



Université de Carthage

Ecole Nationale des Sciences et Technologies Avancées de Borj Cedria

Centrales Solaires Photovoltaïques

Classe: 3ème STEP

1

Mme. Sana KORDOGHLI

Année Universitaire 2021-2022



SOMMAIRE

- I. Maîtriser les différentes étapes et acteurs du développement de projet : bonnes pratiques internationales et spécificités locales
- II. Maitriser le contexte législatif Tunisien: avantages et contraintes de chaque régime
- III. Le développement de projets PV : identifier et analyser un site en fonction de contraintes prédefinies



I. MAÎTRISER LES DIFFÉRENTES ÉTAPES ET ACTEURS DU DÉVELOPPEMENT DE PROJET : BONNES PRATIQUES INTERNATIONALES ET SPÉCIFICITÉS LOCALES

1. Le développement de projet PV

- Cartographie des acteurs
- Critères de réussite des projets : bonnes pratiques

2. Les spécificités du marché tunisien

- Expérience du porteur de projet
- Consistance du projet
- Evaluation financière
- Acteurs locaux

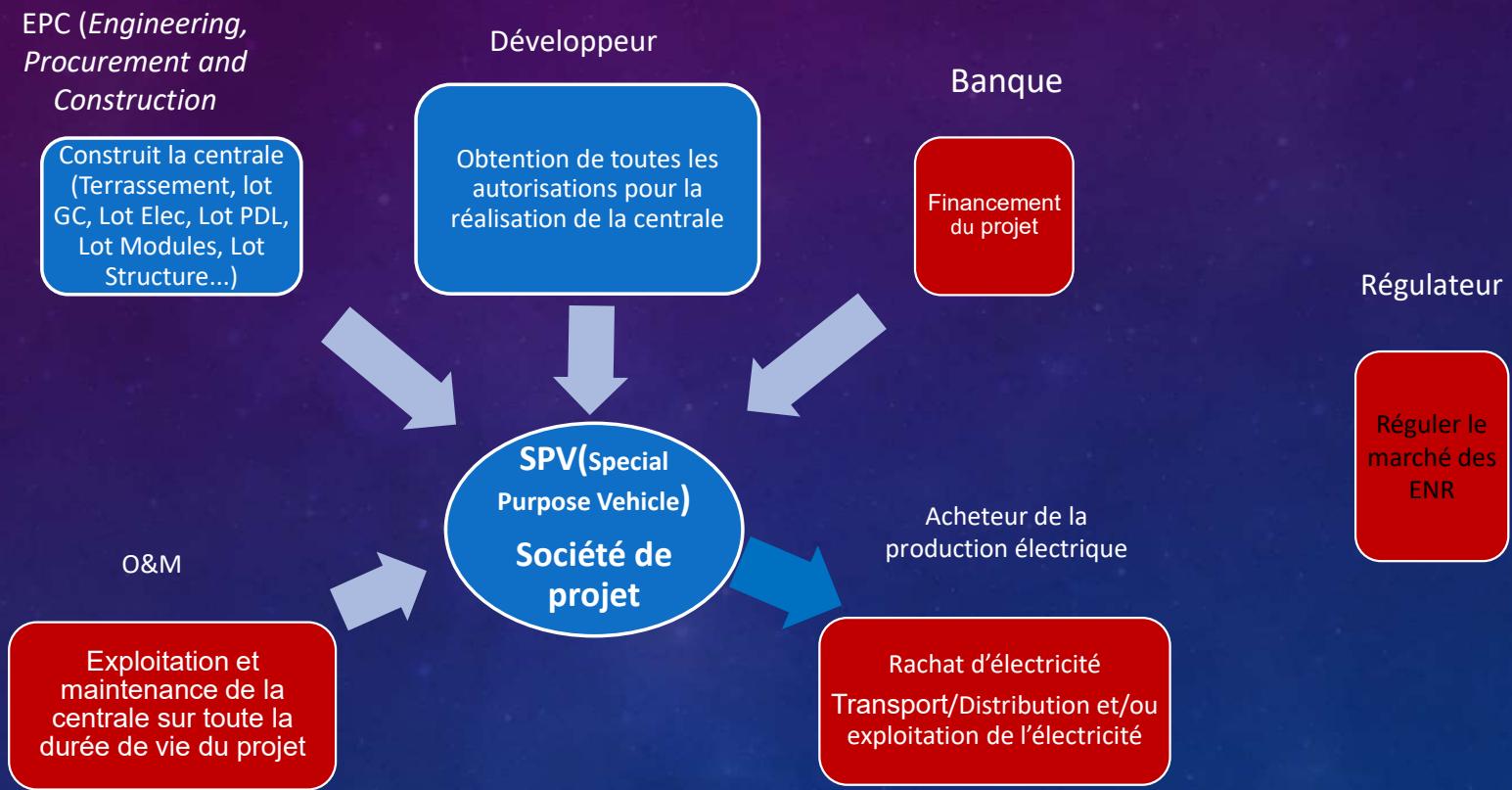


1. LE DÉVELOPPEMENT DES PROJETS PV



1. LE DÉVELOPPEMENT DE PROJET PV

CARTOGRAPHIE DES ACTEURS



1. LE DÉVELOPPEMENT DE PROJET PV

CRITÈRES DE RÉUSSITE DES PROJETS: BONNES PRATIQUES

- - Climat politique et social favorable
- - Qualité du contrat d'achat
- - Qualité de l'acheteur de production électrique qui signe le contrat d'achat :
 - Etat (Cas de la Tunisie)
 - Groupe industriel (Cas du Maroc)
- - Système de tarification:
 - Tarif de rachat subventionné
 - Appel à la concurrence (Appel d'offre, Appel à projet)
- - Multiplication des soumissions:
 - Candidature spontanée
 - Appels d'offres récurrents
- Simplification des démarches administratives :
 - Permis de construire
 - Guichet unique
 - Raccordement réseau



2. LES SPÉCIFICITÉS DU MARCHÉ TUNISIEN



2. LES SPÉCIFICITÉS DU MARCHÉ TUNISIEN

EXPÉRIENCE DU PORTEUR DE PROJET

Critère de référence	Max	Stratégie de développement
1. Expérience du porteur de projet	35	
1.1. Expérience dans le développement de projets de même technologie et au moins de Taille Comparable à celle du projet.	10	
1.2. Expérience dans la construction de centrales de production d'électricité à partir des énergies renouvelables	7,5	S'assurer d'avoir un portefeuille de projets déjà réalisé ou développer des partenariats avec des sociétés étrangères
1.3. Expérience dans l'exploitation et la maintenance de centrales de même technologie et au moins de taille comparable à celle du projet proposé	7,5	
1.4. Expérience en mobilisation des capitaux propres et des emprunts	10	

2. LES SPÉCIFICITÉS DU MARCHÉ TUNISIEN

CONSISTANCE DU PROJET

Critère	Max	Stratégie de développement
2. Consistance du projet proposé	65	
2.1. Source de financement du projet:	15	Obtention de financements: Banques commerciales et bailleurs de fonds
2.2. Site du projet: démarche de mise à disposition du site	10	Prospection et qualification foncière du site (Chapitre II et III)
2.3. Etude Technique	7	
2.4. Intégration industrielle locale du projet	15	Assurer plus de 50% de part locale pour la phase construction et exploitation dans le chiffrage
2.5. Création d'emploi	10	Assurer le transfert de compétences via des partenariats étrangers (Développement, Construction et exploitation)
2.6. Respect du projet aux règles et normes techniques relatifs à la sécurité et à la protection de l'environnement	8	Elaboration de EIE répondant aux normes internationales

2. LES SPÉCIFICITÉS DU MARCHÉ TUNISIEN

EVALUATION FINANCIÈRE

Critère de sélection : tarif de comparaison des offres incluant le taux de change

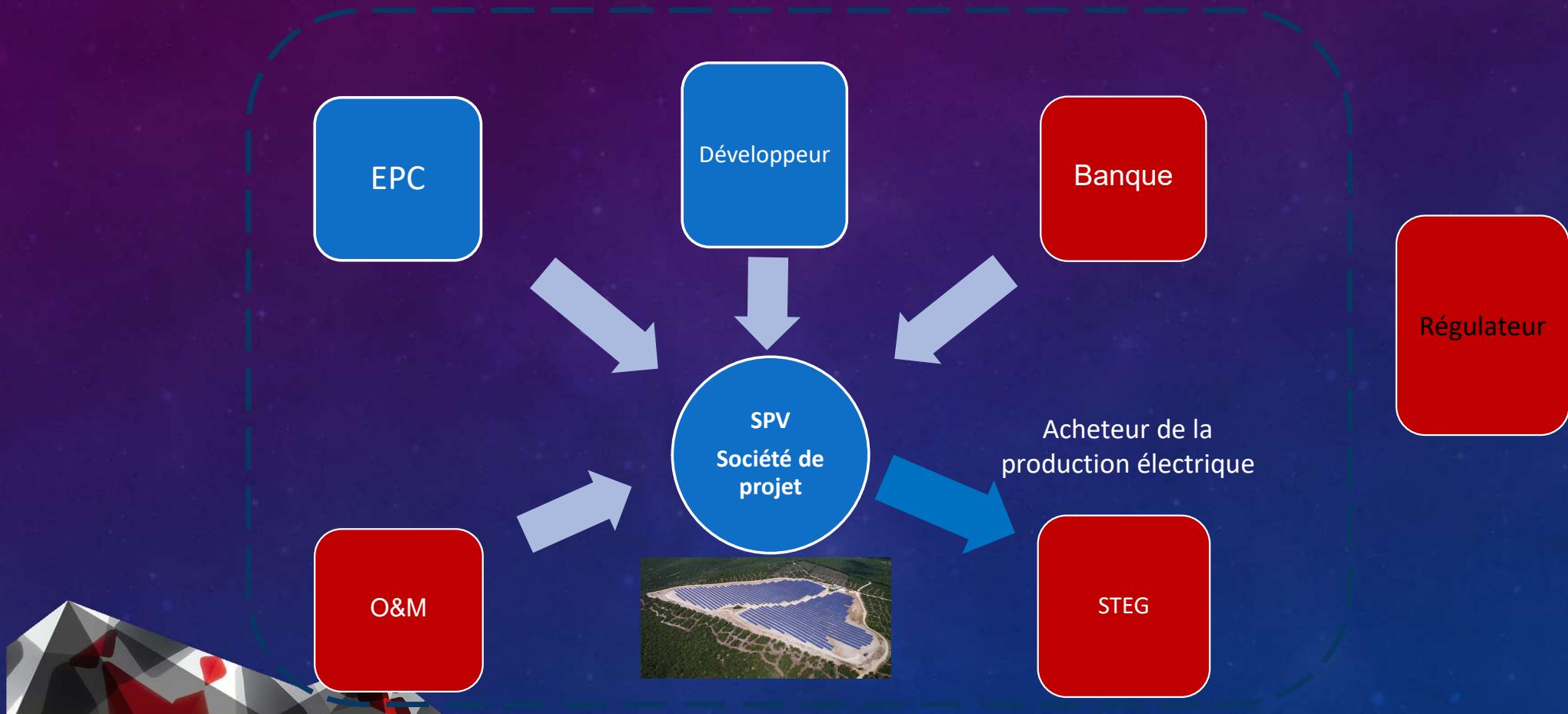
$$T_n = TD_n + \frac{TCn\epsilon}{TCR\epsilon} T\epsilon_n + \frac{TCn\$}{TCR\$} T\$_n$$

où:

- | | |
|---------------|---|
| T_n | = Tarif de l'année n en Monnaie locale |
| TD_n | = Tarif en Monnaie Locale pour l'année n |
| $TCR\epsilon$ | = Taux de change de référence de l'Euro |
| $T\epsilon_n$ | = Tarif en Euro de l'année n converti en Dinar tunisien selon $TCR\epsilon$ |
| $TCn\epsilon$ | = Parité ϵ/DT pour l'année n |
| $TCR\$$ | = Taux de change de référence du Dollar américain |
| $T\$_n$ | = Tarif en Dollar américain de l'année n converti en Dinar tunisien selon $TCR\$$ |
| $TCn\$$ | = Parité $\$/DT$ pour l'année n |

2. LES SPÉCIFICITÉS DU MARCHÉ TUNISIEN

CARTOGRAPHIE DES ACTEURS



2. LES SPÉCIFICITÉS DU MARCHÉ TUNISIEN

ACTEURS LOCAUX

- Introduction aux autorités gouvernementales: Ministère chargé de l'énergie/ Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz / Ministère des affaires foncières / Ministère de l'équipement...
- Introduction aux institutions gouvernementales: CPF(conservation de la propriété financière) / OTC(Office de la Topographie et du Cadastre) / CRDA(COMMISSARIAT REGIONAL AU DEVELOPPEMENT AGRICOLE) / OACA(Office de l'Aviation Civile et des Aéroports) / INP...
- Introduction au marché local: Partenaires / EPC / Sous-traitants...



II. MAÎTRISER LE CONTEXTE LÉGISLATIF TUNISIEN: AVANTAGES ET CONTRAINTES DE CHAQUE RÉGIME

1. Vers la transition énergétique en Tunisie

- Mix énergétique
- Mix électrique
- Objectifs à l'horizon 2030
- L'évolution du cadre réglementaire

2. Cadre réglementaire : les régimes en vigueur

- Projets portés par la STEG
- Régime de concession
- Régime d'autorisation
- Régime d'autoproduction

1. Vers la transition Energétique en Tunisie



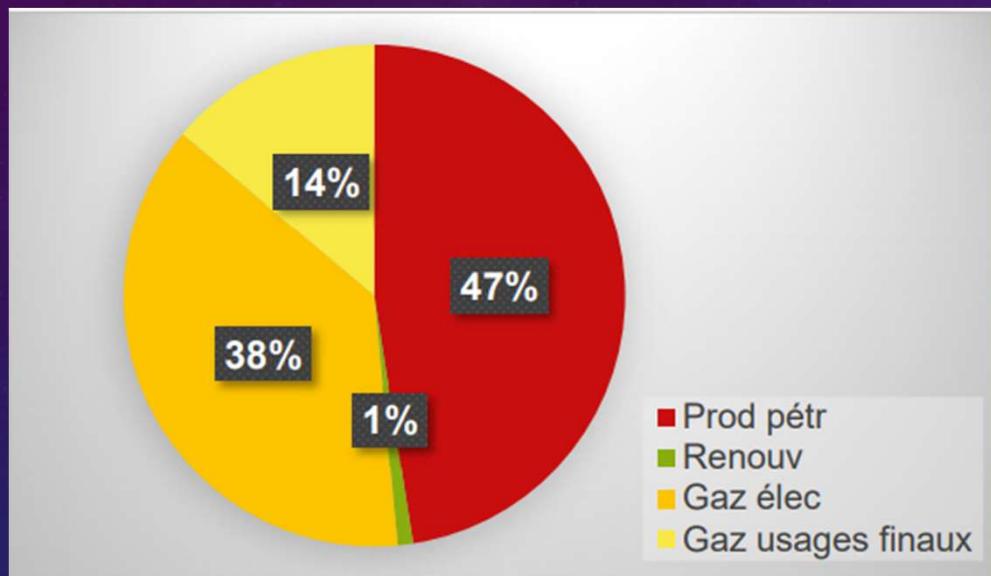
1.Vers la transition énergétique en Tunisie

La situation énergétique de la Tunisie est marquée par des ressources énergétiques limitées, une baisse de la production énergétique et un fort accroissement de la demande. Ce décalage entre la production énergétique et la demande nationale en hydrocarbures a fait apparaître un déficit au niveau du bilan d'énergie primaire qui a atteint 49% en 2018 contre 15 % en 2010

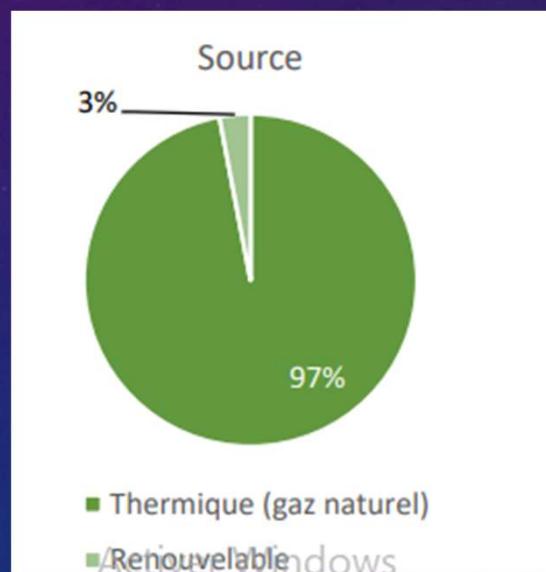


1. Vers la transition énergétique en Tunisie

Mix énergétique



Mix Electrique

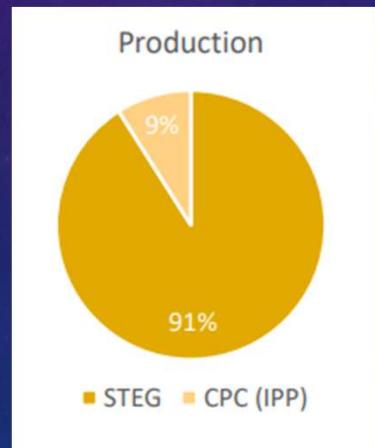


97% de l'électricité est produite à partir du gaz naturel ; la part des énergies renouvelables n'a pas dépassé les 3%.

