

C : Coût de revient final du kWh sur 10 années de l'architecture testée

C_{abonnement}: Coût de l'abonnement au réseau SONABEL

C_{bat}: Capacité de stockage d'une batterie

C_{câble} : Coefficient de trainée aérodynamique des conducteurs

CCTP : Cahier des clauses techniques particulières

C_{facture} : Coût de facture mensuelle d'électricité acheté sur le réseau national

C_{gazoil} : Coût du carburant pour le groupe électrogène

C_{instal}: Capacité de stockage installée

C_{maint} : Coût unitaire de maintenance

C_{min} : Capacité minimale de stockage requise

CM SAF: Satellite Application Facility on Climate Monitoring

C₀ : Coût de réalisation de la source hybride

Cosφ : Facteur de puissance

CO₂ : Dioxyde de carbone

C_{reg_{max}} : Capacité limite de stockage gérable par régulateur de charge/décharge

C_{rempl} : Coût de remplacement du parc de batteries

C_{total} : Coût total de réalisation et de fonctionnement de la source électrique du lycée

D

$\Delta\eta_{pol}/\Delta\eta_{omb}/\Delta\eta_{T^{\circ}max}/\Delta\eta_{ond}/\Delta\eta_{câb}$: Chute de puissance due au salissement/à l'ombrage/à la température/aux pertes de l'onduleur/aux pertes dans le câble

$\Delta P'_{PV}/\Delta P'_{R}/\Delta P'_{G}$: Perte de puissance liée au transfert d'énergie $P'_{PV}/P'_{R}/P'_{G}$

$\Delta P_{PV}/\Delta P_{R}/\Delta P_{G}$: Perte de puissance liée au transfert d'énergie $P_{PV}/P_{R}/P_{G}$

ΔV : Chute de tension limite admissible dans le réseau BT du lycée

ΔU : Chute de tension en bout de ligne HTA

DAO : Dossier d'appel d'offre

DC : Courant continu

D_{ch}: Profondeur de décharge maximale admise

d_i : Quantité d'un item i

Di : Rayonnement diffus reçu dans le plan orienté optimal

E

E_{bat_{max}} : Energie maximale stockable dans les batteries

ENR : Energie renouvelable

E_{prev}/F_{prev}/S_{prev} : Energie active/réactive/apparente prévisionnelle quotidienne nécessaire aux activités du lycée

E_{sensible} : Besoin énergétique quotidien de la charge sensible

F

FCFA : Francs de la Communauté Francophone d'Afrique

G

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Gtep : Giga tonne équivalent pétrole

H

HTA : Haute tension catégorie A

I

IACM : Interrupteur aérien à commande manuelle

I_b : Courant nominal traversant le câble BT/AC

I_{cc} : Courant de court-circuit

I_{dech} : Courant de décharge du parafoudre

I_N : Courant nominal de ligne HTA

I_{n_{câb}} : Courant nominal traversant le câble BT/DC

I_{ondAC} : Courant alternatif nominale de sortie de l'onduleur

I_{ond_{max}} : Courant d'entrée maximal de l'onduleur

I_{sc} : Courant de court-circuit d'un module photovoltaïque

K

Ke : Coefficient d'extension

kg : Kilogramme

k_{ge} : Coefficient de charge maximal du groupe électrogène

K_{I_{sc}} : Coefficient de variation de I_{sc} avec la température

K_{p_{max}} : Coefficient de variation de P_{max} avec la température

k_{rec} : Coefficient de reclassement du groupe électrogène

Ks : Coefficient de simultanéité

k_{transfo} : Coefficient de charge maximal du transformateur

Ku : Coefficient d'utilisation

kVA : Kilovolt-Ampère

K_{V_{oc}} : Coefficient de variation de Voc avec la température

kW : Kilowatt

kWc : Kilowatt crête

kWh : Kilowattheure

L

l : Longueur de la ligne HTA

L : Longueur de câble BT

LPK : Lycée Professionnel de Kaya

M

m³ : Mètre cube

m_x : Masse de l'élément X

MCIA : Ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Artisanat

MENAPLN : Ministère de l'Education Nationale, de l'Alphabétisation et de la Promotion des Langues Nationales

MINEFID : Ministère de l'Economie, des Finances et du Développement

MPPT: Maximum power point tracking

N

η : Rendement du récepteur électrique

η_x : Rendement de l'équipement X

η_{P_x} : Rendement du transfert de d'énergie P_x

n : Nombre de sous champ

N_{cycle} : Nombre de cycle de charge/décharge limite des batteries avant remplacement

N_k : Niveau kéraunique de la zone

N_{rem} : Nombre de remplacement des batteries effectué

O

ONU : Organisation des nations Unies

P

ρ_{cu} : Résistivité linéique du câble BT/DC en cuivre

ρ_{air} : Masse volumique de l'air

P_{charge_{max}} : Puissance maximale de charge du stockage

P_{c_{instal}} : Puissance crête installée

P_{c_{min}} : Puissance crête minimale requise

P_{décharge_{max}} : Puissance maximale de décharge du stockage

P_{dispo} : Puissance photovoltaïque disponible

P_e : Puissance électrique consommée

P_{ge}/S_{ge} : Puissance active/apparente requise du groupe électrogène reclassé

P_{instal_h}/Q_{instal_h} : Puissance active/réactive de tous les récepteurs installés à l'heure h

P_{moy}/Q_{moy} : Puissance active/réactive quotidienne moyenne

P_{max} : Puissance maximale d'un module photovoltaïque

PNDES : Plan National de Développement Economique et Social

P_{ond} : Puissance d'entrée DC de l'onduleur

P_{prev}/Q_{prev} : Puissance active/réactive prévisionnelle de fonctionnement du lycée

P_{PV}'' : Surplus de puissance PV susceptible d'être stocké

P_{PV}/P_R/P_G : Puissance fournie par le champ PV/ le réseau/le groupe électrogène au récepteurs

P_{PV}'/P_R'/P_G' : Puissance fournie par le champ PV/ le réseau/le groupe électrogène au stockage

P_{reg_{max}} : Puissance maximale du régulateur de charge/décharge

P_{sens} : Puissance de la charge sensible

P_{transfo}/S_{transfo} : Puissance active/apparente requise du transformateur

P_u : Puissance utilisée

PV ou **P_v** : Photovoltaïque

P_{vG} : Architecture Photovoltaïque-Groupe électrogène

PV GIS : Photovoltaic Geographical Information System

P_{vR} : Architecture Photovoltaïque-Réseau national

Q

Q_e : Puissance réactive consommée

R

r : Résistance électrique de la ligne HTA

R_i : Part de rayonnement réfléchi à la surface du module

R_p : Ratio de performance du générateur photovoltaïque

S

SATEL : Société Africaine de Télécom et d'Electricité

S_b : Section minimal requise du câble BT

S_{câble} : Surface au vent du conducteur aluélec

S_{conducteur} : Section du conducteur aluélec

S_{emplois} : Puissance apparente convoyée par le câble BT/AC

S'_{ge} : Puissance apparente requise du groupe avant reclassement de puissance

SIG : Système d'Informations Géographiques

S_{mod} : Surface active d'un module photovoltaïque

SONABEL : Société Nationale Burkinabé d'Electricité

S_{ond} : Puissance apparente de sortie de l'onduleur

S_{support} : Surface au vent du support

STC : Conditions standard de test

T

θ_{carac} : Température caractéristique de l'aluminium selon le modèle de Drude

T_{amb} : Température moyenne ambiante de l'air

U

U_c : Tension de régime permanent du parafoudre

U_{source} : Tension composée de service du câble réseau BT/AC du lycée

V

V : Volt

VAr : Volt Ampère réactif

VBA : Visual Basic for Applications

V_{câb} : Tension de service du câble BT/DC

V_{disjOnd}/ I_{disjOnd} : Tension d'emplois/calibre du disjoncteur

V_{fusPV}/ I_{fusPV} : Tension d'emplois/calibre du fusible

V_{mpp_min}/V_{mpp_max} : Tension minimale/maximale de la plage MPPT de l'onduleur

V_{mpp_mod} : Tension du point de puissance maximale du module photovoltaïque

V_{OC} : Tension de circuit ouvert d'un module

V_{ondAC} : Tension de sortie AC de l'onduleur

V_{ond_max}/V_{ond_min} : Tension d'entrée maximale/minimale de l'onduleur

V_{stck} : Tension de service du système de stockage

W

W : Watt

X

x : Réactance de la ligne HTA

X_{40°} : Réactance linéique du conducteur aluélec

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs de K_u selon la catégorie de récepteur considérée

Tableau 2 : Carnet de piquetage de la ligne

Tableau 3 : hypothèses de comportement au démarrage des récepteurs

Tableau 4 : Reclassement de la puissance du groupe électrogène

Tableau 5 : Chute de tension maximale entre l'origine de l'installation et l'utilisation

Tableau 6 : Facteur d'émission CO_2 de la SONABEL sur la période 2012-2015

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats importants des meilleures configurations

Tableau 8 : Valeurs de K_c et K_z

Tableau 9 : Choix du type de parafoudre

Tableau 10 : Valeurs de φ , δ et I_{dech} pour les parafoudres de type II

Tableau 11 : Valeur de la tension de régime permanent U_c

LISTE DES FIGURES

- Figure 1** : Couvertures géographiques des bases de données du programme PV GIS
- Figure 2** : Paramétrage de la page PVGIS pour l'extraction des données d'ensoleillement
- Figure 3** : Méthode de calcul de valeur approchée de l'énergie électrique consommée
- Figure 4** : Schéma synoptique d'une architecture PV autonome
- Figure 5** : Schéma synoptique d'une architecture PvR
- Figure 6** : Schéma synoptique d'une architecture PvG
- Figure 7** : Synoptique des changes d'énergie considérés dans les simulations
- Figure 8** : Logigramme de fonctionnement de la source photovoltaïque
- Figure 9** : Logigramme de la fonction de recharge des batteries
- Figure 10** : Logigramme de la fonction de décharge des batteries
- Figure 11** : Logigramme de l'alimentation réseau de la charge
- Figure 12** : Logigramme de l'alimentation de la charge par le groupe électrogène
- Figure 13** : Synoptique du réseau d'alimentation BT du Lycée professionnel de Kaya
- Figure 14** : Résultats du bilan de puissance
- Figure 15** : Variabilité horaire et quotidienne de l'ensoleillement
- Figure 16** : Paramétrage de l'application pour la configuration 100%R
- Figure 17** : Résultats de la configuration 100%R
- Figure 18** : Paramétrage de l'application pour les configurations 100%PV
- Figure 19** : Résultats de la meilleure configuration 100%PV
- Figure 20** : Comparaison des besoins du lycée avec la productivité PV
- Figure 21** : Paramétrage de l'application pour la configuration du DAO
- Figure 22** : Résultats de la configuration du DAO
- Figure 23** : Pourcentage horaire de répartition du taux de remplissage des batteries
- Figure 24** : Illustration de la désynchronisation des besoins du lycée avec la productivité PV
- Figure 3** : Paramétrage de l'application pour les configurations PvG
- Figure 4** : Résultats des meilleures configurations PvG commutation (a) et parallèle (b)
- Figure 5** : Paramétrage de l'application pour les configurations PvR
- Figure 6** : Résultats des meilleures configurations PvR commutation (a) et parallèle (b)
- Figure 7** : Evolution des coûts des meilleures configurations de chaque architecture

LISTE DES FORMULES

Formule 1 : Calcul de la puissance active consommée par chaque récepteur

Formule 2 : Calcul de la puissance réactive horaire par catégorie de récepteur

Formule 3 : Calcul des puissances actives et réactives horaires des récepteurs du lycée

Formule 4 : Calcul des puissances actives et réactives horaires prévisionnelles du lycée

Formule 5 : Calcul des énergies actives et réactives prévisionnelles horaires consommées par le lycée

Formule 6 : Calcul des puissances actives et réactives horaires moyennes du lycée

Formule 7 : Calcul du facteur de puissance par défaut de l'installation

Formule 8 : Calcul de la capacité de batterie de compensation

Formule 9 : Calcul de la puissance réactive horaire compensée

Formule 10 : Calcul de la puissance apparente horaire prévisionnelle compensée

Formule 11 : Calcul de la puissance photovoltaïque minimale à installer

Formule 12 : Calcul de la chute maximale de puissance photovoltaïque due à la température

Formule 13 : Calcul de la chute maximale de rendement photovoltaïque due à la température

Formule 14 : Calcul de la chute de puissance photovoltaïque due à l'onduleur

Formule 15 : Calcul de la chute de puissance photovoltaïque due au câble

Formule 16 : Calcul du coefficient de performance du générateur photovoltaïque

Formule 17 : Calcul du nombre minimal de modules nécessaires

Formule 18 : Calcul du nombre de modules en série

Formule 19 : Calcul de la valeur maximale de la tension de circuit-ouvert

Formule 20 : Calcul du nombre de branches de modules parallèles

Formule 21 : Calcul de la puissance installée

Formule 22 : Calcul du critère de puissance nominale pour le choix de l'onduleur

Formule 23 : Calcul du critère de tensions limites pour le choix de l'onduleur

Formule 24 : Calcul du critère de courant maximal pour le choix de l'onduleur

Formule 25 : Calcul du courant maximal de court-circuit d'un module

Formule 26 : Calcul de la puissance horaire photovoltaïque disponible

Formule 27 : Calcul du rendement de transfert d'énergie du champ PV aux récepteurs

Formule 28 : Calcul de la capacité de stockage minimale nécessaire

Formule 29 : Calcul du nombre de branches de batterie

Formule 30 : Calcul du nombre de batteries en série par branche

Formule 31 : Calcul de la capacité installée

Formule 32 : Critère de capacité maximale pour le calcul du nombre de régulateurs

Formule 33 : Critère de puissance maximale de décharge pour calcul du nombre de régulateurs

Formule 34 : Critère de puissance maximale de charge pour le calcul du nombre de régulateurs

Formule 35 : Calcul du rendement de transfert d'énergie du champ PV au stockage

Formule 36 : Calcul du rendement de transfert d'énergie des sources thermiques au stockage

Formule 37 : Calcul de l'énergie maximale accessible à la charge et à la décharge dans les batteries

Formule 38 : Calcul de la puissance maximale de charge des batteries

Formule 39 : Calcul de la puissance photovoltaïque candidate au stockage

Formule 40 : Calcul du rendement de transfert d'énergie du stockage aux récepteurs

Formule 41 : Calcul de la puissance maximale de décharge des batteries

Formule 42 : Calcul de la puissance apparente de transformateur nécessaire

Formule 43 : Calcul de la puissance active de transformateur nécessaire

Formule 44 : Calcul du rendement de transfert d'énergie du transformateur aux récepteurs

Formule 45 : Calcul de la puissance active de groupe électrogène nécessaire

Formule 46 : Calcul de la puissance apparente minimale nécessaire du groupe électrogène selon le critère de puissance active requise

Formule 47 : Calcul de la puissance apparente minimale nécessaire du groupe électrogène selon le critère de tenue au choc de puissance transitoire

Formule 48 : Calcul de la puissance apparente minimale nécessaire du groupe électrogène selon le critère de puissance active acceptable

Formule 49 : Calcul de la puissance apparente reclassée

Formule 50 : Calcul du coefficient de reclassement de la puissance du groupe électrogène

Formule 51 : Calcul du rendement de transfert d'énergie du groupe électrogène vers les récepteurs

Formule 52 : Calcul de la puissance perdue lors de chaque transfert d'énergie

Formule 53 : Calcul de la section de câble DC minimale requise

Formule 54 : Vérification de la tenue du câble au courant de court-circuit

Formule 55 : Calcul de l'intensité du courant d'utilisation du câble

Formule 56 : Calcul de l'intensité admissible du câble

Formule 57 : Vérification de la chute de tension limite du câble

Formule 58 : Calcul du coût total de réalisation

Formule 59 : Calcul du nombre de cycles limites des batteries

Formule 60 : Calcul du coût total de la fourniture électrique du lycée sur les dix (10) années

Formule 61 : Calcul du prix de revient du kWh

Formule 62 : Calcul de la quantité totale d'énergie consommée par le lycée

Formule 63 : Calcul du taux d'autosuffisance électrique du lycée

TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES FORMULES	xi
TABLE DES MATIERES	xiii
PREAMBULE.....	1
INTRODUCTION	4
CHAPITRE I : GENERALITES	6
I. CONTEXTE ET JUSTIFICATION	7
1 Présentation de la structure d'accueil	7
2 Présentation du projet.....	8
2.1 Le poste transformateur HTA/BT	9
2.2 Le groupe électrogène secours	9
2.3 Le système photovoltaïque	10
3 Justification du thème et de la méthode d'investigation.....	10
II. OBJECTIFS DE TRAVAIL	12
CHAPITRE II : OUTILS ET METHODOLOGIE	12
I. COLLECTE DES DONNEES.....	13
1 Collecte des données météorologiques.....	13
2 Collecte des caractéristiques électriques des récepteurs.....	15
II. ESTIMATION DU BESOIN, PROFIL DE CHARGE ET COMPENSATION.....	16
1 Coefficients d'utilisation, de simultanéité et d'extension	16
2 Calcul du bilan de puissance	17
3 Besoins énergétiques prévisionnels.....	18
4 La compensation.....	18
III. TYPOLOGIE DES ARCHITECTURES TESTEES ET MODELISATION DES FLUX ENERGETIQUES	20
1 Champ des architectures de mixte étudiées.....	20
2 Diagramme des flux d'énergie	22

3	Modélisation des sources et des flux électriques.....	23
3.1	Le générateur photovoltaïque	23
3.1.1	La taille du champ PV	23
3.1.2	Configuration du champ PV et dimensionnement de l'onduleur MPPT	25
3.1.3	Logigramme de fonctionnement de la source photovoltaïque.....	26
3.2	Le stockage électrochimique	27
3.2.1	Détermination de la taille du stockage et choix du nombre de régulateur.....	27
3.2.2	Logigrammes de fonctionnement du stockage	28
3.3	La source réseau public	31
3.3.1	Description de la ligne.....	31
3.3.2	Le transformateur de puissance	31
3.3.3	Logigramme de fonctionnement de la source réseau	32
3.4	Le groupe électrogène	33
3.4.1	Choix du groupe électrogène.....	33
3.4.2	Logigramme de fonctionnement de la source groupe électrogène	35
4	Le réseau basse tension du lycée	36
4.1	Les liaisons basse-tension courant continu.....	36
4.2	Les liaisons basse-tension courant alternatif	37
IV.	CALCUL ET COMPARAISON DES PERFORMANCES DES CONFIGURATIONS.....	39
1	Séries de tests effectués	39
2	Méthode de comparaison des performances.....	39
2.1	Le coût de revient du kilowattheure	39
2.2	Calcul de l'indice d'autosuffisance	41
V.	OUTILS ET LOGICIELS UTILISES	42
	CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	39
I.	RESULTATS DES COLLECTES DE DONNEES.....	43
1	Bilan de puissance	43
2	Echantillon des données météorologiques.....	44
II.	PERFORMANCES DES ARCHITECTURES TESTEES	45
1	Présentation des résultats.....	45
1.1	Résultats de la configuration 100 % R	45
1.2	Résultats des configurations 100 % PV.....	46
1.3	Résultats de la configuration du dossier d'appel d'offre.....	48
1.4	Résultats des configurations PvG (commutation et parallèle).....	51
1.5	Résultats des configurations PvR (commutation et parallèle).....	52

2	Configuration optimale pour le LPK.....	54
		55
	CONCLUSION	56
	SUGGESTIONS.....	57
	BIBLIOGRAPHIE.....	xvi
	LISTE DES ANNEXES	xvii
	ANNEXE 1 : Locaux et Bâtiments du Lycée Professionnel de Kaya.....	xviii
	ANNEXE 2 : Caractéristiques électriques des récepteurs du Lycée professionnel de Kaya	xx
	ANNEXE 3 : Scenarios d’horaires de fonctionnement du lycée.....	xxi
	ANNEXE 4 : Détermination du temps moyen de fonctionnement des toilettes	xxiii
	ANNEXE 5 : Détails de dimensionnement de la ligne MT	xxiv
	Les paramètres géométriques de tenue des conducteurs	xxiv
	Les contraintes mécaniques principales	xxv
	Choix des supports de ligne et de leurs fondations	xxviii
	La section de conducteur optimale.....	xxix
	ANNEXE 6 : série des massifs normalisés	xxxi
	ANNEXE 7 : Cadre quantitatif estimatif de coûts d’installation et d’exploitation de la source électrique hybride du Lycée professionnel de Kaya.....	xxxii
	ANNEXE 8 : Méthode de dimensionnement des équipements de protection électrique	xxxv
	ANNEXE 9 : Prix unitaire du matériel et des consommables de réalisation et de fonctionnement de la source électrique du Lycée professionnel de Kaya	xxxvii
	ANNEXE 10 : Grille tarifaire de l a Société Nationale Burkinabé d’électricité	xxxix
	ANNEXE 11 : Liste des jours fériés régulièrement en vigueur au Burkina Faso et pris en compte lors des simulations	xl
	ANNEXE 12 : CALCUL DE L’EMISSIVITE CO2 DES CONFIGURATIONS	xli
	ANNEXE 13 : Résultats du bilan de puissance prévisionnel du lycée professionnel de Kaya.....	xlii
	ANNEXE 14 : Résultats des simulations	xlii
	Configurations en architecture 100 % PV	xliii
	Configurations en architecture PvR parallèle.....	xlvi
	Configurations en architecture PvR commutation	xlix
	Configurations en architecture PvG commutation	lii
	Configurations en architecture PvG parallèles	lv

PREAMBULE

En prélude aux détails de notre méthodologie et à la présentation des résultats auxquels nous sommes parvenus, nous souhaitons clarifier deux points essentiels qui sous-tendent la pensée de l'auteur de cette étude.

Premièrement ; l'ambition générale de ce travail

L'ingénieur remplit plusieurs fonctions dont entre autres celle de conseiller technique, lorsqu'il est associé à un processus d'orientation des décideurs face à un problème donné.

En effet, à l'image d'un organisme vivant, tout système (société humaine, entreprise etc.) aspire à se développer c'est-à-dire, à augmenter son bien-être général et celui de chacun de ses membres. Cependant, cette ambition peut être freinée par la survenue de problèmes auxquels l'organisme doit répondre par une réaction adaptée: une réaction disproportionnée, même en réussissant à enrayer le problème, consommerait trop de ressources, et mettrait en péril d'autres fonctions vitales du système. A contrario une réponse trop timide dépenserait inutilement des ressources car le problème persisterait. D'où la nécessité pour le système de recourir à au moins trois principaux organes pour identifier la solution efficace gaspillant le moins de ressource :

Un organe sensitif : lequel explore l'environnement, permettant au système de prendre conscience des ressources potentielles et de délimiter le champ des possibilités. Il est également mis à contribution pour identifier les probables origines fondamentales des problèmes qui ralentissent le développement du système : c'est la fonction des scientifiques chercheurs et des explorateurs.

Un organe législatif : c'est le décideur qui, dans une visée holistique et utilitariste doit décider de l'action à entreprendre afin de résoudre le problème identifié plus tôt par l'organe sensitif. Mais non seulement le décideur ne dispose pas toujours des connaissances techniques pour traduire sa volonté en réalisation concrète, mais de plus il est généralement en mal de déterminer parmi plusieurs possibilités, celle qui est à privilégier pour un effet optimal, surtout lorsque le problème revêt une forte composante technique comme le cas traité dans ce mémoire.

Un organe de réflexion : C'est là qu'intervient l'ingénieur conseil ou de conception, comme intermédiaire entre l'organe législatif et l'organe sensitif. Après avoir recensé ou conçu (dans le cas où le problème est inédit) les potentielles solutions, l'ingénieur doit identifier, grâce à

un modèle et des critères objectifs et pertinents, celle qui serait la plus judicieuse à mettre en œuvre. Ou tout au moins, il doit porter à la connaissance du décideur les conséquences et les implications de chaque solution.

Pour revenir au projet qui nous concerne, le problème est le besoin d'une source électrique hybride peu coûteuse et autonomisante pour l'alimentation d'un lycée régional au Burkina. Les données scientifiques nécessaires à sa résolution sont déjà disponibles sur le site PV GIS qui enregistre l'évolution horaire d'une dizaine de paramètres météorologiques. Notre étude complète cet état de l'existant en situant le contexte économique des prix et en estimant les besoins électriques du futur complexe.

C'est ainsi que nous avons conçu et réalisé cette étude, avec l'ambition d'en faire un outil de conseil à l'endroit des décideurs administratifs. Il s'agit ici de saisir la problématique en amont, dans sa phase d'étude de projet. En partant du besoin prévisionnel du LPK, des données météorologiques de la ville de Kaya et du contexte économique fixé par les fournisseurs d'équipement, l'ingénieur souhaite prévoir les retombées économiques, environnementales et stratégiques de chacune des possibilités envisageables.

Deuxièmement : le choix des critères de sélection de la solution optimale

L'optimum recherché dépend autant des performances intrinsèques de chaque architecture électrique que des modalités de détermination de cet optimum. D'où la nécessité, avant de se lancer à la recherche de la meilleure solution, de définir ce que l'on entend par « meilleure solution » c'est-à-dire de choisir les critères que doit remplir une architecture électrique pour prétendre être la meilleure. Les enjeux énergétiques, écologiques et sociaux mondiaux conduisent souvent à définir les meilleurs projets selon les canaux de la notion de développement durable. Ce sont les dimensions sociales, économiques et environnementales.

La dimension sociale est prise en compte et correspond à la couverture de l'ensemble des besoins électriques du lycée pour son bon fonctionnement. Le choix de ce critère fait écho à l'enjeu énergétique national d'accroître la couverture électrique du territoire burkinabé.

La dimension économique, extrêmement importante, est identifiée par le coût de revient du kWh. Le Burkina Faso a l'électricité la plus chère de la sous-région et l'une des plus chères au monde. Réduire le coût de ce vecteur énergétique moderne est aussi un des principaux enjeux de développement du pays.

En ce qui concerne l'impact environnemental des architectures testées, nous avons déterminé l'émissivité CO₂, mais n'en n'avons pas tenu compte comme critère pertinent de sélection de l'optimum dans le contexte burkinabé. Du moins, pas sous cette forme directe.

En effet, même en envisageant l'incroyable prouesse de reconvertir l'intégralité du parc de production électrique actuel du Burkina en un système 100% ENR, l'impact en termes d'économie de gaz à effet de serre (GES) resterait ridiculement insignifiant en proportion des quantités de GES mondialement émises. Il ne s'agit aucunement ici de dénigrer l'importance de la cause environnementale que nous reconnaissons être noble et indispensable à tout développement, mais nous faisons remarquer qu'elle ne pourrait être considérée de façon pertinente qu'à une échelle sous régionale voir mondiale à l'exemple des annuelles conférences des parties (COP). A la place du critère environnemental nous préférons celui d'autosuffisance énergétique, plus en phase avec les enjeux du secteur de l'énergie dans notre pays.

L'approvisionnement en énergie (hydrocarbures essentiellement) du Burkina dépend directement du climat de ses relations avec ses voisins côtiers, de l'ampleur des réserves mondiales en pétrole, du coût du baril, des fluctuations monétaires internationales etc. et même des humeurs socio-politiques des principaux pays producteurs de pétrole ou de l'état de maturité des nouvelles technologies extractives. L'évolution dans le mauvais sens d'un seul de ces facteurs, a le potentiel de mettre en péril toute l'économie du pays avec des retombées sociales et politiques imprévisibles. Le fait que le pic pétrolier mondial ait été annoncé en 2018 par l'AIE ne fait que renforcer la pertinence de ce critère. Accéder à l'autosuffisance énergétique est donc une urgente nécessité pour toute société souhaitant s'engager sereinement sur la voie d'un développement durable. Dans ce travail, nous l'associons au taux de couverture des besoins électriques du lycée par la source solaire.

NB :

Conscient que les conclusions de cette étude sont fortement sujettes à variation du fait des fluctuations imprévisibles de plusieurs paramètres d'entrée déterminants, mais soucieux de rendre ce travail utile et pertinent sur le long terme et dans une grande variété de contextes, nous avons conçu une application informatique capable de reprendre de façon automatique, l'ensemble de la méthodologie suivie, pour actualiser à tout moment les conclusions, si les conditions d'entrée venaient à évoluer.

INTRODUCTION

Dans son « World Population Prospects » de 2017, l'ONU prédit une hausse de la population mondiale de 7,55 milliards (en 2017 donc) à 9,77 milliards d'habitants en 2050, provoquant une augmentation de la consommation mondiale d'énergie de 13,5 Gtep en 2017 à 17,9 Gtep d'ici 2040, majoritairement dans les pays en voie de développement [1] [2]. Dans un tel contexte, l'Agence Internationale pour l'Energie (AIE) estime que les énergies renouvelables (ENR) devront représenter 50 à 90% des nouvelles capacités de productions électriques mondiales, si nous voulons rester en dessous de +2°C d'augmentation globale d'ici 2100 [2].

Au Burkina Faso en particulier, la transition énergétique a été prise en compte dans le cadre du Plan National de Développement Economique et Social (PNDES) 2016-2020. Il y est prévu « d'accroître la part des énergies renouvelables par le **mix énergétique** » et de « promouvoir l'**autonomisation** et l'**efficacité énergétique** au niveau national ». En plus des raisons écologiques, le Burkina a de réels motifs incitatifs surtout d'ordre économique et stratégique à se tourner vers les énergies renouvelables car la production électrique de ce pays repose quasi exclusivement sur les hydrocarbures importés à un coût de plus en plus élevé [3], tandis qu'entre 2010 et 2017 les prix du photovoltaïque et des batteries ont baissé respectivement de 70% et 40% [2]. En fait, ce dernier argument pourrait rapidement s'avérer plus pressant que la cause écologique dans la mesure où l'AIE a annoncé en 2018 le passage du pic pétrolier au niveau mondial [4]. C'est pourquoi, considérant l'énergie solaire comme un « **atout économique majeur** », le PNDES envisage dans son Objectif Stratégique 2.5 « l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la production totale d'électricité de 6,4% en 2015 à 30% en 2020 ». La décision d'assurer une partie significative de l'approvisionnement électrique des futurs lycées scientifiques et professionnels des chefs-lieux de région procède de cette volonté politique.

Dans sa conception, le Lycée Professionnel de Kaya (LPK) doit être alimenté par le réseau national SONABEL via un poste de transformation de 400 kVA-33 kV/0,4 kV construit à l'intérieur de l'enceinte. En cas de défaillance de ce réseau, un groupe électrogène de 250 kVA le remplace automatiquement. Ce secours concerne les charges principales, c'est à dire :

- l'administration en intégralité (bloc administratif et bâtiment gestion des ateliers)
- la salle polyvalente en intégralité
- l'infirmerie en intégralité
- la cantine en intégralité
- l'éclairage, le système de détection incendie, les armoires de brassage informatique, les prises de courant 2P+T et les brasseurs d'air de tous les autres bâtiments.

En outre, un système photovoltaïque (PV) de 25 kWc connecté au réseau de distribution interne basse tension et muni d'un stockage électrochimique par batteries d'accumulateurs plomb-acide rechargé prioritairement au photovoltaïque est prévu par le Cahier des clauses techniques particulières (CCTP). La capacité de stockage envisagée par le maître d'ouvrage est de 2500 Ah sous 48V et réservée uniquement aux charges dites sensibles que sont :

- Les circuits d'éclairage de tous les bâtiments,
- L'autocommutateur, les armoires de brassage informatique et la détection incendie

Le but de ce mix énergétique est double :

- Réduire le poids de la facture électrique du complexe,
- Minimiser l'impact environnemental de la consommation énergétique du lycée.

Si le principe d'une telle configuration est justifié par les enjeux nationaux et internationaux décrits plus tôt, les détails techniques de sa mise en œuvre sont par contre discutables.

En effet, une étude menée en 2007 par l'AIE sur plusieurs projets dans des pays de la zone subsaharienne dont le Burkina Faso, concluait sur la non viabilité économique des systèmes hybrides dans le contexte de coût des énergies de l'époque [5]. Il est légitime de se demander si ces conditions ont changé depuis, et dans quels cas leurs impacts positifs sont intéressants.

En outre, il est connu que, du fait d'un effet d'échelle, les bénéfices économiques et écologiques d'un générateur photovoltaïque augmentent avec sa puissance installée. Nous pouvons donc nous interroger sur l'intérêt de vouloir construire un générateur PV de seulement 25 kWc, quand la charge prévisionnelle du lycée est dix fois supérieure.

Toujours dans le même intérêt, est-il pertinent d'allouer les trois-quarts du budget du système PV pour un stockage électrochimique d'une autonomie de quelques heures quand il aurait été possible d'employer ces ressources pour acquérir un générateur photovoltaïque plus grand ?

L'idée derrière ces interrogations c'est donc la remise en question de la configuration du mixte électrique du complexe et son optimisation. La notion de configuration optimale ici se rapporte à une configuration assurant 100% des besoins électriques du lycée en minimisant le coût du kWh et la contribution des sources électriques thermiques.

Une approche empirique consistant à tester chaque configuration grandeur nature afin d'enregistrer leurs performances respectives sur le moyen terme afin de dégager la plus efficiente, poserait des contraintes évidentes de temps et de matériel. C'est pourquoi nous avons généralement recours à l'outil informatique pour simuler les essais. Un certain nombre de logiciels tels que RetScreen, HOMER ou ECREEE ont été développés dans cet objectif.

Mais ils sont soit onéreux, soit limités dans les options de paramétrage, soit inadaptés aux contextes particuliers du Lycée Professionnel de Kaya.

Au regard de ce qui précède, notre étude consistera essentiellement à mettre au point sur Excel/VBA un programme facile d'accès qui prend en compte les contraintes économiques (coût du matériel, de l'énergie etc.), techniques (normes, exigences du CCTP, besoins etc.), et météorologiques (ensoleillement, température moyenne etc.) et effectue les tâches suivantes :

- réaliser le bilan de puissance compensée de l'installation ;
- produire le profil de charge quotidien type du lycée ;
- dimensionner de façon exhaustive les composantes de chaque source ;
- simuler les flux horaires d'énergie produite, échangée ou perdue entre les sources et les récepteurs sur une période de dix ans de fonctionnement du complexe ;
- calculer la consommation d'hydrocarbure sur une période de dix années et en déduire l'émissivité CO₂ moyenne du kilowattheure (kWh) consommé ;
- calculer les coûts de réalisation, de fonctionnement et de maintenance de l'installation sur dix années pour déduire le coût de revient moyen du kWh consommé sur cette période.

Dans cette optique, l'intérêt des conclusions de notre étude est de permettre :

- dans l'immédiat, de déterminer la configuration qui assure l'ensemble des besoins électriques du LPK tout en minimisant le plus possible le coût de revient et l'émissivité CO₂ de chaque kWh consommé,
- sur une échelle plus générale, de proposer une méthode et un outil (appliquant automatiquement cette méthode), pour déterminer la configuration la plus adaptée pour l'alimentation électrique d'un établissement comme le LPK.

Pour ce faire, nous commencerons par une collecte des données météorologiques horaires sur la période 2007-2016, de la zone d'implantation du projet à partir de la base de données du programme PV Gis. La phase de collecte se poursuivra par le recensement des caractéristiques électriques de l'ensemble des récepteurs du LPK.

Ensuite un scénario horaire du fonctionnement quotidien de chaque récepteur nous permettra de déduire le profil de charge d'une journée typique du lycée. Nous recueillerons également auprès des fournisseurs, les prix de vente des principales composantes de chaque source électrique envisagée. Puis nous dimensionnerons chaque source électrique.

Les architectures PvR, PvG, 100% PV, 100% R et du DAO seront simulées. Leurs meilleures configurations seront classées et feront l'objet de comparaisons et de discussions.

Nous terminerons par une conclusion générale et l'émission de quelques suggestions.

CHAPITRE I : GENERALITES

I. CONTEXTE ET JUSTIFICATION

1 Présentation de la structure d'accueil

Dans le souci de la mise en œuvre pratique des connaissances théoriques acquises lors de notre formation académique à l'Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), nous avons eu l'honneur d'être accueilli depuis 2017 dans une entreprise de droit privé burkinabé dénommée la Société Africaine de Télécommunication et d'Electricité (SATEL), créée en tant qu'Entreprise Personnelle en septembre 2001 par M. Adama OUEDRAOGO, actuel Président Directeur Général (PDG). Dans son évolution, la société ouvre en novembre 2011 une filiale à Bamako au Mali, suivi en juillet 2014 par la création d'une succursale en Côte d'Ivoire. Dans cette dynamique, elle évolue en octobre de la même année en Société Anonyme avec un capital de cent vingt-quatre millions (124 000 000) de francs CFA. Son siège social est à Ouagadougou au Burkina Faso, sis dans l'immeuble SOMDOUYA (ZAD2) sur le boulevard des TENSIBA. En outre SATEL SA intervient régulièrement au Niger, au Togo et au Bénin.