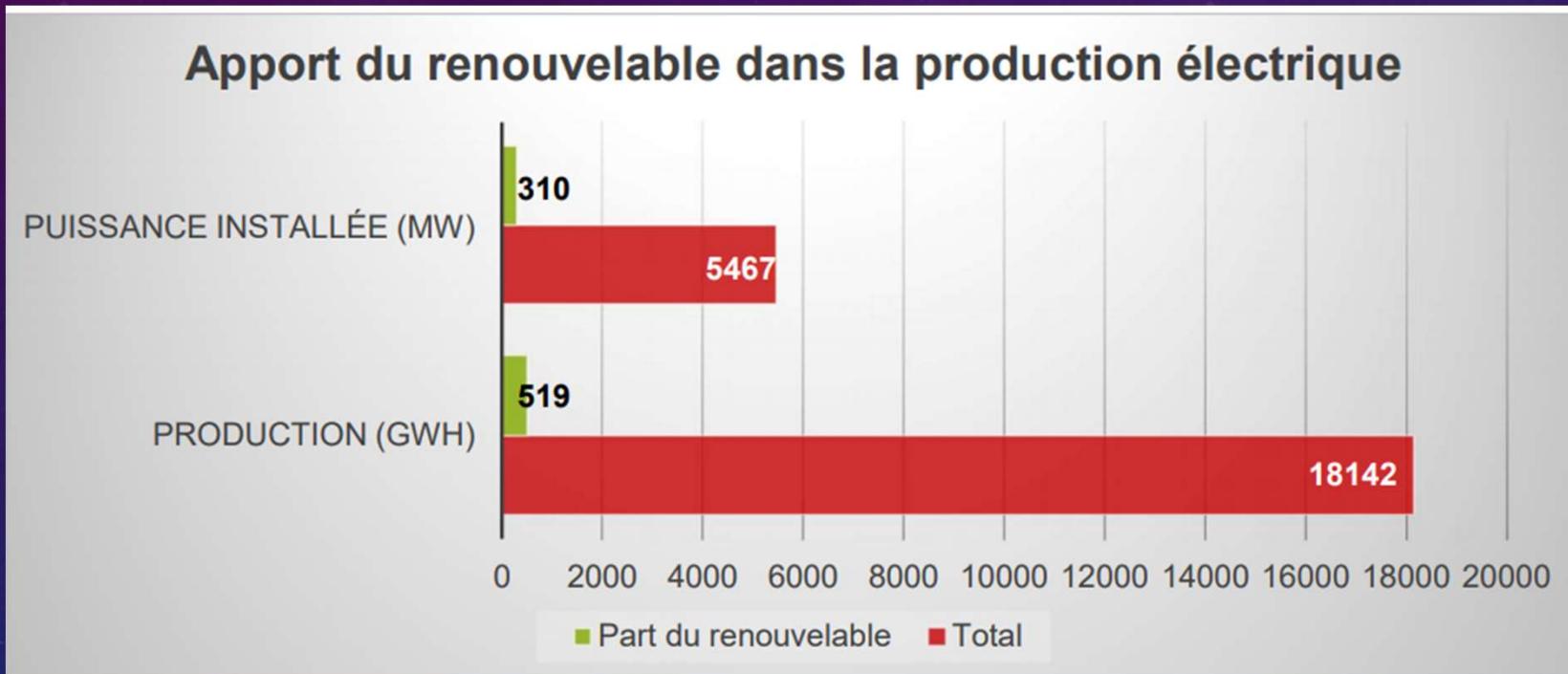
TRANSITION ENERGETIQUE AFIN DE DIVERSIFIER LE MIX ENERGETIQUE

1. Vers la transition énergétique en Tunisie

A la fin 2018, le parc de production électrique a atteint une puissance installée de 5476 MW, dont 5005 MW appartenant à la STEG et 471MW à un seul producteur privé (Carthage Power Company). La production d'électricité est passée de 12091 GWh en 2005 à 18988 GWh en 2018, enregistrant un taux de croissance annuel moyen de 4%.



1. Vers la transition énergétique en Tunisie



Nécessité de renforcer la part des ENR dans le Mix Electrique
Tunisien Objectif : 30 % de la part du renouvelable en 2030

1. Vers la transition énergétique en Tunisie

Mix énergétique

Objectifs à l'horizon 2030

Régime	Photovoltaïque	Eolien
STEG	300 MW	80 MW
Concessions	100 MW	100 MW
Autorisations	120 MW	90 MW
Autoproduction	130 MW	80 MW
Total	650 MW	350 MW

Des objectifs moyen termes ambitieux pour le renouvelable :

- **2017-2020:** 1000 MW soit 12% de la production totale d'électricité
- **2021-2025:** 1250 MW supplémentaire soit 24% de la production totale
- **2025-2030:** 1210 MW supplémentaire pour atteindre 30 %

1. VERS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

ETAT DES LIEUX DES PROJETS ANNONCÉS POUR 2017-2020

Régime	Photovoltaïque			Eolien		
	Capacité planifiée	Capacité annoncée	Capacité en exploitation	Capacité planifiée	Capacité annoncée	Capacité en exploitation
STEG	300 MWc	20 MWc	10 MWc	80 MW	0 MW	0 MW
Concessions	100 MWc	500 MWc	0 MWc	100 MW	200 MW	0 MW
Autorisations	120 MWc	210 MWc	1 MWc	90 MW	240 MW	0 MW
Autoproduction	130 MWc	25,5 MWc	4,5 MWc	80 MW	0 MW	0 MW
Total	650 MWc	755,5 MWc	15,5 MWc	350 MW	440 MW	0 MW

1. Vers la transition énergétique en Tunisie

Mix énergétique

Evolution du cadre Règlementaire

- **Février 2008:** Loi relative à la maîtrise de l'énergie
- **Septembre 2009:** Décret fixant les conditions de transport de l'électricité produite à partir des ER et de la vente des excédents à la STEG (ER et Cogénération)
- **Juin 2010:** Décision relative au prix du rachat des excédents
- **Février 2011:** 1ère Version du Contrat de transport de l'Energie électrique produite à partir d'une installation de cogénération ou d'énergies renouvelables et d'achat de l'excès par la STEG
- **Mai 2011:** Arrêté portant approbation CC de raccordement
- **Mai 2015:** Loi relative à la production de l'électricité à partir des ER

1. Vers la transition énergétique en Tunisie

Mix énergétique

Evolution du cadre Réglementaire

- **Aout 2016:** Décret d'application de la loi N°12_2015
- **Décembre 2016:** Mise en place de la CTER
- **Janvier 2017:** Avis annuel N°01/2016 2017-2020
- **Février 2017:** Grid Code / Contrat type PPA(Power Purchase Agreement) / Contrat type auto-production
- **Mai 2017:** Publication du premier appel à projet pour la réalisation de centrales photovoltaïques et éoliennes à partir de sources renouvelables.
- **Août 2018:** Révision du contrat PPA

Ci-dessous le lien pour la liste des textes de loi régissant des projets énergies renouvelables.

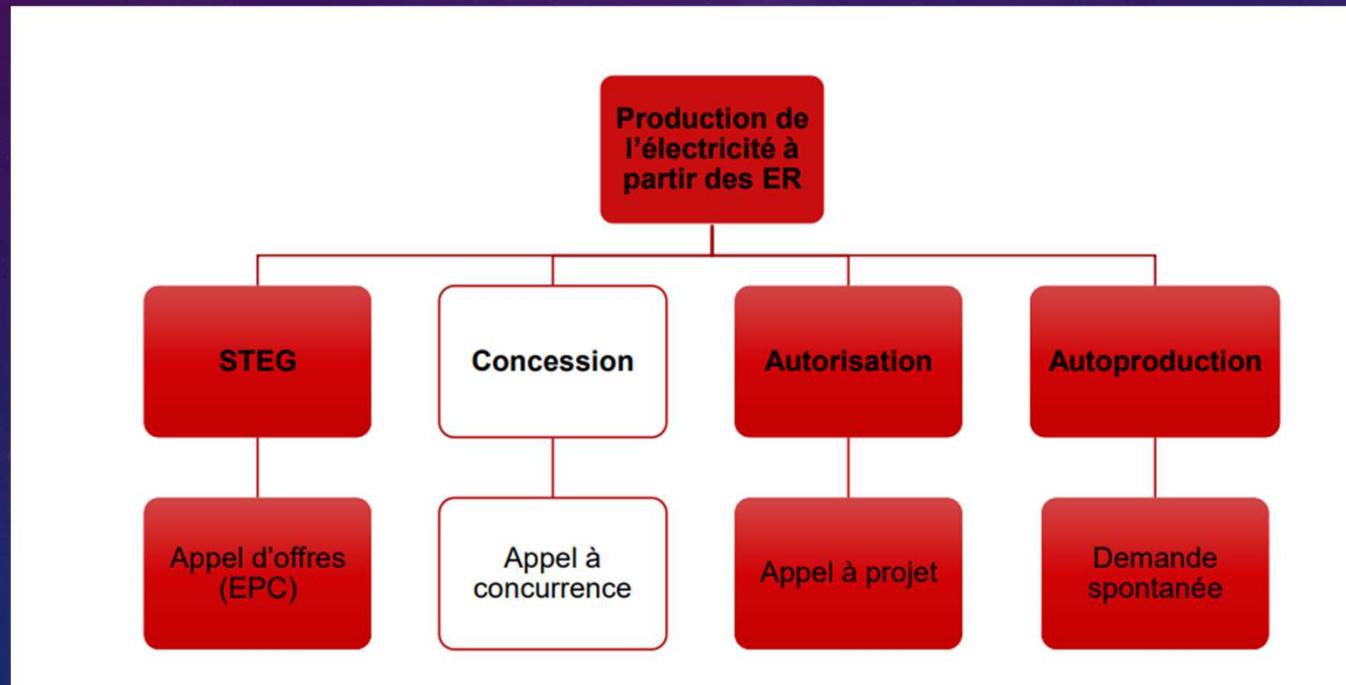
<https://www.energiemines.gov.tn/fr/cadre-reglementaire/>

2. Cadre réglementaire: les régimes en vigueur



1. Vers la transition énergétique en Tunisie

Cadre réglementaire Loi n°2015-12 du 11 mai 2015



2. Cadre réglementaire: les régimes en vigueur

Projets portés par la STEG

- Objectif de 300 MWc de centrales PV à l'horizon 2020
- Phase de développement gérée par la STEG (choix du site, raccordement, études techniques et environnementales, financement)
- Construction à travers de contrats EPC (Engineering, Procurement, Construction) passés via des appels d'offres internationaux
- 2 appels d'offres lancés depuis 2016 (2 x 10 MWc à Tozeur)

Avantages :

- Toute la phase de développement est à la charge de la STEG
- Pas de financement de la part de l'EPC

Inconvénients :

- Projet destinés uniquement aux EPC
- Pas d'appels d'offres récurrents

2. Cadre réglementaire: les régimes en vigueur

Régime des concessions

- Objectif de 500 MWc de centrales PV à l'horizon 2020
- Mise à disposition du site par l'état
- Développement, Financement, Construction, et Exploitation à la charge du développeur
- Sélection des lauréat via un appel d'offres (tarif d'achat le plus bas)
- Sélection de 3 sociétés pour la réalisation des centrales solaires en juillet 2019 : La capacité annoncées sera réparties sur 5 sites ayant des puissances allant de 50 MWc à 200 MWc pour un total de 500 MWc.

Avantages :

- Projets de grande taille: économie d'échelle
- Pas de négociation foncière de terrain

Inconvénients :

- Projets de grande taille: Financements lourds
- Nombre de projets limités

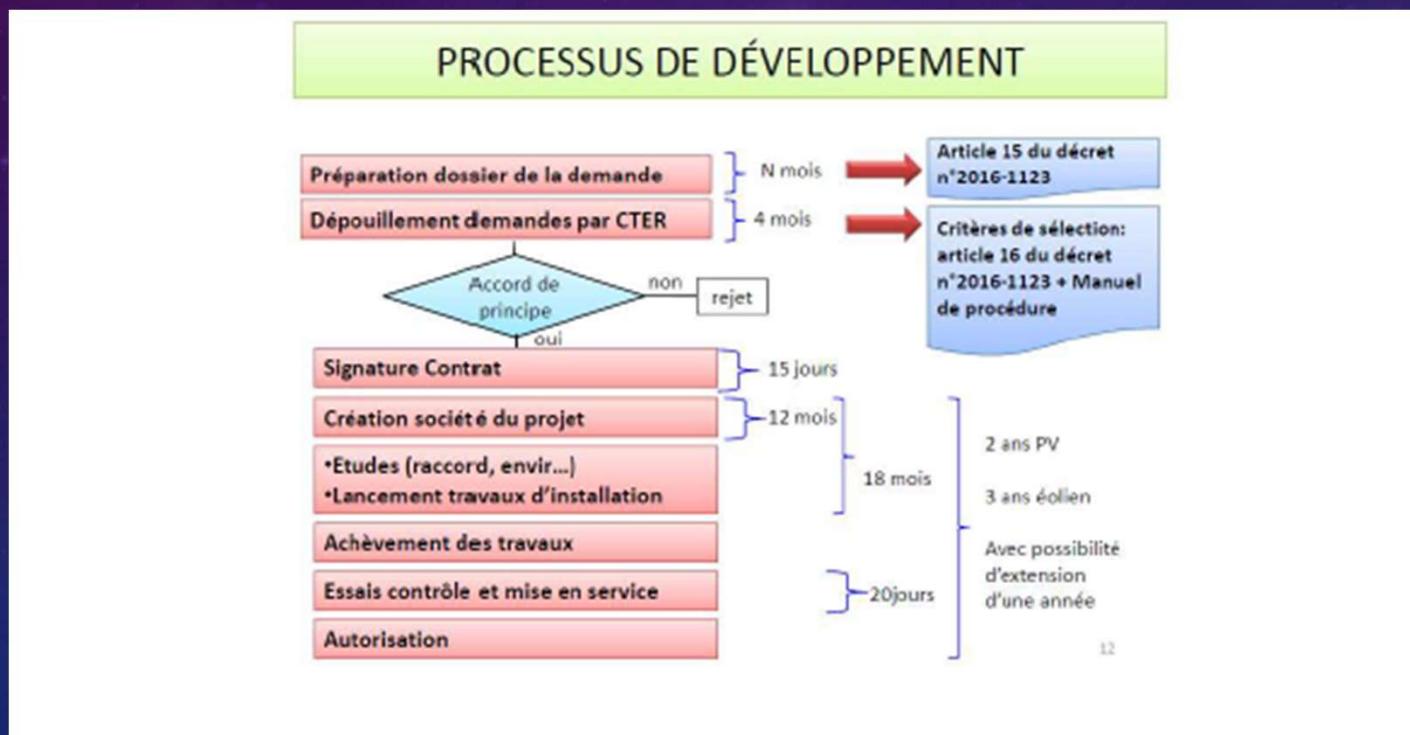
2. Cadre réglementaire: les régimes en vigueur

Régime des autorisations

- Objectif de 120 MWc de centrales PV à l'horizon 2020
- Le porteur de projet prend à sa charge :
 - Prospection foncière et identification de site
 - Développement (études techniques et environnementales, études de raccordement, mesures et étude du gisement, chiffrage du CAPEX et de l'OPEX...) pour obtenir l'ensemble des autorisations
 - Financement (élaboration du Business Plan, recherche de financement, négociation avec les banques et bailleurs de fonds)
 - Construction et exploitation de la centrale
- Sélection des investisseurs selon le tarif de rachat le plus bas lors d'un « Appel à projets »
- 3 rounds d'appels à projets achevées, 4ème round en cours

2. Cadre réglementaire: les régimes en vigueur

Régime des autorisations



2. CADRE RÉGLEMENTAIRE: LES RÉGIMES EN VIGUEUR

RÉGIME DES AUTORISATIONS : DOSSIER DE DEMANDE À PRÉPARER

Informations demandées	Documents / Formulaires requis
Déclaration de la demande	Formulaire 1: Déclaration de la demande
Tarif de vente	Formulaire 2: Tarif de vente proposé par le porteur de projet
Identification du Porteur du Projet	Doc 1: RC Doc 2: CIN Formulaire 3: Déclaration du Chef de file et autres membres du consortium Formulaire 4: Description du Consortium Formulaire 5: Renseignement à fournir par les membres du Consortium
Expérience du porteur de projet	Doc3: Expérience dans les ENR: - Expérience dans le développement - Expérience dans la construction - Expérience dans l'exploitation et la maintenance de centrales élec Doc 4: Assises Financières pour les personnes physiques et Etats financiers pour les personnes morales Doc 5: Expérience en financement en capitaux propres et en dettes

2. CADRE RÉGLEMENTAIRE: LES RÉGIMES EN VIGUEUR

RÉGIME DES AUTORISATIONS : DOSSIER DE DEMANDE À PRÉPARER

Informations demandées	Documents / Formulaires requis
Identification du site du projet	<p>Doc 7: Carte d'implantation pour les projets éoliens</p> <p>Doc 8: Documents prouvant l'allocation du site au projet (promesse ou contrat de bail, titre de propriété...)</p>
Etude technique	<p>Doc 9: Etude technique précisant notamment:</p> <ul style="list-style-type: none">- La source de l'énergie renouvelable- Le facteur de charge du site du projet- La puissance nominale du projet- La production annuelle attendue (en kWh/an)- Les informations techniques détaillées des équipements
Etude économique et financière	<p>Doc 10: Etude économique et financière:</p> <ul style="list-style-type: none">- CAPEX- Mode de financement- OPEX
Intégration locale	<p>Doc 11: Intégration locale</p>
Personnel du projet	<p>Doc 12: Création d'emploi</p>
Impact environnemental et sécurité	<p>Doc 13: Etude préliminaire d'impact sur l'environnement et la sécurité</p>
Planning de réalisation	<p>Doc 14: Planning détaillé de réalisation des travaux</p>
Raccordement de la centrale	<p>Doc 15: Etude préliminaire de raccordement</p> <p>Doc 16: Cahier des charges raccordement</p>

2. CADRE RÉGLEMENTAIRE: LES RÉGIMES EN VIGUEUR

RÉGIME DES AUTORISATIONS : MÉTHODE DE NOTIFICATION

Notation des dossiers	Max
1. Expérience du porteur de projet	35
1.1. Expérience dans le développement de projets de même technologie et au moins de Taille Comparable à celle du projet.	10
1.2. Expérience dans la construction de centrales de production d'électricité à partir des énergies renouvelables	7,5
1.3. Expérience dans l'exploitation et la maintenance de centrales de même technologie et au moins de taille comparable à celle du projet proposé	7,5
1.4. Expérience en mobilisation des capitaux propres et des emprunts	10
2. Consistance du projet proposé	65
2.1. Source de financement du projet:	15
2.2. Site du projet: démarche de mise à disposition du site	10
2.3. Etude Technique	7
2.4. Intégration industrielle locale du projet	15
2.5. Création d'emploi	10
2.6. Respect du projet aux règles et normes techniques relatifs à la sécurité et à la protection de l'environnement	8
Total	100

2. Cadre réglementaire: les régimes en vigueur

Régime de l'autoconsommation

1. Objectif de 130 MWc de centrales PV à l'horizon 2020

2. But : limiter la consommation des secteurs industriel et tertiaire

3. Avantages:

- Candidature sur demande spontanée (pas d'appel d'offres)
- Diminution de la facture d'énergie et maîtrise de son coût sur le long terme

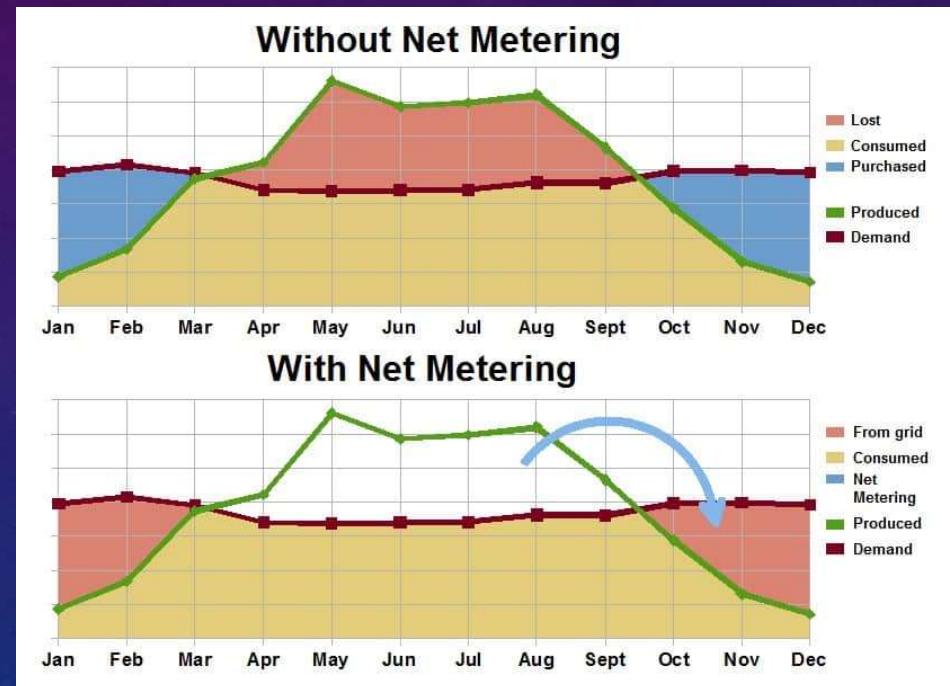
4. Inconvénients:

- Stabilité de mécanisme de financement (subventions)
- Difficulté de financement de la part des industriels
- Délais assez long d'instruction des dossiers

2. CADRE RÉGLEMENTAIRE: LES RÉGIMES EN VIGUEUR

RÉGIME DE L'AUTOCONSOMMATION

- Raccordement en basse tension :
 - Puissance du projet limitée à la puissance souscrite
 - Système de Net-metering : la production est soustraite de la consommation (compensation directe sur la facture d'électricité).
- Raccordement en moyenne et haute tension :
 - Système de Net-billing avec possibilité de transporter l'électricité via le réseau + vente de l'excédent limité à 30% de la production annuelle (tarif fixé par arrêté).
 - Facturation mensuelle avec un bilan annuel et une facture de régularisation en fin d'année



2. Cadre réglementaire: les régimes en vigueur

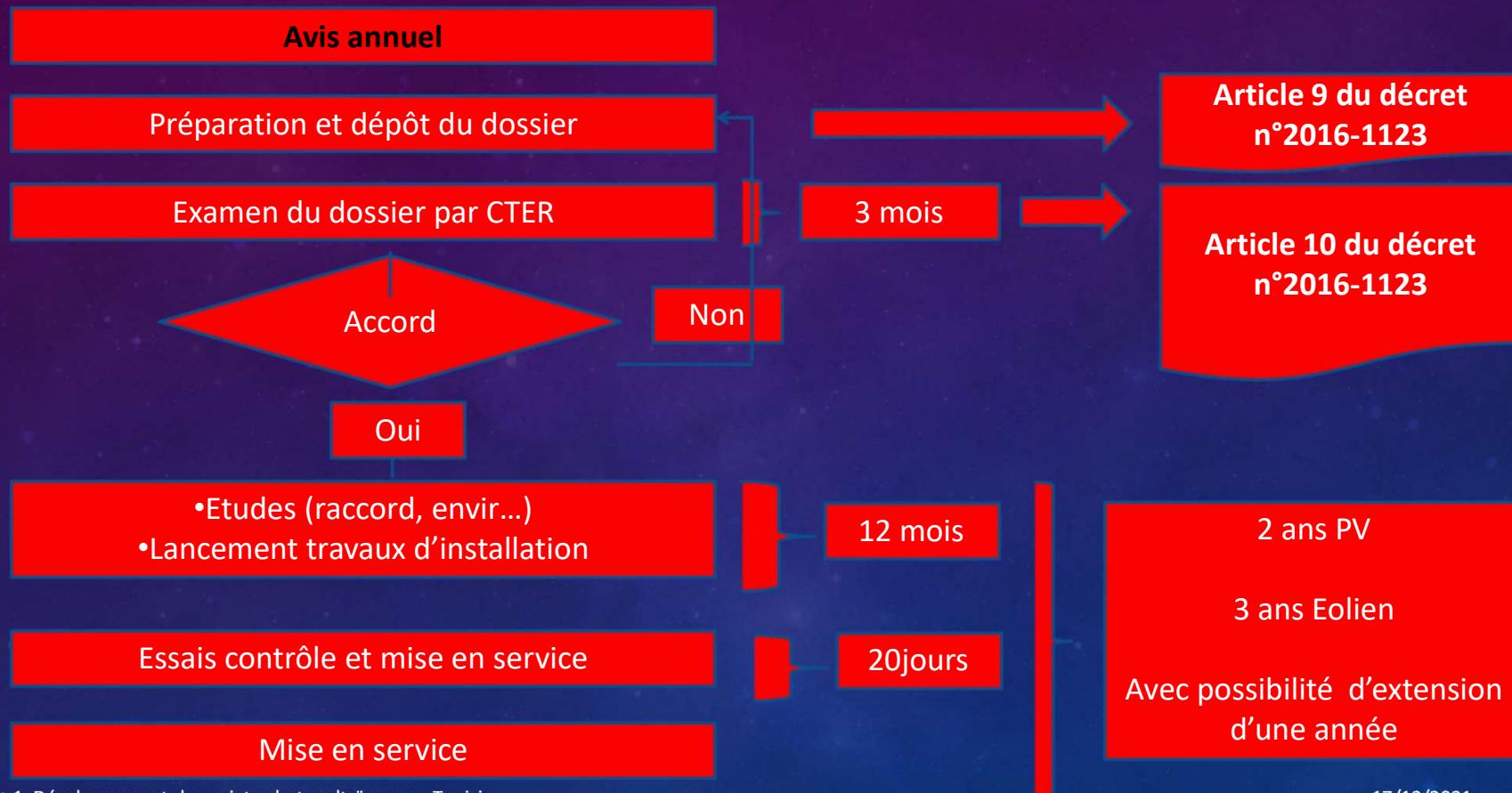
Régime de l'autoconsommation

Tarifs de revente de l'excédent selon arrêté de 2014 (cas du raccordement MT/HT)

Plage horaire		Prix d'achat de l'électricité	Prix de revente à la STEG
Uniforme	TND/kWh	0,251	
Jour		0,240	0,115
Nuit		0,188	0,087
Pointe matin (été)		0,366	0,182
Pointe soir		0,329	0,168
Redevance puissance	TND / kWc	11	
Taxe transport	TND / kWh	0,007	

2. CADRE RÉGLEMENTAIRE: LES RÉGIMES EN VIGUEUR

RÉGIME DE L'AUTOCONSOMMATION



2. CADRE RÉGLEMENTAIRE: LES RÉGIMES EN VIGUEUR

RÉGIME DE L'AUTOCONSOMMATION

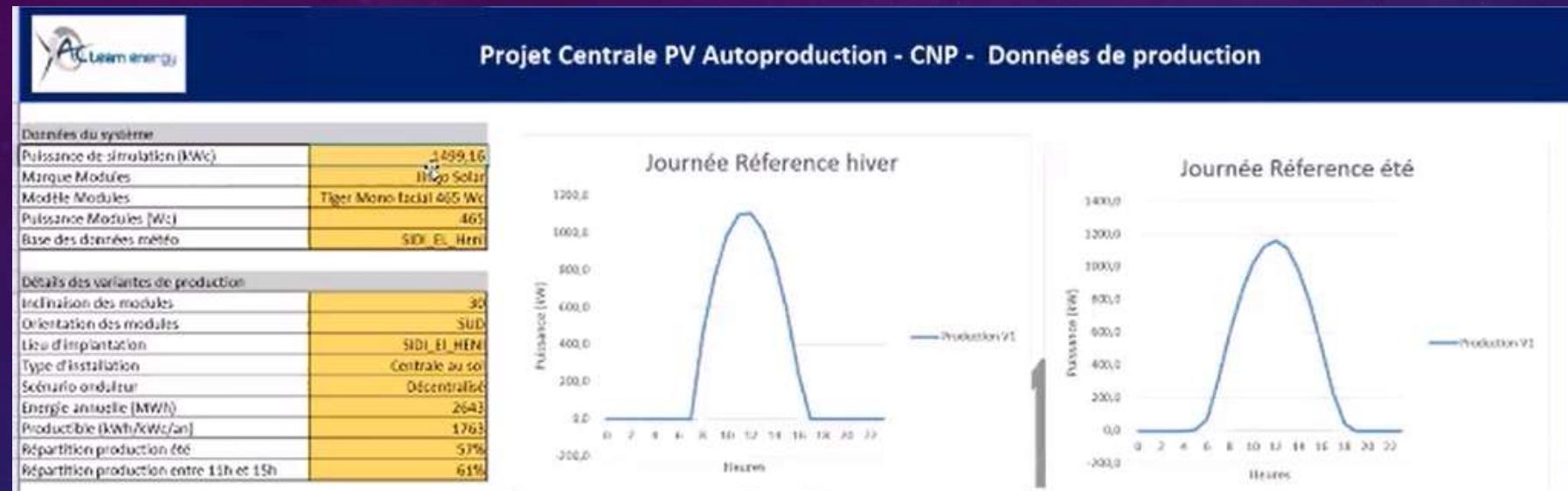
Porteur du projet	Société
Industrie	XXX
Consommation annuelle	25 GWh
Coût moyen de l'électricité	251 millimes/kWh
Puissance de la centrale dimensionnée	10 MWc
Productible	1692 h
Production annuelle moyenne	16,9 GWh
Taux d'autoconsommation	74 %
CAPEX projet	25 M TND
OPEX projet	525 kTND/an
Retour sur investissement	10 ans



2. CADRE RÉGLEMENTAIRE: LES RÉGIMES EN VIGUEUR

RÉGIME DE L'AUTOCONSOMMATION

Capex: Les dépenses d'investissement concernant les immobilisations
OPEX: Les dépenses d'exploitation



La puissance nominale : 1500KWc

Entre midi et 14h : max de production

La centrale PV produit moins de sa puissance unitaire : pertes!!!

III. LE DÉVELOPPEMENT DE PROJETS PV: IDENTIFIER ET ANALYSER UN SITE EN FONCTION DE CONTRAINTES PRÉDÉFINIES

1. Cycle de vie d'un projet PV

2. Identification des zones favorables

Etapes principales

■ Analyser les contraintes

■ Définir les zones d'études

■ Exemple : Tozeur

Développement de projet

■ Prospection foncière

■ Travaux topographiques

■ Engineering de principe

■ Etudes techniques et environnementales

■ Etude financière

1. CYCLE DE VIE D'UN PROJET PV

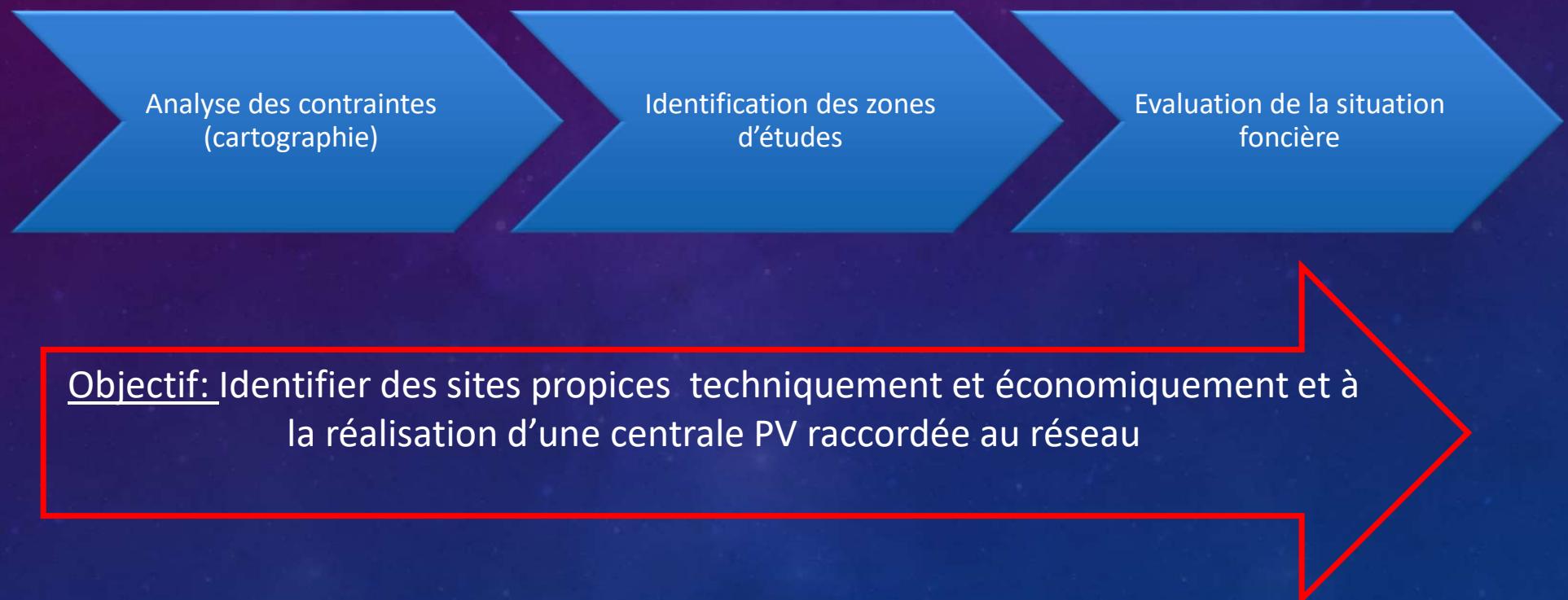


1. CYCLE DE VIE D'UN PROJET PV



1. CYCLE DE VIE D'UN PROJET PV

ETAPES PRINCIPALES



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

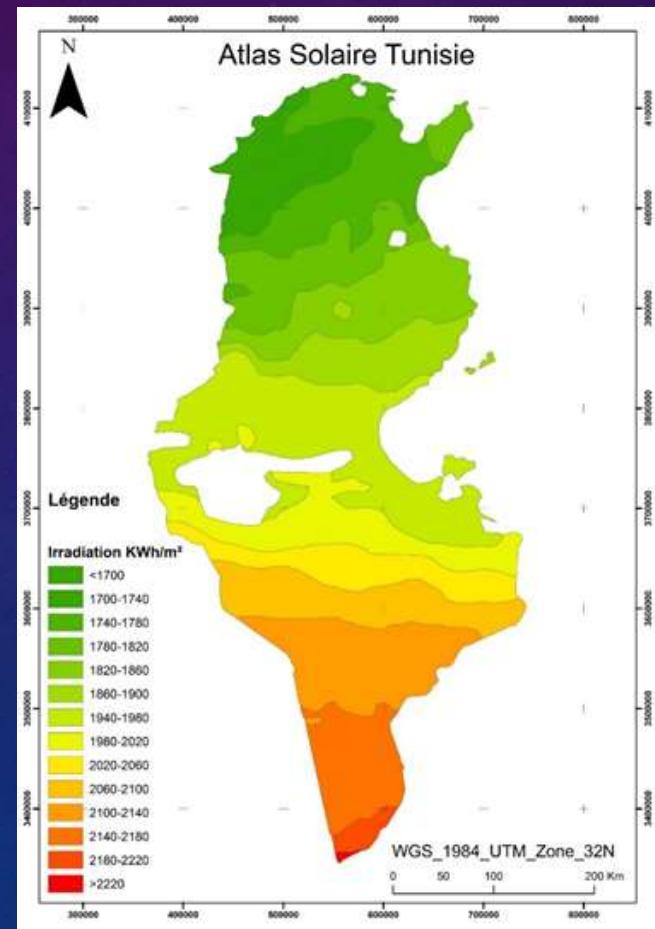
ANALYSE DES CONTRAINTES

- **Ensoleillement**
- **Servitudes:**
 - Aéroport
 - Ports
 - Barrages
 - Aqueducs
 - Zones urbaines
- **Raccordement (proximité des postes de raccordements de la STEG)**
- **Géotechniques**
- **Foncier**