La structure emploie un personnel permanent d'une cinquantaine d'agents répartis entre les trois Directions suivantes :

- **l'Administration générale**, constituée du Cabinet de Président Directeur Général, du Secrétariat Général, du Service des Ressources Humaines et du Service Courriers ;
- **la Direction Technique et des Etudes**, constituée du Département Courant fort, en charge des projets de ligne MT, BT, et d'éclairage public ; et du Département Courant faible chargé des projets d'électricité domestique, de réseaux télécoms et de la sécurité électronique ;
- **la Direction de l'Administration et des Finances**, constituée du Service du Recouvrement, du Service achat et approvisionnement, du Service comptable et financier et du Service commercial et de la logistique.

Le champ d'activités de la société SATEL s'étend principalement à l'électricité industrielle et domestique, de la production à la consommation en passant par la transformation la distribution en Moyenne Tension et en Basse Tension.

Grâce à son partenariat exclusif avec la société française Fonroche, SATEL SA est distributrice et installatrice agréée des équipements d'éclairage public photovoltaïque de ce constructeur dans toute la sous-région.

Elle est également compétente en ce qui concerne la fourniture et la mise en œuvre de matériels informatiques tels que la fibre optique, la vidéo surveillance et le contrôle d'accès.

Dans sa dynamique, SATEL SA est détentrice de plusieurs agréments techniques tant du public (Etat burkinabé) à travers les ministères en charge des mines, de l'énergie, de l'habitat, de l'urbanisme, de la télécommunication, des réseaux informatiques, du transport, des postes et de l'économie ; que du privé avec des entreprises telles que la BRAKINA, la SODIBO, la SEMAFO.

Ainsi, forte de son capital d'expérience au niveau national et sous-régional, du dynamisme de son personnel et de la qualité reconnue de ses réalisations, la société SATEL SA est totalement apte à relever tous les défis liés aux projets qui viendraient à lui être confiés. C'est au regard de cela qu'en mars 2018 elle a été désignée attributaire du lot 3 du marché N°2018-0001/ACOMOD-BURKINA/DG relatif aux travaux d'installation d'un réseau basse tension hybride comptant pour la construction d'un lycée professionnel à Kaya dans la région du Centre-Nord.

C'est justement dans le cadre de l'exécution dudit marché que l'inspiration nous est venue de mener une réflexion sur le caractère optimal ou non du système issu du DAO et dans le cas échéant, de proposer un système plus performant, c'est-à-dire plus économique et plus écologique, de fourniture d'électricité.

2 Présentation du projet

Le projet qui inspire cette étude se déroule dans la ville de Kaya, chef-lieu de la région du centre Nord du Burkina Faso.

Les travaux à exécuter comprennent la fourniture, la mise en place, l'alimentation, le raccordement et le réglage de tous les appareils et appareillages nécessaires au bon fonctionnement de l'installation, les essais préalables et sa réception. Ils se composent en particulier de :

1. La construction des sources d'énergie (Poste de livraison à comptage HTA, postes de transformation, groupe électrogène, système solaire photovoltaïque)
2. L'alimentation du poste de transformation depuis le réseau public HTA de 33 kV
3. L'installation d'un tableaux généraux basse tension (TPE, TGBT1, TGBT2 et TGBT3)
4. La distribution générale basse tension
5. La distribution réseau informatique et réseau téléphonique
6. L'installation d'un système d'éclairage solaire de sécurité

2.1 Le poste transformateur HTA/BT

Ce poste de transformation est situé dans le bâtiment prévu à cet effet en limite de propriété. Il s'agit d'un poste de modèle 15 TS selon les spécifications de la SONABEL. Il abrite :

- Un transformateur de 400 kVA
- Un cellule réseau SM6
- Un cellule protection transformateur SM6 y compris fusibles
- Un Disjoncteur compact d'abonné 1000A
- Un Système de comptage d'énergie double tarif
- Un Compensateur d'énergie réactive 15 kVAr installé en amont du comptage
- Des Affiches réglementaires
- Du Matériel de sécurité

L'alimentation du poste se fera en descente aéro-souterraine au terme d'une dérivation faite à partir d'une ligne HTA SONABEL passant à proximité.

2.2 Le groupe électrogène secours

Le groupe est destiné à remplacer automatiquement les manques de tension constatées sur le réseau de distribution publique. Le groupe devra atteindre sa vitesse et sa tension nominale huit secondes après l'information « manque de tension ». L'arrêt du groupe sera commandé 2 à 5 minutes après le retour du courant secteur.

Le groupe électrogène est prévu être du type capoté et insonorisé de puissance électrique 200 kVA sous 230/400 V et un cosinus phi de 0,8, fonctionnement secours, sous température ambiante de 45°C et assurera l'alimentation des locaux et charges suivantes :

- l'administration en intégralité
- la salle polyvalente en intégralité
- l'infirmerie en intégralité

- la cantine en intégralité
- l'éclairage, le système de détection incendie, les armoires de brassage informatique, les prises de courant 2P+T, les brasseurs d'air de tous les autres locaux

Il est pourvu d'un dispositif d'alimentation automatique comprenant :

- une cuve (500L) de la réserve journalière équipée d'une pompe électrique, d'une pompe à main avec canalisation de retour au réservoir
- les tuyauteries de liaison entre le réservoir journalier et le groupe avec robinet filtre, flexible et vanne police commandée de l'extérieur du local.

2.3 Le système photovoltaïque

Il est prévu qu'une partie de la consommation énergétique de chaque lycée soit prise en charge par un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution interne basse tension de chaque lycée et de puissance installée de 25 kWc.

Pour continuer à assurer la continuité de service en cas de défaillance de la source normale (SONABEL) et de la source secours (Groupe électrogène), il est prévu que le système photovoltaïque connecté au réseau soit équipé d'un système de stockage par batterie d'accumulateur type OPZS de tension individuelle 2V. La capacité du système de stockage aura au moins une capacité 2500Ah sous une tension du système de 48V. La charge des batteries d'accumulateurs se fera prioritairement par l'énergie solaire. Les charges prises en compte par le système de stockage concernent :

- Les charges sensibles tels que l'autocommutateur, les armoires de brassage informatique, la détection incendie
- L'éclairage de tous les locaux et les prises de courant 2P+T confort.

Un système intelligent de gestion du système de stockage doit permettre de gérer de façon optimale l'utilisation des batteries d'accumulateur.

3 Justification du thème et de la méthode d'investigation

Comme nous l'avons annoncé dans le préambule, face un problème, l'idéal est d'utiliser le minimum de ressource permettant une résolution définitive. Il s'agit d'optimiser l'utilisation de ressource qui sont en générales limité. L'idée d'implanter un système hybride pour l'alimentation du LPK alors que classiquement c'est une connexion au réseau qui est

effectuée, découle de la volonté de minimiser l'impact écologique de cet approvisionnement en énergie, conformément au contexte mondial actuel de réduction des GES. En outre, cette option permet de réduire la dépendance du complexe professionnel vis-à-vis des hydrocarbures importés et en raréfaction continue à l'échelle mondiale. Il convient, de trouver la configuration électrique offrant ces avantages en assurant la desserte électrique du lycée pour un coût de réalisation et d'entretien minimum.

La comparaison des efficacités économiques, électriques et écologiques de chaque configuration implique l'enregistrement et l'analyse de leurs performances de fonctionnement sur une longue durée : 5 ans à 10 ans, voir même plus. Sur ces échelles de temps, des expérimentations grandeur nature seraient difficiles à mettre en œuvre et à conduire en plus d'être extrêmement coûteuses, d'autant plus qu'il faudrait ainsi tester une dizaine de configurations différentes. En outre, Les systèmes hybrides ont un niveau de complexité élevé du fait de la multitude de choix d'options et de combinaisons ce qui rend l'option des itérations manuelles peu commode et très sujette aux erreurs.

Pour toutes ces raisons, les ingénieurs et les chercheurs ont souvent recours, pour ce type de projet, à des logiciels de simulation et de comparaison des configurations. Parmi les plus connus nous pouvons citer HOMER et Retscreen.

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables ou Modèle d'Optimisation pour systèmes Hybrides à Energies Renouvelables, en anglais) est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybrides, composés de groupes électrogènes, de systèmes de cogénération, d'éoliennes, de systèmes photovoltaïques, de systèmes hydrauliques, de batteries, de piles à combustible, de la biomasse et bien d'autres, l'ensemble étant connecté au réseau ou non. Il permet d'estimer l'émissivité CO₂, le coût du kWh, le taux de pénétration des sources renouvelables et bien d'autres résultats de sortie en fin de chaque simulation. Il existe depuis 1993 sur initiative du National Renewable Energy Laboratory qui l'a développé pour les programmes d'électrification ruraux en zones isolées. Il est de ce fait très complet mais en devient complexe d'utilisation. De fait, sa prise en main requiert une formation dédiée, même pour les spécialistes du domaine. En outre, depuis 2006, ce logiciel n'est disponible que sous condition du paiement d'une licence annuelle. Malgré son haut degré de performance ces raisons rendent trop coûteuses l'acquisition et l'utilisation du logiciel HOMER, limitant presque exclusivement son emploi au niveau de quelques institutions nationales et internationales spécialisées.

Le logiciel Retscreen par contre, en plus d'une version professionnelle payante, propose une version libre d'accès extrême facile à prendre en main mais moins performante. De plus celle-ci présente l'inconvénient d'offrir peu de latitude dans le choix des caractéristiques du système hybride que l'on souhaite simuler.

Par cette étude et l'application qu'elle permet de concevoir, nous ambitionnons d'offrir un outil aux performances acceptables pour une étude d'avant-projet, facile d'accès à tous car conçu sur VBA et disponible sur n'importe quel lecteur de fichier Excel et permettant d'être plus précis sur les détails configurationnels à tester.

II. OBJECTIFS DE TRAVAIL

Objectif général

L'objectif général de notre étude est de proposer, pour le cas du Lycée professionnel de Kaya, l'architecture d'approvisionnement électrique répondant le mieux aux exigences techniques, économiques et stratégiques.

Objectifs spécifiques

Pour atteindre cet objectif principal, nous avons ciblé plusieurs objectifs spécifiques ci-après :

- Conception d'un outil de simulation du fonctionnement des architectures de mixte électrique appliquées aux conditions du LPK capable de :
 - calculer les dimensions optimales de chaque organe du système ;
 - calculer les échanges d'énergie entre les organes du système ;
 - évaluer les implications financières, énergétiques et écologiques de différents scénarios sur dix années de service.
- Détermination des performances économiques, énergétiques et d'autonomie des configurations Pv, PvG et PvR (avec et sans stockage ; parallèle ou commutation)
- Détermination de la configuration optimale

CHAPITRE II : OUTILS ET METHODOLOGIE

I. COLLECTE DES DONNEES

1 Collecte des données météorologiques

Faute de station météo dans la zone de Kaya, nous avons utilisé l'[outil européen d'évaluation des ressources solaires](#) : Photovoltaic Geographical Information System version actualisée du 05/11/2019 (PV GIS.5). Il extrait les valeurs d'irradiation solaire à partir de données raster fournies par les satellites géostationnaires du programme METEOSAT [6] en tenant compte des effets d'absorption et de diffraction dus aux nuages, poussières, vapeurs d'eau et autres aérosols atmosphériques. Son champ d'action couvre la totalité des continents africain, européen ainsi qu'une majorité du continent asiatique à partir de la longitude 60°Nord (**Fig.1**).

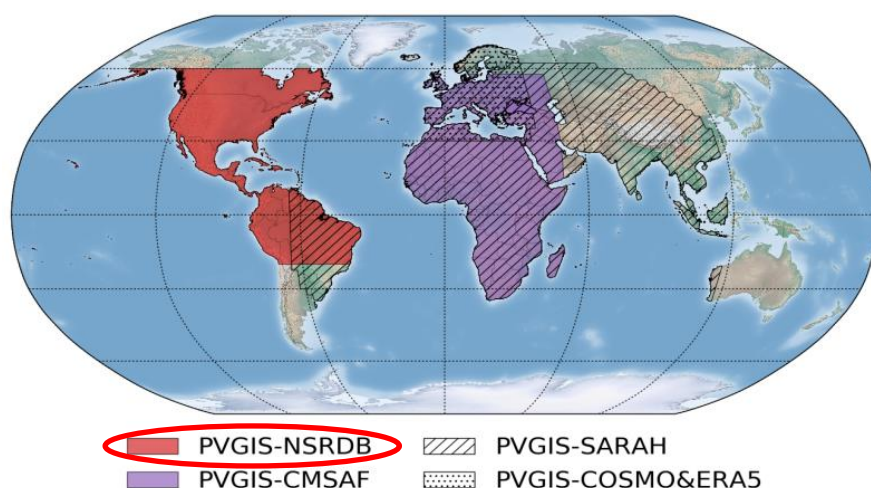


Figure 1 : Couvertures géographiques des bases de données du programme PV GIS

Voici étape par étape, la procédure d'extraction des données que nous avons adoptée, illustrée par la figure **Fig.2** :

- 1- Sur le site web nous renseignons le nom de la ville d'implantation du projet « Kaya-Burkina Faso » ou ses coordonnées géographiques (13.086 ; -1.084). il est aussi possible de pointer directement sur la carte l'emplacement du site.
- 2- Par défaut, nous choisissons l'option « Horizon calculé » qui calcule les effets d'ombrage liés au relief géographique de la zone.
- 3- Nous activons l'onglet « Données horaires », qui permet d'accéder à la base de données météorologiques la plus continue disponible.
- 4- Nous choisissons la base de données du Satellite **Application Facility on Climate Monitoring** (CM SAF) car sa zone de balayage est centrée sur le continent africain.

- 5- Nous entrons l'intervalle 2007-2016, qui est la période d'enregistrement accessible.
- 6- Le type de montage prévu est celui à axes « fixes », sans dispositif de traqueur solaire.
- 7- Nous choisissons l'option de « recherche de l'inclinaison et azimuts optimaux ».
- 8- Nous cochons la case « Composantes du rayonnement » pour avoir les données d'ensoleillement.
- 9- Puis nous accédons aux données en cliquant sur le bouton « Télécharger cvs »

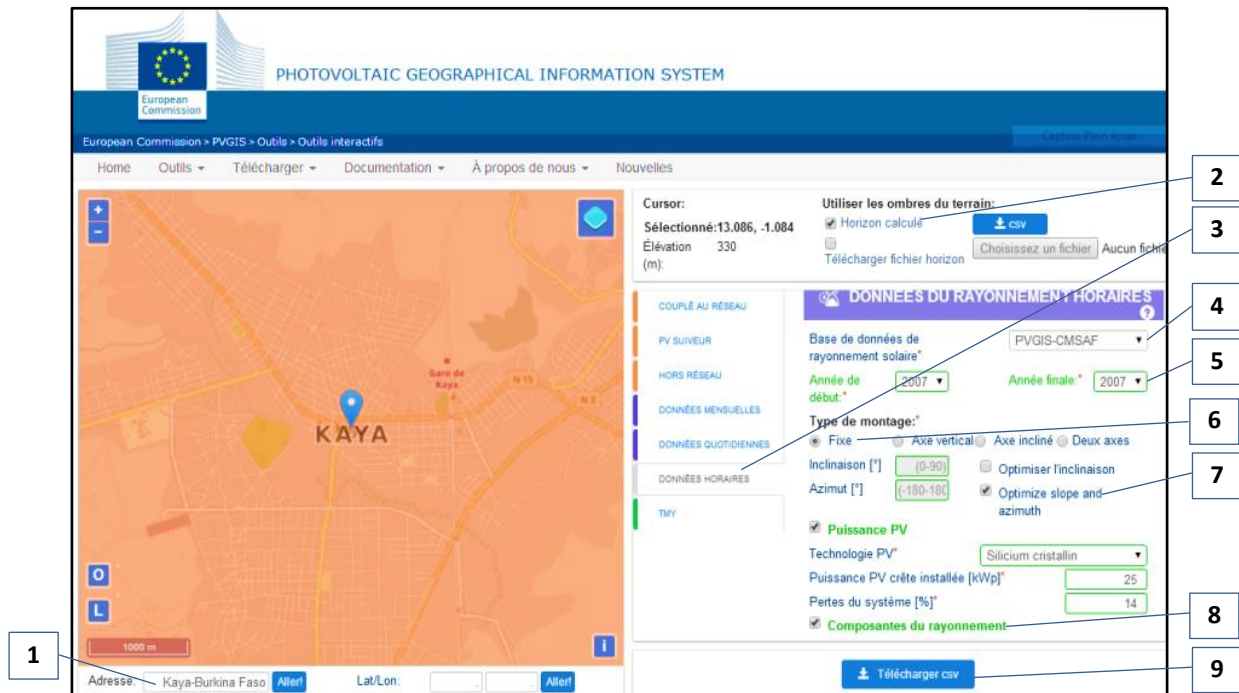


Figure 2 : Paramétrage de la page PVGIS pour l'extraction des données d'ensoleillement de la ville de Kaya

Les informations collectées indiquent pour chaque heure de la période allant de 00h52min du 01/01/2007 à 23h52min du 31/12/2016 :

- Le rayonnement direct **B_i** incident dans le plan orienté optimal en W/m^2 ;
- Le rayonnement diffus **D_i** reçu dans le plan orienté optimal en W/m^2 ;
- La part **R_i** de rayonnement réfléchi à la surface du plan de module PV en W/m^2 ;
- L'angle de hauteur du soleil dans le ciel en degrés ;
- La température moyenne ambiante de l'air **T_{amb}** en $^{\circ}C$;

La vitesse moyenne du vent **V_{10}** en m/s à une hauteur de 10m du sol

2 Collecte des caractéristiques électriques des récepteurs

Nous devons connaître la puissance nominale de chaque récepteur afin d'estimer la consommation électrique brute du complexe. De plus, pour éviter les très fréquentes surestimations de la puissance requise, il convient d'identifier la nature de chaque récepteur, le bâtiment et la pièce où elle sera installée afin d'attribuer des coefficients de foisonnement réalistes durant la phase de bilan de puissance. Le tableau en **Annexe 1** énumère les bâtiments du complexe et les salles qui ont été considérées au cours de ce recensement.

Les caractéristiques électriques qui nous ont intéressé sont :

- le régime de fonctionnement : monophasé ou triphasé,
- la puissance utile en W,
- le rendement,
- la tension nominale d'utilisation en V ou le courant nominal de fonctionnement en A,
- le facteur de puissance nominale (**Cosφ**).

Les équipements recensés ont ainsi été regroupés selon cinq catégories :

- l'éclairage : comptant les luminaires plafonniers, les dalles LED et les appliques sanitaires,
- les prises électriques : de type 2P+T pour les applications courantes en bureaux et salles de classe. Les appareils dont le branchement sera considéré sont :
 - le matériel de bureautique : les ordinateurs bureautiques et leur back up, les imprimantes, les photocopieuses, les téléphones fixes et les scanners ;
 - le matériel didactique : les outils d'atelier que nous ramènerons tous à des moteurs, les ordinateurs portables, les projecteurs et les appareils de sonorisation ;
 - le matériel de commodité : les chauffe-eau électriques, les réfrigérateurs et les distributeurs d'eau.
- la ventilation : incluant aussi bien les brasseurs plafonniers que les extracteurs d'air,
- la climatisation : c'est à dire les climatiseurs de type split ainsi que l'évaporateur de la chambre froide.
- la télécommunication : cette catégorie regroupe l'autocommutateur et son ordinateur serveur central, les armoires de brassages et leurs onduleurs respectifs et les routeurs de connexion internet des bâtiments administratifs.

II. ESTIMATION DU BESOIN, PROFIL DE CHARGE ET COMPENSATION

1 Coefficients d'utilisation, de simultanéité et d'extension

Le coefficient d'utilisation **Ku** tient compte du fait que les récepteurs fonctionnent généralement en dessous de leur puissance nominale. Nous nous sommes conformés aux normes CI 61439-1 et 2 (équivalent de la NF C63-410) rappelées dans le tableau qui suit.

Tableau 1: Valeurs de Ku selon la catégorie de récepteur considérée

Catégorie	Eclairage	Ventilation	Prise	Climatisation	Télécom
Valeur de Ku	1	0,75	0,8	0,8	1

Habituellement le bilan de puissance fait intervenir à plusieurs étapes du calcul, des coefficients de simultanéité (**Ks**) afin de tenir compte du fonctionnement, à des périodes différentes, de chaque récepteur d'un même circuit. La difficulté de cet exercice réside dans le choix des valeurs appropriées de Ks selon le mode de fonctionnement, le type de récepteur, le nombre de récepteurs ou de circuits et cela, à chaque fois qu'il faut réunir des récepteurs ou des groupes de récepteurs. Ce qui conduit très couramment à :

- une sur-estimation du besoin par le choix de Ks trop proche de la valeur 1 : Les sources sont alors plus sûres en cas de pic de puissance mais leurs coûts d'installation et surtout d'exploitation est démultiplié ;
- une sous-estimation du besoin par le choix de Ks trop proche de 0. donnant une installation moins coûteuse mais dangereusement exposée au risque de surcharge et de vieillissement prématuré.

L'utilisation des Ks est donc peu précise et conduit rarement à un dimensionnement optimal. En outre cette méthode ne donne aucune indication quant à l'évolution de la charge au cours du temps, ce qui n'est pas approprié pour cette étude.

C'est pourquoi, nous avons opté pour une méthode plus exhaustive, consistant à associer à chaque récepteur un horaire de fonctionnement réaliste selon sa catégorie et selon le local dans lequel il est installé (**Annexe 3**). Cette hypothèse de fonctionnement des récepteurs se décline en un scénario pour les jours ouvrés et un scénario pour les jours non-ouvrés. Par exemple il est plus facile de prévoir de façon exacte les heures où les lampes des bureaux

seront allumées et les différencier de celles où les lampes des logements ou des toilettes seront allumées plutôt que de leur attribuer plusieurs couches de coefficients entre 0 et 1.

2 Calcul du bilan de puissance

Après avoir identifié les points de consommation électrique du lycée et à partir des caractéristiques électriques constructeurs, nous calculons les puissances actives et réactives consommées élémentaires de chaque appareil en faisant :

$$P = \frac{Pu \cdot Ku}{\eta} \text{ (W)} \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{\left[\left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2 - P^2\right]} \text{ (VAr)} \quad (2)$$

Les formules qui précèdent sont appliquées à chaque récepteur du lycée. Les à chaque heure **h**, les puissances des équipements d'une même catégorie sont sommées. Finalement nous déterminons pour chaque heure **h**, les puissances actives et réactives totales requises pour desservir tous les récepteurs en fonctionnement dans le complexe :

$$P_{\text{instal}_h} = P_{\text{éclairage}_h} + P_{\text{prise}_h} + P_{\text{brasseur}_h} + P_{\text{clim}_h} + P_{\text{telecom}_h} \text{ (W)} \quad (3)$$

Même formule pour l'énergie réactive en VAr.

Les puissances actives et réactives prévisionnelles de chaque heure **h** de la **i**-ième année de fonctionnement valent donc :

$$P_{\text{prev}_h} = P_{\text{instal}_h} \times (1 + 0,833\%)^{i-1} \text{ (W)} \quad (4)$$

Même formule pour l'énergie réactive en VAr.

La valeur de 0,833% correspond au taux de croissance annuelles du besoin électrique du complexe à appliquer de sorte que la dixième année de fonctionnement, le taux de croissance cumulé soit de 25%. En effet, la norme UTE 63- 410 conseille de prendre K_e entre 1,15 à 1,25. En outre, elle préconise lorsque l'installation ne comprend qu'un seul transformateur, comme c'est le cas pour cette étude, de sur-calibrer la puissance nécessaire de l'installation de l'ordre de 25 %. Le but est de tenir compte de l'augmentation progressive de la puissance de l'installation, soit du fait de l'ajout de nouveaux équipements, soit du fait de la baisse de rendement électrique de ceux déjà en service.

Dans un histogramme en 24 heures, ces puissances forment le profil de charge prévisionnelle.

3 Besoins énergétiques prévisionnels

Dans le plan (temps, puissance) du profil de charge horaire (**Fig.3**), l'énergie consommée au cours du temps (aire hachurée en vert), vaut l'intégral :

$$E_{\text{prev}} = \int_{h_0}^{h_{23}} P(h).dh \cong \sum_{i=0}^{23} P_{\text{prev}_{hi}} (Wh) \quad .5$$

Même formule pour l'énergie réactive en VAhr.

Une valeur approchée de cet intégral est la somme des puissances horaires prévisionnelles calculées au point précédent (rectangle coloré en bleu clair).

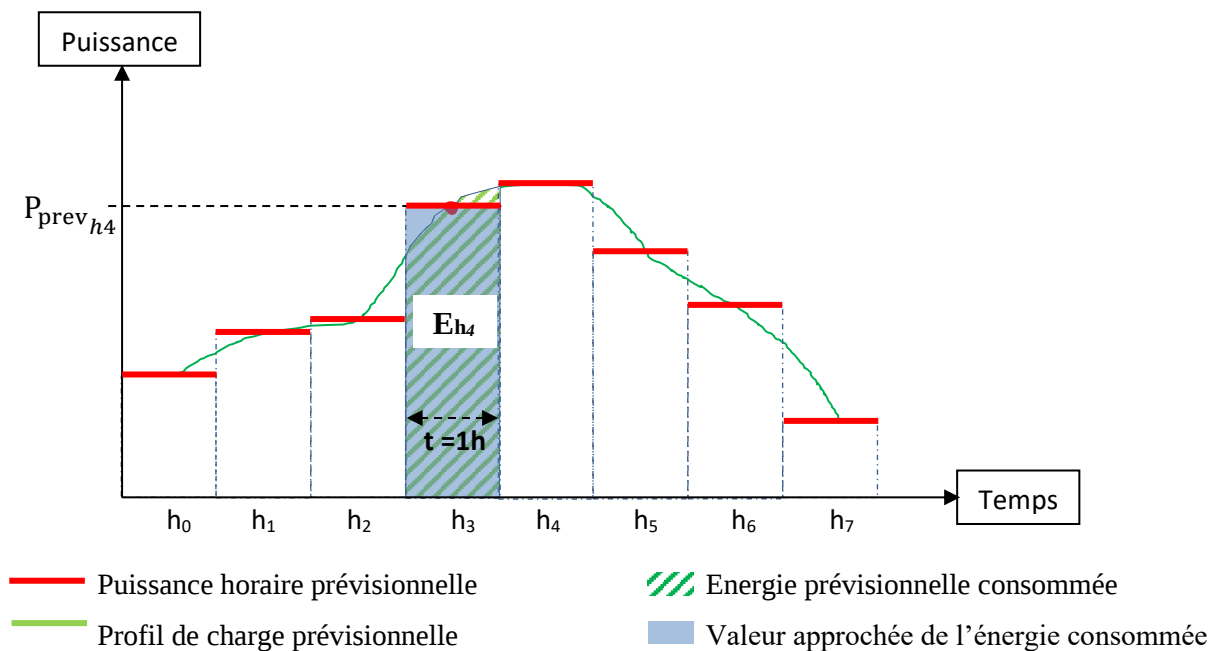


Figure 3 : Méthode de calcul d'une valeur approchée de l'énergie électrique consommée

Ces expressions ont servi à évaluer les énergies actives et réactives consommées quotidiennement par les récepteurs du lycée.

4 La compensation

Nous calculons les valeurs de puissances active et réactive quotidiennes moyennes de la façon suivante :

$$P_{\text{moy}} = \frac{E_{\text{prev}}}{24} (W) \quad (6)$$

Idem pour la puissance réactive moyenne.

La compagnie nationale d'électricité exige un $\cos\phi$ minimum de 0,90. Le non-respect de ce palier engendre un malus sur les factures du fait d'une surconsommation d'énergie réactive. D'où l'intérêt d'une compensation à la source. Le $\cos\phi$ par défaut de l'installation est :

$$\cos\phi_{\text{prev}} = \frac{P_{\text{moy}}}{\sqrt{[P_{\text{moy}}^2 + Q_{\text{moy}}^2]}} \quad (7)$$

La capacité des batteries de compensation nécessaire est alors déterminée par :

$$C_{\text{comp}} = Q_{\text{moy}} - \sqrt{\left[\left(\frac{P_{\text{moy}}}{0,92}\right)^2 - P_{\text{moy}}^2\right]} \quad (\text{VAR}) \quad (8)$$

La puissance réactive horaire compensée vaut donc :

$$Q_{\text{comp}_h} = Q_{\text{prev}_h} - C_{\text{comp}} \quad (\text{VAR}) \quad (9)$$

La puissance apparente prévisionnelle devient alors :

$$S_{\text{prev}} = \sqrt{[P_{\text{prev}}^2 + Q_{\text{comp}}^2]} \quad (\text{VA}) \quad (10)$$

III. TYPOLOGIE DES ARCHITECTURES TESTEES ET MODELISATION DES FLUX ENERGETIQUES

1 Champ des architectures de mixte étudiées

La notion de mixte énergétique se rapporte à la fourniture en énergie d'une région, d'un pays ou d'une entreprise etc. (dans ce cas précis, du LPK), à partir de plusieurs sources d'énergie primaires indépendantes (ici le pétrole pour ce qui est du réseau national et du groupe électrogène et le rayonnement solaire pour ce qui est du champ photovoltaïque et du stockage électrochimique).

Bien que l'application dont la conception nous occupe soit en mesure de simuler un grand nombre de possibilités de mixte électrique, le champ des configurations concurrentes dans le cadre de cette étude s'est limité aux suivantes :

L'architecture 100% Réseau (architecture R) :

Les résultats de l'architecture R serviront de point de référence pour juger du degré de performance des configurations testées. D'où notre intérêt pour cette architecture au début des séries de tests.

L'architecture 100% Photovoltaïque (architecture Pv) :

Dans ce cas de figure, le générateur photovoltaïque et son stockage éventuel sont les seules sources électriques du lycée (**Fig.4**).

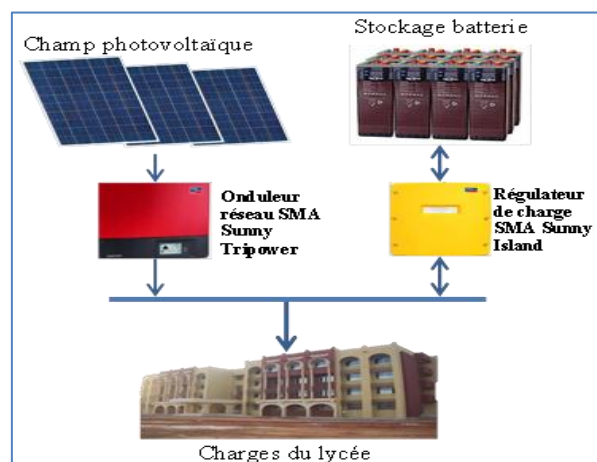


Figure 4 : Schéma synoptique d'une architecture PV autonome

L'architecture Photovoltaïque-Réseau (architecture PvR) :

Dans cette architecture, la source principale d'approvisionnement électrique du lycée est le champ photovoltaïque. Lorsqu'elle est insuffisante (par temps couvert) ou nulle (période

nocturne), le gap est comblé prioritairement par les batteries (si envisagées) puis en dernier recours par le transformateur SONABEL (**Fig.5**).

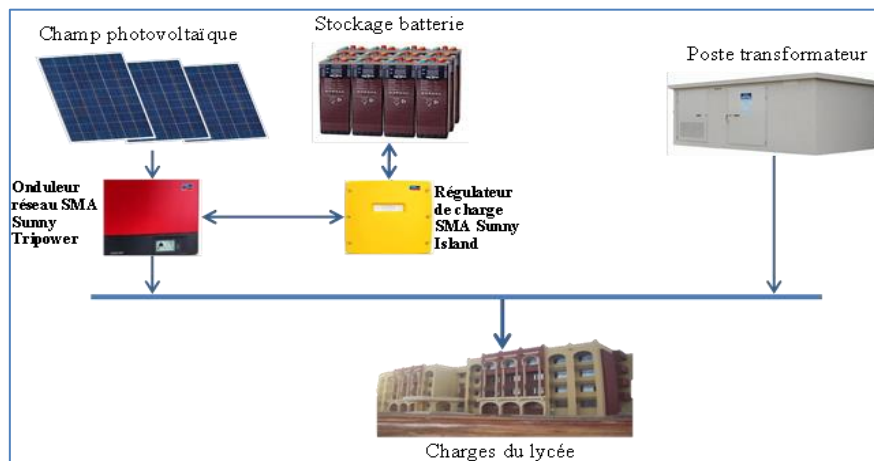


Figure 5 : Schéma synoptique d'une architecture PvR

L'architecture Photovoltaïque-Groupe (architecture PvG) :

Cette architecture est similaire à la précédente, excepté qu'un groupe électrogène remplace le transformateur et sa ligne HTA (**Fig.6**).

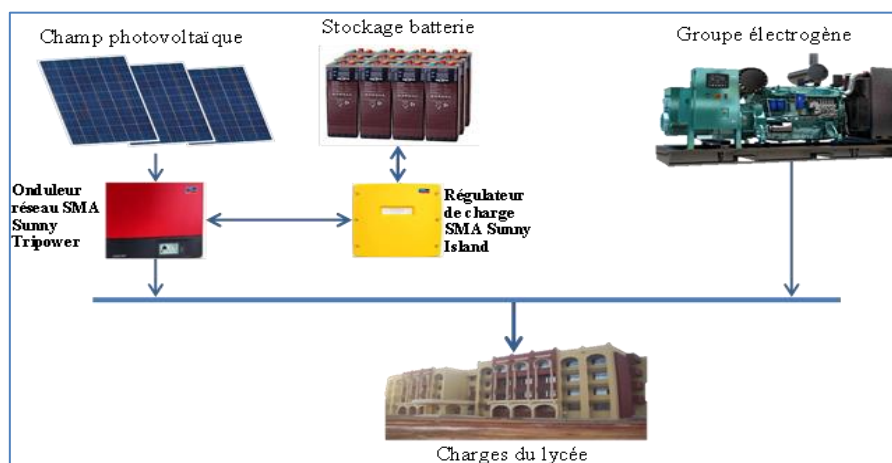


Figure 6 : Schéma synoptique d'une architecture PvG

Le mode de couplage :

Les architectures PvG et PvR se déclinent en deux variantes selon le couplage des sources :

- Un couplage des sources en parallèles : si la productivité PV et le stockage ne parviennent plus à satisfaire la charge, la source thermique se couple instantanément pour suppléer au déficit sans interrompre l'approvisionnement PV.
- Une configuration des sources en commutation : dans ce cas de figure, la charge est à tout instant alimentée soit en ENR, soit en thermique mais jamais par les deux à la fois.

2 Diagramme des flux d'énergie

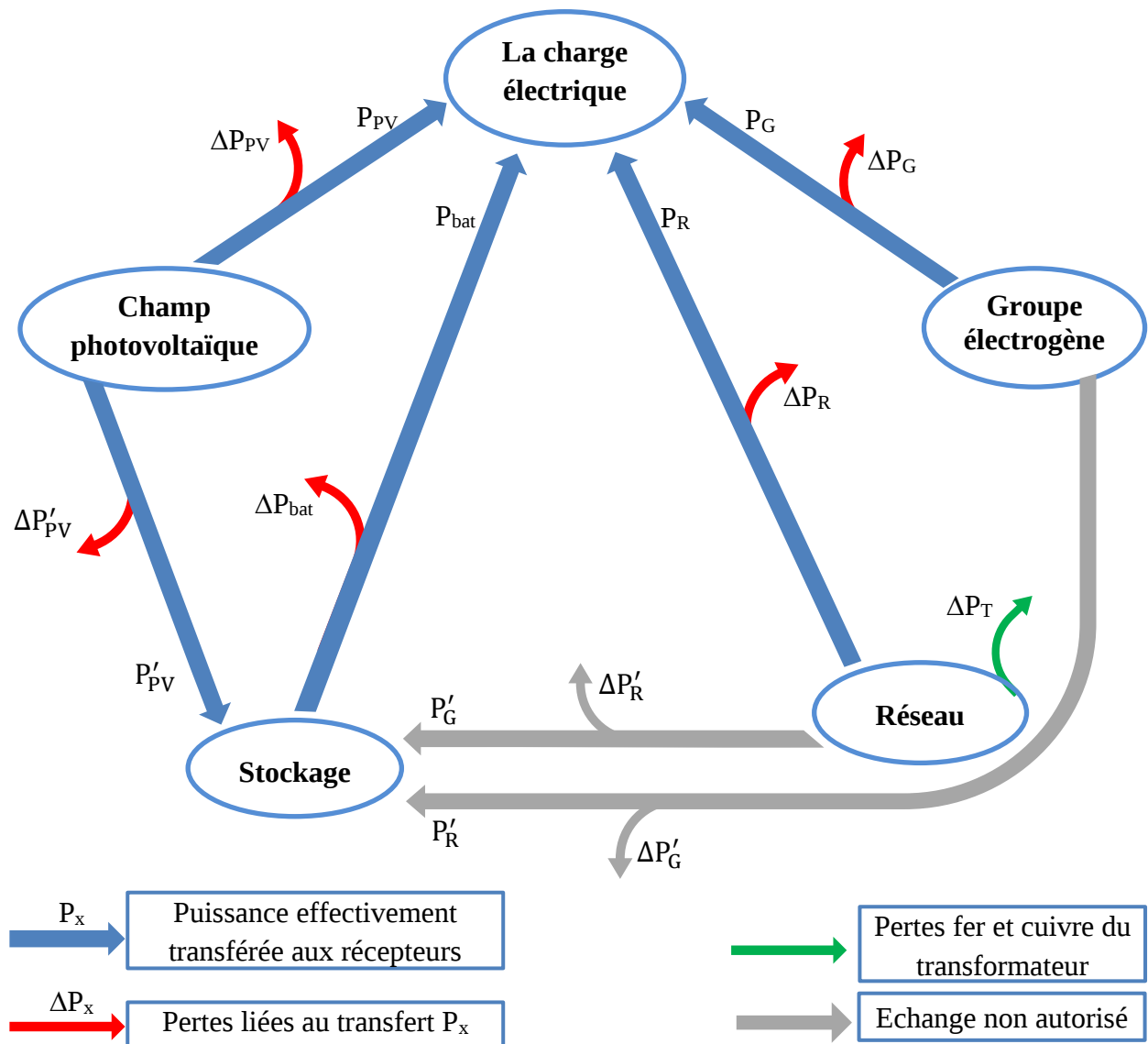


Figure 7 : Synoptique des changes d'énergie considérés dans les simulations

L'architecture globale de la figure ci-dessus représente l'ensemble des échanges pris en compte par les simulations, hors mis les possibilités de recharger les batteries par les sources thermiques.

3 Modélisation des sources et des flux électriques

3.1 Le générateur photovoltaïque

Dans la clause 1.3.1.3 du dossier d'appel d'offre, le maître d'œuvre prévoit que le lycée soit pour tout ou partie pris en charge par un générateur PV.

Les caractéristiques du générateur photovoltaïque à déterminer sont :

- la taille du champ PV : estimée en nombre de modules ou en puissance crête installée.
- la configuration du champ PV : c'est-à-dire le nombre de branches parallèles, celui de modules en séries par branche ainsi que le nombre de sous-champs.
- la puissance et le nombre d'onduleurs MPPT : son choix se base sur la vérification des niveaux de tension et de courant d'entrée ainsi que le ratio de puissance onduleur-Champ PV.
- les sections de câble : pour les liaisons entre les composantes.
- les calibres des protections : aussi bien coté courant continue (DC) qu'alternatif (AC).

3.1.1 La taille du champ PV

Soit P_{dispo} la puissance électrique requise aux bornes du champ PV dans les conditions standards de test (STC). La puissance minimale à installer pour son obtention est :

$$P_{\text{cmin}} = \frac{P_{\text{dispo}}}{R_p} (Wc) \quad (11)$$

P_{cmin} est la puissance photovoltaïque minimale à installer pour fournir la puissance P_{dispo} au niveau du jeu de barre.

R_p est le ratio de performance du générateur PV tenant compte des influences suivantes :

- les pertes par salissement $\Delta\eta_{\text{pol}}$ et par effet d'ombrage $\Delta\eta_{\text{omb}}$ prises à -1% chacune
- la plus grande chute de performance $\Delta\eta_{T^{\circ}\text{max}}$ liée à la température maximale :
- la perte de puissance maximale du module due à une forte température vaut :

$$\Delta P_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}} \times K_{P_{\text{max}}} \times [\text{Max}(T_{\text{amb}}) - 25]}{100} \quad (12)$$

$$\Delta\eta_{T^{\circ}\text{max}} = \frac{\Delta P_{\text{max}}}{1000 \times S_{\text{mod}}} \quad (13)$$

- les pertes de rendement au niveau des onduleurs $\Delta\eta_{\text{ond}}$

$$\Delta\eta_{\text{ond}} = \eta_{\text{ond}} - 1 \quad (14)$$

- les pertes au niveau du câble $\Delta\eta_{c\grave{a}b}$ sont égales à la chute de tension de celui-ci

$$\Delta\eta_{c\grave{a}b} = \Delta V_{c\grave{a}b} \quad (15)$$

De ce qui précède, nous calculons R_p en posant :

$$R_p = [1 + (\Delta\eta_{T^o_{max}} + \Delta\eta_{pol} + \Delta\eta_{omb})] \times (1 + \Delta\eta_{c\grave{a}b}) \times (1 + \Delta\eta_{ond}) \quad (16)$$

A partir de $P_{c_{min}}$, nous trouvons le nombre minimal de modules N_{module} requis par la relation :

$$N_{module} = \text{Arrondi. sup} \left(\frac{P_{c_{min}}}{P_{max}} \right) \quad (17)$$

Par défaut nous associons le maximum de modules PV possible en série. Il en résulte une augmentation de la tension de sortie du champ et donc, à puissance constante, une réduction du courant et des pertes joules dans le câble. L'objectif est de réduire autant que possible la section de câble BT nécessaire pour maintenir une chute de tension acceptable. Cependant, le nombre $N_{PV_{serie}}$ maximal de modules associables en série est strictement limité par la tension maximale d'entrée de l'onduleur coté DC. En outre, pour profiter des meilleures performances de la fonction maximum power point tracking (MPPT) des onduleurs, nous nous assurons de rester dans la plage de tension MPPT $[V_{mpp_{min}}; V_{mpp_{max}}]$. On a donc :

$$\text{Min} \left[\text{Arrondi. inf} \left(\frac{V_{ond_{max}}}{V_{oc_{max}}} \right); \text{Arrondi. inf} \left(\frac{V_{mpp_{max}}}{V_{mpp_{mod}}} \right) \right] \geq N_{PV_{serie}} \geq \text{Arrondi. sup} \left(\frac{V_{mpp_{min}}}{V_{mpp_{mod}}} \right) \quad (18)$$

Dans cette expression $V_{oc_{max}}$, la tension de circuit ouvert maximale vaut :

$$V_{oc_{max}} = V_{oc} \times \left(1 + \frac{K_{V_{oc}} \times [\text{Min}(T_{amb}) - 25]}{100} \right) (V) \quad (19)$$

De l'intervalle de $N_{PV_{serie}}$ nous déduisons celui de $N_{PV_{br}}$ le nombre de branches PV, comme :

$$\text{Arrondi. inf} \left(\frac{N_{module}}{N_{PV_{serie_{min}}}} \right) \geq N_{PV_{br}} \geq \text{Arrondi. sup} \left(\frac{N_{module}}{N_{PV_{serie_{max}}}} \right) \quad (20)$$

A partir de ces deux plages limites, nous déterminons le couple idéal $(N_{PV_{serie}}; N_{PV_{br}})$ tel que :

- $N_{PV_{br}}$ est le plus petit entier naturel non premier appartenant à l'intervalle de l'**Eq.20**
- $N_{PV_{serie}}$ est le plus petit entier naturel appartenant à l'intervalle de l'**Eq.18** tel que son produit par le $N_{PV_{br}}$ choisi est supérieur ou égal à N_{module}

L'exigence que N_{PVbr} ne soit pas un nombre premier, a l'intérêt d'éviter d'être contraint d'utiliser un seul onduleur pour toute l'installation, ceci afin de réduire la criticité d'une panne survenant sur cet équipement.

La puissance totale photovoltaïque installée est alors :

$$P_{c_{instal}} = N_{PVbr} \times N_{PVserie} \times P_{max} (Wc) \quad (21)$$

3.1.2 Configuration du champ PV et dimensionnement de l'onduleur MPPT

Chacune des configurations possibles du champ PV ($N_{PVserie}$; N_{PVbr}) part d'un entier naturel diviseur de N_{PVbr} . Soit n le plus grand des diviseurs naturels de N_{PVbr} , la configuration du générateur PV associée à n possède les caractéristiques suivantes :

- Le champ PV se compose de N_{PVbr} branche(s) comportant chacune $N_{PVserie}$ module(s) en série.
- Le champ est subdivisé en n sous-champ contrôlé(s) par n onduleur(s) identique(s)
- Chaque onduleur reçoit N_{PVbr}/n branche(s) du champ PV

Dans une telle configuration, l'onduleur qui sera choisi est celui de plus petite puissance validant simultanément les critères suivants : le critère de puissance optimale de l'onduleur, le critère de tension d'entrée de l'onduleur et le critère de courant maximal d'entrée de l'onduleur :

$$\frac{P_{c_{instal}}}{n} \times 1,1 \geq P_{ond} \geq \frac{P_{c_{instal}}}{n} \times 0,9 (W) \quad (22)$$

$$V_{ond_{max}} \geq N_{PVserie} \times V_{OC_{max}} \geq V_{ond_{min}} (V) \quad (23)$$

$$I_{ond_{max}} > \frac{N_{PVbr} \times I_{sc_{max}} \times n}{2} (A) \quad (24)$$

$I_{sc_{max}}$ est le courant maximal de court-circuit d'un module :

$$I_{sc_{max}} = I_{sc} \times \left(1 + \frac{K_{I_{sc}} \times [\text{Min}(T_{amb}) - 25]}{100} \right) (A) \quad (25)$$

Si parmi tous les onduleurs à notre disposition, aucun ne vérifie simultanément les conditions 22, 23 et 24, alors on recommence l'itération avec la configuration associée au plus grand diviseur naturel de N_{PVbr} immédiatement inférieur.

Si aucun diviseur naturel de N_{PVbr} ne permet de trouver une configuration optimale, alors on reprend l'itération à partir du choix de N_{PVbr} avec le plus petit entier naturel non premier qui suit.

Si aucun diviseur naturel d'aucune valeur de N_{PVbr} n'offre une configuration optimale, alors on incrémente la valeur de N_{module} et on reprend l'ensemble du processus depuis l'**Eq.17**. Le dimensionnement et le choix des équipements de protection sont détaillés en annexe.

3.1.3 Logigramme de fonctionnement de la source photovoltaïque

Le débit du champ PV vers les récepteurs et les batteries, pour l'ensemble des cas possibles en fonction des conditions météo de l'heure, correspond au logigramme suivant :

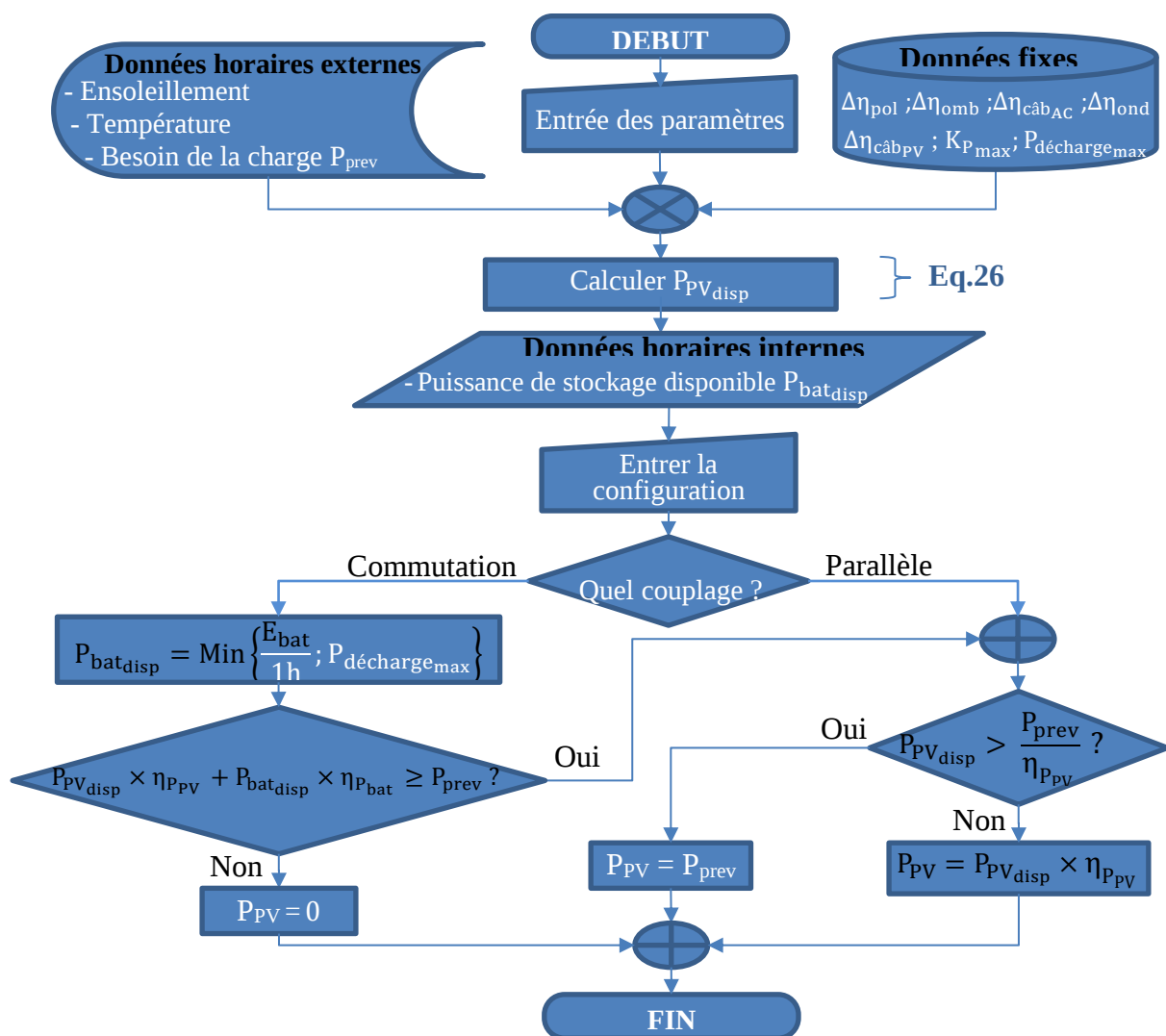


Figure 8 : Logigramme de fonctionnement de la source photovoltaïque

La puissance PV disponible évoquée dans la figure **Fig.11** correspond, pour une heure h donnée, à la totalité de la puissance électrique DC disponible aux bornes du champ PV, en tenant compte de l'ensoleillement de l'heure, de la puissance PV installée et des pertes dues à la température des cellules, à l'ombrage et au salissement des modules :

$$P_{PV_{disp}} = P_{C_{instal}} \times \left(1 + \frac{K_{P_{max}} \times (T_{amb} - 25)}{100}\right) \times (1 + \Delta\eta_{pol} + \Delta\eta_{omb}) \times \frac{B_i + D_i - R_i}{1000} \text{ (W)} \quad (26)$$

Le rendement de transfert d'énergie des bornes du champ aux charges est $\eta_{P_{PV}}$ vaut :

$$\eta_{P_{PV}} = (1 + \Delta\eta_{câb_{PV}}) \times (1 + \Delta\eta_{ond}) \times (1 + \Delta\eta_{câb_{AC}}) \quad (27)$$

3.2 Le stockage électrochimique

Le CCTP prévoit en absence de puissance du champ PV, qu'un stockage électrochimique prenne la relève pour assurer la continuité de service des charges dites sensibles.

3.2.1 Détermination de la taille du stockage et choix du nombre de régulateur

Dans un premier temps, nous déterminons la capacité minimale de stockage à installer C_{min} à partir du besoin énergétique quotidien prévisionnel $E_{sensible}$ des charges à secourir.

$$C_{min} = \frac{E_{sensible} \times A_{ut}}{\eta_{bat} \times D_{ch} \times V_{stck}} \text{ (Ah)} \quad (28)$$

Connaissant la capacité minimale de stockage à installer, nous déterminons le nombre minimum N_{STbr} de branches de batteries de capacité nominale C_{bat} en posant :

$$N_{bat_{br}} = \text{Arrondi. sup} \left(\frac{C_{min}}{C_{bat}} \right) \quad (29)$$

Le nombre $N_{STserie}$ de batteries de tension nominale V_{bat} à disposer en série pour atteindre la tension de service V_{stck} est donné par :

$$N_{bat_{serie}} = \text{Arrondi. sup} \left(\frac{V_{stck}}{V_{bat}} \right) \quad (30)$$

La capacité totale de stockage et le nombre de batteries installées sont donc respectivement:

$$C_{instal} = N_{bat_{br}} \times C_{bat} \text{ (Ah)} \quad (31)$$

Le nombre de régulateur est le premier entier naturel vérifiant les contraintes suivantes :

$$N_{reg} \geq \text{Arrondi. sup} \left(\frac{C_{instal}}{C_{reg_{max}}} \right) \quad (32)$$

$$N_{reg} \geq \text{Arrondi. sup} \left[\frac{\text{Max}(P_{sens_h})}{P_{reg_{max}}} \right] \quad (33)$$

$$N_{reg} \geq \text{Arrondi. sup} \left[\frac{\text{Max}(P_{sensh})}{C_{reg_max} \times V_{stck}} \right] \quad (34)$$

qui sont respectivement le critère de capacité limite admissible par régulateur, le critère de puissance AC limite admissible du régulateur et la contrainte de courant de décharge limite admissible par régulateur.

3.2.2 Logigrammes de fonctionnement du stockage

La puissance de décharge des batteries et ses pertes associées :

Les batteries sont rechargeables par le champ PV (à la puissance P'_{PV}), par le réseau (à la puissance P'_R) ou par le groupe électrogène (à la puissance P'_G). Les modalités de calcul de chacune de ces quantités sont résumées dans le logigramme de la figure **Fig.9**. Ces transferts s'effectuent aux rendements suivants :

$$\eta_{P'_{PV}} = (1 + \Delta\eta_{câb_{PV}}) \times (1 + \Delta\eta_{ond}) \times (1 + \Delta\eta_{câb_{reg}}) \times (1 + \Delta\eta_{reg}) \quad (35)$$

$$\eta_{P'_R} = \eta_{P'_G} = (1 + \Delta\eta_{câb_{AC}}) \times (1 + \Delta\eta_{ond}) \times (1 + \Delta\eta_{reg}) \times (1 + \Delta\eta_{câb_{reg}}) \quad (36)$$

Occasionnant respectivement les pertes $\Delta P'_{PV}$, $\Delta P'_R$ et $\Delta P'_G$ estimées grâce à la formule **Eq.52**.

L'énergie maximale pouvant être stockée dans les batteries vaut :

$$E_{bat_max} = C_{instal} \times V_{stck} \times D_{ch} \quad (37)$$

La puissance maximale de charge du stockage est asservie au nombre et à la caractéristique de courant maximal de charge des régulateurs de charge/décharge suivant la relation :

$$P_{charge_max} = N_{reg} \times I_{charge_max} \times V_{stck} \quad (38)$$

P''_{PV} (**Fig.9**) est la totalité de la puissance photovoltaïque qui, n'ayant pas été consommée par les récepteurs du lycée, est susceptible d'être stockée dans les batteries :

$$P''_{PV} = P_{disp} - \frac{P_{PV}}{\eta_{P_{PV}}} (W) \quad (39)$$

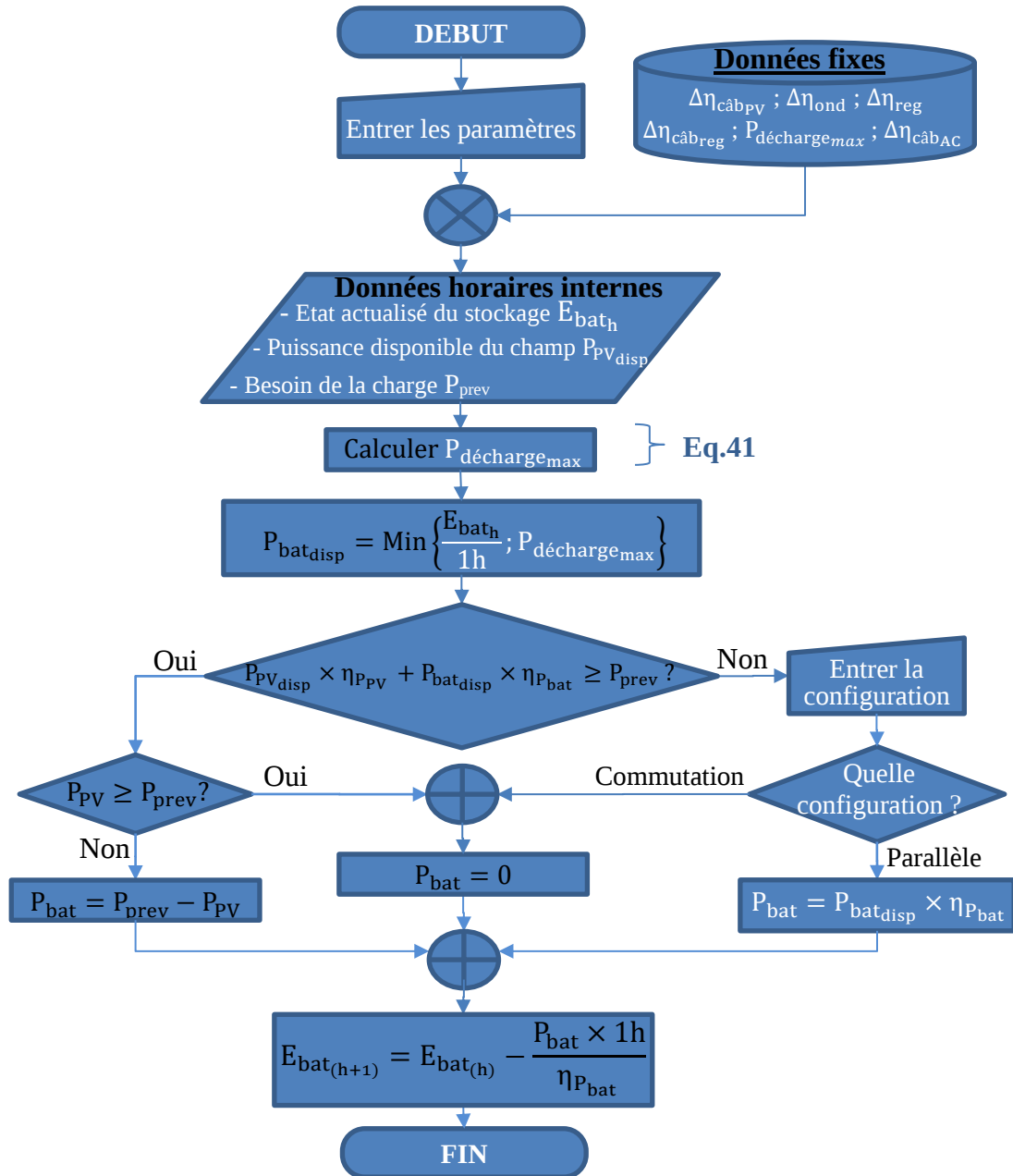


Figure 10 : Logigramme de la fonction de décharge des batteries

Sur la figure **Fig.10**, La puissance de décharge maximale $P_{déchargemax}$ du stockage vers les récepteurs du lycée est fixée par les contraintes de courant de décharge maximale des régulateurs, de puissance AC de décharge maximale des régulateurs et de courant de décharge maximale des batteries :

$$P_{déchargemax} = \min \left| \begin{array}{l} (N_{reg} \times I_{regmax} \times V_{stck}) \\ (N_{reg} \times P_{output_ACmax}) \\ (N_{STbr} \times I_{batmax} \times V_{stck}) \end{array} \right| \quad (41)$$

3.3 La source réseau public

Dans le DAO d'aménagement électrique du Lycée professionnel de Kaya, le réseau d'électricité public est la source principale. Mais les configurations que nous étudierons, envisagent cette source comme secours du générateur PV. En partant donc du résultat du dimensionnement PV, les calculs de l'approvisionnement réseau se feront en deux temps : le dimensionnement de la ligne HTA puis le dimensionnement du transformateur de puissance. Les calculs mécaniques de la ligne ont été détaillés en annexe.

3.3.1 Description de la ligne

La ligne à construire est un tracé rectiligne long de 120 m, comportant un départ depuis une ligne existante, une traversée de voie et une descente aéro-souterraine. Elle compte 4 supports (en comptant celui de la ligne existante) faisant une portée molle de quelques mètres et deux portées tendues de 45 m chacune.

Tableau 2 : Carnet de piquetage de la ligne

Numéro	Désignation	Portée (m)	Orientation	Angle (degré)	Armement	Observation
Existant	ZIDO36	30	Support d'effort	0°	Herse d'arrêt	Support existant
2	P1	45	Support d'effort	0°	Herse double	Départ + traversée de voie
3	P2		Support d'effort	0°	Herse double	IACM + parafoudre
4	P3	45	Support d'effort	0°	Herse d'arrêt	Descente aéro-souterraine

3.3.2 Le transformateur de puissance

Il est effectué à partir de la puissance active prévisionnelle minimum requise du transformateur, en considérant un $\cos\phi = 0,8$ et un taux de charge k_{transfo} de 80% :

$$S_{\text{transfo}} \geq \frac{P_{\text{transfo}}}{\cos\phi \times k_{\text{transfo}}} \text{ (VA)} \quad (42)$$

Excepté dans le cas de la configuration 100%, pour toutes les configurations envisagées, P_{transfo} correspondra au reliquat maximum de puissance horaire, requise par la charge, n'ayant pas pu être assurée par le générateur photovoltaïque (et son stockage éventuellement) sur toute la période des dix années simulée de jour comme de nuit.

$$P_{\text{transfo}} = \text{Max} \left[P_{R_h} \times \left(1 - \frac{1}{\eta_{P_R}} \right) \right] \times (1 + 1,5\%) \text{ (W)} \quad (43)$$

L'extension de 1,5 % en fin de formule correspond à la prise en compte des pertes fer et des pertes cuivre du transformateur qui sont respectivement de l'ordre de 0,2 % et 1,3 % pour la gamme de transformateurs considérés pour cette étude.

Nous choisissons le plus petit transformateur vérifiant l'**Eq.42**.

3.3.3 Logigramme de fonctionnement de la source réseau

La part de la puissance prévisionnelle du lycée prise en charge par le réseau P_R à chaque heure est donnée, selon les cas de figure possibles, par les équations résultats du logigramme **Fig.11**. Ce transfert de puissance du transformateur aux charges du lycée entraîne des pertes ΔP_R par effet joule dans le câble d'alimentation BT. D'où le rendement de transfert η_{P_R} suivant :

$$\eta_{P_R} = 1 + \Delta\eta_{\text{câb}_{AC}} \quad (44)$$

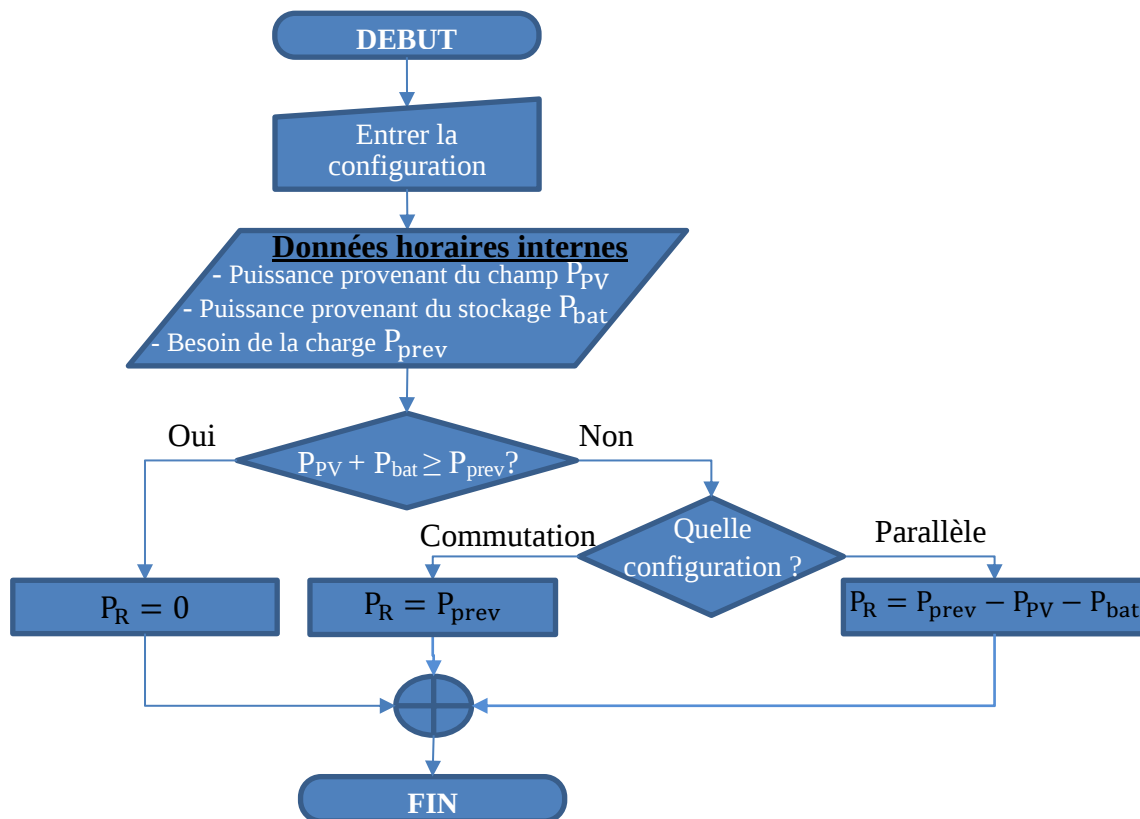


Figure 11 : Logigramme de l'alimentation réseau de la charge

3.4 Le groupe électrogène

3.4.1 Choix du groupe électrogène

Comme pour le transformateur, P_{ge} la puissance prévisionnelle minimum requise du groupe électrogène est le plus grand reste de puissance horaire à fournir à la charge sur la période des 10 années de fonctionnement, quand on soustrait la puissance du générateur PV et son stockage.

$$P_{ge} = \text{Max} \left[P_{Gh} \times \left(1 - \frac{1}{\eta_{PG}} \right) \right] (W) \quad (45)$$

Le choix du groupe électrogène est alors conditionné par la validation des 3 critères suivants :

Le critère de puissance en régime établi : Nous calculons la puissance continue en appliquant un taux de charge électrique maximum du groupe $k_{ge} = 0,80$ sous un $\cos \rho$ standard de 0,8.

$$S'_{ge} \geq \frac{P_{ge}}{k_{ge} \times \cos \rho} (VA) \quad (46)$$

Il s'agit de choisir un groupe assez puissant pour assurer les besoins sans sortir de sa plage de rendement maximal (comprise entre 70 et 80%). cela est primordial pour garantir une plus grande longévité et une consommation acceptable de carburant.

Le critère de tenue aux chocs transitoires : pour éviter que le courant total d'appel ne provoque une chute de tension trop forte lors de la mise sous tension de certains récepteurs, la puissance totale transitoire ne doit pas excéder 2 fois celle du groupe.

$$2 \times S'_{ge} \geq S_{etabli} + S_{surchage} (VA) \quad (47)$$

Pour le calcul de la surcharge au démarrage des récepteurs d'une heure h , nous tenons compte de la variation de puissance entre l'heure $h-1$ et l'heure h pour chaque catégorie de récepteur. A ce différentiel est appliqué un coefficient d'appel de puissance au démarrage propre à chaque catégorie de récepteur et un coefficient de simultanéité des démarrages de 0,25.

Le tableau ci-dessous récapitule les hypothèses des caractéristiques des récepteurs du lycée au démarrage.

Tableau 3 : hypothèses de comportement au démarrage des récepteurs

	Paramètres d'impact au démarrage des récepteurs			
	Cosinus phi	Sinus phi	Coefficient de puissance	Coefficient de simultanéité des démarrages
Lampes	0,90	0,44	1	0,25
Prises	0,50	0,87	3	0,25
Brasseurs	0,30	0,95	3	0,25
Climatiseurs	0,40	0,92	5	0,25
Télécoms	0,80	0,60	1	0,25

Critère de puissance active acceptable : pour que la puissance active totale soit acceptable (aux surcharges près).

$$\cos \varphi \times S'_{ge} \geq P_{\text{etabli}} + P_{\text{surchage}} \text{ (VA)} \quad (48)$$

Notons que pour chaque condition, S'_{ge} désigne aussi bien la puissance nominale que la puissance secours du groupe, tous deux affectés d'un coefficient de reclassement de puissance lié à la température de l'air ambiant, la température d'air de ventilation et à l'altitude du site :

$$S_{ge} = \frac{S'_{ge}}{(1 + k_{\text{rec}})} \text{ (VA)} \quad (49)$$

Où

$$k_{\text{rec}} = a + b + \left(\frac{1000 - \text{Alt}}{100} \right) (\%) \quad (50)$$

a et b sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 4 : Reclassement de puissance du groupe électrogène en fonction de la température ambiante (a) et de l'air de réfrigération (b)

Température	De l'air ambiant (a)	De l'air de réfrigération (b)
40°C	0	0
45°C	-1,25	-1,25
50°C	-1,9	-2,5
55°C	-2,5	-3,75
60°C	-3,1	-5
65°C		-6,25
70°C		-7,5

3.4.2 Logigramme de fonctionnement de la source groupe électrogène

Dans le cas d'une configuration avec un groupe électrogène, La part de la puissance prévisionnelle du lycée prise en charge par cette source P_G à chaque heure est donnée, selon les cas de figure possibles, par les équations résultats du logigramme **Fig.12**. Ce transfert de puissance du groupe aux charges du lycée entraîne des pertes ΔP_G par effet joule dans le câble d'alimentation BT. D'où le rendement de transfert η_{P_G} suivant :

$$\eta_{P_G} = 1 + \Delta\eta_{\text{câb}_{AC}} \quad (51)$$

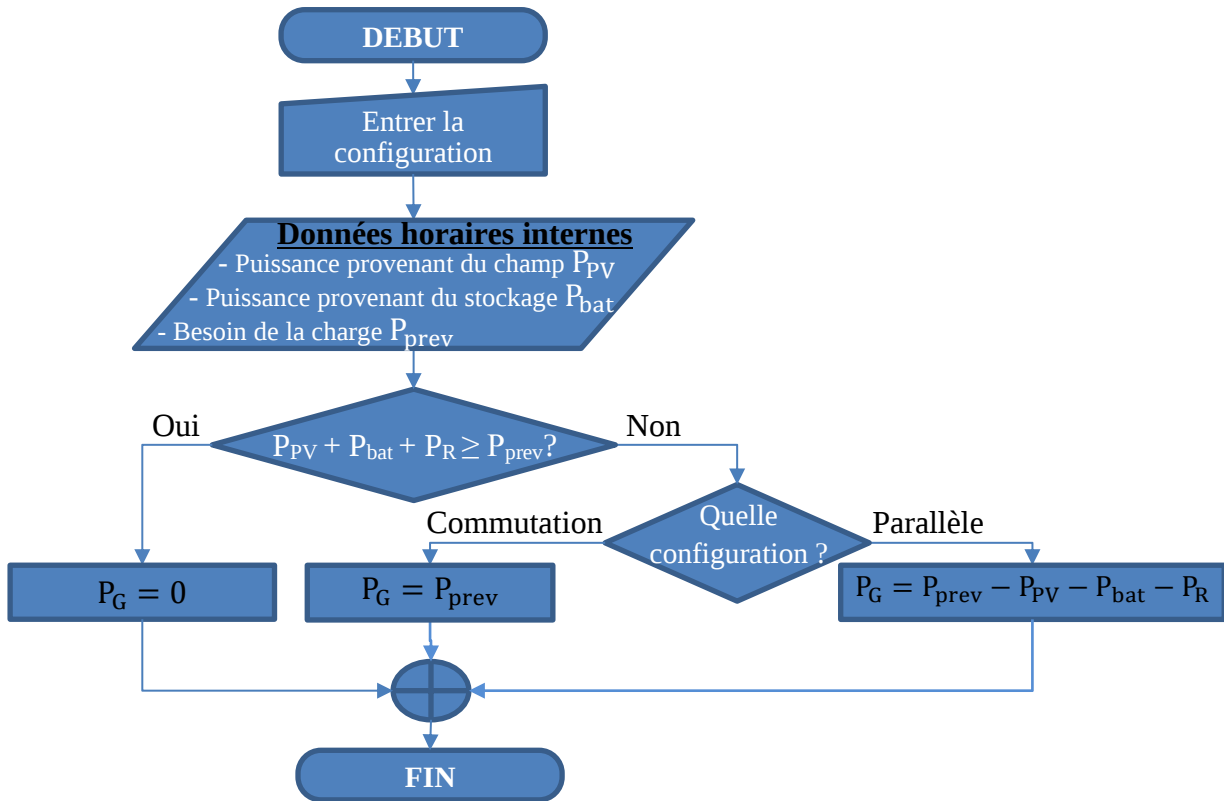


Figure 12 : Logigramme de l'alimentation de la charge par le groupe électrogène

De façon générale, lors du transfert d'une puissance P_x (P_x étant la valeur de la puissance reçue au point d'arrivée) avec un rendement de transfert η_{P_x} il se perd une puissance ΔP_x évaluée comme suit :

$$\Delta P_x = P_x \times \left(1 - \frac{1}{\eta_{P_x}}\right) \text{ (W)} \quad (52)$$

Au cours d'une simulation, la valeur de chaque puissance et celle des pertes qui s'y rapportent sont calculées et enregistrées pour chacune des 87 672 heures de fonctionnement du lycée allant du 1^{er} janvier 2007 à 00h 52min au 31 décembre 2016 à 23h 52min.