2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

ANALYSE DES CONTRAINTES: CARTE D'ENSOLEILLEMENT

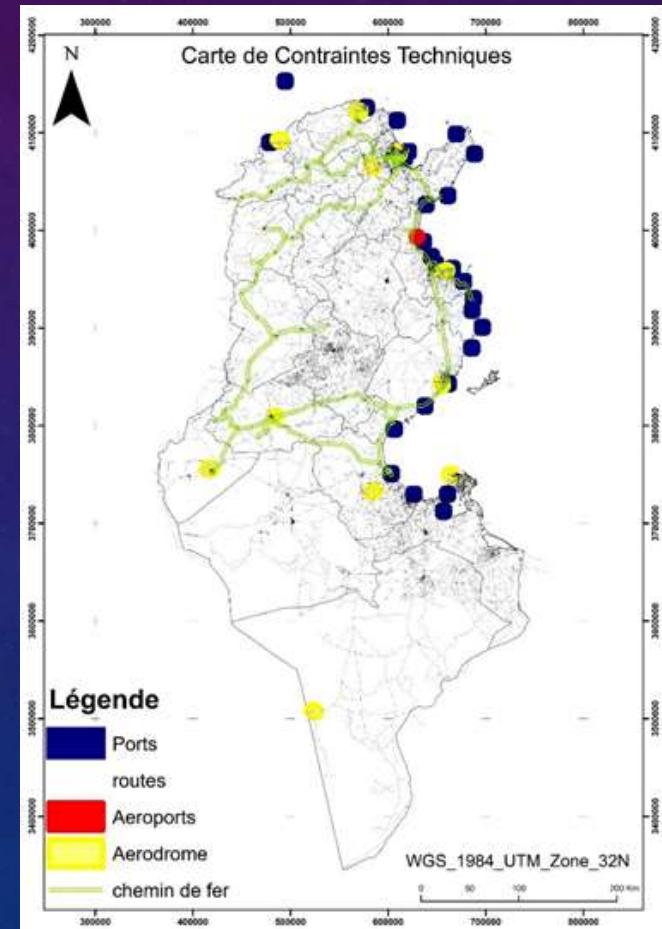
- Variables à considérer :
 - Irradiation solaire
 - Pertes par encrassement (sable)
 - Variation de la ressource
- A comparer :
 - Bases de données météo
 - Centrales en service
- *Source : ANME*



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

ANALYSE DES CONTRAINTES: CARTE DES SERVITUDES

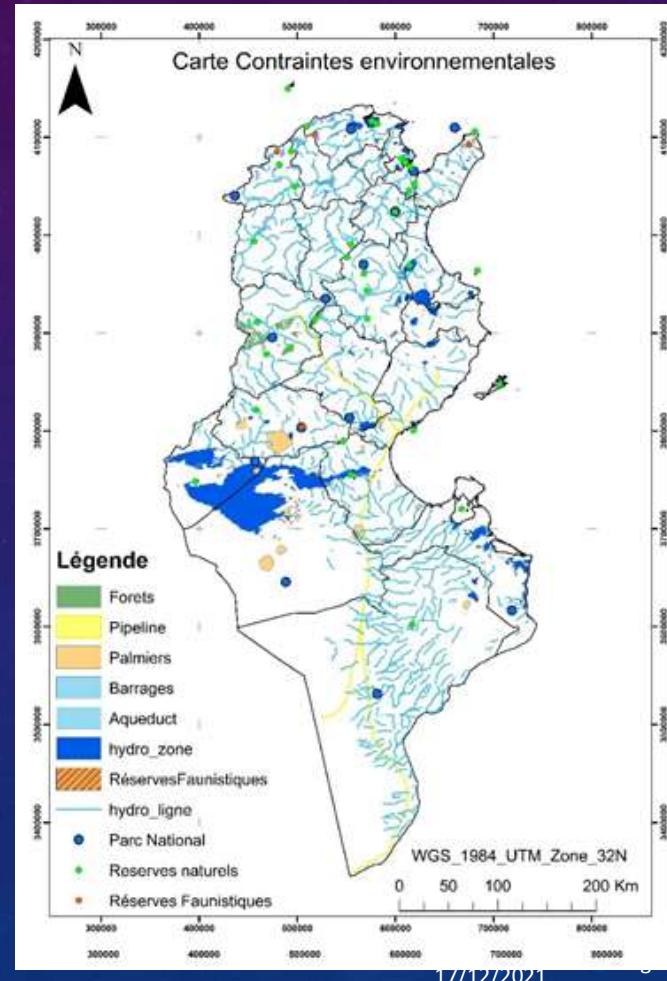
- Variables à considérer :
 - Accessibilité du site
 - Plans d'urbanisme
 - Projet futurs (autoroute, zone urbaine, zone agricole...)
 - Réflexion des irradiations à proximité des aéroports
- *Source : OACA / Ministère de la défense, Ministère de l'agriculture, des ressources hydrauliques et de la pêche*



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

ANALYSE DES CONTRAINTES: ENVIRONNEMENT

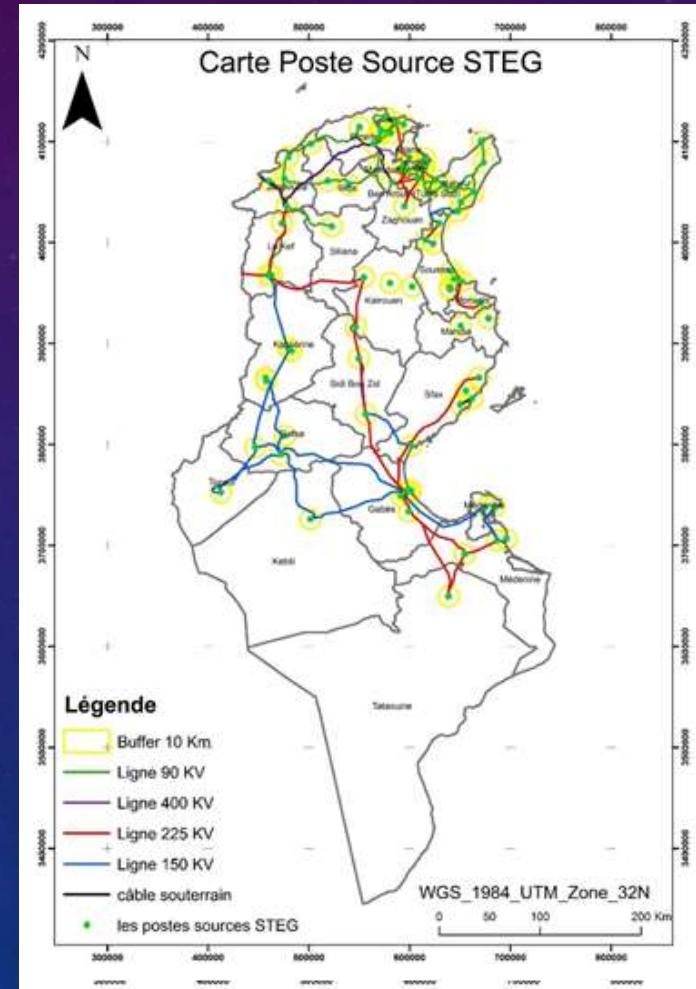
- Variables à considérer :
 - Les zones protégés (parcs nationaux, réserves naturelles)
 - Les projets agricoles d'envergure (Palmiers, oliviers, forêts...)
- *Source : ANME*



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

ANALYSE DES CONTRAINTES: RACCORDEMENT

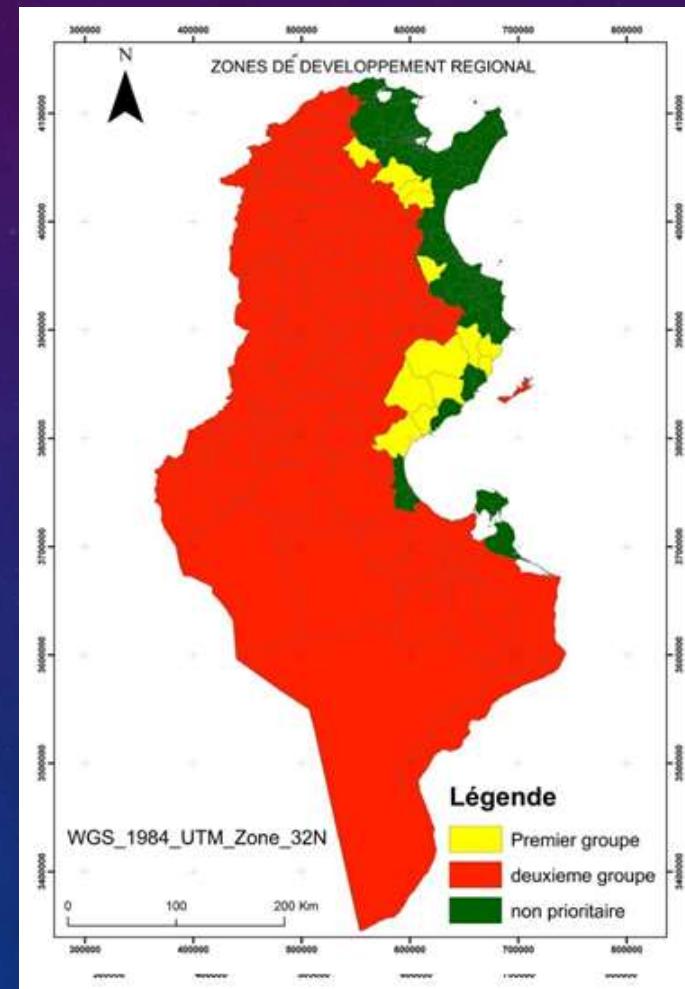
- Variables à considérer :
 - Eloignement des postes de raccordement (0 – 5 Km)
 - Proximité des lignes MT/HT
 - Saturation des postes
- Nécessité de réaliser une étude de raccordement !
- *Source : STEG*



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

ANALYSE DES CONTRAINTES: FISCALITÉ

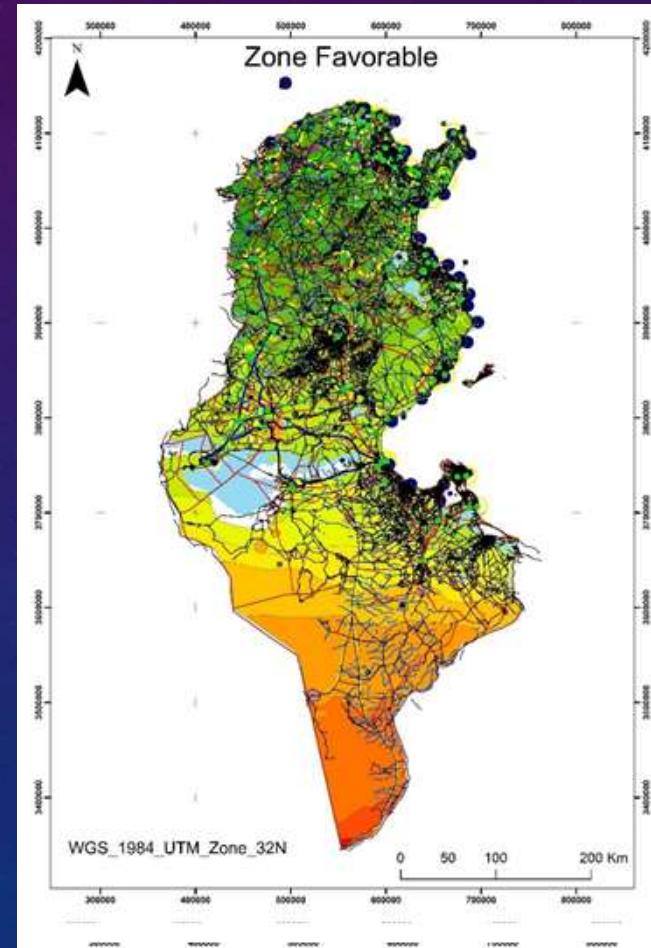
- Avantages fiscaux pour les investissements réalisés en Zone de Développement Régional
 - impact sur le tarif
 - impact sur la « qualité » du dossier (création d'emploi et d'activité en zone défavorisée)
- *Source : Ministère du développement, de l'investissement et de la coopération internationale*



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

DÉFINIR LES ZONES D'ÉTUDE

- Définition de la zone d'étude en ajoutant les couches de contraintes
-
- Evaluation de la situation foncière
- Sécurisation foncière



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

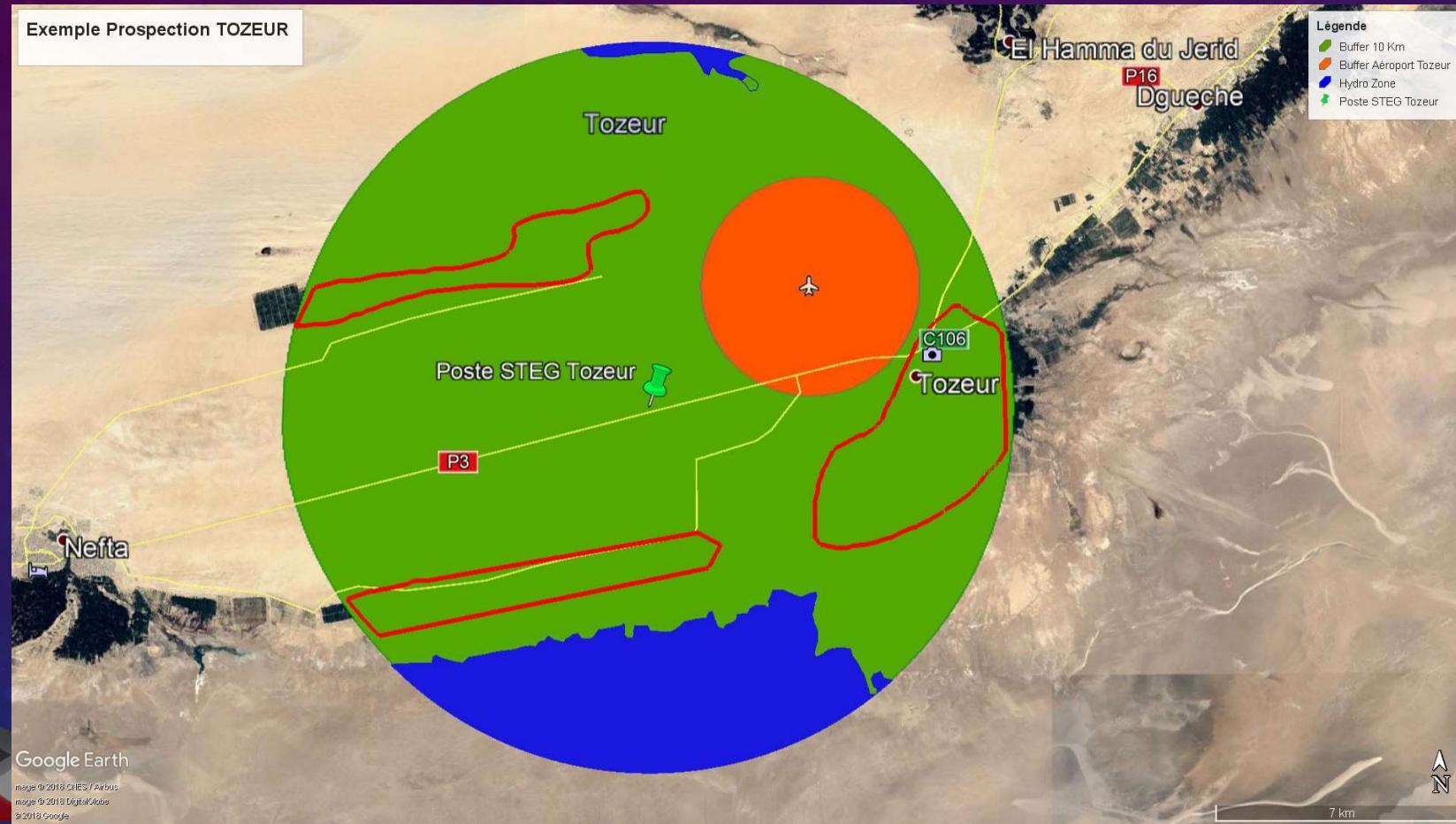
EXEMPLE DE TOZEUR

- Irradiation Solaire:
 - 1980 – 2020 kWh/an
- Contraintes techniques:
 - Aérodrome
- Contrainte Economique:
 - ZDR 2ème Groupe
- Contrainte Environnementale:
 - Zone Hydro (Chatt Jrid)
 - Palmiers



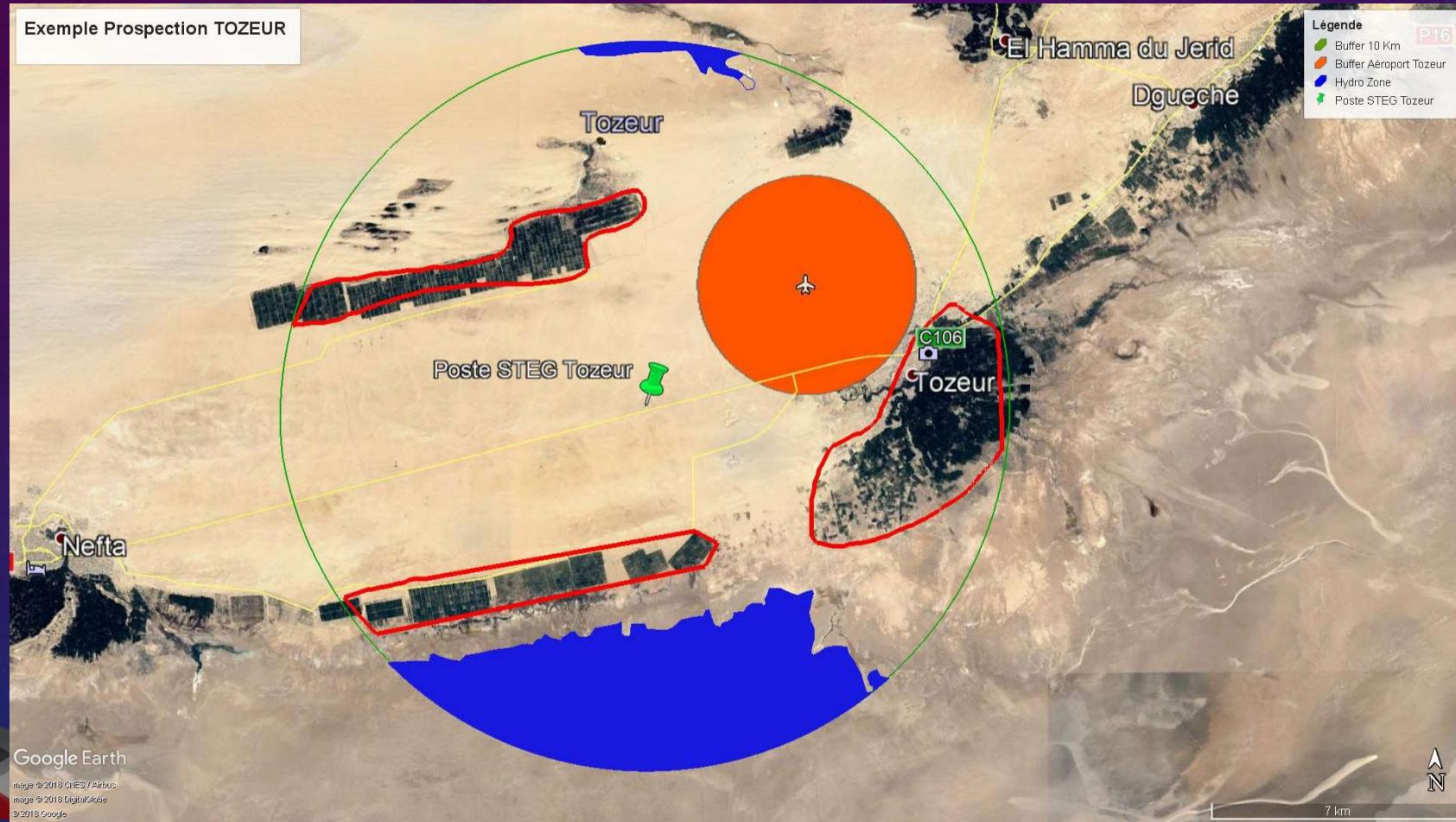
2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

EXEMPLE DE TOZEUR: ANALYSE DES CONTRAINTES



2. IDENTIFICATION DES ZONES FAVORABLES

EXEMPLE DE TOZEUR: ZONE FAVORABLE



3. Développement de projet



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

PROSPECTION FONCIÈRE

Points à encadrer

- Terrain titrés
- Nombre limité de propriétaires (faciliter la négociation)
- Cas de promesse de location (Points clés à négocier)
 - Durée de la période de développement (5 ans renouvelables)
 - Réservation d'espace nécessaire pour le projet (1,5 Ha/MW)
 - Honoraires de location (Attention à la Spéculation !)