Dans ce calcul, les jours non ouvrés considérés sont les suivants :

- les dimanches.
- les jours fériés en vigueur au Burkina ([Annexe 11](#)).
- les congés du **21 décembre au 05 janvier** inclus, du **20 mars au 31 mars** inclus et du **15 juillet au 1^{er} octobre** inclus de chaque année.

Hors mis les jours ci-dessus cités, le lycée est supposé ouvert le reste de l'année.

En fin de simulation, la propriété de l'équation [Eq.5](#) a été utilisée pour estimer les énergies totales véhiculées par chaque tronçon du synoptique de la [Fig.7](#) et leurs pertes respectives.

4 Le réseau basse tension du lycée

Plus les sections des câbles sont grandes, moins il s'y perd d'énergie électrique par effet joule mais le coût du réseau augmente rapidement. Le dimensionnement de cet organe cherche à trouver le meilleur compromis entre ces deux aspects. Pour cet exercice, nous nous sommes référés aux normes CEI-60364 pour la partie DC et à la NF C 15-100 pour la partie AC.

4.1 Les liaisons basse-tension courant continu

Le câble BT/DC se retrouve entre le champ PV et les onduleurs et entre les régulateurs de charge/décharge et les batteries. La chute de tension admissible selon la norme est dans ce cas de 3 %. Cependant, dans le cadre de notre projet, le CCTP est plus rigoureux et exige que la chute de tension ΔV ne dépasse pas 2 %. La section correspondante S_b est donnée par :

$$S_b = \frac{2 \times L \times I_{ncâb} \times \rho_{cu}}{\Delta V \times V_{câb}} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (53)$$

L , $V_{câb}$ et ρ_{cu} sont respectivement la longueur de la liaison, la tension nominale de service et la résistivité linéique du câble (en cuivre) dans lequel circule un courant continu d'intensité nominale $I_{ncâb}$.

A partir de la valeur de S_b calculée, nous choisissons la section $S_{câb}$ normalisée immédiatement supérieure. Ensuite nous vérifions que le courant maximal admissible I_{max} du câble choisi est bien supérieur au courant de court-circuit I_{cc} susceptible de s'y produire :

$$I_{max} \geq I_{cc} \text{ (A)} \quad (54)$$

4.2 Les liaisons basse-tension courant alternatif

Le câble BT/AC se retrouve entre les onduleurs et les régulateurs de charge/décharge où il est disposé sous goulotte avec deux autres circuits, et entre le disjoncteur compact départ du poste source et les bâtiments récepteurs où il est enterré dans un tube de protection mécanique en PVC.

Nous commençons par déterminer à partir de la relation ci-dessous, l'intensité du courant d'utilisation à transporter I_b .

$$I_b = \frac{S_{\text{emplois}}}{\sqrt{3} \times U_{\text{source}}} \quad (\text{A}) \quad (55)$$

S_{emplois} est la puissance apparente convoyée par le câble, selon le bilan de puissance prévisionnelle U_{service} de 400V. Dans le cas de la liaison onduleur-régulateur, S_{emplois} est la puissance de l'onduleur, dans le cas du réseau de distribution BT des bâtiments du complexe, S_{emplois} est pour chaque point du réseau, la puissance de l'ensemble des récepteurs situés en aval de ce point **Fig.13**.

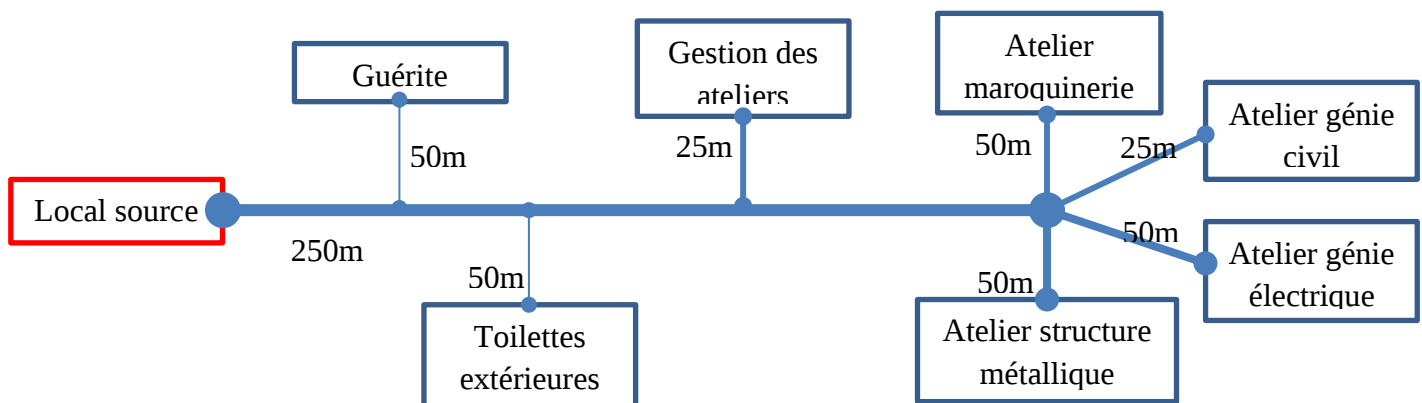


Figure 13 : Synoptique du réseau d'alimentation BT du Lycée professionnel de Kaya

Nous choisissons ensuite l'intensité admissible normalisée I_z immédiatement supérieure à I_b à laquelle nous appliquons les facteurs de correction $K1$, $K2$, $K3$, $K4$, qui traduisent respectivement l'influence du mode de pose, des circuits côte à côte, de la température ambiante et de la nature de l'isolant, de la nature du sol (pour les câbles enterrés). Le facteur correctif de neutre chargé K_n et le facteur correctif de symétrie K_s sont également considérés.

$$I'_z = \frac{I_z}{K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K_n \times K_s} \quad (\text{A}) \quad (56)$$

Puis nous choisissons dans le tableau des sections de câbles normalisés, la section ayant le courant de service immédiatement supérieur à I'_z .

Enfin, nous vérifions par **Eq.57** que la section $S_{c\grave{a}b}$ choisie, respecte la chute de tension ΔV admise par la NF C 15-100. Les valeurs de ΔV maximales admissibles sont rappelées dans le tableau ci-dessous en fonction de l'utilisation finale de l'énergie électrique.

Tableau 5 : Chute de tension maximale entre l'origine de l'installation et l'utilisation

	Eclairage	Autres usages (force motrice)
Abonné alimenté par réseau public BT	3%	5%
Abonné avec poste HTA/BT*	6%	8%

* Chute de tension depuis le poste transformateur jusqu'au récepteur

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{I_b \times L_{c\grave{a}b} \times (\rho_{al} \times \cos \varphi + X \times \sin \varphi)}{S_b \times U_{source}} < 8\% \quad (57)$$

ρ_{al} représente la résistivité linéique de $0,03175\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ du câble en aluminium à 55°C et X sa réactance linéique valant $0,00008\Omega/\text{m}$. Ici nous prendrons $\cos \varphi = 0,9$ et donc $\sin \varphi = 0,6$.

IV. CALCUL ET COMPARAISON DES PERFORMANCES

DES CONFIGURATIONS

1 Séries de tests effectués

Sept (07) séries de simulations ont été menées : deux séries pour les couplages commutation et parallèle des configurations PvR, deux séries pour les couplages commutation et parallèle des configurations PvG, une série de simulations pour les configurations PV autonomes, une simulation de la configuration 100% R et enfin une simulation de la configuration du DAO.

Dans chaque série de simulations, nous faisons varier la taille du champ PV entre 12550Wc et 692000Wc et la capacité du stockage de 0Ah, c'est-à-dire pas de stockage, à 76200Ah soit deux jours complets d'autonomie du lycée.

2 Méthode de comparaison des performances

Sur les nombreux résultats que fournit la simulation, nous nous baserons sur trois principaux afin d'identifier les configurations les plus pertinentes :

- un critère éliminatoire : une configuration ne sera jugée satisfaisante et prise en compte dans l'étude que si elle satisfait 100% des besoins électriques du lycée ;
- un critère de classement : il s'agit d'identifier parmi les configurations satisfaisantes, celle offrant le kWh le moins cher ;
- un critère de préférence : pour deux configurations satisfaisantes ayant des coûts du kWh proches ou égaux, le taux de pénétration de l'énergie PV servira de critère pour les départager. L'idéale serait de maximiser ce taux autant que possible.

2.1 Le coût de revient du kilowattheure

Dans un premier temps, nous déterminons le coût de réalisation de l'architecture testée. Ensuite, nous nous intéressons aux coûts de fonctionnement du système sur une durée de dix ans. Ce qui nous permet d'évaluer le coût de revient du kilowattheure sur la durée simulée.

Le coût d'acquisition: Les composantes qui ont fait l'objet des dimensionnements sont recensées, avec leurs quantités respectives et leurs coûts unitaires respectifs issus des

propositions de prix faites par des fournisseurs reconnus ([Annexe 9](#)). Dans le cas de l'architecture PvR, nous ajoutons les frais de branchement au réseau national $C_{\text{branchement}}$. Le coût de réalisation C_0 de l'installation est donc :

$$C_0 = \sum C_i + C_{\text{branchement}} = \sum (d_i \times e_i) + C_{\text{branchement}} \quad (\text{FCFA}) \quad (58)$$

Les coûts de fonctionnement : Certains items entraînent des dépenses pour leur maintenance, leur remplacement, le paiement de facture ou l'achat de consommables :

- nous considérons que le groupe électrogène entraîne des frais de maintenances C_{maint} à hauteur de trois cents mille (300.000) francs CFA par semestre.
- l'ensemble du banc de batteries est remplacé un nombre N_{rempl} de fois, à chaque fois que le nombre limite de cycles de charge/décharge est atteint. D'après les données du fabricant des batteries, ce dernier dépendant de la profondeur de décharge D_{ch} , suivant la formule :

$$N_{\text{cycle}} = 1245 \times D_{\text{ch}}^{-1,19} \quad (\text{cycles}) \quad (59)$$

Le remplacement de l'ensemble du banc de batteries occasionne un coût C_{rempl} .

- les factures mensuelles d'électricité SONABEL C_{facture}
- le carburant de fonctionnement du groupe électrogène C_{gazoil}

Pour l'architecture PvG, le fonctionnement du groupe électrogène nécessite l'achat de carburant (gasoil) dont l'arrêté Conjoint N°2019-008/MCIA/MINEFID fixe le coût à cinq cent quatre-vingt-sept francs (587) CFA par litre à Kaya. La quantité de carburant consommée est tributaire de la production totale d'énergie du groupe selon les données du constructeur.

En outre, la consommation d'électricité en provenance du réseau national entraîne le paiement d'une facture dont le montant varie selon la puissance souscrite, la quantité d'énergie consommée et les heures de consommation (heures de pointes ou heures pleines). A cela, nous ajoutons les montants des redevances, des primes et autres taxes selon la grille tarifaire officielle de la SONABEL ([Annexe 10 : Tarifs MT](#)) pour déterminer le coût de l'énergie issue de ce réseau.

Le prix de revient du kilowattheure : L'ensemble de ces postes de dépenses concourt au coût global de l'installation C_{total} :

$$C_{\text{total}} = C_0 + (C_{\text{maint}} \times 2 \times 10) + (C_{\text{rempl}} \times N_{\text{rempl}}) + \sum C_{\text{gasoil}} + \sum C_{\text{facture}} \quad (\text{FCFA}) \quad (60)$$

En rapportant ce coût global sur dix ans à la quantité d'électricité consommée dans la même période, nous obtenons le coût moyen de revient du kWh consommé sur cette période :

$$C = \frac{C_{\text{total}}}{E_{\text{total}}} \text{ (FCFA/kWh)} \quad (61)$$

2.2 Calcul de l'indice d'autosuffisance

La quantité totale d'énergie produite sur toute la durée de vie de l'installation vaut :

$$E_{\text{total}} = E_{\text{pvtotal}} + E_{\text{getotal}} + E_{\text{rtotal}} \text{ (Wh)} \quad (62)$$

Le taux de couverture des besoins par l'énergie solaire est de :

$$\tau = \frac{E_{\text{pvtotal}}}{E_{\text{total}}} \times 100 \text{ (\%)} \quad (63)$$

V. OUTILS ET LOGICIELS UTILISES

Les logiciels qui ont été mis à contribution dans ce travail sont :

- **Microsoft Word**, pour le traitement de texte et la réalisation de dessins illustratifs ;
- **Photovoltaic Geographical Information System**, pour la collecte de données météo ;
- **Microsoft Excel**, pour la réalisation des calculs explicités dans la méthodologie ;
- **Virtual Basic Application d'Excel**, pour le codage de l'algorithme de simulation.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. RESULTATS DES COLLECTES DE DONNEES

1 Bilan de puissance

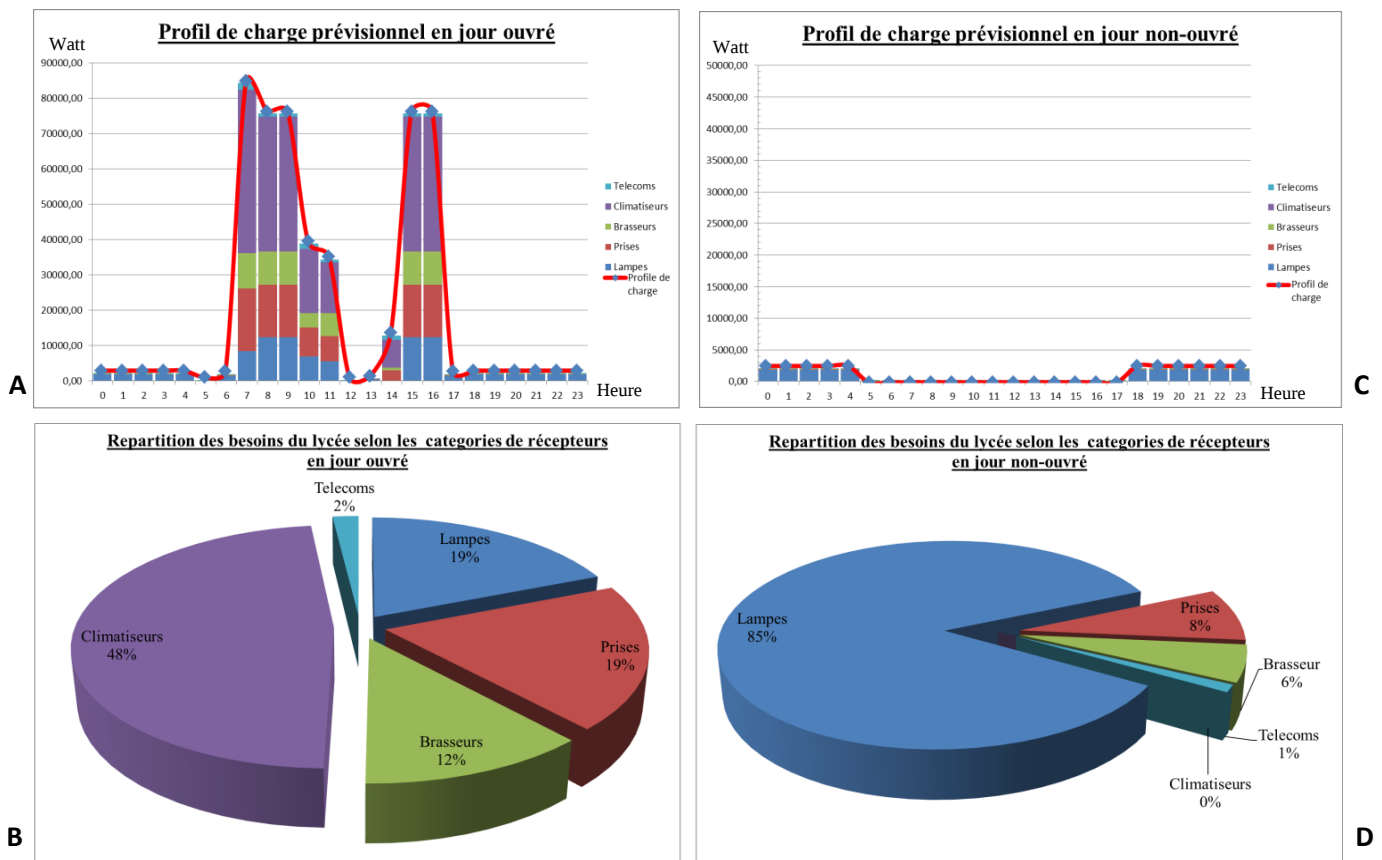


Figure 14 : Résultats du bilan de puissance (détails en [Annexe 13](#))

La consommation électrique du lycée pendant les jours non-ouvrés, en [Fig.14.C](#) et [D](#), se réduit pour l'essentiel à l'éclairage en période nocturne. A cette consommation viennent se superposer, pendant les jours ouvrés, deux périodes de grande consommation électrique entre 7h 00 et 17h 00, séparées par la pause de midi entre 12h 00 et 15h 00 où la consommation électrique est très basse ([Fig.14.A](#) et [B](#)). Les pics de puissance ont lieu à 7h 00 et 15h 00 respectivement à 84,34 kW et 75,68 kW.

Il est intéressant de remarquer que 48 % des besoins électriques du lycée pendant les jours ouvrés, sont dus à la climatisation ([Fig.14.B](#)). Ce taux atteint 55 % aux heures de pointe, faisant de cette catégorie de récepteurs, le premier poste de consommation d'électricité du lycée. Il est suivi en seconde position par les charges branchées sur les prises et l'éclairage responsables chacun de 19% de la consommation du lycée. Viennent ensuite les circuits de brasseurs, et la télécom respectivement à hauteur de 12 % et 2 %.

D'un point de vue horaire, nous constatons (**Fig.14.A**) que 31 % de l'énergie nécessaire au fonctionnement du lycée est consommé pendant les heures de pointe (10h à 14h et 16h à 19h) où l'énergie est la plus chère et 69 % pendant les heures pleines.

2 Echantillon des données météorologiques

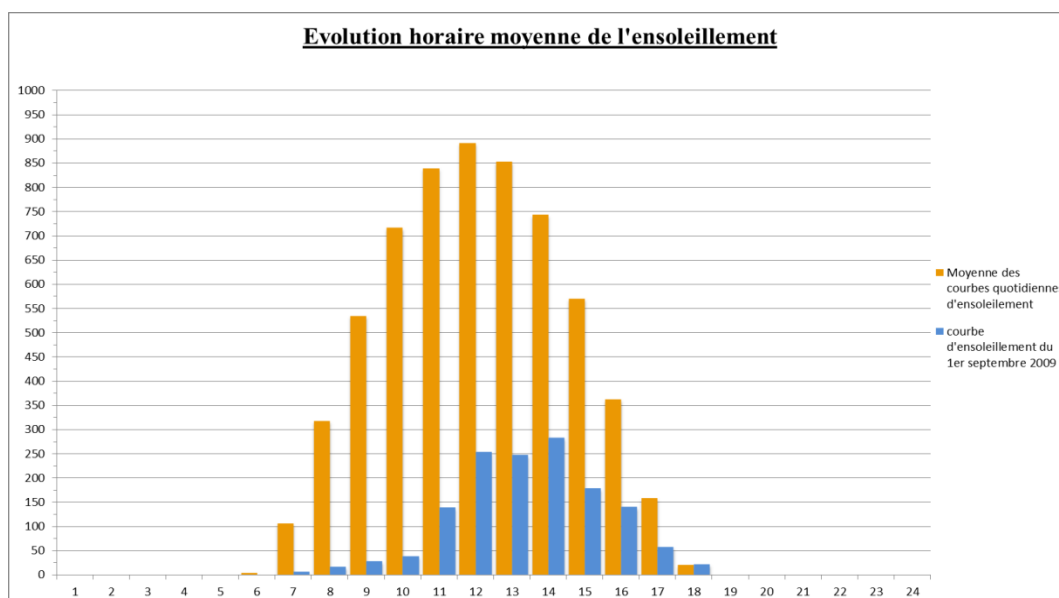


Figure 15 : Variabilité horaire et quotidienne de l'ensoleillement

L'histogramme jaune de la figure **Fig.15** a été obtenu en faisant pour chaque heure, la moyenne des valeurs quotidiennes d'ensoleillement sur les dix années de la base de données météorologiques recueillies. Nous retrouvons la forme en cloche caractéristique de l'évolution horaire quotidienne de l'ensoleillement. Elle montre que dans la zone d'implantation du projet, la période d'activité solaire s'étale (au plus large) de 6h à 18h avec un pic de 891W/m² aux environs de 12h. A cette variabilité horaire se superpose une variabilité entre les jours. A titre d'exemple, l'histogramme en bleu de la même figure correspond à la journée du 1^{er} septembre 2009 (jour de très forte averse), caractérisée par un début d'ensoleillement tardif à 7h et un pic de seulement 283W/m² décalé à 14h.

II. PERFORMANCES DES ARCHITECTURES TESTEES

1 Présentation des résultats

1.1 Résultats de la configuration 100 % R

Le paramétrage effectué est le suivant :

100% R				
	PV	R	G	S
Sources actives	0	1	0	0
Type	Parallèle	1	Commutation	0

Grille des transferts d'énergie possibles						
		Transfert d'énergie ...				
Vers...		Du Champ PV	Du Stockage	Du Réseau	Du Groupe électrogène	De la Charge
	Le Champ PV					
	Le Stockage	0		0	0	
	Le Réseau					
	Le Groupe électrogène					
	La Charge	0	0	1	0	

Figure 16 : Paramétrage de l'application pour la configuration 100%R

Le récapitulatif des résultats obtenus est le suivant :

Input		Le réseau			
Capacité des batteries	Puissance PV testée	Puissance transfo installée	Contribution réseau à la charge		
0	0	147200	100,00%		

Groupe électrogène		Le champ PV			
Puissance groupe installée	Contribution groupe à la charge	Rapport puissance PV / Thermique	Taux d'utilisation de l'énergie PV potentielle	Contribution PV à la charge	
0	0,00%	0	0,00%	0,00%	

Stockage					
Contribution PV	Contribution réseau	Contribution groupe	Contribution stockage à la charge	Taux de charge max	Nombre de remplacement
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0

Output					
Besoins non pris en charge	Emissivité CO2 du kWh	Prix de revient du kWh	Autosuffisance électrique du lycée		
0,00%	0,767	185,178	0%		

Figure 17 : Résultats de la configuration 100 % R

Le premier fait remarquable est qu'un transformateur de 160 kVA semble suffire pour couvrir les besoins électriques du lycée, même en supposant une croissance géométrique annuelle de 0,92 % (Fig.17), au lieu des 400 kVA réclamés dans le DAO. Ce résultat corrobore les études rétrospectives effectuées à l'occasion des remplacements de transformateurs qui montrent très souvent un fort surdimensionnement de cet équipement en comparaison avec les consommations réelles enregistrées. Ce surdimensionnement est la conséquence d'un biais de sécurité auquel sont soumis les ingénieurs chargés des dimensionnements au moment des travaux neufs. Elle a deux conséquences sur le coût de revient du kWh :

- le coût d'acquisition du transformateur est plus élevé
- sur toute la durée de vie du transformateur, les pertes fer qui sont proportionnelles à sa puissance nominale sont plus importantes. Ce qui engendre des factures plus lourdes et une émissivité CO₂ plus forte.

L'émissivité du kWh consommé pour cette architecture est légèrement supérieure à la moyenne enregistrée par la SONABEL depuis 2012 qui est de 0,696 kg/kWh (**Tab.6**).

Tableau 6 : Facteur d'émission CO₂ de la SONABEL sur la période 2012-2015 [3]

Année	2012	2013	2014	2015	2016
Electricité thermique totale produite et vendue (kWh)	522 031 920	608 747 901	720 575 517	831 633 718	799 647 780
Production total de CO ₂ (kg)	381 775 950	427 966 429	529 403 148	512 015 271	476 643 221
Facteur d'émission CO ₂ (kg/kWh)	0,731	0,703	0,735	0,616	0,596

Cela vient du fait que l'émissivité calculée lors des simulations est l'émissivité par rapport à l'énergie effectivement consommée par la charge, et non l'énergie totale produite.

Le coût de revient du kWh consommé est légèrement supérieur au prix moyen de la SONABEL. Encore une fois, cela est dû au fait qu'il s'agisse du coût du kWh effectivement utilisé par la charge.

1.2 Résultats des configurations 100 % PV

Le paramétrage effectué est le suivant :

100% PV				
	PV	R	G	S
Sources actives	1	0	0	1
Type	Parallèle	1	Commutation	0

Grille des transferts d'énergie possibles						
		Transfert d'énergie ...				
Vers...		Du Champ PV	Du Stockage	Du Réseau	Du Groupe électrogène	De la Charge
	Le Champ PV					
	Le Stockage	1		0	0	
	Le Réseau					
	Le Groupe électrogène					
	La Charge	1	1	0	0	

Figure 18 : Paramétrage de l'application pour les configurations 100 % PV

Le récapitulatif des résultats obtenus est disponible en annexe « Résultats de tests Configurations en architecture 100 % PV ».

Pour cette configuration, nous remarquons qu'une bonne partie des combinaisons de puissance PV et de capacité de stockage, ne permet pas de pourvoir à 100 % des besoins électriques (**Annexe 14**). En effet, tant que la capacité de stockage est inférieure à 17780 Ah, aucune taille de champ PV n'est suffisamment grande pour permettre d'assurer tous les besoins du complexe. De même, pour un champ PV d'une taille inférieure à 17780 Ah, aucune taille de champ PV n'est suffisamment grande pour permettre d'assurer tous les besoins du complexe. Sans surprise, cette configuration n'émet aucun CO₂ et le niveau d'autosuffisance électrique du complexe est de 100 % (**Fig.19**). Mais le prix de revient du kWh est au minimum de quatre cent soixante-douze (472) francs CFA, ce qui correspond au coût de la configuration 292kWc et 38100 Ah.

Input		Le réseau			
Capacité des batteries	Puissance PV testée	Puissance transfo installée	Contribution réseau à la charge		
38100	292000	0	0,00%		
Groupe électrogène		Le champ PV			
Puissance groupe installée	Contribution groupe à la charge	Rapport puissance PV / Thermique	Taux d'utilisation de l'énergie PV potentielle	Contribution PV à la charge	
0	0,00%	Tout photovoltaïque	20,04%	81,82%	
Stockage					
Contribution PV	Contribution réseau	Contribution groupe	Contribution stockage à la charge	Taux de charge max	Nombre de remplacement
100,00%	0,00%	0,00%	18,18%	100,00%	1
		Output			
Besoins non pris en charge	Emissivité CO2 du kWh	Prix de revient du kWh	Autosuffisance électrique du lycée		
0,00%	0,000	471,574	100,00%		

Figure 19 : Résultats de la meilleure configuration 100 % PV

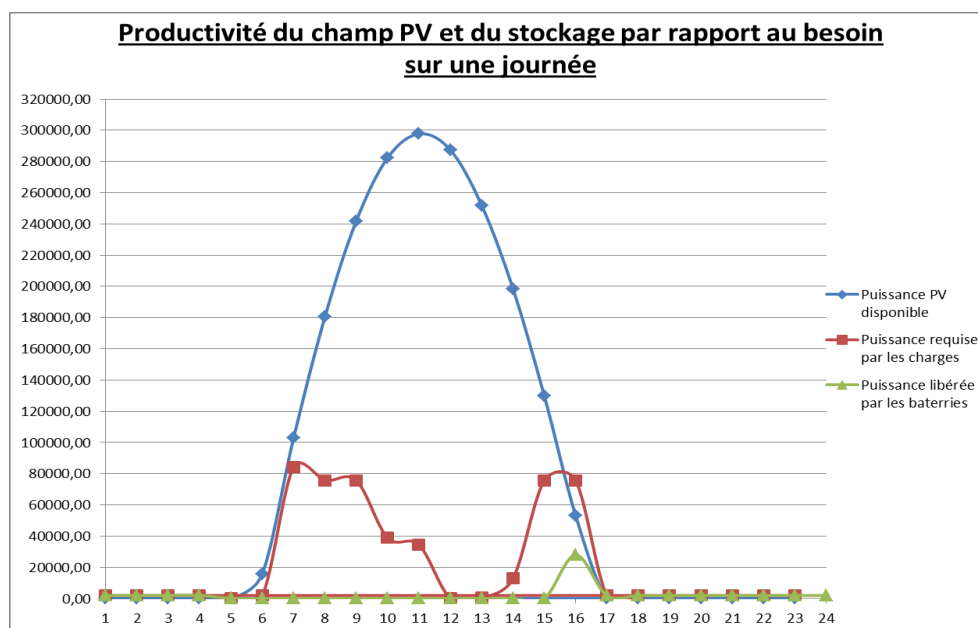


Figure 8 : Comparaison des besoins du lycée avec la productivité PV 100 % PV

L'évidence ici est la disproportion de l'énergie qu'aurait pu développer le champ PV par rapport à ce qui est nécessaire au lycée, stockage inclus (**Fig.20**). D'où le taux très faible d'utilisation de l'énergie PV d'environ 20 %. Cette configuration est malgré tout la plus économique de toutes les configurations 100 % PV testées car le coût de revient du kilowattheure crête installé est beaucoup plus faible que celui de l'Ampère-heure installé. Jusqu'à un certain seuil, dans le contexte actuel de coûts des technologies de production et de stockage électrochimiques de l'énergie photovoltaïque, il est plus avantageux d'augmenter disproportionnellement la taille du champ PV plutôt que d'investir dans un stockage. Ici, ce seuil est caractérisé par un ratio de 80/20. C'est à dire que le prix minimum du kWh est atteint lorsqu'environ 80 % des besoins électriques sont gérés directement par le champ PV et les 20 % compensés par les batteries de stockage.

1.3 Résultats de la configuration du dossier d'appel d'offre

En rappel, le DAO exige un transformateur de 400 kVA, un groupe électrogène de 250 kVA et un champ solaire de 25 kWc muni d'un stockage de 2500 Ah rechargé prioritairement par l'énergie solaire. Ce qui corresponde au paramétrage présenté dans la figure ci-dessous.

Proposition DAO avec batteries à chaque solaire prioritairement				
	PV	R	G	S
Sources actives	1	1	1	1
Type	Parallèle	1	Commutation	0

Grille des transferts d'énergie possibles					
		Transfert d'énergie ...			
		Du Champ PV	Du Stockage	Du Réseau	Du Groupe électrogène
Vers...	Le Champ PV				
	Le Stockage	1		1	1
	Le Réseau				
	Le Groupe électrogène				
	La Charge	1	1	1	1

Figure 9 : Paramétrage de l'application pour la configuration du DAO

Le récapitulatif des résultats obtenus est donné dans la capture d'écran qui suit.

Input		Le réseau			
Capacité des batteries	Puissance PV testée	Puissance transfo installée	Contribution réseau à la charge		
2500	25000	147200	54,87%		
Groupe électrogène		Le champ PV			
Puissance groupe installée	Contribution groupe à la charge	Rapport puissance PV / Thermique	Taux d'utilisation de l'énergie PV potentielle	Contribution PV à la charge	
0	0,00%	1/5	50,52%	20,29%	
Stockage					
Contribution PV	Contribution réseau	Contribution groupe	Contribution stockage à la charge	Taux de charge max	Nombre de remplacement
9,12%	90,88%	0,00%	24,84%	100,00%	2
Output					
Besoins non pris en charge	Emissivité CO2 du k/wh	Prix de revient du k/wh	Autosuffisance électrique du lycée		
0,00%	0,674	239,877	22,55%		

Figure 10 : Résultats de la configuration du DAO

Nous constatons sur le récapitulatif ci-dessus que la puissance de transformateur nécessaire est la même que pour l'architecture 100 % R.

En effet le choix de la puissance du transformateur requis se joue sur la puissance à pourvoir lors des pics de consommation. Or comme nous le voyons sur la [Fig.24.b](#), ces pics de besoin à 7h et à 15h, sont complètement décalés des heures de forte productivité photovoltaïque (entre 10h et 13h). Du point de vue de ces heures de pic de consommation électrique, tout se passe donc quasiment comme si le champ PV n'existait pas. D'où un transformateur de puissance requise inchangée.

En outre, la simulation n'a pas jugé nécessaire d'employer un groupe électrogène. En effet, en présence du réseau, l'intervention d'un groupe électrogène ne peut avoir lieu qu'en cas de délestage or le programme de simulation n'inclut pas les délestages, trop complexes et pas assez documentés pour être pris en compte de façon objective.

Seulement la moitié de l'énergie électrique développée aux bornes du générateur PV a été soit directement utilisée par les charges, soit emmagasinée dans les batteries. Ce faible taux d'utilisation s'explique par les trois facteurs limitant suivants :

- la non-concordance des périodes de forte productivité PV avec celles de forte demande électrique de la charge comme illustré sur la figure X. D'où une contribution directe de seulement 20,29 % du générateur PV aux besoins du lycée ([Fig.24.b](#)).
- la concurrence de l'énergie en provenance du réseau électrique national avec l'énergie PV pour le stockage. En effet, près de 91 % de l'énergie stockée dans les batteries est issue du réseau national et seulement 9,12 % provient du champ PV.

- la trop faible capacité du système de stockage qui est très souvent rempli. En effet, 83 % du temps, le stockage a un taux de remplissage supérieur ou égal à 95 % et il est quasiment toujours à plus de 85 % de taux de remplissage (**Fig.23.b**). Ce qui laisse peu de place pour les surplus de production du champ solaire.