Titre de propriété = critère de bancabilité de projet rédhibitoire !

Objectif: Assurer l'allocation du site au projet

3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

PROSPECTION FONCIÈRE: CRITÈRES GÉNÉRAUX

- Prospection: Identification de zones favorable
- Identification des parcelles cadastrés: Office de la topographie et du cadastre
- Définir les surfaces nécessaire pour l'implantation du projet: Tenir compte de:
 - L'implantation de la centrale (limiter les pertes par ombrage)
 - VRD
 - Position du PDL
 - Clôtures
- Vérifier l'état foncier du terrain (Titre de propriété, titre foncier): Conservation de la Propriété foncière
- Vérifier que le terrain n'est pas dans l'indivision (terrains privés)
- Vérifier que le terrain ne fait pas l'objet de litige
- Identifier la liste des propriétaires

3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

PROSPECTION FONCIÈRE: CAS DES TERRAINS PUBLICS

- Décembre 2017: publication du manuel de procédure de soumission des demandes d'occupation temporaire des terrains publics pour la réalisation des projets de production d'électricité à partir des énergies renouvelables
- Critères et conditions d'attribution des terrains du domaine de l'état:
 - Concordance de la surface du terrain à la taille du projet
 - Définition au préalable du régime auquel s'inscrit le projet dans le terrain (autorisation ou autoconsommation)
 - Définition au préalable de la technologie (Eolien ou PV)
 - Interdiction de céder le projet à un tiers investisseur ou développeur
 - Possibilité d'attribuer une autorisation d'étude de site à plusieurs développeurs si la surface le permet (le lauréat à l'appel à projet le moins disant se chargera de la réalisation)
 - Durée maximale d'attribution des terrains: 2 ans

3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

PROSPECTION FONCIÈRE: COMPARAISON TERRAIN PUBLIC/PRIVÉ

Terrain	Public	Privé
Avantages	<ul style="list-style-type: none">▪ Transparence de procédure▪ Pas de négociation de redevance▪ Pas de risque de litige	<ul style="list-style-type: none">▪ Sécurité foncière (élimination de la concurrence)▪ Garanti de terrain sur 25 ans (bail de location)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">• Concurrence• Pas de sécurité foncière pour la phase construction et exploitation	<ul style="list-style-type: none">▪ Disponibilité de terrain purgée de tout recours▪ Difficulté de négociation (spéculation des prix)

3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES

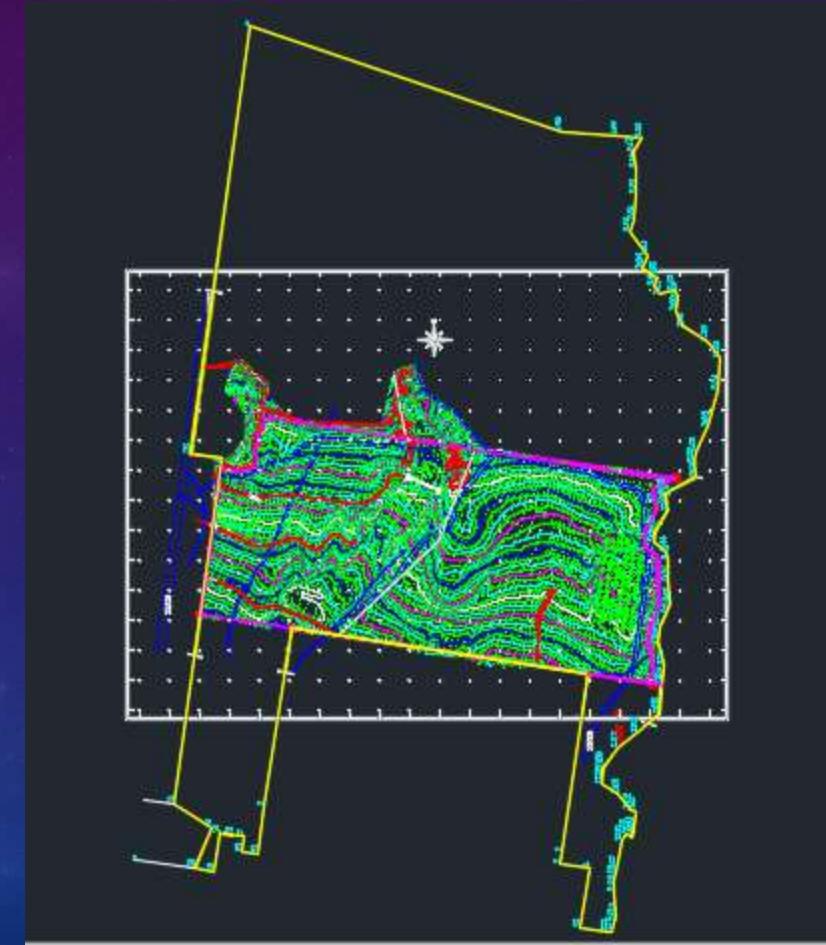
- Contraintes topographiques: Eviter les terrains accidentés
 - Courbes de niveau espacés
 - Limiter les travaux de terrassement
 - Limiter les pertes par ombrage

Objectif: Définir la meilleure implantation d'un terrain identifié



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES

- Travaux topographique:
 - Bornage
 - Plan côté



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

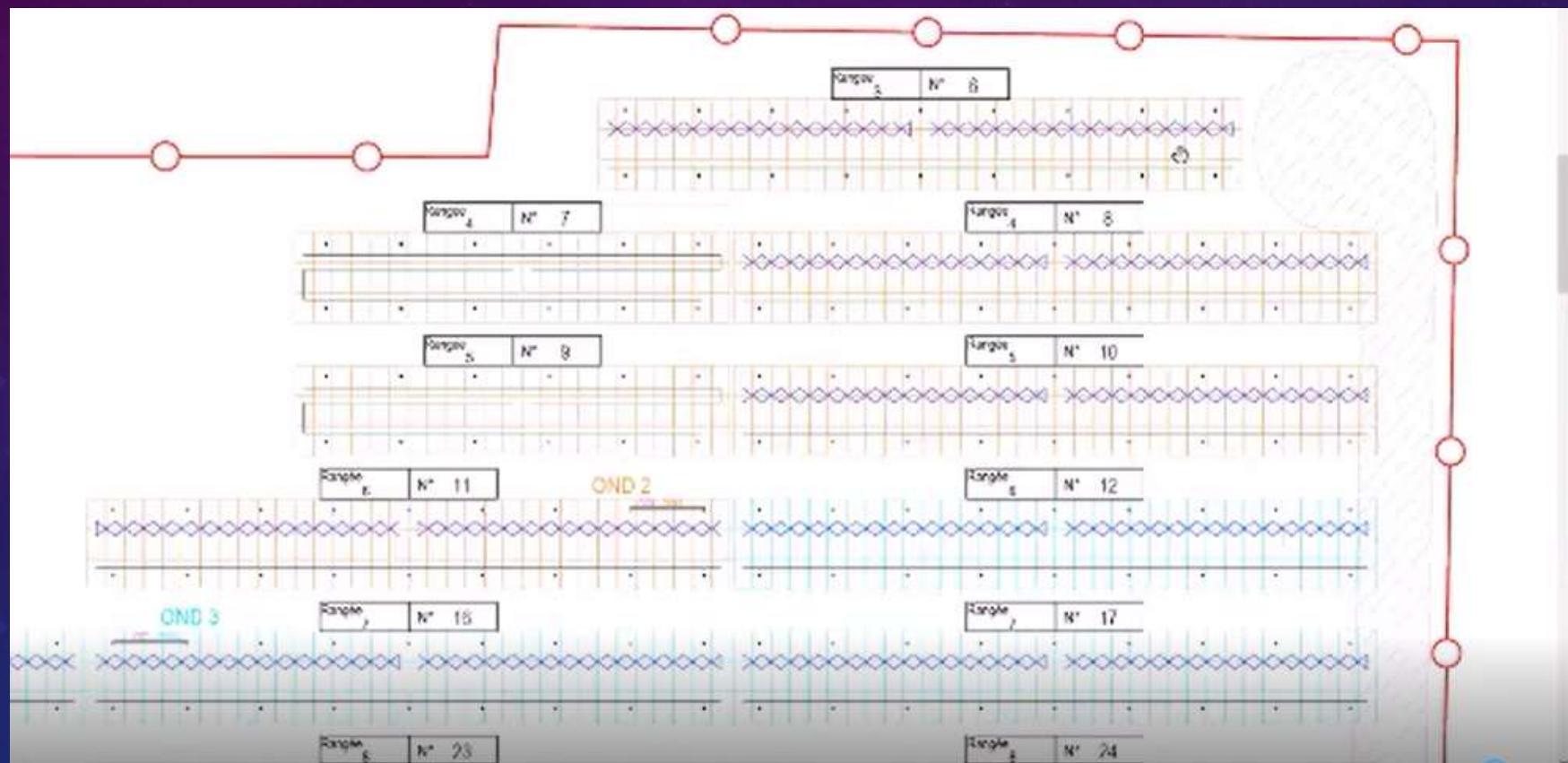
INGÉNIERIE DE PRINCIPE

- Dimensionnement de la centrale
 - Calepinage
 - Plan masse



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

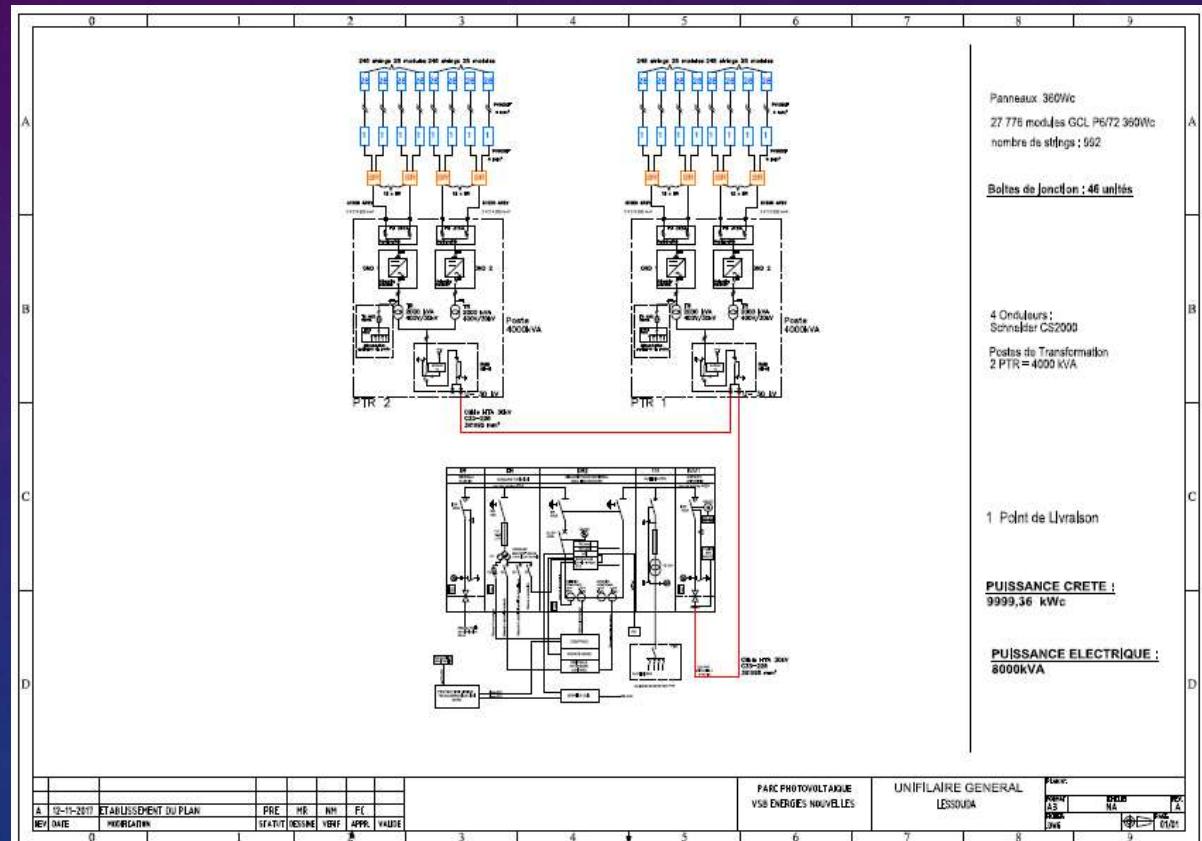
INGÉNIERIE DE PRINCIPE



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

INGÉNIERIE DE PRINCIPE

■ Schéma unifilaire



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

INGÉNIERIE DE PRINCIPE

■ Etude de productible

- Evaluation de l'ensoleillement
- Choix des modules
- Choix du système de fixation
- Choix des onduleurs
- Inclinaison
- Ombrages

Productible net

P50: xxx h
P90: xxx h



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

ETUDES TECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

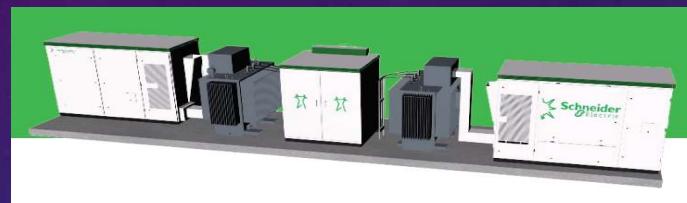
- Etude géotechnique: définir la nature du sol et ses contraintes
 - Terrain marécageux
 - Sol instable
 - Risque de rejet du projet pour contrainte environnementale
- Etude des fondations: définir et dimensionner le système de fondation le plus adéquat au projet (pieux battus, longrines...)
- Etude d'impact social et environnemental: évaluer l'impact du projet sur la région de point de vue environnemental (faune et flore, nuisance, paysage) et social (création d'emploi, sensibilisation de la collectivité locale...)

3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

CHIFFRAGE DE LA SOLUTION TECHNIQUE

- **Chiffrage de la fourniture:**

- Modules
- Structure
- PDL / PTR
- Onduleurs



- **Chiffrage des travaux**

- Lot terrassement / VRD
- Lot GC (fondations)
- Lot Elec



3. DÉVELOPPEMENT DE PROJET

INGÉNIERIE FINANCIÈRE

■ Elaboration du Business Plan

- Compiler les consultations et les données d'entrée du chiffrage
- Définir le CAPEX et l'OPEX du projet
- Appliquer les hypothèses de financement (maturité des projets, période de grâce, taux d'intérêt...)

Module 2: Ingénierie des centrales photovoltaïques raccordées au réseau moyenne tension

INGENIERIE DES CENTRALES PV RACCORDEES AU RESEAU MT

SOMMAIRE

- Maitriser les spécificités de chaque type de projets solaires
- Les principaux organes des centrales PV
- Maitriser les principes de base d'une implantation
- Utilisation de PVsyst
- Réaliser des plans techniques
- Calculer des métrés relatifs à une implantation
- Maitriser les Choix technologiques adaptés au contexte Tunisie



MAÎTRISER LES SPÉCIFICITÉS DE CHAQUE TYPE DE PROJET SOLAIRE

Différents principes Photovoltaïques

Autoconsommation	Autoconsommation avec injection surplus	Injection Réseau
production = consommation	production = consommation + injection réseau	production = injection réseau
Recherche de la production optimale en fonction de la consommation	Compromis entre production vis-à-vis de la consommation et rentabilité	Recherche du meilleur LCOE possible

LCOE = Levelized Cost of Energy

C'est-à-dire Prix de revient moyen de l'électricité par l'unité de production

LCOE :La meilleure technique pour une production maximale. Dans un site donné c'est chercher la solution technique qui nous permet de vendre l'électricité la moins chère



PROJETS GRANDES TAILLES : CENTRALES AU SOL

- Contraintes administratives, environnementales, d'espaces, agricoles, techniques
- Champ PV au sol : Haute Puissance / HTA ou HTB
- Nécessite des travaux préparatoires plus conséquents
- Terrains et surface nécessaires conséquentes
- Phasage de construction accrue
- Conception et dimensionnement très important
- Travaux de raccordement souvent importants



Les principaux organes de centrales photovoltaïques



II. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOTAIQUE

Energie Solaire Photovoltaïque



L'énergie Solaire une énergie de type électromagnétique sur laquelle on a une distribution qui se centre dans le visible - autour de 0,55 microns -, et qui est caractérisée par une puissance énergétique qui, à l'extérieur de l'atmosphère est de **1360 Watts par mètre carré** et qui, au niveau de la Terre, est considérée autour de **1000 Watts par mètre carré**.



Cette puissance solaire, elle se répartit partout dans le monde, dans tous les territoires, tous les pays et sur la mer et en fait vous avez une distribution qui est comprise entre 0,9 MWh par mètre carré et par an dans les pays du nord de l'Europe et ça peut aller à autour de 2 à 3 MWh par mètre carré par an dans les zones les plus ensoleillées du monde.

A Paris par exemple, c'est autour de 1 MWh par mètre carré et par an, ce qui correspond en juillet, journalièrement, autour de 5,5 kWh par mètre carré et par jour.

Energie Solaire Photovoltaïque

Comment se passe ce processus de conversion, de transformation de l'énergie solaire en énergie électrique ?



Lorsque la lumière atteint une cellule solaire, une partie de l'énergie incidente est convertie directement en électricité sans aucun mouvement ou réaction pollutions. Cette propriété remarquable est au produisant des déchets ou cœur de toute installation photovoltaïque. L'effet photovoltaïque fut observé pour la première fois par Becquerel en 1839 entre des électrodes plongées dans un électrolyte à la lumière. Dans un solide, c'est en 1876 que l'on observa un phénomène photoélectrique dans le sélénium et ce matériau fut utilisé pour la mesure de la lumière avant que le silicium ne soit développé.

Energie Solaire Photovoltaïque

L'effet Photovoltaïque

Les cellules solaires actuellement sur le marché convertissent directement la lumière en électricité en utilisant certaines propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Propriétés des semi-conducteurs

L'équilibre thermodynamique indique qu'aucun transfert d'énergie n'existe entre deux systèmes. Le niveau d'énergie d'un électron est l'énergie E qu'il faudrait lui fournir pour l'amener à l'extérieur du matériau. Les lois de la mécanique quantique montrent que les niveaux d'énergie sont proches et se groupent en bandes d'énergie. A l'intérieur de ces bandes, il existe une continuité des niveaux d'énergie, alors que entre bandes, on définit une bande interdite.

Energie Solaire Photovoltaïque

Propriétés des semi-conducteurs

La bande correspondant aux électrons de la couche extérieure est appelée bande de valence, bande qui permet la liaison des atomes entre eux. L'énergie maximale de la bande de valence est E_v . La bande d'énergie immédiatement au-dessus de la bande de valence est appelée bande de conduction, son niveau d'énergie minimale est E_c . La conduction électrique utilise les électrons de cette bande. Les matériaux sont caractérisés par leur niveau de Fermi E_F qui correspond au potentiel électrochimique ou au travail de sortie des électrons dans le solide.

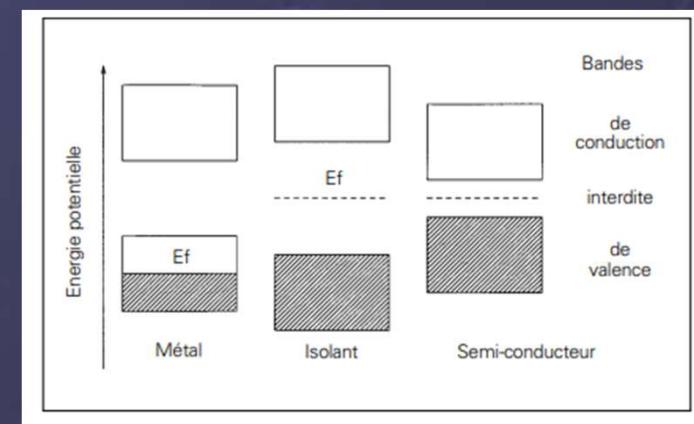
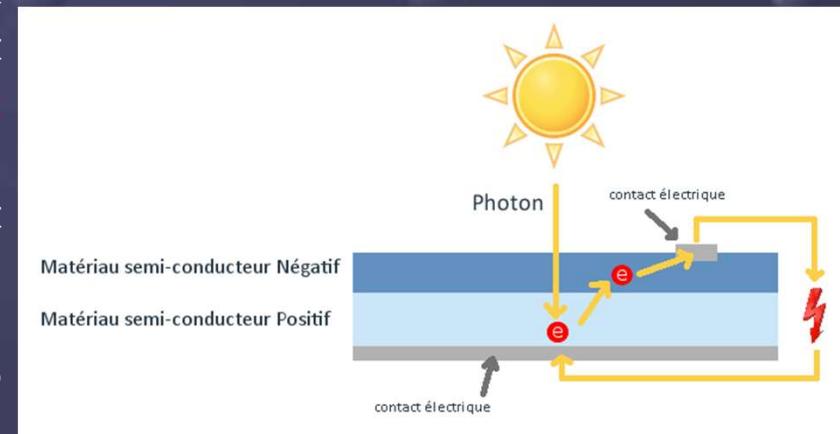


Fig. Bandes d'énergie des matériaux

Energie Solaire Photovoltaïque

Principe de Fonctionnement

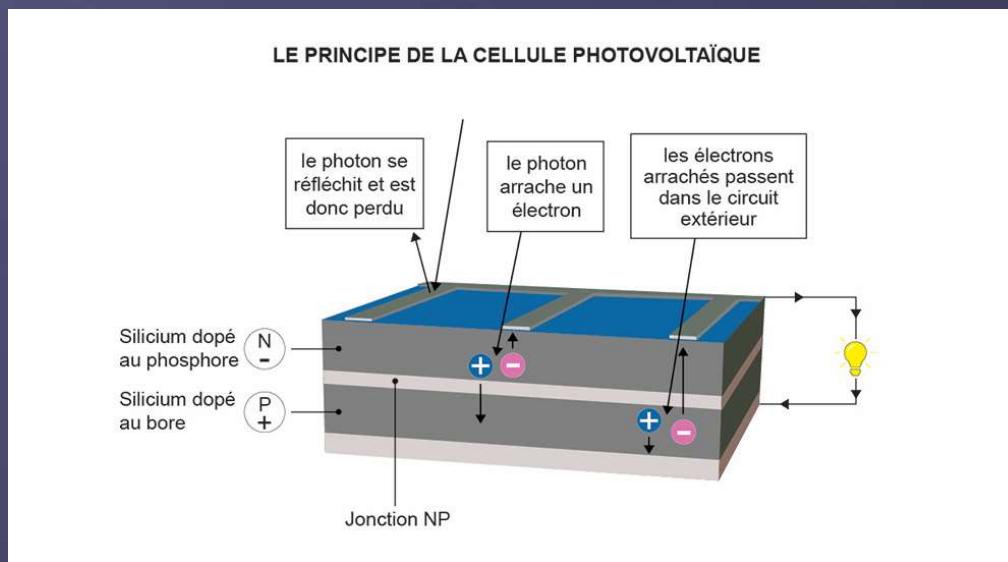
La lumière dont les photons transportent une énergie $E=h\nu$ permet d'atteindre l'effet photovoltaïque. La lumière pénétrant dans un semi-conducteur permet donc, si son énergie est supérieure au gap de faire passer le semi-conducteur **de l'état isolant à l'état conducteur**, ce phénomène augmentant lorsque la température du semi-conducteur s'élève. Lorsque un électron est extrait de la bande de valence pour passer dans la bande de conduction, il laisse derrière lui une vacance ou un trou à sa place: alors un autre électron proche de la bande de valence peut combler ce trou et laisser derrière lui à son tour un trou, on aura ainsi établi un courant de trous. Les deux types de courant ne seront pas différenciés, on parlera simplement de courant, qu'il s'agisse d'électrons ou de trous. De même on dit que l'absorption de l'énergie des photons par le semi-conducteur crée des paires de porteurs électron-trou.



Energie Solaire Photovoltaïque

Principe de Fonctionnement

Pour transformer le semi-conducteur photosensible de composant passif en composant actif, il faut pouvoir générer un courant de porteurs, donc apporter une force qui obligera les électrons et les trous à s'écouler dans deux directions opposées. Cette force sera réalisée par un champ électrique interne provenant du dopage du semi-conducteur.



Energie Solaire Photovoltaïque

DOPAGE

Le principe de fonctionnement d'une cellule PV est la conversion directe de la lumière en électricité, l'interaction rayonnement matière ayant lieu au sein de ce qu'on appelle une jonction P-N

↳ La première étape de la conversion de la lumière en courant électrique est la génération au sein du semi-conducteur des porteurs de charges que sont les électrons libres et les trous.

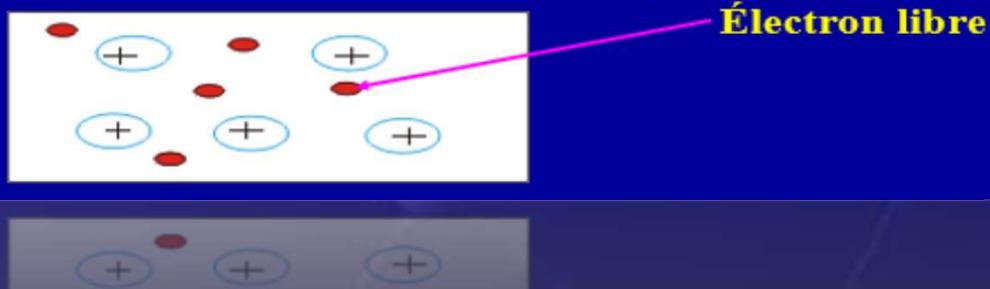
↳ **DOPAGE**

↳ **DOPAGE**

Energie Solaire Photovoltaïque

DOPAGE

- Dans un semi-conducteur pur le nombre de porteurs étant faible à température ordinaire, la conductivité est médiocre. Mais on peut l'améliorer par dopage du semi-conducteur, en remplaçant un atome de silicium tétravalent:
- Soit, dans le cas de silicium de **type N**, par un atome à cinq électrons de valence, possédant un électron supplémentaire qui, par agitation thermique, va très vite devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant

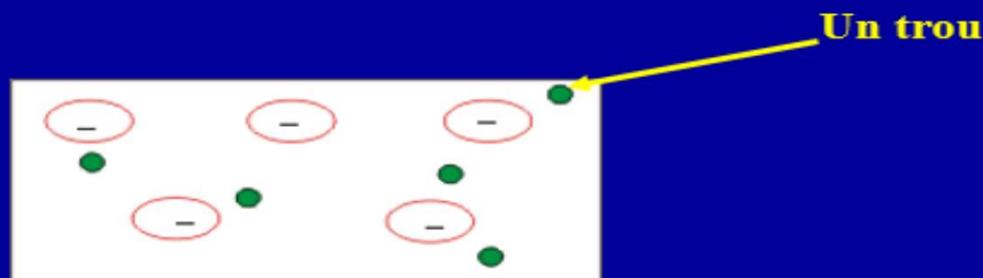


Energie Solaire Photovoltaïque

DOPAGE



Soit dans le cas du silicium de type P, par un élément à trois électrons de valence introduisant une orbitale vacante rapidement occupée par agitation thermique, par un électron



Energie Solaire Photovoltaïque

LA JONCTION PN

→ On fabrique une jonction P-N en accolant deux morceaux de semi-conducteur, l'un de type P, l'autre de type N.

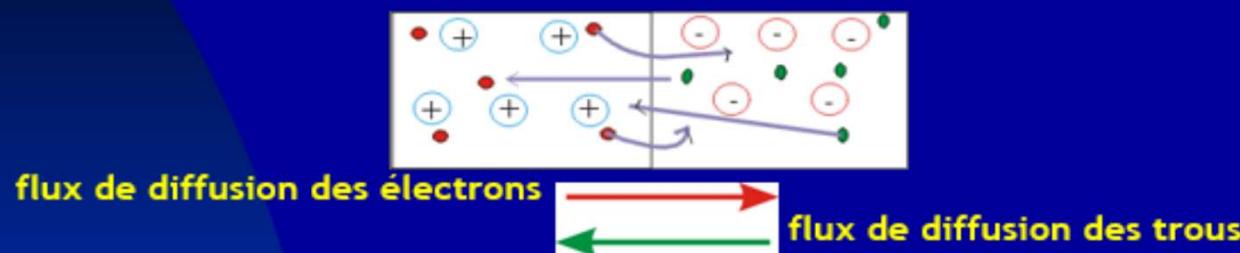
Zone N
pauvre en trous

Zone P pauvre
en électrons

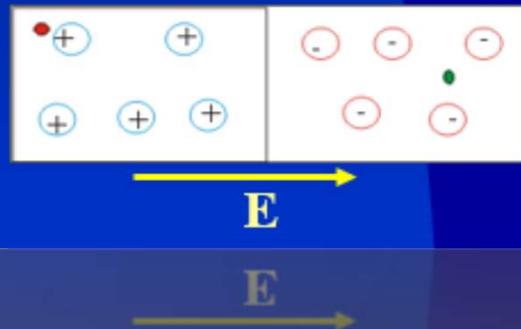
Energie Solaire Photovoltaïque

I. A l'obscurité

Au voisinage de l'interface, des électrons de la zone N diffusent dans la zone P pauvre en électrons et se recombinent aux trous présents dans cette zone, tandis que les trous subissent un courant de diffusion de la zone P vers la zone N où ils se recombinent aux électrons.



Il en résulte une barrière de potentiel V_0 de nature électrostatique et non électromotrice et un champ électrique E_0

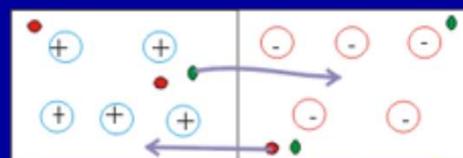


Energie Solaire Photovoltaïque

I. La jonction PN est éclairée

Lorsque la jonction PN est éclairée, par l'absorption de photons d'énergie $h\nu$ supérieure ou égale à la tension seuil du S.C., un électron devient libre de se déplacer dans le cristal. Il laisse derrière lui un trou également capable de se mouvoir.

Le champ électrique E_0 qui règne à la jonction, a tendance à les séparer et à déplacer les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P.

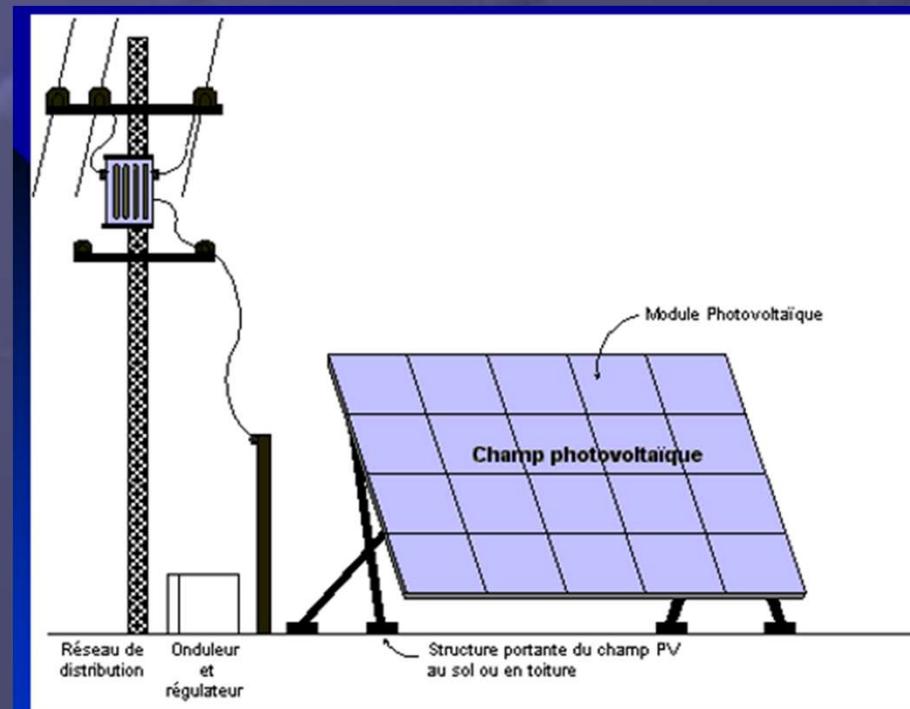


Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure: on obtient un courant électrique.