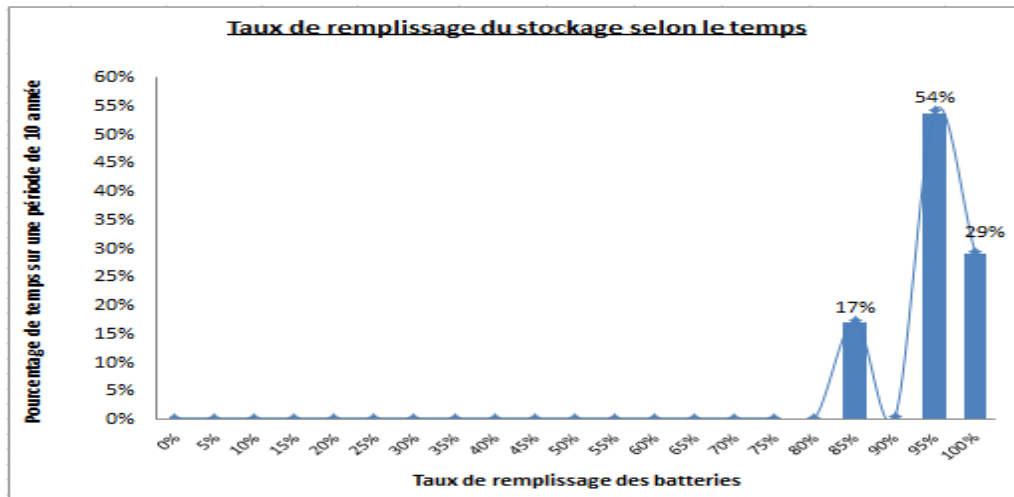


Figure 11 : Pourcentage horaire de répartition du taux de remplissage des batteries

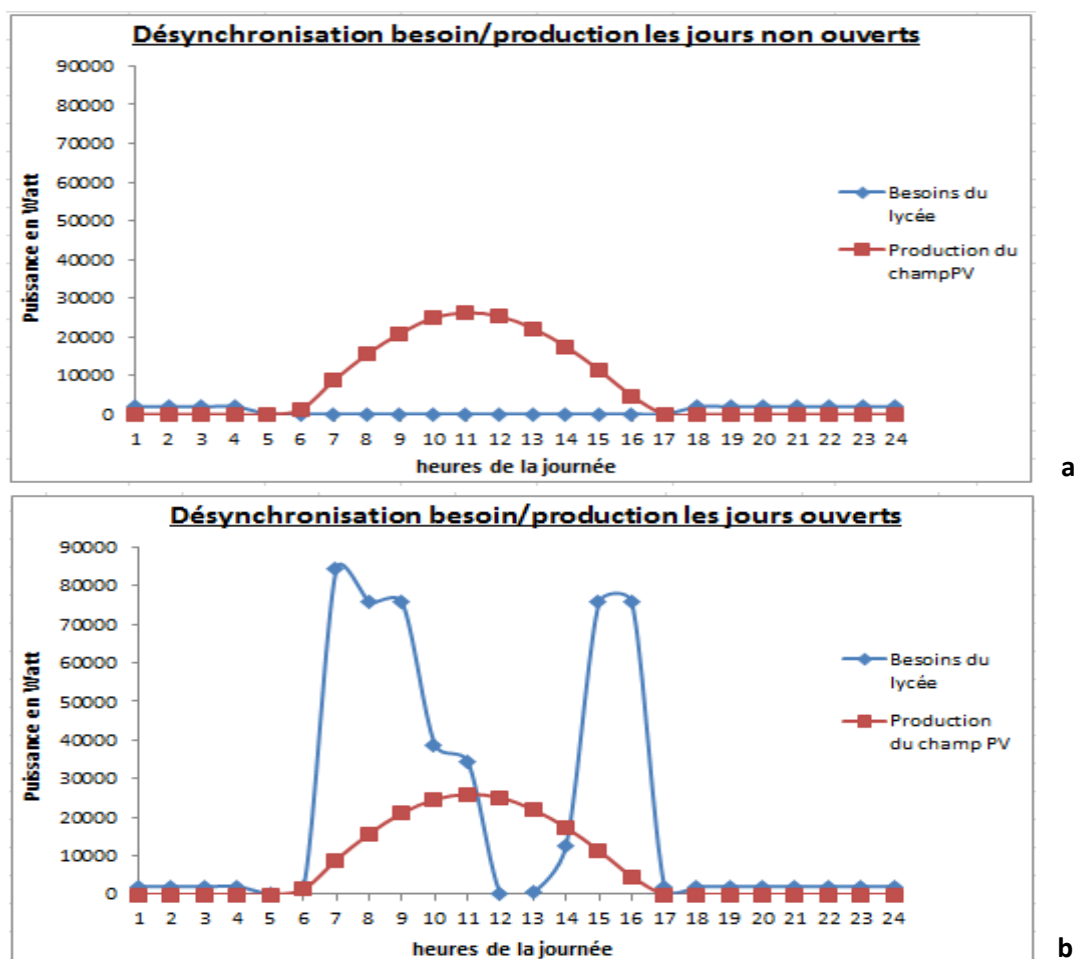


Figure 12 : Désynchronisation des besoins du lycée avec la productivité PV

Au finish, cette architecture réussit à satisfaire 100 % des besoins du lycée au coût de 239,87 FCFA par kWh et provoque l'émission de 0,674 g de CO₂ par kWh consommé.

1.4 Résultats des configurations PvG (commutation et parallèle)

Les paramétrages effectués furent les suivants :

PvG parallèle					PvG commutation				
	PV	R	G	S		PV	R	G	S
Sources actives	1	0	1	1	Sources actives	1	0	1	1
Type	Parallèle	1	Commutation	0	Type	Parallèle	0	Commutation	1

Grille des transferts d'énergie possibles						
Vers...	Transfert d'énergie ...					
		Du Champ PV	Du Stockage	Du Réseau	Du Groupe électrogène	De la Charge
	Le Champ PV					
	Le Stockage	1		0	0	
	Le Réseau					
	Le Groupe électrogène					
	La Charge	1	1	0	1	

Figure 13 : Paramétrage de l'application pour les configurations PvG

Le récapitulatif des résultats obtenus est disponible en annexe « Résultats de tests Configurations en architecture PvG commutation & Configurations en architecture PvG parallèle » :

L'émissivité CO₂ de cette catégorie de configuration est d'autant plus faible et l'autosuffisance électrique qu'elle confère au lycée est d'autant plus forte que la taille du champ PV et la capacité du stockage sont grandes.

En moyenne, le prix du kWh consommé décroît dans un premier temps avec l'augmentation de la taille du champ PV jusqu'à 102 kWc. Puis, augmente à nouveau à partir de 112 kWc. Par contre, ce coût du kWh croît systématiquement avec la capacité de stockage installée. Ainsi, la colonne des configurations PvG sans stockage présente toujours les prix de kWh les plus faibles qu'il s'agisse d'un couplage commutation ou parallèle.

Enfin, notons qu'à dimensions égales, les résultats du couplage parallèle sont en tous points meilleurs que ceux obtenus par couplage commutation.

Les captures d'écran ci-dessous montrent les détails des résultats des configurations offrant les kWh les moins coûteux :

Input		Le réseau			
Capacité des batteries	Puissance PV testée	Puissance transfo installée	Contribution réseau à la charge		
0	172000	0	0,00%		
Groupe électrogène		Le champ PV			
Puissance groupe installée	Contribution groupe à la charge	Rapport puissance PV / Thermique	Taux d'utilisation de l'énergie PV potentielle	Contribution PV à la charge	
172000	55,87%	1	14,20%	44,13%	
Stockage					
Contribution PV	Contribution réseau	Contribution groupe	Contribution stockage à la charge	Taux de charge max	Nombre de remplacement
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0
Output					
Besoins non pris en charge	Emissivité CO2 du kWh	Prix de revient du kWh	Autosuffisance électrique du lycée		
0,00%	0,486	221,413	44,13%		

a

Input		Le réseau			
Capacité des batteries	Puissance PV testée	Puissance transfo installée	Contribution réseau à la charge		
0	122000	0	0,00%		
Groupe électrogène		Le champ PV			
Puissance groupe installée	Contribution groupe à la charge	Rapport puissance PV / Thermique	Taux d'utilisation de l'énergie PV potentielle	Contribution PV à la charge	
172000	39,03%	3/4	27,47%	60,97%	
Stockage					
Contribution PV	Contribution réseau	Contribution groupe	Contribution stockage à la charge	Taux de charge max	Nombre de remplacement
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0
Output					
Besoins non pris en charge	Emissivité CO2 du kWh	Prix de revient du kWh	Autosuffisance électrique du lycée		
0,00%	0,340	168,107	60,97%		

b

Figure 14 : Résultats des meilleures configurations PvG commutation (a) et parallèle (b)

La configuration PvG parallèle utilisant un champ PV de 122 kWc permet de réduire la contribution du groupe électrogène à 39 % contre près de 61 % pris en charge directement par le générateur photovoltaïque sans l'intermédiaire d'un stockage (Fig.26.b). L'émissivité qui en résulte est plus de moitié inférieure à la moyenne historique de la SONABEL et le coût du kWh qu'il fournit est 9,22 % inférieur à celui d'une installation conventionnelle 100 % R, le tout pour une autosuffisance électrique du lycée d'environ 61 %.

1.5 Résultats des configurations PvR (commutation et parallèle)

Les paramétrages effectués furent les suivants :

PvR parallèle				
	PV	R	G	S
Sources actives	1	1	0	1
Type	Parallèle	1	Commutation	0

PvR commutation				
	PV	R	G	S
Sources	1	1	0	1
Type	Parallèle	0	Commutation	1

Grille des transferts d'énergie possibles						
Vers...	Transfert d'énergie ...					
		Du Champ PV	Du Stockage	Du Réseau	Du Groupe	De la Charge
	Le Champ PV					
	Le Stockage	1		0	0	
	Le Réseau					
	Le Groupe électrogène					
	La Charge	1	1	1	0	

Figure 15 : Paramétrage de l'application pour les configurations PvR

Les résultats obtenus sont disponibles en [Annexe 14](#).

Les captures d'écran ci-dessous montrent les détails des résultats des configurations offrant les kWh les moins coûteux :

Input		Le réseau			
Capacité des batteries	Puissance PV testée	Puissance transfo installée	Contribution réseau à la charge		
0	57000	147200	84,30%		
Groupe électrogène		Le champ PV			
Puissance groupe	Contribution groupe à la charge	Rapport puissance PV / Thermique	Taux d'utilisation de l'énergie PV	Contribution PV à la charge	
0	0,00%	3/7	15,21%	15,70%	
Stockage					
Contribution PV	Contribution réseau	Contribution groupe	Contribution stockage à la charge	Taux de charge max	Nombre de remplacement
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0
Output					
Besoins non pris en charge	Emissivité CO2 du kWh	Prix de revient du kWh	Autosuffisance électrique du lycée		
0,00%	0,647	194,286	15,70%		

a

Input		Le réseau			
Capacité des batteries	Puissance PV testée	Puissance transfo installée	Contribution réseau à la charge		
0	47000	147200	66,04%		
Groupe électrogène		Le champ PV			
Puissance groupe	Contribution groupe à la charge	Rapport puissance PV / Thermique	Taux d'utilisation de l'énergie PV	Contribution PV à la charge	
0	0,00%	1/3	39,87%	33,96%	
Stockage					
Contribution PV	Contribution réseau	Contribution groupe	Contribution stockage à la charge	Taux de charge max	Nombre de remplacement
100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0
Output					
Besoins non pris en charge	Emissivité CO2 du kWh	Prix de revient du kWh	Autosuffisance électrique du lycée		
0,00%	0,506	175,661	33,96%		

b

Figure 16 : Résultats des meilleures configurations PvR commutation (a) et parallèle (b)

Comme pour l'architecture PvG, l'émissivité CO₂ des configurations PvR est d'autant plus faible et l'autosuffisance électrique qu'elles confèrent au lycée est d'autant plus forte que la taille du champ PV et la capacité du système de stockage sont grandes.

En moyenne, le prix du kWh consommé décroît dans un premier temps avec l'augmentation de la taille du champ PV jusqu'à 42 kWc et 67 kWc respectivement pour les couplages parallèle et commutation, puis augmente à nouveau à partir de 47 kWc et 72 kWc. Par contre, le coût du kWh augmente systématiquement avec la capacité de stockage, de sorte que les configurations PvR sans stockage présentent toujours les prix de revient les plus faibles.

Enfin, notons qu'à dimension égales, les résultats du couplage parallèle sont en tous points meilleurs que ceux obtenus par couplage commutation.

La configuration PvR parallèle utilisant un champ PV de 47 kWc permet de ramener la contribution du réseau à 66 % contre près de 34% pris en charge directement par le générateur photovoltaïque sans un stockage. L'émissivité qui en résulte est inférieure de 27,3 % à la moyenne historique de la SONABEL et le coût du kWh qu'il fournit est 5,14% inférieur à celui d'une installation conventionnelle 100 %R, le tout pour une autosuffisance électrique du lycée d'environ 34 %.

2 Configuration optimale pour le LPK

Rappelons que la notion de configuration idéale est arbitraire par définition. Elle dépend autant des performances intrinsèques de chaque configuration que des critères de sélection du décideur. Ici nous décidons de trouver la configuration assurant la totalité des besoins électriques du lycée de la façon la moins coûteuse tout en conférant de préférence le plus d'autonomie électrique au complexe.

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats importants des meilleures configurations

Architecture	Détails configuration du coût minimum	Coût du kWh (FCFA)	Autosuffisance électrique	Emissivité CO ₂ (kg/kWh)	Taux d'utilisation PV
100% R	R : 160kVA	185,178	0%	0,767	0%
100% PV	PV : 292kWc S : 38100Ah	471,574	100%	0	20,04%
DAO	PV : 25kWc ; R : 160kVA G : 0kVA ; S : 2500Ah	239,877	22,55%	0,674	50,52%
PvG commutation	PV : 172kWc ; G : 215kVA	221,413	44,13%	0,486	14,20%
PvG parallèle	PV : 122kWc ; G : 215kVA	168,107	60,97%	0,340	27,47%
PvR commutation	PV : 57kWc ; R : 160kVA	194,286	15,70%	0,647	15,21%
PvR parallèle	PV : 47kWc ; R : 160kVA	175,661	33,96%	0,506	39,87%

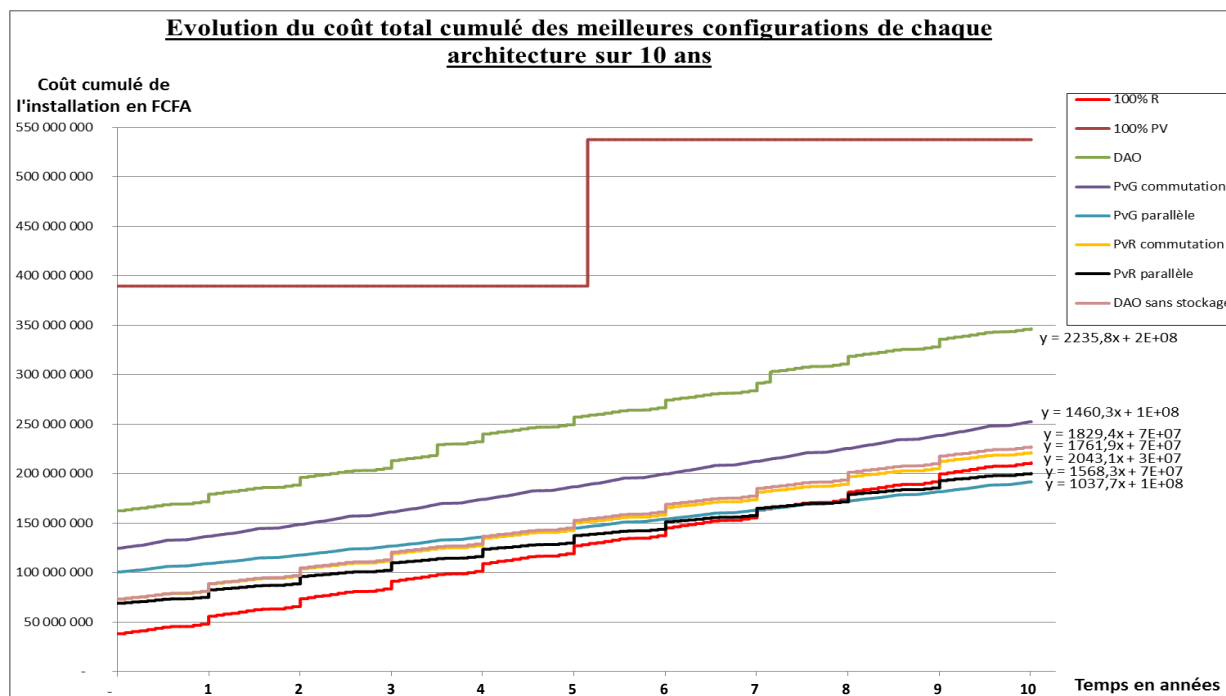


Figure 17 : Evolution des coûts cumulés des meilleures configurations au fil des années

Le **Tab.7** dresse un récapitulatif comparatif des meilleures configurations simulées. A moyen terme, la configuration PvG parallèle (122 kWc ; 215 kVA) présente les meilleurs résultats aussi bien sur le plan économique que sur le plan environnemental, tout en offrant au lycée technique, l'autonomie électrique la plus satisfaisante.

En outre, l'allure des courbes de la **Fig.29** de coût du kilowattheure de chaque configuration indique que l'avantage économique de la configuration PvG parallèle (122 kWc ; 215 kVA) a tendance à se renforcer à long terme. De fait, cette configuration devient plus économique que la solution 100 % R au bout de sept années de fonctionnement. A titre de comparaison, la configuration proposée par le DAO conduit à un kilowattheure 29,54 % plus cher que dans le cas d'une simple connexion au réseau et l'allure des courbes de coût suggèrent une accentuation progressive de cet inconvénient avec le temps.

CONCLUSION

Ce mémoire s'est penché sur la conception d'un « **réseau basse tension alimenté par une source hybride** », dans le cadre du projet de « **construction d'un lycée professionnel à Kaya dans la région du Centre-Nord** », pour le compte du MENAPLN du Burkina Faso. L'objectif était de trouver la configuration de sources électriques maximisant les intérêts économique, environnemental et stratégique dans le contexte météorologique et des contraintes technique et économique du site.

L'étude a montré que la configuration prévue à la base par le DAO réussit à réduire de plus de 12 %, l'émission de gaz carbonique en offrant au nouveau lycée, une autosuffisance électrique de 22,55 % sur ses besoins quotidiens. Cependant, non seulement elle est quatre fois plus coûteuse qu'une traditionnelle connexion au réseau électrique national à l'installation, mais en plus, au fil du temps le kilowattheure produit par cette architecture devient de plus en plus cher par rapport à celui d'une installation 100 % R conventionnelle.

D'une façon générale, l'étude révèle que ce désavantage économique persistant, peut être généralisé à la majorité des configurations incluant un stockage. En outre, elle montre que dans le cas où un stockage est employé, il est préférable d'en réserver exclusivement la recharge au générateur photovoltaïque. Enfin, nous constatons que les couplages de sources en parallèle offrent de bien meilleures performances que les couplages en commutation.

Ainsi la configuration PvG parallèle (122 kWc ; 215 kVA ; sans stockage) bien qu'étant à l'installation près de trois fois plus coûteuse qu'une électrification conventionnelle, parvient en une décennie à être 9,22 % plus économique que cette dernière. De plus, elle confère une autosuffisance électrique de 60,97 % au complexe, et permet de réduire de 55,67 % ses émissions de CO₂. Enfin, la rentabilité de cette configuration est la plus satisfaisante de toutes celles qui ont été simulées et s'accroît avec le temps.

Ce qui nous permet de dire que la configuration PvG (122 kWc ; 215 kVA ; sans stockage) est, dans le cas de l'électrification du lycée professionnel de Kaya, la meilleure option pour réduire sa facture de consommation électrique et l'impact environnemental négatif de son activité et accroître sa résilience face aux hausses imprévisibles du prix des hydrocarbures.

Pour finir, outre les réponses qu'apporte ce travail à la problématique traitée, le fait qu'il ait été pour nous une occasion de mettre à contribution la majeure partie des connaissances acquises au cours de notre programme de formation académique, constitue pour nous un réel motif de satisfaction notamment en termes de Système d'Informations géographiques (SIG), de programmation informatique, de techniques de collecte de données, de dimensionnement de sources conventionnelles et renouvelables d'électricité, avec ou sans stockage, connecté au réseau ou non, calcul d'impact économique et environnemental de projet, et réflexion sur la notion de solution durable.

SUGGESTIONS

➤ Suggestions :

Comme montré plus haut, la participation des sources électriques thermiques à la recharge du stockage est une des principales raisons des performances économiques et environnementales médiocres de la configuration proposée par le DAO. Aussi suggérons-nous la reconfiguration du câblage du système de sorte que seul le champ PV puisse recharger les batteries.

Il y a également la possibilité d'améliorer les performances énergétiques du complexe. En cela, nous montrions au chapitre des résultats, que le coût élevé du kWh de la majorité des configurations hybrides est dû à l'emploi de batteries de stockage. L'alternative explorée a été de réduire l'investissement sur le stockage tout en surdimensionnant le générateur PV. Mais les faibles taux d'utilisation de l'énergie PV qui en résultent, révèlent une inefficacité énergétique.

En tenant compte de la répartition des besoins électriques du lycée selon l'utilisation finale qui en est faite (**Fig.14 B et D**), nous pouvons envisager une solution de stockage de l'énergie solaire sous forme de froid pour la climatisation des salles. Cette solution en plus d'avoir le potentiel d'être moins coûteuse à réaliser, pourrait s'autofinancer grâce aux économies qu'elle permettrait de réaliser sur l'achat et l'installation d'équipements traditionnels de climatisation.

Une autre possibilité plus bénéfique et plus simple à réaliser, serait de profiter des nouvelles dispositions du sous-secteur de l'électricité au Burkina, autorisant la production d'électricité par des acteurs autres que la SONABEL [14]. Il s'agirait alors de vendre au réseau national, les surplus d'énergie produits en période de faible consommation du lycée, afin d'accélérer la rentabilisation de l'installation. Outre le fait que la technologie nécessaire soit mature, sa mise en œuvre nécessite peu de travaux supplémentaires si elle est prise en compte dès la phase de conception du projet.

➤ Perspectives concernant l'amélioration du modèle pour les simulations :

Dans l'optique d'augmenter la précision des simulations et la fiabilité de leurs prédictions, il pourrait être intéressant de modéliser :

- les variations du profil de charge selon les périodes de l'année ;
- l'effet de la température sur le nombre de cycles de charge/décharge des batteries ;
- les délestages et interruptions accidentelles de fourniture d'électricité par le réseau national ;
- les variations de la consommation spécifique de carburant du groupe électrogène en fonction de la puissance électrique instantanée requise par la charge.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] World Population Prospects : The 2017 Révision/ Organisation des Nations Unies/ Département des Affaires Economiques et Sociales.
- [2] AIE World Energy Outlook 2017, "Sustainable scenario 2°C"
- [3] Rapports annuels d'activités SONABEL 2006-2017.
- [4] AIE World Energy Outlook 2018.
- [5] AIE : Injection de photovoltaïque en réseau diesel isolé Quelques critères de faisabilité. Octobre 2007.
- [6] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/methods.html
- [7] Mueller et al.2009 / Mueller et al.2012 / Huld et al.2012 / Gracia Amillo et al. , 2014.
- [8] Yiwalo John Willy Arnold BATIONO 2017: "Etude des protections électriques de la ligne HTA 33kV Kaya-Dori".
- [9] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html
- [10] Huld T., Müller R. and Gambardella A., 2012: "A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa". Solar Energy, 86, 1803-1815.
- [11] A. MOUSTAPHA, 2011/ Projet d'alimentation électrique de la localité de Yaba : construction d'une ligne d'interconnexion HTA 33 kV et le réseau HTA/BTA de Yaba"
- [12] Manuel Marcelino MADECA, 2019 : " Etude d'alimentation de poste HTA/BTA sur portique dans la ville de Ouagadougou : Cas du poste 122 A Nonsin ".
- [13] A. C. Nonnotte 2016: "Les toilettes scolaires"/ <https://www.elsevier.com/fr-fr/connect/medecine/les-toilettes-scolaires#footer-577705>
- [14] LOI N°014-2017/AN du 20 avril 2017 portant réglementation générale du secteur de l'énergie
- [15] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) : " Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone " ; Version 11.0.0 - mardi 18 novembre 2014.
- [16] Manuel de travaux pratiques-Transport et Distribution de l'énergie Electrique- section 6 : Calcul d'une liaison aérienne
- [17] Vocabulaire Electrotechnique International 2017
- [18] BP Energy Outlook 2018,
- [19] Exxon Mobil Energy Outlook 2018.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Locaux et Bâtiments du Lycée professionnel de Kaya

ANNEXE 2 : Caractéristiques électriques des récepteurs du Lycée Professionnel de Kaya

ANNEXE 3 : Scenarios d'horaires de fonctionnement du lycée

ANNEXE 4 : Détermination du temps moyen de fonctionnement des toilettes

ANNEXE 5 : Détails de dimensionnement de la ligne MT

ANNEXE 6 : Série des massifs normalisés

ANNEXE 7 : Cadre quantitatif estimatif de coûts d'installation et d'exploitation de la source électrique hybride du Lycée professionnel de Kaya

ANNEXE 8 : Prix unitaire du matériel et des consommables entrants dans la réalisation et le fonctionnement de la source électrique du Lycée professionnel de Kaya

ANNEXE 9 : Méthode de dimensionnement des équipements de protection électrique

ANNEXE 10 : Grille tarifaire de la Société Nationale Burkinabé d'électricité

ANNEXE 11 : Liste des jours fériés régulièrement en vigueur au Burkina Faso et pris en compte lors des simulations

ANNEXE 12 : Calcul de l'émissivité CO₂ des configurations

ANNEXE 13 : Résultats du bilan de puissance prévisionnel du lycée professionnel de Kaya

ANNEXE 14 : Résultats des tests

ANNEXE 1 : Locaux et Bâtiments du Lycée Professionnel de Kaya

Bâtiment	Nombre d'étage	Pièce	Nombre de personne par pièce	Nombre de pièce de ce type	Surface totale de la pièce (m²)	Type d'activité
Atelier maroquinerie	1	Bureau du chef d'atelier	1	1	19,31	Bureau
		Salle de cours	41	2	236,02	Cours
		Salle des professeurs	5	1	25,28	Bureau
		Aire de pratique	50	1	255,97	TP
		Salle d'exposition	30	1	54,40	Entreposage
		Magasins de stockage	-	3	86,36	Entreposage
		Espaces communs	-	1	150,24	Dégagement
		Espaces extérieurs	-	1	113,18	Accès
Atelier génie civil	1	Toilettes	-	3	20,8	Sanitaire
		Bureau du chef d'atelier	1	1	13,60	Bureau
		Salle de cours	41	2	236,02	Cours
		Salle de laboratoire	5	3	98,10	TP
		Salle des professeurs	5	1	25,29	Bureau
		Aire de pratique	50	1	156,18	TP
		Espace de stockage	-	1	40,43	Entreposage
		Espaces communs	-	1	105,58	Dégagement
Atelier génie électrique	1	Espaces extérieurs	-	1	121,3	Accès
		Toilettes	-	3	21,06	Sanitaire
		Bureau du chef d'atelier	1	1	18,02	Bureau
		Salle de cours	41	2	248,40	Cours
		Salle des professeurs	5	1	21,03	Bureau
		Salle de pratique	50	3	229,34	TP
		Magasin	-	1	71,33	Entreposage
		Espaces communs	-	1	169,02	Dégagement
Gestion des ateliers	1	Espaces extérieurs	-	1	42,40	Accès
		Toilettes	-	3	34,53	Sanitaire
		Bureau du chef des travaux	1	1	14,04	Bureau
		Bureau chef travaux adjoint	1	1	14,04	Bureau
		Surveillance	1	1	14,00	Bureau
		Secrétariat	1	1	12,03	Bureau
		Bureau du chef magasin	1	1	07,00	Bureau
		Magasin	-	2	139,37	Entreposage
Blocs pédagogiques (x3)	2	Espaces communs	-	1	31,36	Dégagement
		Espaces extérieurs	-	1	3,7	Accès
		Toilettes	-	1	08,62	Sanitaire
		Salle de cours	41	8	844,16	Cours
		Espaces communs	-	1	142,4	Dégagement
Bibliothèque	1	Espaces extérieurs	-	1	351	Accès
		Local technique	-	2	10,72	Entreposage
		Toilettes	-	6	113,7	Sanitaire
		Accueil	2	1	15,34	Bureau
		Salle des livres	-	1	53,13	Lecture
		Salle de réunion	10	1	29,40	Réunion
		Salle de lecture	40	2	110,20	Lecture
		Magasin	-	2	04,97	Entreposage
Réfectoire	1	Espaces communs	-	1	05,55	Dégagement
		Espaces extérieurs	-	1	64,37	Accès
		Toilettes	-	3	19,60	Sanitaire
		Salle de restauration	100	1	134,50	Restauration
		Salle réception des plats	1	1	8,85	Restauration
		Salle de plonge	4	1	9,30	Restauration
		Office	-	1	18,60	Entreposage
		Cuisine	5	1	53,94	Cuisine
		Chambre froide	-	1	06,47	Conservation
		Magasin	-	1	09,31	Entreposage
Cafétéria	1	Espaces communs	-	1	10,25	Dégagement
		Local technique	-	1	02,12	Entreposage
		Espaces extérieurs	-	1	25,42	Accès
		Toilettes	-	1	08,90	Sanitaire
		Salle cafétéria	25	1	47,55	Pause

		Kitchenette	2	1	10,92	Pause
		Terrasse	20	1	39,72	Pause
		Espaces extérieurs	-	1	1,44	Accès
		Toilettes	-	2	7,04	Sanitaire
Infirmierie	1	Bureau de consultation	1	1	14,72	Sécurité
		Salle de soin	1	1	20,52	Soin
		Salle d'observation	2	1	24,60	Soin
		Magasin	-	1	10,40	Entreposage
		Espaces communs	-	1	32,80	Dégagement
		Espaces extérieurs	-	1	32,80	Accès
		Toilette	-	2	18,59	Sanitaire
Salles spécialisées	1	Gestionnaire	1	1	14,19	Bureau
		Cybercafé	20	1	80,04	Informatique
		Salle de DAO	20	1	81,44	TP
		Salle de dessin	21	2	162,88	TP
		Espaces communs	-	1	57,45	Dégagement
		Espaces extérieurs	-	1	20,09	Accès
		Toilette	-	2	14,19	Sanitaire
Bloc administratif	1	Salle informatique	-	1	24,14	informatique
		Censorat	1	1	24,14	Bureau
		Rangement	-	2	08,26	Entreposage
		Secrétariat du censeur	1	1	08,78	Bureau
		Salle de reprographie	-	1	08,78	Informatique
		Bureau	1	2	11,78	Bureau
		Salle d'accueil	1	1	09,06	Bureau
		Salle de réunion	20	1	41,51	Réunion
		Secrétariat du proviseur	1	1	21,42	Bureau
		Salle personnel de soutien	1	1	11,78	Bureau
		Intendance	1	1	11,78	Bureau
		Surveillance	1	1	11,78	Bureau
		Provisorat	1	1	24,14	Bureau
		Espaces communs	-	1	120,96	Dégagement
		Espaces extérieurs	-	1	31,37	Accès
		Vestiaire	-	2	12,63	Sanitaire
		Toilette	-	4	21,16	Sanitaire
Salle polyvalente	1	Salle de spectacle	60	1	97,56	Spectacle
		Scène	-	1	31,75	Spectacle
		Loges	-	2	27,94	Spectacle
		Magasin	-	1	06,87	Entreposage
		Local technique	-	1	3,00	Entreposage
		Arrière scène	-	1	42,70	Spectacle
Guérite	1	Poste de contrôle	1	1	09,00	Sécurité
		Sas	-	1	01,76	Dégagement
		Perron	-	1	02,10	Accès
		Toilette	-	1	03,84	Sanitaire
Logement (x6)	1	Séjour	2	1	35,00	Séjour
		Cuisine	1	1	09,90	Cuisine2
		Chambre à coucher	2	3	51,64	Chambre
		Espaces communs	-	1	07,56	Dégagement
		Espaces extérieurs	-	1	14,83	Accès
		Toilette	-	2	04,75	Sanitaire

En jaune sont surlignés les bâtiments construits auxquels nous nous sommes limités dans l'estimation des besoins.

ANNEXE 2 : Caractéristiques électriques des récepteurs du Lycée professionnel de Kaya

<u>Catégorie</u>	<u>Désignation</u>	<u>Puissance électrique(W)</u>	<u>Rendement</u>	<u>Facteur de puissance</u>	<u>Coefficient d'utilisation</u>
Eclairage	Lustre	60	100%	0,9	1
	Spot LED	18			
	Applique plafonnière LED	9			
	Dalle LED 60X60 blanc froid	40			
	Tube LED 60	11			
	Tube LED 120	20			
	Applique sanitaire	7			
	Projecteur industriel	150			
Ventilation	Brasseur	62	80%	0,8	0,75
	Extracteur d'air	120			
Prises électriques	Réfrigérateur	400	85%	0,8	0,7
	Photocopieuse	60			
	Enceinte sonore	600			
	Amplificateur	600			
	Baladeur	25			
	Téléviseur	600			
	Écran d'ordinateur	485			
	Unité centrale	30			
	Onduleur PC	75			
	Appareil divers branché	100			
	Ordinateur portable	120			
	Distributeur d'eau	72			
	Chauffe-eau	100			
	Projecteur	72			
Climatisation	Clim 2CV	1520	85%	0,80	0,7
	Clim 3CV	2732			
	Clim 4CV	3620			
Télécommunication	Onduleur serveur	150	85%	0,80	1
	Armoire de brassage	200			
	Routeur	15			
	Téléphone fixe	10			
	Centrale de détection incendie	75			
	Détecteur incendie	5			
	Alarme sonore	25			

ANNEXE 3 : Scenarios d’horaires de fonctionnement du lycée

Scenario « jour ouvré » (pour les bâtiments construits)

		Horaires de fonctionnement des appareils électriques par jour ouvré																							
Bâtiment	Pièce	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Atelier maroquinerie	chef d’atelier																								
	Salle de cours																								
	Salle des profs																								
	Aire de pratique																								
	Salle d’exposition																								
	Magasins																								
	Espaces communs																								
	Espaces extérieurs																								
	Toilettes																								
Atelier génie civil	chef d’atelier																								
	Salle de cours																								
	Salle de laboratoire																								
	Salle des profs																								
	Aire de pratique																								
	Espace de stockage																								
	Espaces communs																								
	Espaces extérieurs																								
	Toilettes																								
Atelier génie électrique	chef d’atelier																								
	Salle de cours																								
	Salle des profs																								
	Salle de pratique																								
	Magasin																								
	Espaces communs																								
	Espaces extérieurs																								
	Toilettes																								
Atelier structures métalliques	chef d’atelier																								
	Salle de cours																								
	Salle professeurs																								
	Salle de pratique																								
	Espace de stockage																								
	Espaces extérieurs																								
	Toilettes																								
Gestion des ateliers	chef des travaux																								
	chef travaux adjoint																								
	Surveillance																								
	Secrétariat																								
	chef magasin																								
	Magasin																								
	Espaces communs																								
	Espaces extérieurs																								
	Toilettes																								
Latrines extérieurs	Toilettes																								
Local source	Local solaire																								
Guérite	Poste de contrôle																								
	Sas																								
	Perron																								
	Toilette																								

Scenario « jour non-ouvré » (pour les bâtiments construits)

Bâtiment	Pièce	Horaires de fonctionnement des appareils électriques par jour fermé																							
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Atelier maroquinerie	Espaces extérieurs																								
Atelier génie civil	Espaces extérieurs																								
Atelier génie électrique	Espaces extérieurs																								
Atelier structures métalliques	Espaces extérieurs																								
Gestion des ateliers	Espaces extérieurs																								
Local source	Local solaire																								
Guérite	Poste de contrôle																								
	Sas																								
	Perron																								
	Toilette																								

ANNEXE 4 : Détermination du temps moyen de fonctionnement des toilettes

Une population d'environ 1300 élèves et membres de personnel ([Annexe 1](#)) se partagent 81 espaces de toilettes. Sur la base de l'étude [13], nous avons estimé le temps moyen t_{toilette} d'utilisation de chaque toilette du complexe. Le temps total passé aux toilettes correspond pour l'essentiel à la somme du temps passé aux selles et de celui passé aux urines.

En considérant que quotidiennement le tiers de la population du lycée ressent le besoin de se rendre aux selles et que celui-ci dure en moyenne 15 min nous pouvons écrire :

$$T_{\text{selles}} = \frac{N_{\text{pop}}}{3} \times 15 \text{ (Min)}$$

Et en considérant que quotidiennement chaque individu ressent le besoin de se rendre aux urines 2 fois et y passe 4 min nous avons :

$$T_{\text{urines}} = N_{\text{pop}} \times 4 \times 2 \text{ (Min)}$$

Toujours selon [13], pour des raisons diverses, seule la moitié des usagers d'établissements publics vont effectivement aux toilettes quand ils en ressentent le besoin. D'où le temps total d'utilisation des toilettes estimé comme suit :

$$T_{\text{toilettes}} = (T_{\text{selle}} + T_{\text{urine}}) \times 0,5 \text{ (Min)}$$

$$t_{\text{toilette}} = \frac{T_{\text{toilettes}}}{N_{\text{toilettes}}} \text{ (Min)}$$

Nous estimons donc le temps moyen d'utilisation de chaque sanitaire t_{toilette} à une heure et trente minutes par jour.

ANNEXE 5 : Détails de dimensionnement de la ligne MT

Les paramètres géométriques de tenue des conducteurs

La portée a : qui est la distance linéaire entre deux supports consécutifs (**Fig.7**). En régime HTA, elle peut aller jusqu'à 150 m mais en agglomération la SONABEL la limite à 60 m.

La garde au sol minimale requise gs : c'est la distance verticale séparant le point le plus bas du câble et le sol (**Fig.7**). Selon le type d'activité menée sous la portée de ligne considérée, le **Tab.3** donne les valeurs de la gs .

La flèche f : c'est la distance verticale entre la droite reliant les deux points d'attache du conducteur aux poteaux et le niveau le plus bas du conducteur (**Fig.7**). Nous déterminons la valeur de la flèche de chaque portée en faisant :

$$f = H_{att} - gs \text{ (m)}$$

Le paramètre p : correspond au rayon du cercle dont la courbure est identique à celle du câble entre les deux supports (**Fig.7**). Pour sa détermination, nous avons utilisé la relation :

$$P = \frac{1}{2} \times \left(f + \frac{a^2}{4 \times f} \right) \text{ (m)}$$

L'écartement minimal requis e : est la distance horizontale entre les conducteurs évitant que ceux-ci se touchent ainsi que les arcs électriques (**Fig.6**). Pour chaque portée, nous l'avons calculée par la formule suivante :

$$e \geq Kc \times \left[\frac{U}{150} + Kz \times \sqrt{(f + L)} \right] \text{ (m)}.$$

Où U est la tension de ligne en kV et les valeurs de Kc et Kz dépendent de la technologie d'isolateur adoptée et du niveau de vent de la zone comme le montre le **Tab.8**. L est la longueur libre de la chaîne en mètres et vaut 0,50 m pour deux alignements successifs, 0 m pour deux ancrages successifs. Lorsqu'on a un ancrage suivi d'un alignement, on fait la moyenne des deux valeurs de e obtenue en prenant $L = 0,5$ m puis $L = 0$ m.

Tableau 8 : Valeurs de Kc et Kz

Kc				Kz	
Isolateur rigide		Isolateur suspendu		Zone à vent normal	Zone à fort vent
Armement en drapeau ou alterné	Armement en nappe ou en triangle	Armement en drapeau ou alterné	Armement en nappe ou en triangle		
0,8	0,7	1	0,8	0,9	1

Les contraintes mécaniques principales

La tension mécanique du câble Θ , la traction exercée sur les ensembles chaîne-isolateur-armement Λ , la force de renversement du support Ω et la force de compression verticale du support Γ sont les principales contraintes dont les déterminations nous ont occupées dans cette phase du dimensionnement. Ce calcul a été scindé en deux, suivant les plans (L, Q) (Fig.14) et (h, Q) (Fig.14) dans lesquels ces forces s'appliquent. Nous admettons l'hypothèse que la tension du câble est uniforme le long d'une portée.

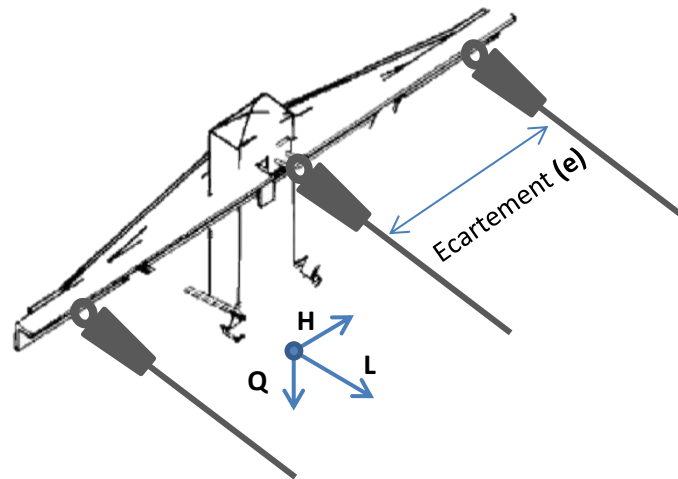


Figure 18 : Axes de calcul des contraintes mécaniques de la ligne HTA

Dans le plan (L, Q) longitudinal à la ligne :

La composante selon l'axe Q de la tension du câble est essentiellement le fait du poids du câble entre les deux supports :

$$\Theta_Q = \frac{m_{\text{câble}}}{2} \times g \text{ (N)}$$

Nous en déduisons l'expression de la tension globale du câble, et donc, de la traction de celui-ci sur l'ensemble d'ancrage comme suit :

$$\Theta_{LQ} = \Lambda_{LQ} = \frac{\Theta_Q}{\cos \alpha} \text{ (N)}$$

Où nous montrons que l'angle α de la tension de câble avec la verticale est tel que :

$$\cos \alpha = \frac{a}{2 \times p}$$

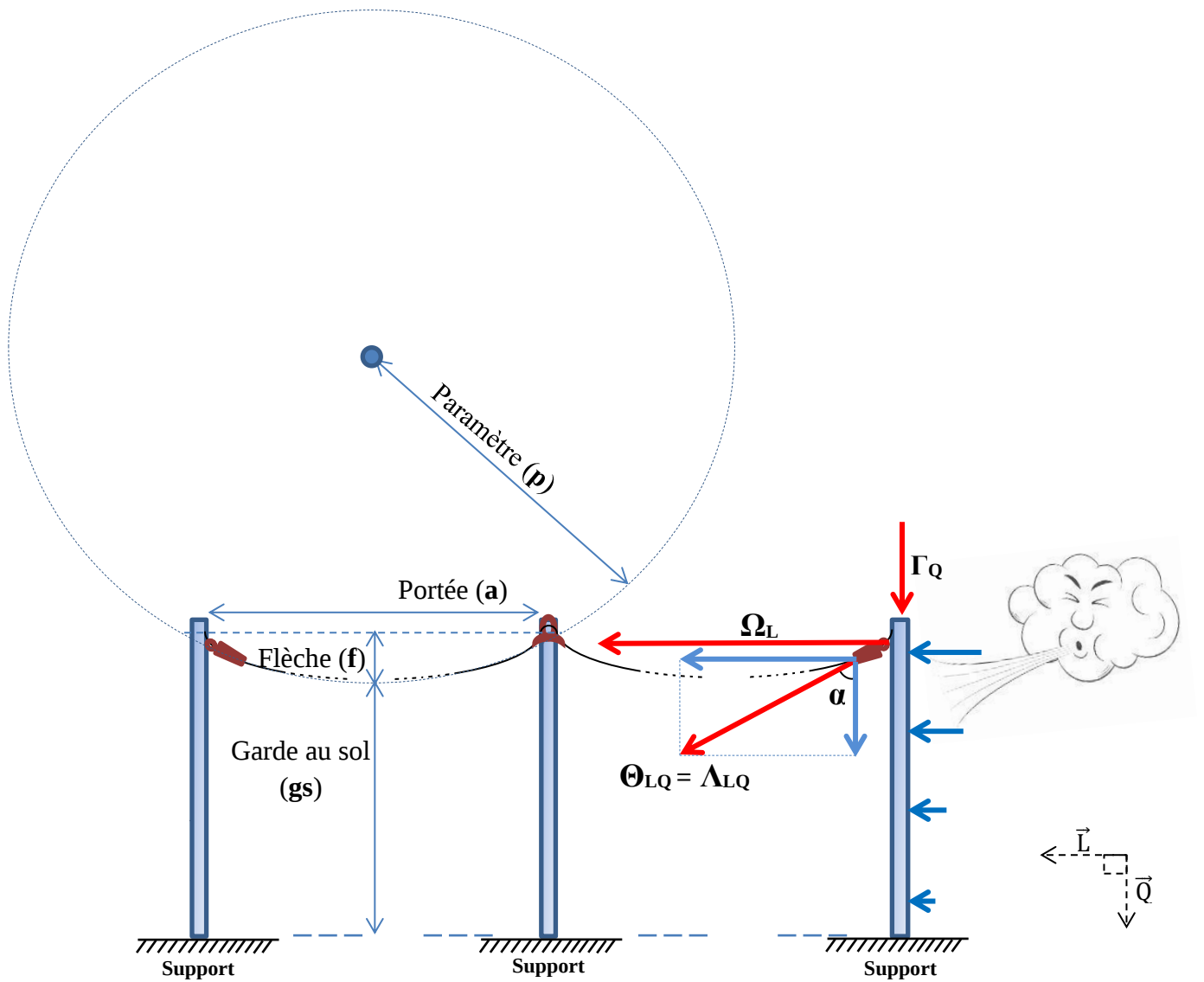


Figure 19 : Vue des principaux paramètres géométriques d'une ligne HTA et illustration des forces mécaniques principales dans le plan (L, Q)

La force de renversement du support est la somme des forces de pression du vent s'exerçant sur lui et de la composante horizontale de la tension du câble. D'où :

$$\Omega_L = f_c \times C_{\text{support}} \times \frac{1}{2} \times \rho_{\text{air}} \times V_{H_{\text{att}}}^2 \times S_{\text{support}} + (3 \times \Theta_L) \quad (\text{N})$$

Où la tension horizontale du câble est :

$$\Theta_L = \Theta_{LQ} \times \sin \alpha \quad (\text{N})$$

Dans le plan (H, Q) transversal à l'axe de la ligne :

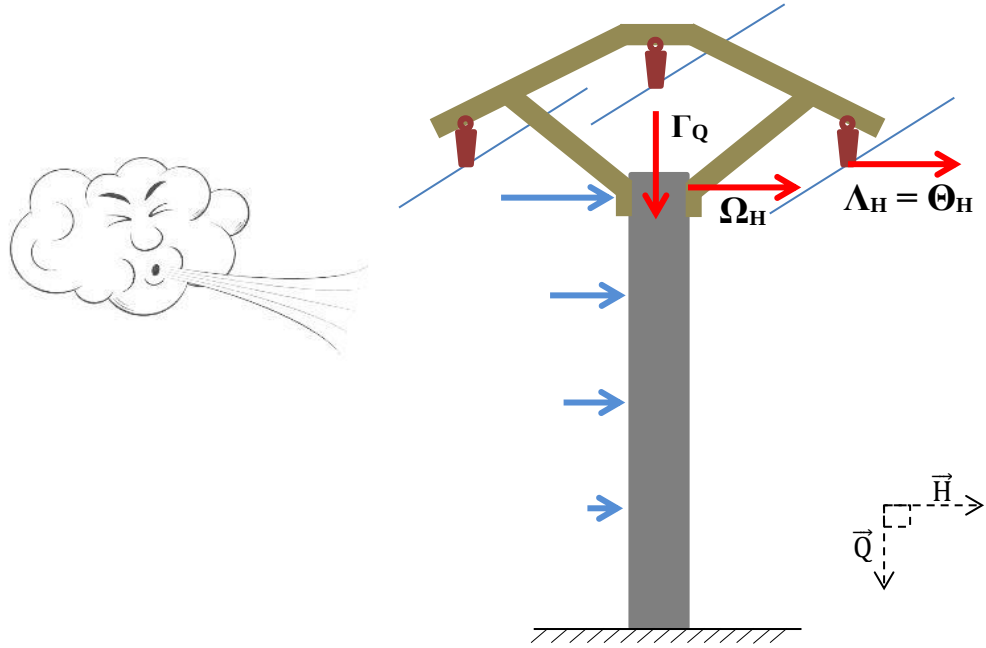


Figure 20 : Forces mécaniques principales dans le plan (H, Q)

Dans ce plan, la tension du câble est due à la pression latérale du vent sur la section de câble se situant entre deux supports.

$$\Theta_H = \Lambda_H = f_c \times C_{\text{câble}} \times \frac{1}{2} \times \rho_{\text{air}} \times V_{H_{\text{att}}}^2 \times \frac{S_{\text{câble}}}{2} \quad (\text{N})$$

La force de renversement du support résulte de la pression du vent et de la tension du câble :

$$\Omega_H = f_c \times C_{\text{support}} \times \frac{1}{2} \times \rho_{\text{air}} \times V_{H_{\text{att}}}^2 \times S_{\text{support}} + 3 \times (\Theta_{H1} + \Theta_{H2}) \quad (\text{N})$$

La force de compression Γ du support résultante des poids des accessoires et du câble est toujours verticale et vaut :

$$\Gamma_Q = \left[m_{\text{armement}} + 6 \times \left(m_{\text{isolateur}} + m_{\text{chaîne}} \frac{m_{\text{câble1}} + m_{\text{câble2}}}{4} \right) \right] \times g \quad (\text{N})$$

La vitesse maximale V_{10} de vent des données météorologiques permet de calculer une valeur approchée de la vitesse maximale V_{att} du vent à la hauteur H_{att} d'attache du câble grâce à la formule suivante :

$$V_{\text{att}} = \text{Max}(V_{10}) \times \frac{\ln\left(\frac{H_{\text{att}}}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{Z_0}\right)} \quad (\text{m/s})$$

La valeur finale de chaque contrainte mécanique est calculée en faisant la somme vectorielle de ses composantes dans les plans (L, Q) et (H, Q).

La norme NFC 11-201 définit un coefficient de sécurité K à appliquer au résultantes avant le choix du matériel (Voir valeurs de K au point 3.3.1).

Choix des supports de ligne et de leurs fondations

Le choix des supports de la ligne est guidé par deux valeurs caractéristiques : l'effort nominal du support F et l'effort conventionnel de vent V.

L'effort nominal du support F : D'après la NFC 11-201, l'effort nominal de renversement d'un support est la force au coefficient $\sigma = 1,2$ qu'il faut appliquer à la hauteur d'attache de ce support pour en provoquer le pliage. Il ne tient compte que des contraintes horizontales liées à la tension des conducteurs :

$$F = \sqrt{(3 \times \Theta_L)^2 + (3 \times \Theta_H)^2} \times K \times \sigma \text{ (N)}$$

La hauteur hors sol du support est donnée par :

$$H_{hs} = H_{\text{support}} - D \text{ (m)}$$

Où D est la profondeur de la fouille de fondation du support. Sa valeur varie selon l'orientation et la hauteur du support. Pour ce projet, vu que tous les supports seront orientés en arrêt (**Tab.3**) nous aurons :

$$D = \frac{H_{\text{support}}}{10} + 0,7 \text{ (m)}.$$

Avec cette première valeur de D, si $F > 6,5 \text{ kN}$, nous reprenons les calculs de D en faisant :

$$D = \frac{H_{\text{support}}}{20} + 1,5 \text{ (m)}$$

L'effort conventionnel de vent V : est identique à F mais en ne considérant que les contraintes sur le support, liées à la pression du vent.

En considérant pour simplifier que la pression du vent s'exerce uniformément sur toute la surface du support exposée alors le point d'application par défaut de Ω est au centre du support. D'où :

$$V = \Omega \times \frac{H_{hs}}{2 \times H_{att}} \text{ (N.m)}$$

Pour chaque support, les sections du massif de béton tiennent compte de la nature du sol et de l'orientation du support.

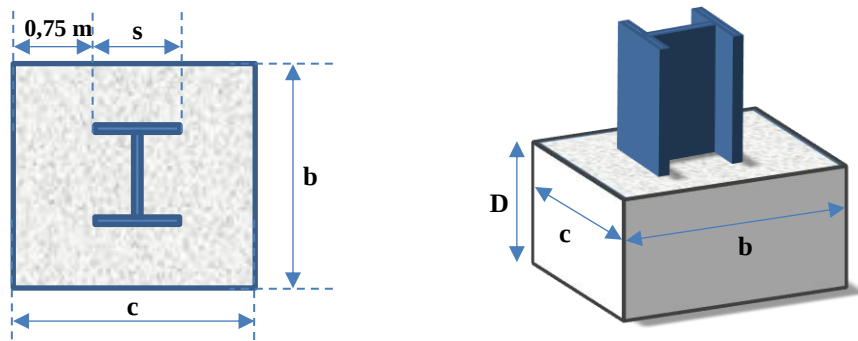


Figure 21 : Dimensions du massif de béton pour support

Pour les massifs rectangulaires (**Fig.9**) cela revient à déterminer les dimensions des cotés **c**, **b** et la profondeur **D** (**Eq.60** et **.61**).

$$c = 0,75 \times 2 + s \text{ (m)}$$

La longueur **s** dépend du support choisi et de son orientation.

La dimension **b** est tirée du tableau de la série des massifs normalisés (**Annexe 6**) à partir de la valeur de l'effort limite du support et de sa hauteur hors sol.

La section de conducteur optimale

En plus du critère de tension mécanique admissible du conducteur calculé par **Eq.50** et **.54**, des critères électriques entrent en ligne de compte dans le choix du câble.

Le critère de courant nominal : il s'agit du courant **I_N** qui circulera dans chaque conducteur.

$$I_N = \frac{P_i}{U \times \cos \rho \times \sqrt{3}} \text{ (A)}$$

Où **P_i** est la puissance électrique convoyée par un conducteur après **i** années d'exploitation en considérant un taux de croissance annuel de la demande **a** de 0,893 %. Nous considérons **i** = 25 années

$$P_i = \max(P_{\text{prev}_h}) \times (1 + a)^i \text{ (W)}$$

Le critère de courant de court-circuit : le câble doit pouvoir supporter un court-circuit triphasé pendant **t_{cc} = 5s** sans être détérioré. Nous calculons la section qu'il faut par :

$$S_{\text{conducteur}} = \frac{I_{cc} \times \sqrt{t_{cc}}}{a} \text{ (mm}^2\text{)}$$

Le critère de chute de tension : d'après la norme NF C 11-201, la chute de tension maximale entre le poste source et le point d'arrivée de la ligne ne doit pas excéder 7 % sous un équilibre thermique à 40°C :

$$\Delta U = \sqrt{3} \times I_N \times l \times (r_{40^\circ} \times \cos \rho + x_{40^\circ} \times \sin \rho) \text{ (mm}^2\text{)}$$

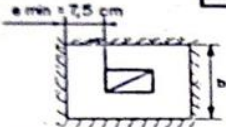
Où

$$r_{40^\circ} = r_{20^\circ} \times \left[1 + \frac{1}{40 \times \theta_{\text{carac}}} (40 - 20) \right] \text{ (}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}\text{)}$$

Nous sélectionnons la plus petite section vérifiant simultanément ces quatre conditions.

ANNEXE 6 : série des massifs normalisés

Sol mou
Catégorie IV



Fondations rectangulaires

POTEAUX EN BETON OU METALLIQUES

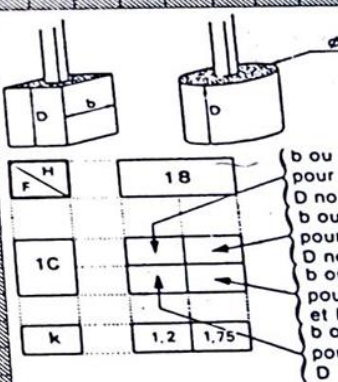
DIMENSIONS DES FONDATIONS

Tableau III



Fondations circulaires

		b (cm) minimum										Ø (cm) minimum						
		9	10	11	12	13	14	16	18	20	22	9	10	11	12	13	14	16
$k = 1,2 \rightarrow D = \frac{H}{10} + 0,50 m$ $k = 1,75 \rightarrow D = \frac{H}{10}$	H(m) F _{act}																	
	1,25-1,6	40	50									55	60					
	2	55	55	55								60	60	70				
	2,5	70	70	70	70							80	85	85	90	85	90	
	3,2	80	85	85	90	85	90	85	90	85	90							
	4	90	95	95	100	95	100	95	100	95	100	90	100	110	120			
	5	100	110	110	120	110	120	110	120	105	120	105	130	130	155	130	165	140
	6,5	120	125	125	135	125	135	125	140	125	140	120	140	120	140	110	130	100
	8	90	100	105	115	115	125	115	130	120	135	125	140	135	155	150	170	155
	10	110	120	120	135	130	145	130	150	140	155	140	160	150	190	160	200	170
$k = 1,2 \rightarrow D = \frac{H}{20} + 1,30 m$ $k = 1,75 \rightarrow D = \frac{H}{20}$	12,5	130	140	140	155	145	160	150	170	155	175	160	180	170	190	185	205	190
	16	150	165	160	180	165	185	170	190	175	200	180	205	190	215	200	230	205
	20	170	190	185	205	190	215	200	225	205	230	210	240	210	245	225	260	230
	25	190	215	205	225	210	235	220	245	225	250	230	260	240	270	250	280	260
	32	215	240	230	255	235	260	245	270	250	280	255	290	270	305	275	310	285
	40	230	260	245	270	250	280	260	290	265	300	270	305	295	330	300	340	310
k		1,2	1,75	1,2	1,75	1,2	1,75	1,2	1,75	1,2	1,75	1,2	1,75	1,2	1,75	1,2	1,75	1,2



b ou Ø min pour k = 1,2 et D normalisé (b₂)
 b ou Ø min pour k = 1,75 et D normalisé
 b ou Ø min pour k = 1,75 et D = 2 m
 b ou Ø min pour k = 1,2 et D = 2 m

**ANNEXE 7 : Cadre quantitatif estimatif de coûts d'installation et
d'exploitation de la source électrique hybride du Lycée professionnel de
Kaya**

a	b	c		d	e	f	i = d x e + f
Catégorie	Item	Caractéristiques spécifiques	Unité	Quantité	Prix unitaire d' acquisition (FCFA)	Coût de maintenance et remplacement (FCFA/mois)	Prix total d' acquisition
Génie Civil	Local transformateur de puissance		unité				
	Local groupe électrogène		unité				
	Local générateur photovoltaïque		unité				
	Local comptage		unité				
	Tranchée MT descente aéro-souterraine		mètre				
	Tranchée des BT souterraines		mètre				
	Regard pour BT souterraine		unité				
	Sous total Génie Civil						-
Ligne HTA	Support HEA type 1		unité				
	Support HEA type 2		unité				
	Support HEA type 3		unité				
	Support HEA type 4		unité				
	Armement type 1		unité				
	Armement type 2		unité				
	Armement type 3		unité				
	Armement type 4		unité				
	Chaine + pince d'ancrage		unité				
	Isolateur		unité				
	Conducteur almélec		mètre				
	Béton de fondation		m3				
	Câble descente aéro-souterraine		mètre				
	Grillage avertisseur		rouleaux				
	Cosse alu-cuivre		mètre				
	Jeu d'extrémités extérieures		unité				
	Protection mécanique PVC		tube				
	IACM		unité				
	Parafoudre		unité				
	Câble de mise à la terre		mètre				
	Barrette de coupure + socle		unité				
	Piquet de mise à la terre		unité				
	Sous total ligne HTA						-
tra nsf	Cellule interrupteur		unité				
	Cellule de protection transfo		unité				

	Transformateur 33kV/0,4kV		unité				
	DGPT2		unité				
	Cosse alu-cuivre		unité				
	Jeu d'extrémités intérieures		unité				
	Jeu de prises équerres		unité				
	Câble liaison cellule-transfo		mètre				
	Câble liaison transfo-TGBT		mètre				
	Chemin de câble		mètre				
	Sous total poste						-
Groupe secours	Groupe électrogène		unité				
	Cuve de stockage carburant		unité				
	Câble liaison groupe-TGBT		unité				
	Chemin de câble		unité				
	Coupleur fréquence et tension		unité				
	Sous total groupe électrogène						-
Générateur PV	Module photovoltaïque		unité				
	Support métallique		ensemble				
	Boîte de jonction PV		unité				
	Câble de liaison PV-onduleur		mètre				
	Onduleur		unité				
	Boîtier de protection onduleur		unité				
	Liaison onduleur-TGBT		mètre				
	Goulotte de câble		mètre				
	Sous total générateur PV						-
Réseau BT	Amenée principale 1		mètre				
	Amenée principale 2		mètre				
	Amenée principale 3		mètre				
	Amenée principale 4		mètre				
	Amenée principale 5		mètre				
	Dérivation Atelier maroquinerie		mètre				
	Dérivation Atelier génie civil		mètre				
	Dérivation Atelier électrique		mètre				
	Dérivation Atelier métallique		mètre				
	Dérivation Gestion des ateliers		mètre				
	Dérivation Bloc pédagogique		mètre				
	Dérivation Bibliothèque		mètre				
	Dérivation Réfectoire		mètre				
	Dérivation Cafétéria		mètre				
	Dérivation Infirmerie		mètre				
	Dérivation Salles spécialisées		mètre				
	Dérivation Bloc administratif		mètre				
	Dérivation Latrines extérieures		mètre				
	Dérivation Salle polyvalente		mètre				
	Dérivation Local source		mètre				
	Dérivation Guérite		mètre				
	Dérivation Logement		mètre				
	Grillage avertisseur		rouleaux				
	Protection mécanique PVC		tube				

Système de stockage	Sous total réseau BT						-
	Batterie		unité				
	Goulotte de câble		unité				
	Support pour batterie		ensemble				
	Régulateur charge/décharge		unité				
	Câble liaison onduleur-régulateur		unité				
	Câble liaison régulateur-batterie		mètre				
	Protection régulateur		unité				
	Sous total stockage						-
Frais de fonctionnement	Carburant groupe électrogène	Gasoil	litre				
	Facture d'électricité	Heures de pointe	kWh				
		Heures pleines	kWh				
		Prime et redevance	forfait/an				
		Frais d'abonnement	forfait				
	Sous total frais de fonctionnement						-
TOTAL GÉNÉRAL						-	

ANNEXE 8 : Méthode de dimensionnement des équipements de protection électrique

Les protections de la partie courant continu de l'onduleur protègent ce dernier contre les surintensités et surtensions en provenance du champ PV. Les protections de la partie courant alternatif, préviennent les récepteurs de l'installation contre les surtensions et surintensités venant de l'onduleur.

- Protection en sortie de champ PV :

Pour la protection des onduleurs, chacune des branches du champ sera équipée d'un couple de fusibles de tension V_{fusPV} et calibre I_{fusPV} déterminés comme suit :

$$V_{fusPV} \geq 1,5 \times N_{PV_{serie}} \times V_{OC_{reel}} (V)$$

$$2 \times I_{ond_{max}} \geq I_{fusPV} \geq 1,5 \times I_{ond_{max}} (A)$$

- Protection en sortie d'onduleur :

Les sorties en courant alternatif des onduleurs seront quant à elles équipées de disjoncteurs tripolaires différentiels de tension de service $V_{disjOnd}$ équivalente à la tension output nominale des onduleurs soit 230 V/400 V et de calibre $I_{disjOnd}$ calculées comme suit :

$$I_{disj_{ond}} \leq \text{Min} \left(\frac{S_{ond}}{V_{ondAC} \times \sqrt{3}} ; I_{ondAC} \right) (A)$$

- Parafoudres DC et AC :

Les trois éléments pris en considération dans le choix du parafoudre sont le type, le courant de décharge I_{dech} et la tension de régime permanent U_c .

Les parafoudres de type 1 moins coûteux seraient privilégiés si on envisageait utiliser un paratonnerre (**Tab.9**), ce qui n'est pas le cas dans ce projet. Nous optons donc pour des parafoudres de type 2 qui peuvent être utilisés aussi bien du côté AC que DC.

Tableau 9 : Choix du type de parafoudre

Caractéristique de l'installation	Nk ≤ 25		Nk > 25	
	Coté DC	Coté AC	Coté DC	Coté AC
Structure équipée d'un paratonnerre	Obligatoire type II	Obligatoire type I	Obligatoire type II	Obligatoire type I
Alimentation BT entièrement ou partiellement aérienne	Peu utile type II	Recommandé type II	Recommandé type II	Obligatoire type II
Alimentation BT entièrement souterraine	Peu utile type II	Peu utile type II	Recommandé type II	Recommandé type II

Le courant de décharge se détermine à partir du **Tab.10** par l'estimation du risque d'exposition aux surcharges atmosphériques F_{PV} qui se calcul comme suit :

$$F_{PV} = N_k \times (1 + \varphi_{PV} + \delta_{PV})$$

N_k est le niveau kéraunique du site. Au Burkina, il est compris entre 30 et 60, par sécurité nous considérerons la seconde valeur. Les valeurs de φ_{PV} et δ_{PV} pour les parafoudres de type II sont accessibles dans le **Tab.10**.

Tableau 10 : Valeurs de φ , δ et I_{dech} pour les parafoudres de type II

Résultat du tableau 9	Obligatoire	Recommandé	Peu utile	
Valeur de φ_{PV}	2	1	0	
Situation de l'installation	Complètement entouré de structures	Quelques structures à proximité	Terrain plat ou découvert	Sur crête, site en montagne ou présence d'un plan d'eau
Valeur de δ_{PV}	0	0,5	0,75	1
Estimation du risque F_{PV}			I_{dech} (kA)	
$F_{PV} \leq 40$			5	
$40 \leq F_{PV} \leq 80$			10	
$F_{PV} > 80$			20	

La tension de régime permanent U_c est choisie dans le tableau **Tab.11** sachant le niveau de tension du dispositif à protéger.

Tableau 11 : Valeur de la tension de régime permanent U_c

Tension de fonctionnement maximale (V)	U_c (kV)	
	Sortie champ PV	Sortie onduleur et régulateur de charge
100	1,5	-
150	2,5	-
300	4	-
400	-	3,1
600	6	4,2
800	-	5,1
1000	8	5,6

**ANNEXE 9 : Prix unitaire du matériel et des consommables de réalisation
et de fonctionnement de la source électrique du Lycée professionnel de
Kaya**

Supports HEA et HEB	
Caractéristiques	Prix (FCFA)
simple HEA 160/12 m	117 749
simple HEA 180/12 m	292 369
simple HEA 200/12 m	341 097
simple HEB 180/12 m	321 606
simple HEA 220/12 m	473 753
simple HEB 200/12 m	375 207
simple HEB 220/12 m	521 129
Jumelé 2xHEA 160/12 m	235 497
Jumelé 2xHEA 180/12 m	584 738
Jumelé 2xHEB 160/12 m	259 046
Jumelé 2xHEA 200/12 m	682 194
Jumelé 2xHEB 180/12 m	643 212
Jumelé 2xHEA 220/12 m	750 414
Jumelé 2xHEB 200/12 m	947 507
Jumelé 2xHEB 220/12 m	1 042 258
Portique 2x2 HEB 160/12 m	618 092
Portique 2x2 HEB 180/12 m	1 286 423
Portique 2x2 HEB 200/12 m	1 500 827
Portique 2x2 HEB 220/12 m	2 084 515
Jumelé 2xHEB 220/13 m	1 094 370
Portique 2x2 HEB 160/13 m	543 997
Portique 2x2 HEB 180/13 m	1 350 745
Portique 2x2 HEB 200/13 m	1 575 869
Portique 2x2 HEB 220/13 m	2 188 741

Isolateurs composites MT	
Dénomination	Prix (FCFA)
MAX CS40 BB 11-120/490	8 906
MAX CS40 BB 11-120/490	8 906
MAX CS40 BB 11-145/607	9 971
MAX CS40 BB 11-145/607	9 971
MAX CS40 BB 11-145/607	9 971
MAX CS40 BB 11-180/842	12 111
MAX CS40 BB 11-180/842	12 111
MAX CS40 BB 11-200/960	13 185
MAX CS40 BB 11-200/960	13 185
MAX CS40 BB 11-200/960	13 185

Câbles almélec	
Section (mm²)	Prix (FCFA/m)
22	80
34,4	166
54,6	253
75,5	356
93,3	336
117	551
148	697
181	651
228	819
288	1035
366	1 315
570	2 047

Groupes électrogènes	
Puissance (kVA)	Prix (FCFA)
40	6 231 582
55	8 133 854
65	8 658 619
90	8 816 049
105	9 412 969
140	11 643 219
165	13 053 524
215	14 103 054
255	17 546 823
265	20 498 625
315	22 035 144
360	23 614 416

Modules photovoltaïques	
Dénomination	Prix (FCFA)
D6P230B3A	65 016
D6P235B3A	66 430
D6P240B3A	67 843
D6P245B3A	69 257
D6P250B3A	70 670
JAP6 60-255/4BB	72 083
JAP6 60-260/4BB	73 497
JAP6 60-265/4BB	74 910
JAP6 60-270/4BB	76 324
JAP6 60-275/4BB	77 737

Traverses d’ancrage double	
Dénomination	Prix (FCFA)
TADE601050	48 213
TADE601200	49 820
TADE601500	50 509
TADE701050	48 213
TADE701200	49 820
TADE701500	50 509
TADE801200	49 820
TADE801500	50 509
TADE801700	77 403

Transformateurs de puissance	
Puissance (kW)	Prix (FCFA)
100	1 620 304
160	1 998 000
250	2 564 544
400	3 508 784
630	4 956 816
1000	7 286 336
1600	11 063 296
2500	16 729 328

Onduleurs SMA	
Dénomination	Prix (FCFA)
15000TL	1 398 500
20000TL	1 814 967
25000TL	1 903 522

Carburants	
Gasol (FCFA/l)	Essence (FCFA/l)
587	677

Régulateurs de charge/décharge	
Dénomination	Prix (FCFA)
Sunny Island charger 50	817 847
Sunny Island 6.0H	1 685 154
Sunny Island 8.0H	1 845 863

Batteries	
Dénomination	Prix (FCFA)
Sun power VL-2/2540-C100/1,85V	411 285
Sun power VL-2/2900-C24/1,83V	454 578
Sun power VL-2/3250-C24/1,83V	526 733
Sun power VL-2/3610-C10/1,80V	559 531
Sun power VL-2/3980-C5/1,77V	583 802

Câbles BT			
En cuivre (mm²)		En aluminium (mm²)	
Section (mm²)	Prix (FCFA/m)	Section (mm²)	Prix (FCFA/m)
1,5	36	2,5	23
2,5	60	4	36
4	96	6	54
6	145	10	90
10	241	16	145
16	386	25	226
25	603	35	316
35	844	50	452
50	1 205	70	633
70	1 687	95	859
95	2 290	120	1 085
120	2 893	150	1 356
150	3 616	185	1 672
185	4 460	240	2 170
240	5 786	300	2 712
300	7 232	400	3 616
400	9 643	500	4 520
500	12 053	630	5 695
630	15 187		

Accessoires d’ancrage MT	
Dénomination	Prix (FCFA)
Pince d'ancrage 22 à 93 mm²	2 591
Pince d'ancrage 93 à 228 mm²	5 031

ANNEXE 10 : Grille tarifaire de la Société Nationale Burkinabé d'électricité

SOCIÉTÉ NATIONALE D'ÉLECTRICITÉ DU BURKINA

DEPANNAGE OUAGA / BOBO
80 00 11 30 (N° GRATUIT)

Société d'Etat au capital de 63.308.270.000 Francs CFA
Siège social : 55, Avenue de la Nation
01 B.P. 54 Ouagadougou 01
Tel. : (226) 25 30 61 00 / 02 / 03 / 04 / Fax : (226) 25 31 03 40
Site web : www.sonabel.bf

DEPANNAGE OUAGA
25 31 37 20



GRILLE TARIFAIRE

Arrêté n°2015-00-014/MME/MEF/MICA du 06 octobre 2015 et Arrêté n°06-089/MCPEA/MMCE/MFB du 23 août 2006 et son modificatif n°08-013/MMCE/MEF/MCPEA du 16 octobre 2008

TENSION		Catégories et tranches tarifaires	FACTURATION DES CONSOMMATIONS (en FCFA)				FRAIS D'ABONNEMENT (en FCFA)					
			Tarifs du kWh			Redevance	PRIME FIXE	Avance sur Consommation	Frais ETS police et de pose	Timbres	Liasse	TOTAL Abonnement
B A S S E T E N S I O N	MONOPHASE 2 FILS	I) USAGE DOMESTIQUE PARTICULIERS ET ADMINISTRATION										
		Tarif type A (monophasé)	Tranche 1 0 à 75 kWh	Tranche 2 76 à 100 kWh	Tranche 3 plus de 100 kWh							
		1 à 3A	75	126	136	1 132	0	3 375	691	400	106	4 574
		Tarif type B (monophasé)	Tranche 1 0 à 50 kWh	Tranche 2 51 à 200 kWh	Tranche 3 plus de 200 kWh							
		5A	96	102	109	457	1 774	8 175	691	400	106	9 374
		10A	96	102	109	457	3 548	16 350	691	400	106	17 549
		15A	96	102	109	457	5 322	24 525	691	400	106	25 724
		20A	96	102	109	764	7 096	32 700	691	400	106	33 899
		25A	96	102	109	764	8 870	40 875	691	400	106	42 074
		30A	96	102	109	764	10 644	49 050	691	400	106	50 249
	TRIPHASE 4FILS	II) USAGE DOMESTIQUE ET FORCE MOTRICE PARTICULIERS ET ADMINISTRATION	Tranche 1 0 à 50 kWh	Tranche 2 51 à 200 kWh	Tranche 3 plus de 200 kWh							
		Tarif type C (triphasé)										
		10A	96	106	114	1 226	10 613	51 300	1 360	400	106	53 166
		15A	96	106	114	1 226	15 916	76 950	1 360	400	106	76 636
		20A	96	106	114	1 373	21 224	102 600	1 360	400	106	104 466
		25A	96	106	114	1 373	26 531	128 250	1 360	400	106	130 136
		30A	96	106	114	1 373	31 837	153 900	1 360	400	106	155 766
	DOUBLE TARIF	III) B.T. / TARIFS HORAIRES PARTICULIERS ET ADMINISTRATION	Heures de pointe (10h à 14 h et 16h à 19h)		Heures pleines (0h à 10h, 14h à 16h et 19h à 0h)							
		Tarif type D1 Non industriel	165		66		6 536	34 582 FCFA par kW par an	PS X 100 X 165	1 360	4 000	106
		Tarif type D2 Industriel	140		75		7 115	26 616 FCFA par kW par an	PS X 100 X 140	1 360	4 000	106
	MOYENNE TENSION (MT)	IV) M.T. / TARIFS HORAIRES PARTICULIERS ET ADMINISTRATION	Heures de pointe (10h à 14 h et 16h à 19h)		Heures pleines (0h à 10h, 14h à 16h et 19h à 0h)							
		Tarif type E1 Non industriel	139		64		6 536	70 626 FCFA par kW par an	PS X 100 X 139	1 360	4 000	106
		Tarif type E2 Industriel	116		54		7 115	64 387 FCFA par kW par an	PS X 100 X 116	1 360	4 000	106
	INDUSTRIES EXTRACTIVES ET HAUTE TENSION (HT)	V) H.T. / TARIFS HORAIRES PARTICULIERS	Heures de pointe (10h à 24 h)		Heures pleines (0h à 10h)							
		Tarif type G	140		70		7 115	64 387 FCFA par kW par an	PS X 100 X 116	1 360	4 000	106
	ECLAIRAGE PUBLIC Tarif type F	5A - 15A mono	122		361			- PS = Puissance Souscrite				
		20A et plus mono	122		637			- Pour la BT double tarif, la MT et la HT : Pénalisation si Cos phi < 0,9 et Bonification si Cos phi > 0,9				
		10A - 15A triphasé	122		1 022			- L'administration est dispensée du versement de l'avance sur consommation				
		20A et plus triphasé	122		1 144			- Pour la BT double tarif, la MT et la HT : les frais de timbres sont de 400 FCFA par jeu de page en double du contrat soit au total 4000 FCFA				

ENSEMBLE, AU SERVICE D'UNE GRANDE AMBITION!