Energie Solaire Photovoltaïque

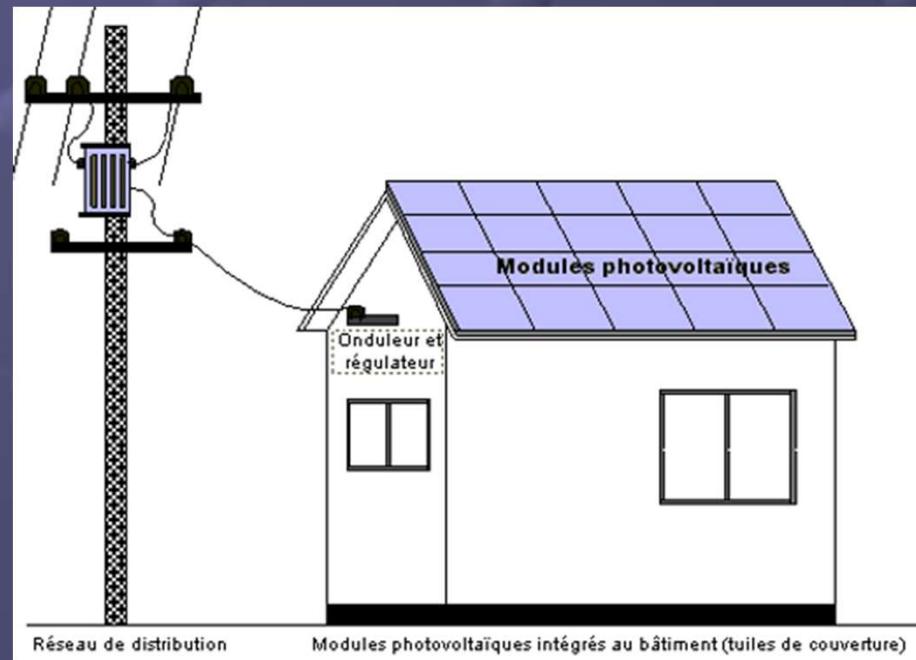
Exemples d'Applications



Système PV monté au sol

Energie Solaire Photovoltaïque

Exemples d'Applications



Système PV monté sur toiture

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Le panneau photovoltaïque

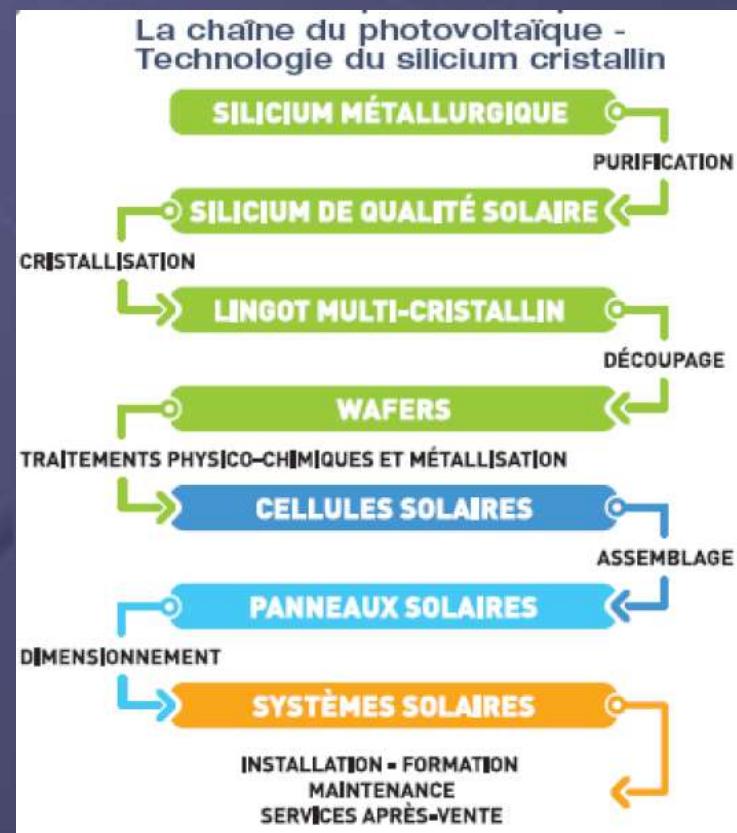


Ensemble de cellules solaires ou modules solaires qui lorsqu'ils sont soumis au rayonnement solaire délivrant un courant électrique. Ils peuvent disposer soit en parallèle soit en série.

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques

- Deux grandes familles de modules photovoltaïques
 - Silicium cristallin (Mono ou Poly)
 - Couche mince (Silicium, CdTe, CIGS)

Cadrés ou non

- Dimensions standardisées Modules Cristallins:
 - 99x165cm cristallins 60 cellules
 - 99x199cm cristallins 72 cellules
 - 120x200cm : couche mince CdTe (FS6)



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques

A. Notions importantes

Le Watt Crêt

Puissance photovoltaïque au conditions STC

- Irradiance de 1000 W/m^2
- Coefficient Air Masse AM 1.5
- Température des modules 25°C

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques

b. Les caractéristiques des Modules Photovoltaïques

- *Caractéristiques électriques :*

- Courant de court circuit (I_{sc})
- Tension circuit ouvert (V_{oc})
- Tension maximale (1000 ou 1500Vcc)
- Courant inverse maximal (I_{rm})

- *Caractéristiques mécaniques :*

- Dimensions
- Cadre ou non
- Tenue surpression / dépression
- Épaisseur vitrage
- Poids

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques

c. Le choix des Modules Photovoltaïques

- ❖ Qualité
- ❖ Garanties
- ❖ Provenance des cellules
- ❖ Caractéristiques Tension – Courant / Effet Température
- ❖ Prix
- ❖ Qualité de l'assemblage
- ❖ Environnement Projet
- ❖ Type de Structure
- ❖ Ombrage
- ❖ Rayonnement Direct et Diffus .

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1.Les Modules Photovoltaïques

d. Les différentes technologies des Modules Photovoltaïques

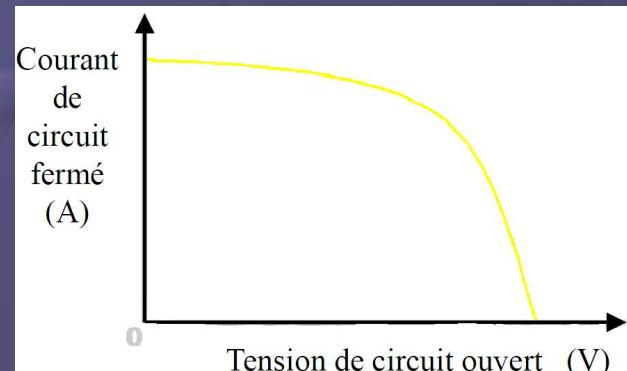
Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium Mono	De 14 à 18 %	25 - 30 ans	- Très performant - Stabilité de production - Méthode de production coûteuse - Présente une meilleure productivité que le poly	Aérospatiale , modules toitures, façades, générateurs sol
Silicium Poly	De 12 à 17 %	25 – 30 ans	- Adapté à la production grande échelle - Stabilité de production - Plus de 50 % du marché mondial - Tend à disparaître au profit du mono	Modules toiture, façades, générateurs grandes puissances
Composite Mono cristallin	18 à 20 %		- Lourd - Se fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiales
Amorphe	De 6 à 9 %		- Peut fonctionner sous lumière fluo - Fonctionnement sir faible luminosité - Fonctionnement par temps couvert / ombrage partiel - Subit de fortes pertes de puissance lors des premières années	Appareils électroniques Intégration dans le bâtiment
Composite Poly cristallin (Cds, Cdte , etc)	De 8 à 17 %	25 – 30 ans	- Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Intégration dans le bâtiment, Appareils électroniques

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques

e. Fonctionnement électrique des Modules Photovoltaïques



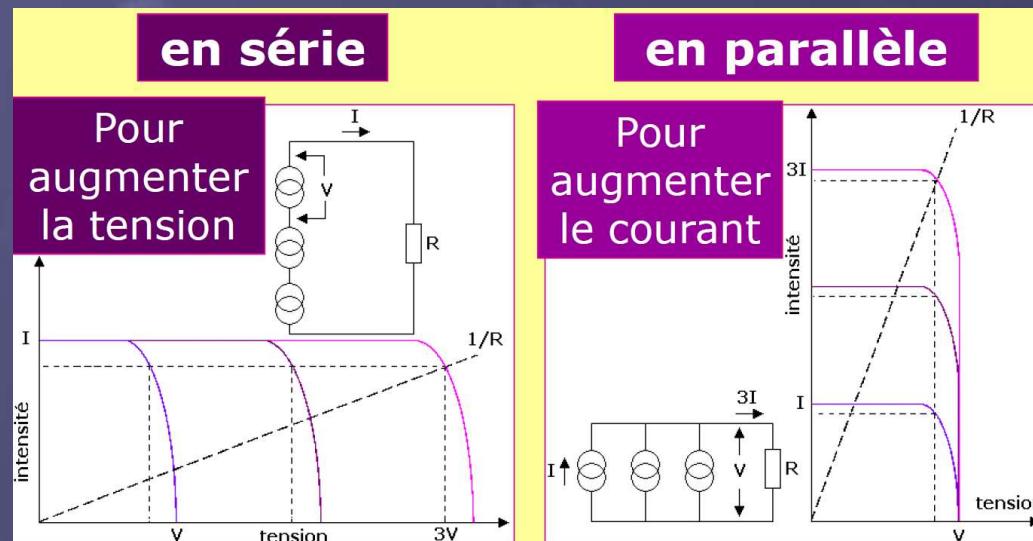
Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques

e. Fonctionnement électrique des Modules Photovoltaïques

i. Couplage en série et en parallèle



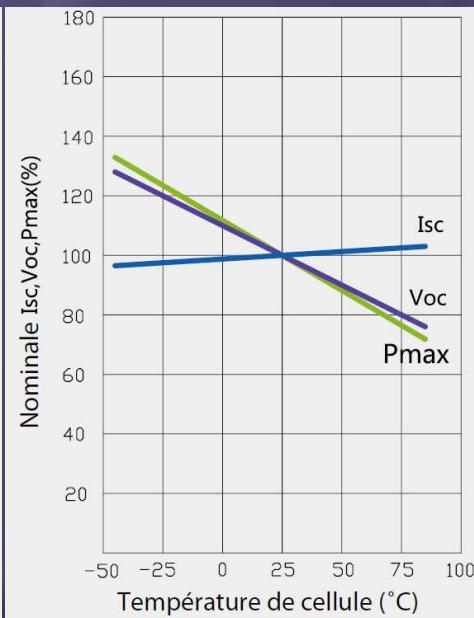
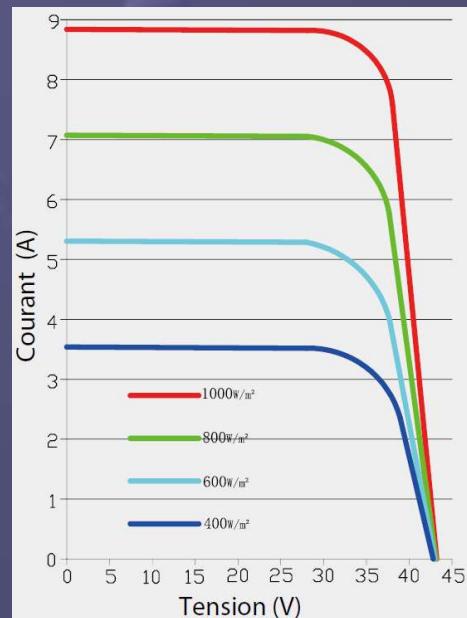
Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

1. Les Modules Photovoltaïques

e. Fonctionnement électrique des Modules Photovoltaïques

ii. Courbes caractéristiques d'un module PV



Remarques :

- Si T° augmente
= Pmax diminue
- Si irradiation diminue
= Pmax diminue



Importance de la ventilation et de l'ensoleillement

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2. Les Onduleurs

- Les systèmes solaires ne sont pas capables de produire que du courant continu. Pour produire un courant alternatif il faut recourir à l'utilisation d'un convertisseur qui a pour rôle de convertir le courant continu en un courant alternatif (220V, 50Hz).
- Le convertisseur doit être muni d'un système qui lui permet de se disjoncter automatiquement lorsque la charge est trop forte ou lorsqu'il y a surchauffe ou sous-tension de la batterie et de se remettre en marche lorsque la panne est éliminées.

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

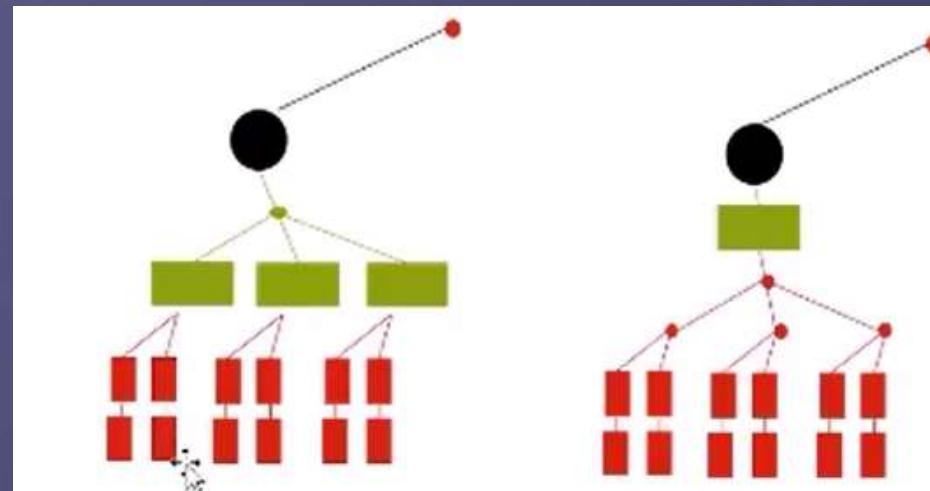
- Transforme le courant continu en courant alternatif
- 3 familles :
 - Centraux
 - Multi branches dit Décentralisés
 - Micro onduleurs



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2. Les onduleurs



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

- Onduleurs centraux :

- 200kVA à 2MVA
- Tension d'entrée 1000 ou 1500Vcc
- Tension de sortie non standard (de 320 à 800Vac)
- 50 à 200 branches de modules
- 1 à 4 MPPT
- Sans transformateur
- À coupler avec un transformateur BT/HTA adapté
- Adapté pour les centrales >5MVA
- Câblage CC important
- Nécessitent une maintenance spécifique
- Communication fibre optique
- Contrats de garantie de disponibilité avec le fournisseur



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

ONDULEURS DECENTRALISES

- **Onduleurs multi branches :**

- 10 à 100 kVA
- Tension d'entrée 1000 ou 1500Vcc
- Tension de sortie en général standard (400Vac)
- 4 à 16 branches
- 2 à 8 MPPT par onduleur (permet d'optimiser la production en cas d'ombrages)
- Sans transformateur
- À coupler avec un transformateur BT/HTA
- Adapté pour les centrales <5MVA
- Câblage AC important
- Faible maintenance
- Possibilité de communication par CPL
- Contrats de garantie de disponibilité avec le fournisseur

.

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

• Micro onduleurs

- 0.3 à 1kVA
- Se couple directement sur un modules photovoltaïque
- Pas adaptés aux centrales au sol
- Uniquement pour Marché Residentiel
- Permet d'optimiser la production
- Cout élevé

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

- Dimensionnement onduleurs
 - Caractérisé par une tension DC max
 - Ne pas dépasser cette tension en entrée

Nombre maximale de modules en série / entrée MPPT

$$N = V_{max} / (V_{oc} \times 1,15)$$

- V_{max} [V] : Tension maximum admissible par l'onduleur
- V_{oc} [V] : Tension en circuit ouvert d'un module à modifier selon température max (norme UTE C15-712-1)
- 1,15 : Coefficient de sécurité (UTE C15-712-1)

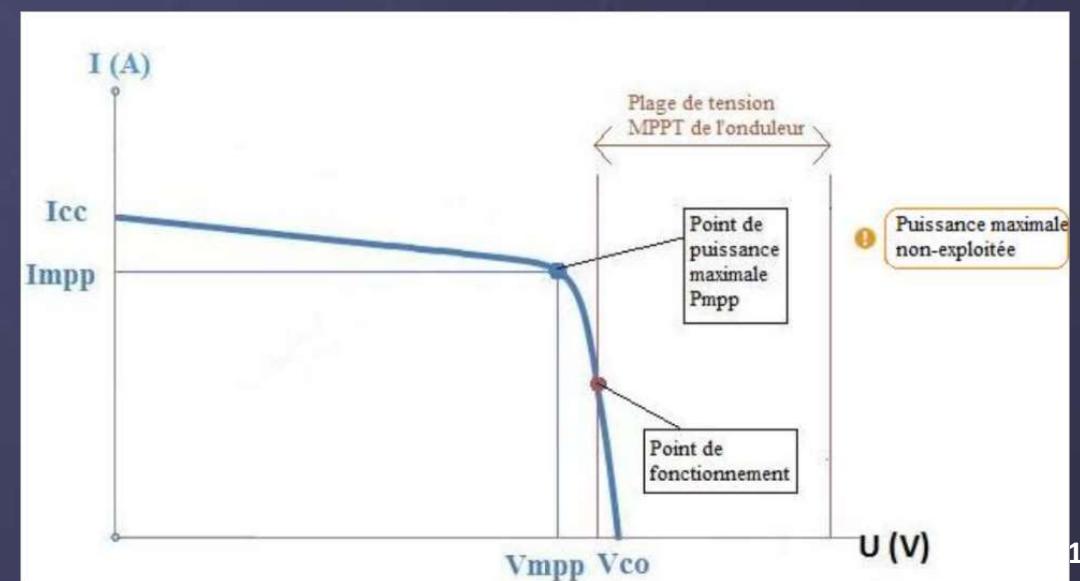
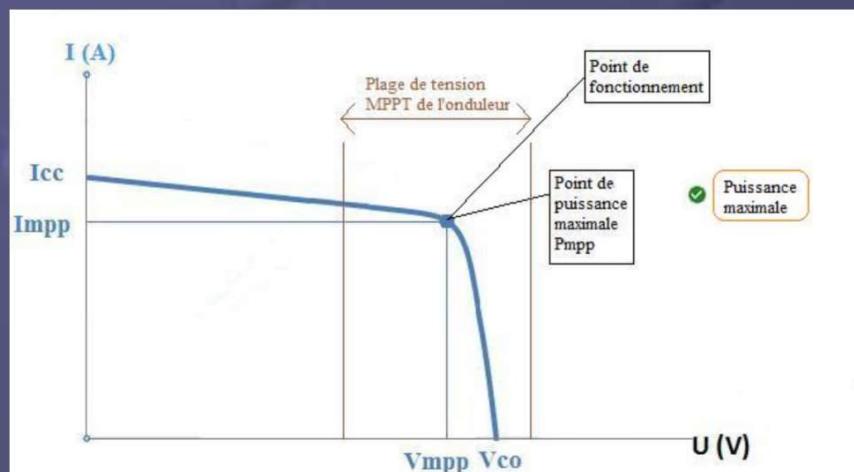
Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2. Les onduleurs