ANNEXE 11 : Liste des jours fériés régulièrement en vigueur au Burkina Faso et pris en compte lors des simulations

Fêtes civiles ou commémorations	
Dates approximatives	Motifs
1er janvier	Célébration du premier jour de l'an
03 janvier	Commémoration du soulèvement populaire
08 mars	Célébration de la journée internationale de la femme
1er mai	Célébration de la fête du travail
05 août	Commémoration de la proclamation de l'indépendance de la Haute-Volta
31 octobre	Journée des martyrs de l'insurrection populaire des 30 et 31 octobre 2014
11 décembre	Célébration de la fête nationale

Fêtes chrétiennes	
Dates approximatives	Motifs
22 avril	Lundi de pâques
30 mai	Ascension
10 juin	Pentecôte
15 août	Assomption
1er novembre	Toussaint
25 décembre	Noël

Fêtes musulmanes	
Dates approximatives	Motifs
05 juin	Ramadan ou Aïd al-Fitr
11 août	Tabaski ou Aïd El Kébir
09 novembre	Mouloud

ANNEXE 12 : CALCUL DE L'EMISSIVITE CO2 DES CONFIGURATIONS

Pour le générateur photovoltaïque : Le générateur photovoltaïque ne produit ni nuisance sonore, ni vibration, ni contamination souterraine, ni émission de gaz à effet de serre durant sa période d'exploitation. D'où son émissivité nulle : $\varepsilon_{pv} = 0$.

Pour le réseau SONABEL : selon le tableau **Tab.6**, le facteur d'émission CO₂ du parc de production national de la SONABEL sur les cinq dernières années a été en moyenne de $\varepsilon_r = 0,676$ kg par kilowattheure d'électricité produite, transportée, distribuée et vendue [3].

Pour le groupe électrogène : La composition chimique de l'essence et du gasoil les rapproche réciproquement de l'octane et de l'hexane. Selon le carburant utilisé, le facteur ε_{ge} d'émission de CO₂ du moteur du groupe électrogène sera de 2,67 kg par litre de gasoil ou 2,28 kg par litre d'essence [15].

La quantité totale de CO₂ émise dans l'atmosphère sur toute la durée de vie de l'installation vaut alors :

$$CO2_{total} = (E_{pv_{total}} \times \varepsilon_{pv}) + (E_{r_{total}} \times \varepsilon_r) + (E_{ge_{total}} \times \varepsilon_{ge}) \text{ (kg)}$$

L'émissivité globale de l'installation sur la même période est donc donnée par :

$$\varepsilon = \frac{CO2_{total}}{E_{total}} \text{ (kg/kWh)}$$

ANNEXE 13 : Résultats du bilan de puissance prévisionnel du lycée professionnel de Kaya

Prévision pour les jours ouvrés

	Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Puissances et énergies actives	Lampes	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	11,00	1541,00	8519,00	12358,00	12358,00	6968,50	5546,00	11,00	419,00	132,00	12358,00	12358,00	1541,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	94 701,50
	Prises	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	17620,24	14840,00	14840,00	8156,24	7082,35	82,35	82,35	2862,59	14840,00	14840,00	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	96 399,06
	Brasseurs	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	174,38	10055,63	9416,25	9416,25	4039,69	6626,25	58,13	58,13	697,50	9416,25	9416,25	174,38	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	60 246,56
	Climatiseurs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46111,06	38109,65	38109,65	18260,94	14260,24	0,00	0,00	8001,41	38109,65	38109,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	239 072,24
	Telecoms	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	2029,41	958,82	958,82	1423,53	888,24	11,76	11,76	1082,35	958,82	958,82	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	9 447,06
	Totaux	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	163,24	1809,49	84335,33	75682,72	75682,72	38848,89	34403,07	163,24	571,24	12775,85	75682,72	75682,72	1809,49	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	499 866,42
Puissances et énergies réactives	Lampes	906,17	906,17	906,17	906,17	906,17	5,33	746,34	4125,94	5985,25	5985,25	3375,00	2686,05	5,33	202,93	63,93	5985,25	5985,25	746,34	906,17	906,17	906,17	906,17	906,17	906,17	45 866,03
	Prises	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	12410,02	10324,84	10324,84	6117,18	5311,76	61,76	61,76	2146,94	10324,84	10324,84	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	68 273,49
	Brasseurs	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	130,78	7541,72	7062,19	7062,19	3029,77	4969,69	43,59	43,59	523,13	7062,19	7062,19	130,78	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	45 184,92
	Climatiseurs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34583,29	28582,24	28582,24	13695,71	10695,18	0,00	0,00	6001,06	28582,24	28582,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	179 304,18
	Telecoms	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	1522,06	719,12	719,12	1067,65	666,18	8,82	8,82	811,76	719,12	719,12	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	7 085,29
	Totaux	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	119,51	947,71	60183,03	52673,63	52673,63	27285,29	24328,86	119,51	317,11	9546,82	52673,63	52673,63	947,71	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	345 713,91
Puissances apparentes horaires	Lampes	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	12,22	1712,22	9465,56	13731,11	13731,11	7742,78	6162,22	12,22	465,56	146,67	13731,11	13731,11	1712,22	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	
	Prises	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	21551,83	18078,38	18078,38	10195,29	8852,94	102,94	102,94	3578,24	18078,38	18078,38	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	
	Brasseurs	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	217,97	12569,53	11770,31	11770,31	5049,61	8282,81	72,66	72,66	871,88	11770,31	11770,31	217,97	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	
	Climatiseurs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57638,82	47637,06	47637,06	22826,18	17825,29	0,00	0,00	10001,76	47637,06	47637,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Telecoms	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	2536,76	1198,53	1198,53	1779,41	1110,29	14,71	14,71	1352,94	1198,53	1198,53	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	
	Totaux	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	202,31	2042,65	103607,17	92208,38	92208,38	47473,40	42136,26	202,31	653,36	15948,80	92208,38	92208,38	2042,65	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	

Prévision pour les jours non-ouvrés

	Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Puissances et énergies actives	Lampes	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	29,00	11,00	11,00	29,00	11,00	11,00	11,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	1871,00	20 760,00
	Prises	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	82,35	1 976,47
	Brasseur	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	58,13	1 395,00
	Climatiseurs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
	Telecoms	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	282,35
	Totaux	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	163,24	163,24	163,24	163,24	163,24	181,24	163,24	163,24	181,24	163,24	163,24	163,24	163,24	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	2023,24	24 413,82
Puissances et énergies réactives	Lampes	906,17	906,17	906,17	906,17	906,17	5,33	5,33	5,33	5,33	5,33	14,05	5,33	5,33	14,05	5,33	5,33	5,33	906,17	906,17	906,17	906,17	906,17	906,17	906,17	10 054,53
	Prises	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	61,76	1 482,35
	Brasseur	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	43,59	1 046,25
	Climatiseurs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
	Telecoms	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	8,82	211,76
	Totaux	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	119,51	119,51	119,51	119,51	119,51	128,23	119,51	119,51	128,23	119,51	119,51	119,51	119,51	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	1020,35	12 794,89
Puissances apparentes horaires	Lampes	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	12,22	12,22	12,22	12,22	12,22	32,22	12,22	12,22	32,22	12,22	12,22	12,22	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	2078,89	
	Prises	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	102,94	
	Brasseur	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	72,66	
	Climatiseurs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Telecoms	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	
	Totaux	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	202,31	202,31	202,31	202,31	202,31	222,02	202,31	202,31	222,02	202,31	202,31	202,31	202,31	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	2265,97	

ANNEXE 14 : Résultats des simulations

Configurations en architecture 100 % PV

L'Emissivité CO₂ du kWh (g/kWh)

Emissivité CO ₂ du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
14000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
15000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
16000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
17000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
18000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
19000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
20000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
21000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
22000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
24000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
26000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
28000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
30000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
32000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
34000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
36000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
38000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
40000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
42000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
47000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
52000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
57000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
62000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
67000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
72000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
77000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
82000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
87000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
92000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
102000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
112000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
122000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
132000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
142000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
152000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
162000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
172000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
182000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
192000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00
242000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00
292000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00
342000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00
392000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00
442000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00
492000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00
542000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00
592000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00	0,00
642000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
692000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	0,00	0,00	0,00	0,00	Valeurs Moyennes

Le prix du kWh (FCFA/kWh)

Prix de revient du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
14000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
15000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
16000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
17000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
18000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
19000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
20000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
21000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
22000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
24000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
26000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
28000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
30000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
32000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
34000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
36000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
38000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
40000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
42000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
47000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
52000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
57000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
62000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
67000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
72000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
77000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
82000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
87000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
92000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
102000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
112000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	914,80	914,80
122000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	917,49	917,49
132000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	924,19	924,19
142000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	929,28	929,28
152000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	933,17	933,17
162000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	937,99	937,99
172000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	938,56	938,56
182000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	948,92	948,92
192000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	948,02	948,02
242000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	585,43	977,01	781,22
292000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	471,57	733,28	602,43
342000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	488,14	749,85	618,99
392000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	513,85	775,56	644,70
442000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	514,34	776,05	645,20
492000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	566,41	828,12	697,27
542000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	594,47	856,18	725,32
592000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	498,19	620,19	881,90	666,76
642000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	489,46	506,89	628,89	890,60	628,96
692000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	518,07	535,51	657,51	919,22	657,58
	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	503,77	513,53	564,08	883,17	Valeurs Moyennes

Autosuffisance électrique du lycée (%)

Autosuffisance électrique	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
14000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
15000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
16000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
17000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
18000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
19000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
20000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
21000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
22000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
24000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
26000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
28000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
30000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
32000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
34000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
36000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
38000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
40000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
42000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
47000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
52000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
57000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
62000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
67000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
72000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
77000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
82000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
87000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
92000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
102000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
112000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
122000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
132000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
142000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
152000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
162000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
172000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
182000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
192000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00
242000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00
292000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00
342000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00
392000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00
442000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00
492000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00
542000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00
592000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00	100,00
642000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
692000	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	100,00	100,00	100,00	100,00	Valeurs Moyennes

Configurations en architecture PvR parallèle

L'Emissivité CO₂ du kWh (g/kWh)

Emissivité CO ₂ du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	0,68	0,64	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,62	0,63
14000	0,68	0,63	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,62
15000	0,67	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,60	0,60	0,61
16000	0,65	0,60	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57	0,59
17000	0,65	0,60	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57	0,59
18000	0,65	0,60	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57	0,59
19000	0,65	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,58
20000	0,64	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,57
21000	0,64	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,56
22000	0,63	0,57	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53	0,55
24000	0,62	0,55	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,51	0,54
26000	0,61	0,54	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,50	0,49	0,52
28000	0,60	0,52	0,51	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49	0,49	0,47	0,51
30000	0,59	0,51	0,49	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,46	0,49
32000	0,56	0,48	0,46	0,45	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,42	0,45
34000	0,56	0,48	0,46	0,45	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,42	0,45
36000	0,56	0,47	0,45	0,44	0,43	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42	0,40	0,44
38000	0,55	0,45	0,43	0,42	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,42
40000	0,54	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39	0,39	0,39	0,39	0,38	0,37	0,41
42000	0,53	0,43	0,40	0,39	0,38	0,37	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35	0,39
47000	0,51	0,41	0,37	0,35	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,36
52000	0,49	0,39	0,34	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,29	0,28	0,27	0,32
57000	0,47	0,38	0,31	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24	0,23	0,29
62000	0,46	0,36	0,29	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18	0,25
67000	0,44	0,34	0,27	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,14	0,23
72000	0,43	0,33	0,26	0,20	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,10	0,20
77000	0,41	0,31	0,24	0,18	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,08	0,06	0,17
82000	0,39	0,29	0,22	0,15	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03	0,14
87000	0,39	0,28	0,21	0,15	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03	0,02	0,13
92000	0,37	0,27	0,20	0,13	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,02	0,01	0,12
102000	0,34	0,24	0,17	0,11	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,09
112000	0,32	0,22	0,15	0,09	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,08
122000	0,30	0,19	0,13	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,07
132000	0,28	0,17	0,11	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06
142000	0,27	0,16	0,09	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06
152000	0,25	0,15	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
162000	0,24	0,13	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
172000	0,23	0,12	0,06	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
182000	0,22	0,11	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
192000	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
242000	0,16	0,07	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
292000	0,14	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
342000	0,12	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
392000	0,11	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
442000	0,10	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
492000	0,10	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
542000	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
592000	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
642000	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
692000	0,08	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	0,41	0,32	0,29	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	Valeurs Moyennes

Le prix du kWh (FCFA/kWh)

Prix de revient du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	186,30	264,14	281,18	298,54	315,90	333,27	350,61	367,90	385,26	506,71	767,83	368,88
14000	185,73	263,41	280,35	297,69	315,06	332,43	349,76	367,05	384,42	505,79	766,88	368,05
15000	185,15	262,68	279,52	296,85	314,21	331,58	348,91	366,21	383,57	504,90	765,93	367,23
16000	183,80	260,69	277,40	294,70	312,05	329,41	346,73	364,05	381,39	502,67	763,45	365,12
17000	183,80	260,69	277,40	294,70	312,05	329,41	346,73	364,05	381,39	502,67	763,45	365,12
18000	183,80	260,69	277,40	294,70	312,05	329,41	346,73	364,05	381,39	502,67	763,45	365,12
19000	183,22	259,83	276,59	293,87	311,21	328,57	345,88	363,21	380,54	501,82	762,49	364,29
20000	182,66	258,92	275,81	293,04	310,37	327,73	345,03	362,37	379,68	500,97	761,52	363,46
21000	182,10	257,99	275,05	292,21	309,53	326,89	344,18	361,52	378,83	500,12	760,58	362,64
22000	181,63	257,13	274,38	291,46	308,78	326,13	343,42	360,76	378,06	499,35	759,74	361,89
24000	180,54	255,24	272,91	289,82	307,13	324,46	341,75	359,08	376,37	497,66	757,94	360,26
26000	180,94	254,85	272,89	289,66	306,96	324,28	341,57	358,88	376,16	497,46	757,63	360,12
28000	179,91	253,02	271,33	288,06	305,33	322,63	339,92	357,21	374,48	495,77	755,90	358,51
30000	178,97	251,33	269,73	286,57	303,76	321,05	338,32	355,59	372,86	494,14	754,24	356,96
32000	177,43	248,63	266,33	283,90	300,75	318,02	335,23	352,46	369,76	491,00	751,11	354,06
34000	177,43	248,63	266,33	283,90	300,75	318,02	335,23	352,46	369,76	491,00	751,11	354,06
36000	176,68	247,68	264,94	282,77	299,54	316,80	333,99	351,20	368,51	489,74	749,86	352,88
38000	177,40	248,22	264,73	282,86	299,63	316,82	333,99	351,19	368,51	489,72	749,83	352,99
40000	176,55	247,26	262,90	281,30	298,11	315,17	332,33	349,54	366,84	488,03	748,12	351,47
42000	175,83	246,45	261,10	279,68	296,62	313,46	330,62	347,84	365,13	486,30	746,39	349,95
47000	175,66	254,75	275,49	302,59	328,56	353,33	379,05	404,96	430,92	612,65	1002,65	410,97
52000	176,86	255,81	274,53	300,40	326,29	350,69	376,14	402,08	428,03	609,68	999,72	409,11
57000	175,79	254,62	272,26	295,64	321,10	345,59	370,78	396,60	422,54	604,14	994,23	404,84
62000	177,24	255,94	273,10	293,54	318,09	342,89	367,93	393,43	419,28	600,85	990,76	403,00
67000	177,28	255,89	272,88	291,87	315,37	340,28	365,29	390,58	416,27	597,72	987,63	401,00
72000	177,10	255,63	272,51	290,70	313,13	338,05	363,07	388,25	413,75	594,87	984,73	399,25
77000	178,90	257,33	274,10	291,64	313,20	338,03	363,08	388,21	413,49	593,78	983,82	399,60
82000	180,86	259,14	275,85	293,34	313,76	338,09	363,17	388,34	413,58	593,67	982,58	400,22
87000	182,49	260,71	277,41	294,92	315,18	339,26	364,38	389,59	414,87	595,00	982,87	401,52
92000	180,50	258,62	275,35	292,91	312,99	336,71	361,91	387,24	412,69	593,09	978,03	399,09
102000	180,40	258,28	275,17	292,84	312,95	336,83	362,21	387,76	413,41	594,15	941,10	395,92
112000	184,66	262,33	279,37	297,19	317,79	342,31	367,80	393,46	418,82	590,79	932,12	398,79
122000	185,22	262,74	279,87	297,89	319,41	344,32	369,89	395,16	421,00	592,99	934,80	400,30
132000	189,88	267,26	284,43	302,86	325,38	350,53	375,63	401,44	427,33	598,63	941,50	405,90
142000	193,59	270,83	288,11	306,99	330,06	355,33	380,42	406,27	432,19	603,33	946,59	410,34
152000	195,83	272,91	290,33	309,99	333,52	358,19	383,96	409,85	435,81	606,70	950,48	413,42
162000	199,31	276,26	293,87	314,22	337,23	362,70	388,52	414,44	440,42	611,06	955,30	417,57
172000	198,51	275,37	293,31	313,47	337,44	362,98	388,83	414,79	440,77	611,14	955,87	417,50
182000	207,60	284,43	302,77	323,25	347,48	373,08	398,96	424,94	450,93	621,03	966,24	427,34
192000	205,40	282,26	301,06	321,80	346,26	371,91	397,83	423,81	449,82	617,38	965,33	425,71
242000	229,48	306,98	326,67	349,12	374,14	399,92	425,90	451,94	478,00	615,74	994,32	450,20
292000	242,18	311,40	322,87	337,95	354,55	371,75	389,12	406,51	423,92	488,89	750,60	399,98
342000	256,30	325,98	337,77	353,52	370,24	387,49	404,88	422,29	439,72	505,45	767,16	415,53
392000	280,11	347,53	362,13	378,30	395,12	412,40	429,80	447,22	464,66	531,16	792,87	440,12
442000	279,13	346,39	361,49	377,89	394,78	412,09	429,49	446,93	464,36	531,66	793,36	439,78
492000	330,18	396,92	412,54	429,07	446,02	463,34	480,76	498,19	495,67	583,73	845,43	489,26
542000	357,50	423,80	439,77	456,38	473,37	490,70	508,12	511,62	518,69	611,78	873,49	515,02
592000	382,46	448,35	464,56	481,25	498,27	515,61	521,34	524,50	523,58	637,51	899,21	536,06
642000	390,52	456,25	472,61	487,24	499,14	516,50	514,12	519,39	524,21	646,21	907,92	539,46
692000	418,58	484,16	500,61	515,23	523,41	534,33	540,48	540,68	552,83	674,83	936,54	565,61
	210,19	284,73	301,62	319,81	339,08	359,42	379,28	398,94	418,49	556,36	861,89	Valeurs Moyennes

Autosuffisance électrique du lycée (%)

Autosuffisance électrique	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	10,73	17,20	17,78	17,92	18,03	18,14	18,25	18,37	18,48	19,04	19,62	17,60
14000	11,52	18,22	18,94	19,09	19,20	19,32	19,43	19,54	19,65	20,30	20,91	18,74
15000	12,31	19,24	20,09	20,26	20,38	20,49	20,60	20,72	20,83	21,53	22,20	19,88
16000	14,67	22,28	23,54	23,75	23,89	24,01	24,13	24,24	24,35	25,14	26,06	23,28
17000	14,67	22,28	23,54	23,75	23,89	24,01	24,13	24,24	24,35	25,14	26,06	23,28
18000	14,67	22,28	23,54	23,75	23,89	24,01	24,13	24,24	24,35	25,14	26,06	23,28
19000	15,46	23,29	24,66	24,90	25,06	25,18	25,30	25,41	25,52	26,31	27,35	24,40
20000	16,24	24,29	25,75	26,06	26,22	26,35	26,47	26,58	26,69	27,48	28,63	25,52
21000	17,01	25,30	26,80	27,20	27,38	27,51	27,64	27,75	27,86	28,65	29,91	26,64
22000	17,76	26,30	27,84	28,35	28,54	28,67	28,80	28,91	29,03	29,81	31,17	27,74
24000	19,25	28,29	29,87	30,63	30,83	30,98	31,12	31,24	31,35	32,14	33,63	29,94
26000	20,58	30,14	31,74	32,75	32,96	33,13	33,26	33,39	33,51	34,30	35,88	31,97
28000	21,99	32,11	33,73	34,97	35,22	35,41	35,55	35,69	35,81	36,60	38,25	34,12
30000	23,31	33,96	35,61	36,99	37,36	37,56	37,72	37,85	37,98	38,78	40,47	36,14
32000	26,42	38,04	40,05	41,58	42,43	42,64	42,83	42,99	43,13	43,95	45,64	40,88
34000	26,42	38,04	40,05	41,58	42,43	42,64	42,83	42,99	43,13	43,95	45,64	40,88
36000	27,46	39,28	41,53	43,08	44,10	44,33	44,53	44,70	44,84	45,68	47,36	42,44
38000	28,88	40,86	43,60	45,16	46,39	46,69	46,90	47,09	47,23	48,08	49,77	44,60
40000	30,15	42,25	45,54	47,12	48,48	48,92	49,12	49,32	49,49	50,35	52,04	46,61
42000	31,33	43,52	47,46	49,05	50,49	51,12	51,33	51,53	51,71	52,60	54,29	48,58
47000	33,96	46,32	52,13	53,76	55,28	56,41	56,72	56,93	57,13	58,09	59,78	53,32
52000	36,05	48,55	56,12	58,17	59,72	61,12	61,78	61,99	62,20	63,25	64,96	57,63
57000	38,12	50,74	59,46	62,84	64,43	65,91	66,97	67,35	67,57	68,71	70,44	62,05
62000	40,47	53,22	62,43	68,16	69,89	71,37	72,68	73,47	73,78	75,05	76,84	67,03
67000	42,21	55,05	64,42	71,61	73,85	75,32	76,71	77,78	78,32	79,79	81,61	70,61
72000	43,93	56,86	66,34	74,40	77,54	79,02	80,44	81,66	82,47	84,42	86,32	73,95
77000	46,09	59,13	68,69	77,13	81,64	83,26	84,68	86,00	87,11	89,84	91,83	77,76
82000	48,81	61,97	71,59	80,00	85,74	88,10	89,49	90,76	91,89	94,97	96,61	81,81
87000	49,74	62,95	72,56	80,92	86,92	89,63	90,97	92,18	93,24	96,16	97,57	82,99
92000	51,48	64,77	74,34	82,60	88,92	92,16	93,38	94,39	95,21	97,71	98,91	84,90
102000	55,09	68,55	77,85	85,95	92,42	95,44	96,41	97,10	97,64	99,45	99,99	87,81
112000	58,30	71,89	80,96	88,90	94,89	96,99	97,80	98,32	98,73	99,88	100,00	89,70
122000	60,97	74,62	83,56	91,29	96,18	97,73	98,42	98,85	99,16	99,94	100,00	90,97
132000	63,51	77,19	86,02	93,36	97,01	98,23	98,79	99,15	99,40	99,97	100,00	92,06
142000	65,20	78,94	87,66	94,46	97,46	98,51	99,00	99,32	99,52	99,98	100,00	92,73
152000	67,19	81,04	89,56	95,42	97,90	98,79	99,21	99,48	99,63	99,98	100,00	93,47
162000	68,77	82,71	90,95	96,02	98,20	98,97	99,35	99,57	99,70	99,99	100,00	94,02
172000	70,38	84,36	92,12	96,53	98,45	99,13	99,46	99,64	99,75	99,99	100,00	94,53
182000	71,85	85,78	92,98	96,93	98,65	99,26	99,55	99,70	99,81	99,99	100,00	94,95
192000	73,34	87,11	93,69	97,29	98,82	99,37	99,62	99,75	99,84	99,99	100,00	95,35
242000	78,75	91,14	95,67	98,23	99,26	99,64	99,80	99,87	99,92	100,00	100,00	96,57
292000	81,82	93,38	96,78	98,69	99,49	99,78	99,87	99,92	99,96	100,00	100,00	97,24
342000	83,77	94,74	97,49	98,94	99,62	99,84	99,92	99,95	99,97	100,00	100,00	97,66
392000	85,26	95,65	97,99	99,12	99,71	99,88	99,94	99,97	99,98	100,00	100,00	97,95
442000	86,41	96,35	98,30	99,24	99,76	99,91	99,96	99,97	99,99	100,00	100,00	98,17
492000	87,22	96,95	98,51	99,34	99,79	99,93	99,97	99,98	99,99	100,00	100,00	98,33
542000	87,79	97,35	98,65	99,40	99,82	99,94	99,97	99,99	99,99	100,00	100,00	98,45
592000	88,38	97,67	98,78	99,46	99,85	99,96	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	98,55
642000	88,88	97,90	98,88	99,51	99,87	99,97	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	98,64
692000	89,32	98,08	98,97	99,55	99,89	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	98,71
	46,88	57,96	62,50	65,50	67,16	67,89	68,30	68,60	68,82	69,64	70,51	Valeurs Moyennes

Configurations en architecture PvR commutation

L'Emissivité CO₂ du kWh (g/kWh)

Emissivité CO ₂ du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	0,76	0,68	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,63	0,63	0,65
14000	0,76	0,68	0,64	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,65
15000	0,76	0,68	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,64
16000	0,76	0,68	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,62
17000	0,76	0,68	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,62
18000	0,76	0,68	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,62
19000	0,76	0,67	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58	0,57	0,61
20000	0,76	0,66	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,56	0,60
21000	0,76	0,65	0,59	0,58	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,55	0,60
22000	0,76	0,65	0,58	0,58	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,54	0,59
24000	0,75	0,63	0,58	0,58	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,53	0,58
26000	0,75	0,62	0,58	0,57	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,51	0,56
28000	0,75	0,60	0,58	0,57	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,49	0,55
30000	0,75	0,59	0,57	0,57	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49	0,48	0,54
32000	0,75	0,58	0,57	0,53	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,44	0,51
34000	0,75	0,58	0,57	0,53	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,44	0,51
36000	0,74	0,58	0,57	0,52	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44	0,42	0,50
38000	0,74	0,58	0,57	0,50	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,42	0,40	0,49
40000	0,72	0,58	0,57	0,48	0,42	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,39	0,47
42000	0,71	0,58	0,57	0,47	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,38	0,37	0,46
47000	0,67	0,58	0,57	0,43	0,37	0,36	0,35	0,35	0,35	0,34	0,33	0,43
52000	0,66	0,58	0,57	0,39	0,34	0,32	0,31	0,31	0,31	0,30	0,29	0,40
57000	0,65	0,58	0,54	0,37	0,30	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,24	0,37
62000	0,64	0,58	0,50	0,35	0,26	0,24	0,23	0,22	0,22	0,21	0,19	0,33
67000	0,64	0,58	0,48	0,33	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,15	0,31
72000	0,64	0,58	0,45	0,32	0,21	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,28
77000	0,64	0,56	0,42	0,30	0,18	0,15	0,14	0,13	0,11	0,09	0,07	0,25
82000	0,64	0,51	0,39	0,28	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,22
87000	0,64	0,50	0,38	0,27	0,15	0,11	0,08	0,07	0,06	0,03	0,02	0,21
92000	0,64	0,49	0,37	0,25	0,14	0,09	0,06	0,05	0,05	0,02	0,01	0,20
102000	0,61	0,45	0,35	0,21	0,12	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,17
112000	0,56	0,41	0,33	0,18	0,09	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,15
122000	0,54	0,39	0,31	0,16	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,14
132000	0,51	0,37	0,27	0,14	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,13
142000	0,48	0,36	0,25	0,13	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,12
152000	0,45	0,34	0,22	0,11	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,11
162000	0,44	0,33	0,20	0,10	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
172000	0,43	0,31	0,18	0,09	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
182000	0,42	0,27	0,17	0,09	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
192000	0,40	0,25	0,15	0,08	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
242000	0,31	0,17	0,11	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
292000	0,24	0,14	0,09	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
342000	0,22	0,11	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
392000	0,19	0,09	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
442000	0,17	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
492000	0,15	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
542000	0,14	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
592000	0,14	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
642000	0,13	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
692000	0,12	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
	0,56	0,45	0,39	0,32	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	Valeurs Moyennes

Le prix du kWh (FCFA/kWh)

Prix de revient du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	197,22	280,27	298,01	323,88	350,08	376,21	402,32	428,24	454,22	636,29	1027,31	434,01
14000	197,47	280,53	296,79	322,65	348,94	375,06	401,14	427,05	453,04	635,05	1026,02	433,07
15000	197,73	280,80	295,73	321,50	348,19	374,29	400,41	426,37	452,31	634,27	1025,23	432,44
16000	198,88	281,45	292,62	317,91	345,98	372,05	398,18	424,10	450,11	632,01	1022,68	430,54
17000	198,88	281,45	292,62	317,91	345,98	372,05	398,18	424,10	450,11	632,01	1022,68	430,54
18000	198,88	281,45	292,62	317,91	345,98	372,05	398,18	424,10	450,11	632,01	1022,68	430,54
19000	199,11	280,67	291,54	316,66	344,73	370,89	396,97	422,88	448,96	630,80	1021,40	429,51
20000	199,19	279,01	290,51	315,67	343,40	369,62	395,72	421,64	447,72	629,54	1020,01	428,37
21000	199,28	277,17	289,73	315,00	342,13	368,36	394,45	420,37	446,39	628,31	1018,65	427,26
22000	199,53	276,07	289,32	314,72	341,25	367,30	393,30	419,32	445,39	627,21	1017,47	426,44
24000	199,69	274,18	288,98	314,57	340,07	365,92	391,94	417,96	443,97	625,78	1015,96	425,37
26000	201,11	272,81	290,47	316,20	340,68	366,37	392,42	418,32	444,34	626,16	1016,23	425,92
28000	201,55	269,58	290,81	316,63	339,84	365,40	391,38	417,25	443,22	625,13	1015,10	425,08
30000	202,02	268,34	291,27	316,74	339,30	364,51	390,37	416,36	442,35	624,15	1014,09	424,50
32000	203,83	268,62	293,12	315,25	336,51	362,17	387,97	413,87	439,74	621,52	1011,59	423,11
34000	203,83	268,62	293,12	315,25	336,51	362,17	387,97	413,87	439,74	621,52	1011,59	423,11
36000	203,97	268,84	293,50	314,16	335,38	360,88	386,84	412,73	438,53	620,37	1010,37	422,32
38000	204,83	270,91	295,79	314,71	336,03	361,54	387,42	413,31	439,08	620,99	1010,92	423,23
40000	202,64	271,31	296,32	313,97	334,87	360,32	386,14	412,04	437,78	619,59	1009,61	422,23
42000	201,15	271,77	296,85	313,14	333,49	359,02	384,71	410,55	436,44	618,15	1008,08	421,21
47000	195,90	265,37	281,95	311,74	331,15	356,22	381,19	406,93	432,86	614,58	1004,51	416,58
52000	195,43	268,33	284,71	311,58	330,46	354,52	379,34	404,89	431,07	612,66	1002,49	415,95
57000	194,29	268,84	282,21	310,51	326,59	349,56	374,32	399,83	425,62	607,07	997,15	412,36
62000	196,95	272,11	281,94	311,55	324,09	345,89	370,99	396,14	421,92	603,29	993,33	410,74
67000	198,04	273,51	281,81	311,75	321,86	343,14	368,03	393,12	418,59	599,84	989,85	409,05
72000	199,05	274,63	297,95	311,46	320,00	340,92	365,86	390,82	416,09	596,72	986,76	409,12
77000	202,36	276,36	298,26	313,36	320,10	341,00	365,68	390,81	415,89	595,74	985,54	409,55
82000	206,30	276,07	299,63	315,47	321,10	341,86	365,89	390,94	415,96	595,41	985,46	410,37
87000	208,58	277,64	301,45	317,06	322,70	342,98	367,00	391,99	417,10	596,71	987,00	411,84
92000	207,88	275,93	299,84	314,83	321,04	340,26	364,21	389,40	414,74	594,75	985,13	409,82
102000	207,79	275,33	300,45	313,75	321,30	339,56	364,23	389,58	415,17	595,83	977,50	409,14
112000	210,30	277,77	305,70	316,65	324,75	344,74	369,67	395,21	420,84	602,18	932,12	409,08
122000	211,16	278,45	306,26	316,49	324,81	346,61	371,75	397,36	423,12	604,80	934,80	410,51
132000	214,56	283,57	309,46	320,45	330,28	352,72	378,06	403,75	429,55	611,45	941,50	415,94
142000	216,99	287,47	312,09	323,34	334,68	357,43	382,90	408,64	434,53	616,53	946,59	420,11
152000	218,38	290,16	313,36	324,45	337,94	360,98	386,59	412,32	438,30	620,42	950,48	423,04
162000	222,35	293,88	316,35	327,87	342,37	365,59	391,25	417,06	443,04	625,23	955,30	427,30
172000	221,59	292,19	315,14	327,32	342,61	365,95	391,70	417,56	443,52	625,81	955,87	427,21
182000	230,75	299,65	323,99	336,87	352,68	376,19	401,95	427,85	453,83	636,17	966,24	436,92
192000	228,85	296,13	321,09	335,17	351,50	375,17	400,92	426,86	452,86	628,84	965,33	434,79
242000	249,31	318,34	343,26	359,37	379,83	403,83	429,69	455,71	481,74	657,83	994,32	461,20
292000	258,39	329,16	337,75	346,60	360,73	376,35	393,68	411,06	428,47	488,89	750,60	407,43
342000	272,07	340,76	352,45	362,22	377,01	392,84	410,21	427,58	444,99	505,45	767,16	422,98
392000	293,94	363,08	374,74	387,36	402,52	418,50	435,86	453,27	470,71	531,16	792,87	447,64
442000	290,18	362,42	372,96	387,33	402,81	418,97	436,35	453,75	471,18	531,66	793,36	447,36
492000	339,30	412,89	423,73	439,08	454,74	471,02	488,39	505,81	523,25	583,73	845,43	498,85
542000	366,43	438,64	451,36	466,93	482,69	499,05	516,43	533,87	551,30	611,78	873,49	526,54
592000	391,22	462,24	476,57	492,44	508,33	524,76	542,14	559,59	570,60	637,51	899,21	551,33
642000	398,73	469,43	484,98	500,94	516,96	533,43	550,84	561,86	574,21	646,21	907,92	554,14
692000	425,21	497,31	513,24	529,42	545,53	562,04	573,04	587,55	592,83	674,83	936,54	581,59
	229,66	302,03	320,49	339,56	357,25	379,76	403,68	427,71	449,75	611,88	967,03	Valeurs Moyennes

Autosuffisance électrique du lycée (%)

Autosuffisance électrique	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	0,53	11,03	15,97	16,12	16,23	16,33	16,45	16,57	16,68	17,26	17,86	14,64
14000	0,55	11,04	17,05	17,22	17,33	17,43	17,55	17,67	17,79	18,45	19,08	15,56
15000	0,57	11,05	18,10	18,31	18,40	18,51	18,62	18,74	18,86	19,58	20,27	16,45
16000	0,60	11,39	21,07	21,60	21,66	21,77	21,88	22,01	22,12	22,93	23,90	19,18
17000	0,60	11,39	21,07	21,60	21,66	21,77	21,88	22,01	22,12	22,93	23,90	19,18
18000	0,60	11,39	21,07	21,60	21,66	21,77	21,88	22,01	22,12	22,93	23,90	19,18
19000	0,65	12,08	21,97	22,61	22,80	22,89	23,01	23,14	23,25	24,06	25,15	20,15
20000	0,92	13,34	22,82	23,43	23,95	24,04	24,16	24,28	24,39	25,21	26,42	21,18
21000	1,16	14,71	23,51	24,06	25,11	25,18	25,31	25,44	25,56	26,36	27,69	22,19
22000	1,29	15,65	24,02	24,49	26,22	26,34	26,47	26,60	26,71	27,52	28,95	23,11
24000	1,83	17,24	24,60	24,95	28,42	28,53	28,68	28,81	28,94	29,75	31,31	24,82
26000	2,47	19,35	24,86	25,11	30,45	30,59	30,74	30,88	31,01	31,83	33,49	26,43
28000	2,61	21,81	24,99	25,18	32,56	32,77	32,95	33,11	33,23	34,07	35,77	28,09
30000	2,70	22,97	25,04	25,80	34,52	34,78	34,99	35,14	35,28	36,12	37,87	29,56
32000	2,85	24,05	25,10	30,68	39,54	39,84	40,07	40,26	40,41	41,29	43,03	33,37
34000	2,85	24,05	25,10	30,68	39,54	39,84	40,07	40,26	40,41	41,29	43,03	33,37
36000	3,04	24,17	25,11	32,77	41,14	41,58	41,81	41,99	42,13	43,02	44,78	34,69
38000	4,00	24,32	25,11	35,26	43,31	43,92	44,17	44,35	44,54	45,42	47,19	36,51
40000	5,79	24,41	25,12	37,10	45,29	46,13	46,41	46,61	46,81	47,74	49,51	38,27
42000	7,13	24,45	25,12	39,03	47,25	48,30	48,66	48,88	49,06	50,02	51,79	39,97
47000	12,19	24,58	25,15	44,51	51,91	53,45	54,08	54,30	54,52	55,58	57,37	44,33
52000	14,51	24,64	25,54	49,01	56,31	58,21	59,16	59,54	59,76	60,94	62,75	48,22
57000	15,70	24,73	30,01	51,46	60,90	62,97	64,23	64,95	65,22	66,49	68,37	52,28
62000	16,17	24,79	35,16	54,73	66,14	68,44	69,89	70,99	71,52	73,02	74,96	56,89
67000	16,40	24,82	37,40	56,51	69,52	72,47	73,97	75,34	76,16	77,96	79,99	60,05
72000	16,53	24,90	40,76	58,59	72,59	76,20	77,73	79,18	80,31	82,85	84,98	63,15
77000	16,67	27,40	45,32	60,90	76,58	80,31	82,16	83,66	85,05	88,74	91,00	67,07
82000	16,78	33,56	49,18	63,70	80,12	84,40	87,27	88,77	90,20	94,28	96,24	71,32
87000	16,83	34,65	49,91	64,78	81,03	85,92	88,92	90,42	91,70	95,63	97,27	72,46
92000	16,87	36,17	51,30	67,04	82,15	88,81	91,74	93,09	94,07	97,34	98,76	74,30
102000	20,71	40,81	54,22	72,09	84,77	93,39	95,36	96,35	97,01	99,32	99,99	77,64
112000	26,66	46,92	56,40	76,45	88,88	95,47	97,10	97,77	98,34	99,83	100,00	80,35
122000	29,21	49,72	59,38	79,04	92,17	96,47	97,82	98,42	98,86	99,90	100,00	81,91
132000	33,83	51,94	64,36	81,33	93,77	97,21	98,30	98,83	99,20	99,95	100,00	83,52
142000	37,57	53,62	67,85	83,22	94,57	97,70	98,58	99,03	99,34	99,98	100,00	84,68
152000	41,06	55,32	71,56	85,64	95,31	98,13	98,83	99,27	99,50	99,98	100,00	85,87
162000	42,26	56,87	74,15	86,76	95,70	98,42	99,05	99,38	99,59	99,98	100,00	86,56
172000	44,13	60,07	76,48	87,73	96,12	98,67	99,18	99,48	99,65	99,98	100,00	87,41
182000	45,81	64,18	78,19	88,59	96,44	98,82	99,29	99,57	99,70	99,98	100,00	88,23
192000	47,20	67,88	79,88	89,31	96,75	98,95	99,44	99,64	99,77	99,98	100,00	88,98
242000	59,20	77,32	85,21	92,90	97,47	99,38	99,69	99,81	99,88	99,99	100,00	91,90
292000	68,96	81,76	88,65	95,13	98,03	99,62	99,80	99,89	99,93	100,00	100,00	93,80
342000	71,85	85,57	90,19	95,92	98,33	99,73	99,86	99,93	99,96	100,00	100,00	94,67
392000	74,92	88,23	92,68	96,43	98,53	99,80	99,91	99,95	99,96	100,00	100,00	95,49
442000	78,14	89,26	94,38	96,88	98,73	99,84	99,92	99,96	99,98	100,00	100,00	96,10
492000	80,42	90,54	95,39	97,19	98,87	99,86	99,95	99,97	99,98	100,00	100,00	96,56
542000	81,27	92,20	95,76	97,40	98,97	99,88	99,96	99,97	99,99	100,00	100,00	96,85
592000	82,03	93,75	96,20	97,60	99,07	99,89	99,97	99,98	99,99	100,00	100,00	97,13
642000	82,97	94,88	96,45	97,76	99,14	99,93	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	97,37
692000	84,52	95,47	96,76	97,91	99,17	99,95	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	97,61
	26,68	41,33	49,21	57,68	64,30	66,09	66,74	67,12	67,41	68,39	69,33	Valeurs Moyennes

Configurations en architecture PvG commutation

L'Emissivité CO₂ du kWh (g/kWh)

Emissivité CO ₂ du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	0,87	0,77	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,72	0,72	0,74
14000	0,87	0,77	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,71	0,70	0,74
15000	0,87	0,77	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,70	0,69	0,73
16000	0,87	0,77	0,69	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,66	0,70
17000	0,87	0,77	0,69	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,66	0,70
18000	0,87	0,77	0,69	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,66	0,70
19000	0,86	0,77	0,68	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,65	0,70
20000	0,86	0,75	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,69
21000	0,86	0,74	0,67	0,66	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63	0,68
22000	0,86	0,73	0,66	0,66	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,63	0,62	0,67
24000	0,85	0,72	0,66	0,65	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,60	0,65
26000	0,85	0,70	0,65	0,65	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,64
28000	0,85	0,68	0,65	0,65	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58	0,57	0,56	0,63
30000	0,85	0,67	0,65	0,65	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,54	0,61
32000	0,85	0,66	0,65	0,60	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,50	0,58
34000	0,85	0,66	0,65	0,60	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,50	0,58
36000	0,84	0,66	0,65	0,59	0,51	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50	0,48	0,57
38000	0,84	0,66	0,65	0,56	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,46	0,55
40000	0,82	0,66	0,65	0,55	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,44	0,54
42000	0,81	0,66	0,65	0,53	0,46	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44	0,42	0,52
47000	0,76	0,66	0,65	0,48	0,42	0,41	0,40	0,40	0,40	0,39	0,37	0,48
52000	0,74	0,66	0,65	0,44	0,38	0,36	0,36	0,35	0,35	0,34	0,32	0,45
57000	0,73	0,66	0,61	0,42	0,34	0,32	0,31	0,31	0,30	0,29	0,28	0,42
62000	0,73	0,65	0,56	0,39	0,29	0,27	0,26	0,25	0,25	0,23	0,22	0,38
67000	0,73	0,65	0,55	0,38	0,27	0,24	0,23	0,21	0,21	0,19	0,17	0,35
72000	0,73	0,65	0,52	0,36	0,24	0,21	0,19	0,18	0,17	0,15	0,13	0,32
77000	0,73	0,63	0,48	0,34	0,20	0,17	0,16	0,14	0,13	0,10	0,08	0,29
82000	0,72	0,58	0,44	0,32	0,17	0,14	0,11	0,10	0,09	0,05	0,03	0,25
87000	0,72	0,57	0,44	0,31	0,17	0,12	0,10	0,08	0,07	0,04	0,02	0,24
92000	0,72	0,56	0,42	0,29	0,16	0,10	0,07	0,06	0,05	0,02	0,01	0,22
102000	0,69	0,52	0,40	0,24	0,13	0,06	0,04	0,03	0,03	0,01	0,00	0,19
112000	0,64	0,46	0,38	0,21	0,10	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,17
122000	0,62	0,44	0,35	0,18	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,16
132000	0,58	0,42	0,31	0,16	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,14
142000	0,54	0,40	0,28	0,15	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,13
152000	0,51	0,39	0,25	0,12	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,12
162000	0,50	0,38	0,23	0,12	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,12
172000	0,49	0,35	0,20	0,11	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
182000	0,47	0,31	0,19	0,10	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
192000	0,46	0,28	0,18	0,09	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
242000	0,36	0,20	0,13	0,06	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
292000	0,27	0,16	0,10	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
342000	0,25	0,13	0,09	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
392000	0,22	0,10	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
442000	0,19	0,09	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
492000	0,17	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
542000	0,16	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
592000	0,16	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
642000	0,15	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
692000	0,13	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
	0,64	0,51	0,44	0,37	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	Valeurs Moyennes

Le prix du kWh (FCFA/kWh)

Prix de revient du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	238,11	309,32	325,98	351,80	377,70	403,60	429,49	455,37	481,25	662,77	1053,21	462,60
14000	238,34	309,58	324,17	349,95	375,86	401,77	427,65	453,52	479,41	660,75	1051,14	461,10
15000	238,57	309,83	322,44	348,14	374,07	399,98	425,87	451,75	477,63	658,86	1049,13	459,66
16000	239,69	310,35	317,92	343,01	369,01	394,89	420,79	446,66	472,54	653,62	1043,34	455,62
17000	239,69	310,35	317,92	343,01	369,01	394,89	420,79	446,66	472,54	653,62	1043,34	455,62
18000	239,69	310,35	317,92	343,01	369,01	394,89	420,79	446,66	472,54	653,62	1043,34	455,62
19000	239,86	309,30	316,46	341,36	367,09	393,02	418,90	444,75	470,66	651,72	1041,22	454,03
20000	239,61	307,16	315,11	340,04	365,16	391,10	416,98	442,84	468,73	649,79	1039,06	452,32
21000	239,41	304,79	314,05	339,10	363,21	389,17	415,03	440,89	466,78	647,85	1036,89	450,65
22000	239,51	303,33	313,43	338,64	361,42	387,31	413,15	439,02	464,91	645,97	1034,83	449,23
24000	239,01	300,84	312,85	338,29	357,75	383,65	409,47	435,32	461,19	642,25	1030,84	446,50
26000	239,66	298,66	314,23	339,85	355,73	381,58	407,39	433,23	459,09	640,13	1028,55	445,28
28000	239,94	294,49	314,51	340,24	352,24	377,94	403,69	429,50	455,37	636,38	1024,71	442,64
30000	240,30	292,80	314,95	339,60	349,02	374,63	400,32	426,14	451,98	632,99	1021,23	440,36
32000	241,93	292,67	316,77	332,19	341,35	366,87	392,54	418,27	444,09	625,02	1013,28	435,00
34000	241,93	292,67	316,77	332,19	341,35	366,87	392,54	418,27	444,09	625,02	1013,28	435,00
36000	241,97	292,84	317,15	328,59	338,67	363,95	389,61	415,37	441,20	622,12	1010,33	432,89
38000	242,43	294,86	319,44	326,11	336,82	361,75	387,39	413,14	438,89	619,81	1008,01	431,70
40000	239,54	295,22	319,96	323,14	333,56	358,07	383,63	409,35	435,07	615,91	1004,12	428,87
42000	237,51	295,67	320,49	319,98	330,34	354,44	379,86	405,56	431,30	612,09	1000,28	426,14
47000	230,28	289,22	305,58	311,94	323,88	347,03	371,95	397,61	423,30	603,90	992,05	417,88
52000	228,88	292,15	307,88	306,38	318,51	340,98	365,26	390,64	416,32	596,69	984,81	413,50
57000	227,26	292,63	299,98	302,35	310,38	332,52	356,21	380,95	406,54	586,73	974,71	406,39
62000	229,74	295,88	293,47	299,44	303,71	325,42	348,74	372,75	397,83	577,58	965,46	400,91
67000	230,74	297,26	290,64	297,48	298,69	319,14	342,38	365,86	390,39	569,56	957,27	396,31
72000	231,68	298,31	302,73	294,69	294,01	313,20	336,39	359,72	383,66	561,42	948,93	393,16
77000	234,93	297,05	297,52	293,79	289,89	308,87	331,42	354,67	378,10	553,66	940,91	389,16
82000	238,82	289,35	294,23	292,53	287,21	305,12	325,74	348,96	372,34	547,15	934,99	385,13
87000	241,08	289,61	295,16	292,82	287,82	304,57	324,93	348,16	371,82	546,90	935,35	385,29
92000	240,36	286,07	291,88	287,87	285,05	298,40	318,89	342,42	366,65	543,01	931,87	381,13
102000	235,70	279,88	288,97	280,87	282,70	292,32	314,65	338,87	363,71	541,90	932,20	377,43
112000	231,09	274,98	291,59	279,32	281,63	295,13	318,11	342,93	367,94	547,71	934,34	378,62
122000	228,90	272,30	288,57	277,04	278,01	295,88	319,41	344,37	369,64	550,27	937,02	378,31
132000	226,75	274,74	285,73	279,36	281,65	301,17	325,19	350,29	375,69	556,85	943,72	381,92
142000	224,68	276,62	284,15	280,83	285,21	305,32	329,75	355,00	380,51	561,90	948,81	384,80
152000	221,89	277,25	280,94	280,08	287,68	308,40	333,16	358,42	384,09	565,79	952,70	386,40
162000	224,42	279,11	280,79	282,76	291,75	312,66	337,56	363,03	388,75	570,60	957,52	389,90
172000	221,41	273,56	276,90	281,48	291,53	312,74	337,89	363,40	389,20	571,17	958,09	388,85
182000	228,55	276,05	283,99	290,20	301,28	322,83	348,03	373,60	399,45	581,53	968,46	397,63
192000	225,00	268,06	279,86	287,91	299,78	321,67	346,83	372,55	398,42	580,62	967,55	395,29
242000	231,02	278,97	298,64	310,03	327,39	349,84	375,35	401,23	427,20	609,60	996,54	418,71
292000	228,38	286,53	290,79	295,84	307,72	322,13	339,23	356,52	373,88	491,11	752,82	367,72
342000	239,41	295,79	304,40	310,89	323,72	338,48	355,67	372,99	390,39	507,67	769,38	382,62
392000	259,23	316,42	325,34	335,62	349,04	364,06	381,30	398,66	416,09	533,38	795,09	406,75
442000	253,56	314,93	322,58	335,25	349,16	364,48	381,77	399,14	416,56	533,88	795,58	406,08
492000	301,29	364,56	372,73	386,72	400,96	416,51	433,78	451,20	468,61	585,95	847,65	457,27
542000	327,70	389,43	400,07	414,37	428,82	444,53	461,81	479,24	496,65	614,00	875,71	484,76
592000	351,97	412,19	424,95	439,72	454,35	470,22	487,52	504,96	522,38	639,72	901,43	509,95
642000	358,88	418,74	433,18	448,12	462,93	478,86	496,21	513,64	526,43	648,43	910,14	517,78
692000	384,53	446,23	461,20	476,44	491,48	507,44	524,83	542,25	555,05	677,05	938,76	545,93
	246,70	304,78	316,14	326,21	338,09	359,21	382,52	406,33	430,14	599,32	964,80	Valeurs Moyennes

Autosuffisance électrique du lycée (%)

Autosuffisance électrique	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	0,53	11,03	15,97	16,12	16,23	16,33	16,45	16,57	16,68	17,26	17,86	14,64
14000	0,55	11,04	17,05	17,22	17,33	17,43	17,55	17,67	17,79	18,45	19,08	15,56
15000	0,57	11,05	18,10	18,31	18,40	18,51	18,62	18,74	18,86	19,58	20,27	16,45
16000	0,60	11,39	21,07	21,07	21,60	21,66	21,77	21,88	22,01	22,12	22,93	19,18
17000	0,60	11,39	21,07	21,60	21,66	21,77	21,88	22,01	22,12	22,93	23,90	19,18
18000	0,60	11,39	21,07	21,60	21,66	21,77	21,88	22,01	22,12	22,93	23,90	19,18
19000	0,65	12,08	21,97	22,61	22,80	22,89	23,01	23,14	23,25	24,06	25,15	20,15
20000	0,92	13,34	22,82	23,43	23,95	24,04	24,16	24,28	24,39	25,21	26,42	21,18
21000	1,16	14,71	23,51	24,06	25,11	25,18	25,31	25,44	25,56	26,36	27,69	22,19
22000	1,29	15,65	24,02	24,49	26,22	26,34	26,47	26,60	26,71	27,52	28,95	23,11
24000	1,83	17,24	24,60	24,95	28,42	28,53	28,68	28,81	28,94	29,75	31,31	24,82
26000	2,47	19,35	24,86	25,11	30,45	30,59	30,74	30,88	31,01	31,83	33,49	26,43
28000	2,61	21,81	24,99	25,18	32,56	32,77	32,95	33,11	33,23	34,07	35,77	28,09
30000	2,70	22,97	25,04	25,80	34,52	34,78	34,99	35,14	35,28	36,12	37,87	29,56
32000	2,85	24,05	25,10	30,68	39,54	39,84	40,07	40,26	40,41	41,29	43,03	33,37
34000	2,85	24,05	25,10	30,68	39,54	39,84	40,07	40,26	40,41	41,29	43,03	33,37
36000	3,04	24,17	25,11	32,77	41,14	41,58	41,81	41,99	42,13	43,02	44,78	34,69
38000	4,00	24,32	25,11	35,26	43,31	43,92	44,17	44,35	44,54	45,42	47,19	36,51
40000	5,79	24,41	25,12	37,10	45,29	46,13	46,41	46,61	46,81	47,74	49,51	38,27
42000	7,13	24,45	25,12	39,03	47,25	48,30	48,66	48,88	49,06	50,02	51,79	39,97
47000	12,19	24,58	25,15	44,51	51,91	53,45	54,08	54,30	54,52	55,58	57,37	44,33
52000	14,51	24,64	25,54	49,01	56,31	58,21	59,16	59,54	59,76	60,94	62,75	48,22
57000	15,70	24,73	30,01	51,46	60,90	62,97	64,23	64,95	65,22	66,49	68,37	52,28
62000	16,17	24,79	35,16	54,73	66,14	68,44	69,89	70,99	71,52	73,02	74,96	56,89
67000	16,40	24,82	37,40	56,51	69,52	72,47	73,97	75,34	76,16	77,96	79,99	60,05
72000	16,53	24,90	40,76	58,59	72,59	76,20	77,73	79,18	80,31	82,85	84,98	63,15
77000	16,67	27,40	45,32	60,90	76,58	80,31	82,16	83,66	85,05	88,74	91,00	67,07
82000	16,78	33,56	49,18	63,70	80,12	84,40	87,27	88,77	90,20	94,28	96,24	71,32
87000	16,83	34,65	49,91	64,78	81,03	85,92	88,92	90,42	91,70	95,63	97,27	72,46
92000	16,87	36,17	51,30	67,04	82,15	88,81	91,74	93,09	94,07	97,34	98,76	74,30
102000	20,71	40,81	54,22	72,09	84,77	93,39	95,36	96,35	97,01	99,32	99,99	77,64
112000	26,66	46,92	56,40	76,45	88,88	95,47	97,10	97,77	98,34	99,83	100,00	80,35
122000	29,21	49,72	59,38	79,04	92,17	96,47	97,82	98,42	98,86	99,90	100,00	81,91
132000	33,83	51,94	64,36	81,33	93,77	97,21	98,30	98,83	99,20	99,95	100,00	83,52
142000	37,57	53,62	67,85	83,22	94,57	97,70	98,58	99,03	99,34	99,98	100,00	84,68
152000	41,06	55,32	71,56	85,64	95,31	98,13	98,83	99,27	99,50	99,98	100,00	85,87
162000	42,26	56,87	74,15	86,76	95,70	98,42	99,05	99,38	99,59	99,98	100,00	86,56
172000	44,13	60,07	76,48	87,73	96,12	98,67	99,18	99,48	99,65	99,98	100,00	87,41
182000	45,81	64,18	78,19	88,59	96,44	98,82	99,29	99,57	99,70	99,98	100,00	88,23
192000	47,20	67,88	79,88	89,31	96,75	98,95	99,44	99,64	99,77	99,98	100,00	88,98
242000	59,20	77,32	85,21	92,90	97,47	99,38	99,69	99,81	99,88	99,99	100,00	91,90
292000	68,96	81,76	88,65	95,13	98,03	99,62	99,80	99,89	99,93	100,00	100,00	93,80
342000	71,85	85,57	90,19	95,92	98,33	99,73	99,86	99,93	99,96	100,00	100,00	94,67
392000	74,92	88,23	92,68	96,43	98,53	99,80	99,91	99,95	99,96	100,00	100,00	95,49
442000	78,14	89,26	94,38	96,88	98,73	99,84	99,92	99,96	99,98	100,00	100,00	96,10
492000	80,42	90,54	95,39	97,19	98,87	99,86	99,95	99,97	99,98	100,00	100,00	96,56
542000	81,27	92,20	95,76	97,40	98,97	99,88	99,96	99,97	99,99	100,00	100,00	96,85
592000	82,03	93,75	96,20	97,60	99,07	99,89	99,97	99,98	99,99	100,00	100,00	97,13
642000	82,97	94,88	96,45	97,76	99,14	99,93	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	97,37
692000	84,52	95,47	96,76	97,91	99,17	99,95	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	97,61
	26,68	41,33	49,21	57,68	64,30	66,09	66,74	67,12	67,41	68,39	69,33	Valeurs Moyennes

Configurations en architecture PvG parallèles

L'Emissivité CO₂ du kWh (g/kWh)

Emissivité CO ₂ du kWh	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	0,78	0,72	0,72	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,70	0,70	0,72
14000	0,77	0,71	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,71
15000	0,76	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,68	0,68	0,70
16000	0,74	0,68	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,67
17000	0,74	0,68	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,67
18000	0,74	0,68	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,67
19000	0,74	0,67	0,66	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63	0,66
20000	0,73	0,66	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,63	0,62	0,65
21000	0,72	0,65	0,64	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,61	0,64
22000	0,72	0,64	0,63	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,60	0,63
24000	0,70	0,62	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,61
26000	0,69	0,61	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,56	0,59
28000	0,68	0,59	0,58	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,54	0,57
30000	0,67	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,52	0,56
32000	0,64	0,54	0,52	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49	0,47	0,51
34000	0,64	0,54	0,52	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49	0,47	0,51
36000	0,63	0,53	0,51	0,50	0,49	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,46	0,50
38000	0,62	0,51	0,49	0,48	0,47	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,44	0,48
40000	0,61	0,50	0,47	0,46	0,45	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,42	0,46
42000	0,60	0,49	0,46	0,44	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42	0,41	0,40	0,45
47000	0,57	0,47	0,42	0,40	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,36	0,35	0,41
52000	0,56	0,45	0,38	0,36	0,35	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,37
57000	0,54	0,43	0,35	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,33
62000	0,52	0,41	0,33	0,28	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,20	0,29
67000	0,50	0,39	0,31	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,16	0,26
72000	0,49	0,38	0,29	0,22	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,12	0,23
77000	0,47	0,36	0,27	0,20	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,07	0,19
82000	0,45	0,33	0,25	0,17	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,04	0,03	0,16
87000	0,44	0,32	0,24	0,17	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,03	0,02	0,15
92000	0,42	0,31	0,22	0,15	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01	0,13
102000	0,39	0,27	0,19	0,12	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	0,00	0,00	0,11
112000	0,36	0,24	0,17	0,10	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,09
122000	0,34	0,22	0,14	0,08	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,08
132000	0,32	0,20	0,12	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,07
142000	0,30	0,18	0,11	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06
152000	0,29	0,17	0,09	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
162000	0,27	0,15	0,08	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
172000	0,26	0,14	0,07	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
182000	0,25	0,12	0,06	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
192000	0,23	0,11	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
242000	0,19	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
292000	0,16	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
342000	0,14	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
392000	0,13	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
442000	0,12	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
492000	0,11	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
542000	0,11	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
592000	0,10	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
642000	0,10	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
692000	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	0,46	0,37	0,33	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26	Valeurs Moyennes

Le prix du kWh (FCFA/kWh)

Prix de revient du	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	218,60	288,86	305,19	322,38	339,61	356,85	374,08	391,31	408,54	529,47	790,06	393,18
14000	217,35	287,18	303,25	320,41	337,63	354,87	372,10	389,33	406,56	527,32	787,87	391,26
15000	216,11	285,50	301,31	318,44	335,65	352,89	370,12	387,35	404,58	525,23	785,67	389,35
16000	212,75	280,85	295,87	312,92	330,10	347,32	364,55	381,78	399,01	519,51	779,45	384,01
17000	212,75	280,85	295,87	312,92	330,10	347,32	364,55	381,78	399,01	519,51	779,45	384,01
18000	212,75	280,85	295,87	312,92	330,10	347,32	364,55	381,78	399,01	519,51	779,45	384,01
19000	211,51	279,18	293,99	310,98	328,14	345,34	362,57	379,80	397,03	517,53	777,25	382,12
20000	210,29	277,52	292,18	309,04	326,18	343,37	360,59	377,83	395,06	515,55	775,06	380,24
21000	209,09	275,87	290,43	307,11	324,22	341,42	358,63	375,86	393,09	513,59	772,88	378,38
22000	207,99	274,30	288,80	305,27	322,36	339,54	356,75	373,97	391,21	511,70	770,82	376,61
24000	205,68	271,03	285,45	301,44	318,50	335,65	352,85	370,07	387,29	507,79	766,65	372,94
26000	204,99	269,36	283,74	299,25	316,30	333,42	350,61	367,81	385,03	505,52	764,20	370,93
28000	202,84	266,12	280,47	295,54	312,51	329,59	346,76	363,95	381,16	501,65	760,21	367,35
30000	200,85	263,10	277,40	292,19	308,95	326,01	343,14	360,34	377,53	498,01	756,49	364,00
32000	196,82	257,23	270,82	285,35	301,17	318,22	335,29	352,43	369,62	490,05	748,53	356,87
34000	196,82	257,23	270,82	285,35	301,17	318,22	335,29	352,43	369,62	490,05	748,53	356,87
36000	195,24	255,27	268,40	282,88	298,37	315,39	332,45	349,56	366,75	487,15	745,63	354,28
38000	194,82	254,52	266,74	281,19	296,29	313,16	330,21	347,30	364,46	484,84	743,32	352,44
40000	192,92	252,41	263,56	277,98	292,83	309,44	326,48	343,56	360,69	481,03	739,51	349,13
42000	191,18	250,50	260,42	274,82	289,52	305,75	322,80	339,86	356,96	477,26	735,74	345,89
47000	188,60	256,25	271,25	294,23	317,42	341,37	366,89	392,59	418,32	599,09	987,44	403,04
52000	187,66	255,05	266,66	288,85	311,97	335,41	360,25	385,95	411,65	592,26	980,59	397,85
57000	184,35	251,51	260,92	280,55	303,63	326,89	350,97	376,35	402,04	582,48	970,74	390,04
62000	183,22	250,13	258,61	273,74	296,54	319,81	343,41	367,99	393,52	573,69	961,87	383,87
67000	181,33	248,06	256,23	268,57	290,39	313,68	337,13	361,20	386,27	566,07	954,17	378,46
72000	179,24	245,80	253,77	264,45	284,53	307,81	331,20	354,97	379,52	558,40	946,35	373,27
77000	178,62	244,98	252,78	262,73	280,21	303,21	326,61	350,18	374,16	551,54	939,33	369,49
82000	177,52	243,63	251,32	261,33	276,45	298,05	321,49	345,16	369,11	545,82	934,28	365,83
87000	178,09	244,11	251,81	261,91	276,54	297,45	320,99	344,80	368,86	545,89	934,79	365,93
92000	174,11	239,98	247,79	258,07	272,08	292,00	315,77	339,93	364,46	542,30	931,59	361,64
102000	169,90	235,44	243,74	254,34	268,06	288,39	312,64	337,43	362,49	541,64	930,04	358,56
112000	170,54	235,83	244,57	255,48	270,12	292,22	316,77	341,87	367,20	546,70	934,34	361,42
122000	168,11	233,29	242,28	253,58	270,34	293,48	318,26	343,54	369,06	549,26	937,02	361,66
132000	169,95	235,06	244,28	256,34	275,44	299,22	324,25	349,66	375,29	555,90	943,72	366,28
142000	171,80	236,81	246,23	259,32	279,68	303,78	328,95	354,44	380,15	560,98	948,81	370,09
152000	171,89	236,68	246,48	261,38	282,73	307,14	332,43	358,03	383,85	564,86	952,70	372,56
162000	173,68	238,30	248,64	265,05	286,97	311,60	336,99	362,68	388,53	569,67	957,52	376,33
172000	171,17	235,73	246,98	264,63	287,06	311,87	337,35	363,11	388,99	570,24	958,09	375,93
182000	178,71	243,36	255,69	274,22	297,05	321,99	347,54	373,36	399,26	580,60	968,46	385,48
192000	174,95	239,91	253,42	272,64	295,81	320,87	346,50	372,35	398,28	579,69	967,55	383,81
242000	193,60	261,19	278,63	299,82	323,96	349,34	375,15	401,11	427,13	605,48	996,54	410,18
292000	203,76	264,29	275,23	289,02	304,93	321,83	339,10	356,45	373,83	491,11	752,82	361,12
342000	216,59	278,25	290,44	305,09	321,24	338,27	355,58	372,96	390,36	507,67	769,38	376,89
392000	239,46	302,22	315,18	330,46	346,79	363,90	381,24	398,64	416,06	533,38	795,09	402,04
442000	237,75	301,36	315,08	330,72	347,19	364,34	381,70	399,11	416,54	533,88	795,58	402,11
492000	288,27	352,29	366,75	382,61	399,19	416,38	433,75	451,17	466,44	585,95	847,65	453,68
542000	315,23	379,58	394,54	410,54	427,19	444,40	461,79	478,30	494,49	614,00	875,71	481,43
592000	339,81	404,68	420,01	436,15	452,86	470,10	486,58	502,77	518,25	639,72	901,43	506,58
642000	347,56	412,13	427,65	443,87	460,60	477,86	494,04	509,51	526,43	648,43	910,14	514,38
692000	375,34	440,40	456,09	472,40	489,18	505,23	522,65	537,60	555,05	677,05	938,76	542,70
	208,04	273,08	285,47	300,81	318,72	338,38	358,65	379,03	399,56	544,72	858,59	Valeurs Moyennes

Autosuffisance électrique du lycée (%)

Autosuffisance électrique	0	2540	5080	7620	10160	12700	15240	17780	20320	38100	76200	
12551	10,73	17,20	17,78	17,92	18,03	18,14	18,25	18,37	18,48	19,04	19,62	17,60
14000	11,52	18,22	18,94	19,09	19,20	19,32	19,43	19,54	19,65	20,30	20,91	18,74
15000	12,31	19,24	20,09	20,26	20,38	20,49	20,60	20,72	20,83	21,53	22,20	19,88
16000	14,67	22,28	23,54	23,75	23,89	24,01	24,13	24,24	24,35	25,14	26,06	23,28
17000	14,67	22,28	23,54	23,75	23,89	24,01	24,13	24,24	24,35	25,14	26,06	23,28
18000	14,67	22,28	23,54	23,75	23,89	24,01	24,13	24,24	24,35	25,14	26,06	23,28
19000	15,46	23,29	24,66	24,90	25,06	25,18	25,30	25,41	25,52	26,31	27,35	24,40
20000	16,24	24,29	25,75	26,06	26,22	26,35	26,47	26,58	26,69	27,48	28,63	25,52
21000	17,01	25,30	26,80	27,20	27,38	27,51	27,64	27,75	27,86	28,65	29,91	26,64
22000	17,76	26,30	27,84	28,35	28,54	28,67	28,80	28,91	29,03	29,81	31,17	27,74
24000	19,25	28,29	29,87	30,63	30,83	30,98	31,12	31,24	31,35	32,14	33,63	29,94
26000	20,58	30,14	31,74	32,75	32,96	33,13	33,26	33,39	33,51	34,30	35,88	31,97
28000	21,99	32,11	33,73	34,97	35,22	35,41	35,55	35,69	35,81	36,60	38,25	34,12
30000	23,31	33,96	35,61	36,99	37,36	37,56	37,72	37,85	37,98	38,78	40,47	36,14
32000	26,42	38,04	40,05	41,58	42,43	42,64	42,83	42,99	43,13	43,95	45,64	40,88
34000	26,42	38,04	40,05	41,58	42,43	42,64	42,83	42,99	43,13	43,95	45,64	40,88
36000	27,46	39,28	41,53	43,08	44,10	44,33	44,53	44,70	44,84	45,68	47,36	42,44
38000	28,88	40,86	43,60	45,16	46,39	46,69	46,90	47,09	47,23	48,08	49,77	44,60
40000	30,15	42,25	45,54	47,12	48,48	48,92	49,12	49,32	49,49	50,35	52,04	46,61
42000	31,33	43,52	47,46	49,05	50,49	51,12	51,33	51,53	51,71	52,60	54,29	48,58
47000	33,96	46,32	52,13	53,76	55,28	56,41	56,72	56,93	57,13	58,09	59,78	53,32
52000	36,05	48,55	56,12	58,17	59,72	61,12	61,78	61,99	62,20	63,25	64,96	57,63
57000	38,12	50,74	59,46	62,84	64,43	65,91	66,97	67,35	67,57	68,71	70,44	62,05
62000	40,47	53,22	62,43	68,16	69,89	71,37	72,68	73,47	73,78	75,05	76,84	67,03
67000	42,21	55,05	64,42	71,61	73,85	75,32	76,71	77,78	78,32	79,79	81,61	70,61
72000	43,93	56,86	66,34	74,40	77,54	79,02	80,44	81,66	82,47	84,42	86,32	73,95
77000	46,09	59,13	68,69	77,13	81,64	83,26	84,68	86,00	87,11	89,84	91,83	77,76
82000	48,81	61,97	71,59	80,00	85,74	88,10	89,49	90,76	91,89	94,97	96,61	81,81
87000	49,74	62,95	72,56	80,92	86,92	89,63	90,97	92,18	93,24	96,16	97,57	82,99
92000	51,48	64,77	74,34	82,60	88,92	92,16	93,38	94,39	95,21	97,71	98,91	84,90
102000	55,09	68,55	77,85	85,95	92,42	95,44	96,41	97,10	97,64	99,45	99,99	87,81
112000	58,30	71,89	80,96	88,90	94,89	96,99	97,80	98,32	98,73	99,88	100,00	89,70
122000	60,97	74,62	83,56	91,29	96,18	97,73	98,42	98,85	99,16	99,94	100,00	90,97
132000	63,51	77,19	86,02	93,36	97,01	98,23	98,79	99,15	99,40	99,97	100,00	92,06
142000	65,20	78,94	87,66	94,46	97,46	98,51	99,00	99,32	99,52	99,98	100,00	92,73
152000	67,19	81,04	89,56	95,42	97,90	98,79	99,21	99,48	99,63	99,98	100,00	93,47
162000	68,77	82,71	90,95	96,02	98,20	98,97	99,35	99,57	99,70	99,99	100,00	94,02
172000	70,38	84,36	92,12	96,53	98,45	99,13	99,46	99,64	99,75	99,99	100,00	94,53
182000	71,85	85,78	92,98	96,93	98,65	99,26	99,55	99,70	99,81	99,99	100,00	94,95
192000	73,34	87,11	93,69	97,29	98,82	99,37	99,62	99,75	99,84	99,99	100,00	95,35
242000	78,75	91,14	95,67	98,23	99,26	99,64	99,80	99,87	99,92	100,00	100,00	96,57
292000	81,82	93,38	96,78	98,69	99,49	99,78	99,87	99,92	99,96	100,00	100,00	97,24
342000	83,77	94,74	97,49	98,94	99,62	99,84	99,92	99,95	99,97	100,00	100,00	97,66
392000	85,26	95,65	97,99	99,12	99,71	99,88	99,94	99,97	99,98	100,00	100,00	97,95
442000	86,41	96,35	98,30	99,24	99,76	99,91	99,96	99,97	99,99	100,00	100,00	98,17
492000	87,22	96,95	98,51	99,34	99,79	99,93	99,97	99,98	99,99	100,00	100,00	98,33
542000	87,79	97,35	98,65	99,40	99,82	99,94	99,97	99,99	99,99	100,00	100,00	98,45
592000	88,38	97,67	98,78	99,46	99,85	99,96	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	98,55
642000	88,88	97,90	98,88	99,51	99,87	99,97	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	98,64
692000	89,32	98,08	98,97	99,55	99,89	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	98,71
	46,88	57,96	62,50	65,50	67,16	67,89	68,30	68,60	68,82	69,64	70,51	Valeurs Moyennes