Fonctionnement en plage de tension MPPT

- Cherche le maximum de puissance
- Déplacement du point de fonctionnement (couple U – I)
- Fonction de l'irradiation, température, ombre
- Maximum Power Point Tracking



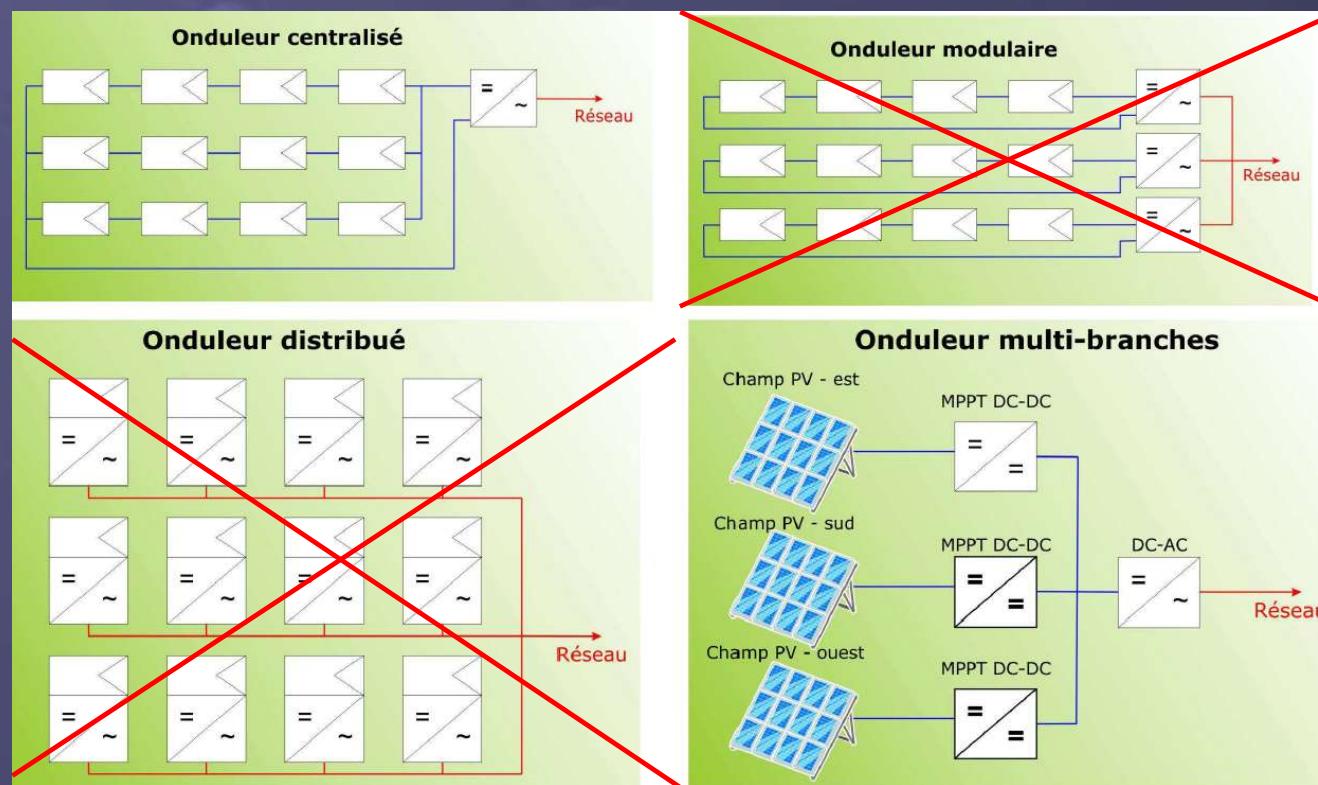
Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

- Différents types d'onduleurs

Cout élevé,
application
pour le
particulier



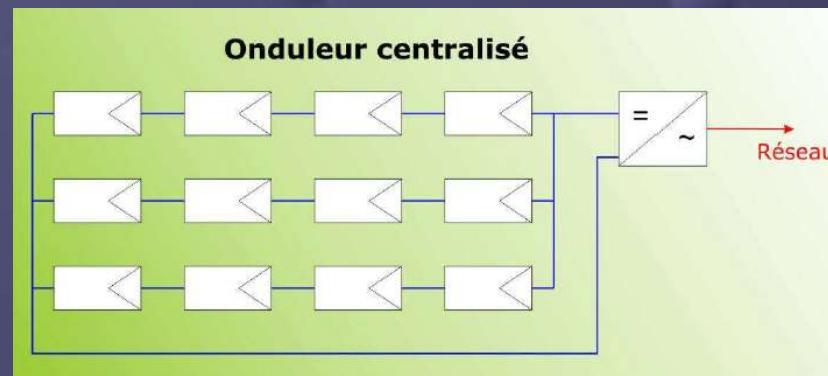
Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

- Différents types d'onduleurs

Onduleurs centralisés pour centrale PV de forte puissance



- Souvent plusieurs onduleurs fonctionnant en maître-esclave (quand le premier onduleur atteint sa puissance max, il enclenche la mise en parallèle du second)
- Mise en parallèle, des sous-champs PV en DC
- Protection et câblage spécifiés en DC

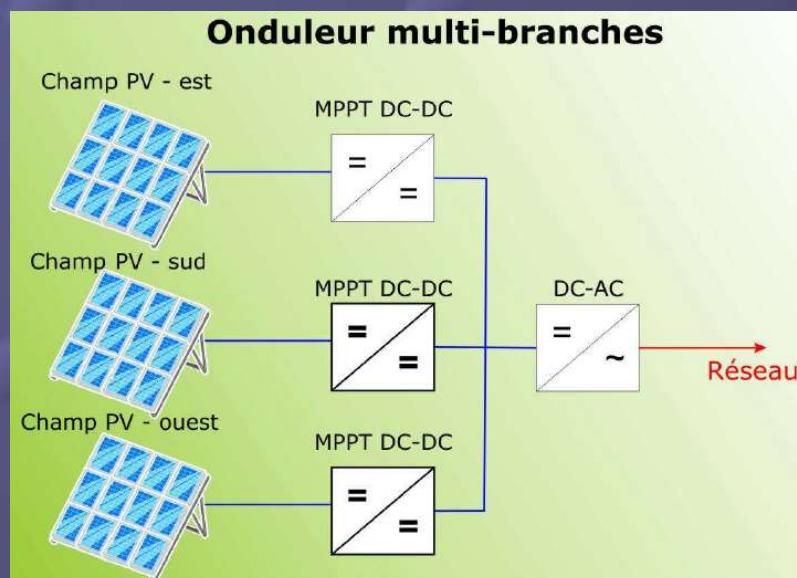
Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

- Différents types d'onduleurs

Onduleurs MPPT pour centrale BT et MT



- Un convertisseur DC/DC par sous-champ avec suivi de Pmax
- Un convertisseur DC/AC unique
- Possibilités de sous-champs différents (technologie, taille, orientation, inclinaison, ombrage)
- Optimisation par suivi de Pmax pour chacun

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

2.Les onduleurs

Choix de l'onduleur

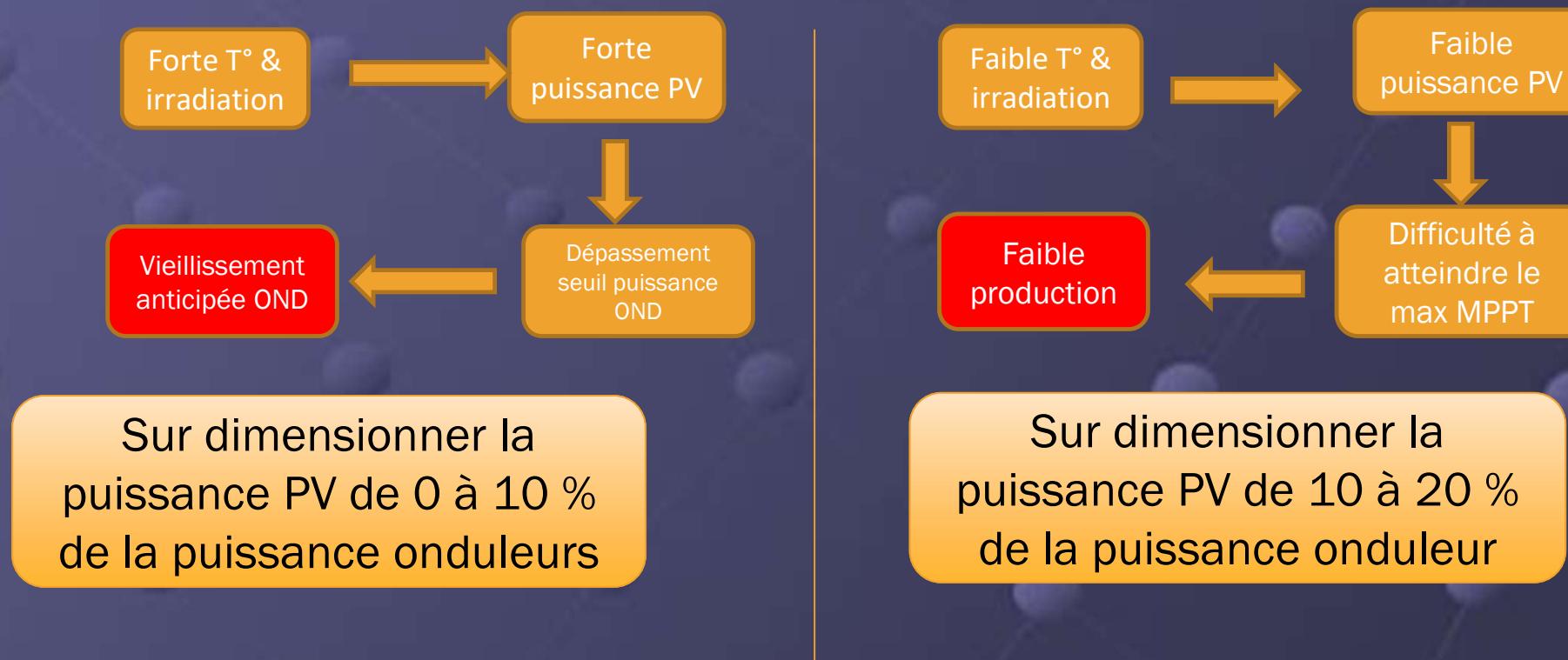
- Le Ratio DC/AC = Puissance crête totale/ Puissance totale des onduleurs

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

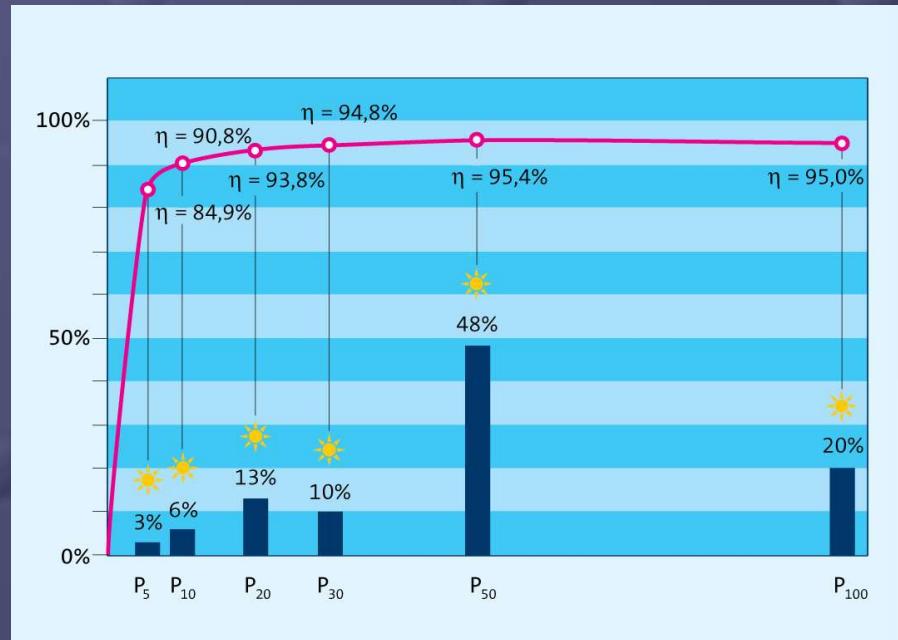
2. Les onduleurs

Influence de la température sur le dimensionnement onduleur



Rendement de l'onduleur

- Rendement européen normalisé de l'onduleur
- Technologie MPPT = recherche de Pmax pour chaque entrée



$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 \times \eta_{5\%Pn} + 0,06 \times \eta_{10\%Pn} + 0,13 \times \eta_{20\%Pn} + 0,10 \times \eta_{30\%Pn} + 0,48 \times \eta_{50\%Pn} + 0,20 \times \eta_{Pn}$$

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

Choix des onduleurs en Tunisie

- Assurer une bonne ventilation
- Choisir onduleurs pour zone désertique et haute température
- Limiter les risques d'encrassement des onduleurs
- Choix des filtres et des dispositifs de récupération de sable

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

3. STRUCTURES DE SUPPORT

Elément qui supporte les modules PV

- Donne l'orientation et l'inclinaison au panneaux
- Fixe ou suivi du soleil (1 axe ou 2 axes)
- En acier galvanisé ou aluminium
- Géométrie à adapter au câblage
- Fondation en fonction de la nature du sol



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

4. TRANSFORMATEUR & POSTE DE LIVRAISON

- Elève la tension du courant alternatif BT->HTA
- Onduleur et transformateur peuvent être inclus dans le même local
- Transforme la BT en HT pour les $P > 250 \text{ kWc}$

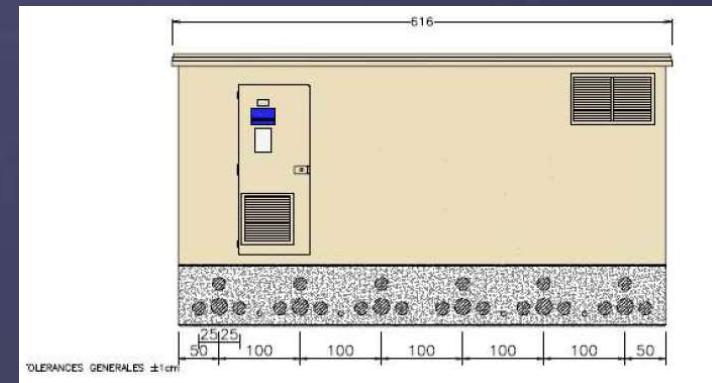
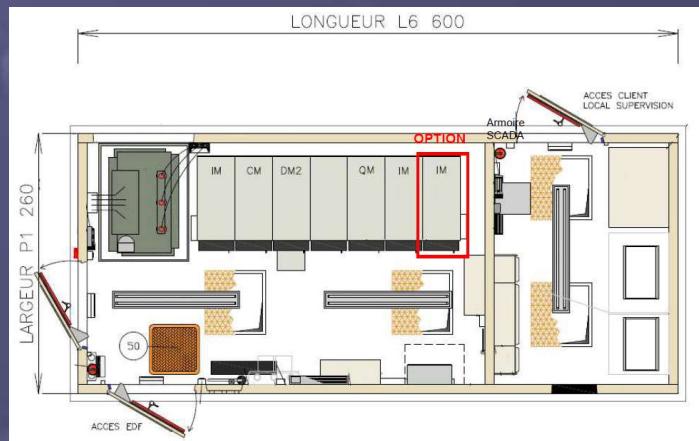


Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

5. Poste de Livraison

- Dernier organe de la centrale
- Fait la liaison entre le site privé et le réseau public
- Fonctions de protection et de comptage



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

6. Les coffrets de protection

- Protection contre surtension et surintensité
- Protection des biens (onduleurs, transfo) et des personnes



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

7. STATION METEOROLOGIQUE

Les capteurs météo à prévoir

- Pyranomètre (même inclinaison et même orientation que le champ PV)
- Pluviomètre
- Anémomètre (ou girouette)
- Sonde de température ambiante
- Sonde de température des modules



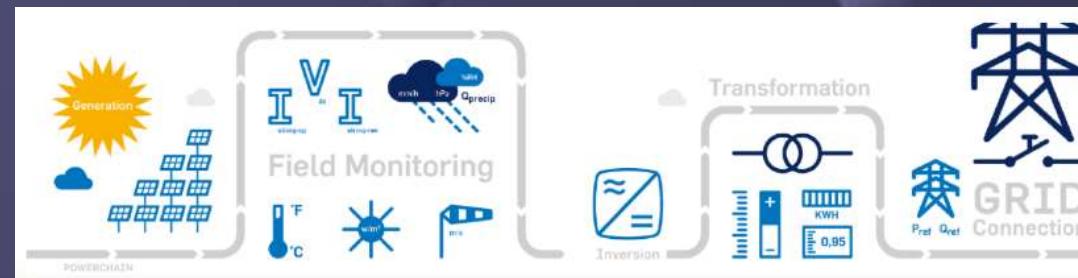
Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

8. MONITORING

Le monitoring ou centrale d'acquisition de données permet :

- La supervision
- La surveillance
- La maintenance



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

8. MONITORING



Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

9. Batterie d'accumulateurs

- Nécessaires si l'installation n'est pas raccordée au réseau de distribution.
- L'énergie de fonctionnement est extraite de l'accumulateur à partir de l'instant où le courant d'utilisation est supérieur au courant issu du photogénérateur .

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

10. Un régulateur de charge

Son rôle consiste à couper la liaison entre :

- l'utilisateur et la batterie pour éviter la décharge partielle ou totale de cette dernière (une décharge profonde entraînerait un vieillissement prématûre des accumulateurs)
- les panneaux PV et la batterie pour éviter une surcharge de cette dernière (qui provoquerait une perte en eau et un vieillissement prématûre de la batterie)

Energie Solaire Photovoltaïque

Les composants d'un système Photovoltaïque

13. Les câbles

Le choix des câbles doit être fait de manière à puiser au maximum dans la puissance de charge des panneaux solaires car la chute de tension ne doit en aucun cas dépasser 0.3 V pour des batteries de 12V et 0.5V pour des batteries de 24V.

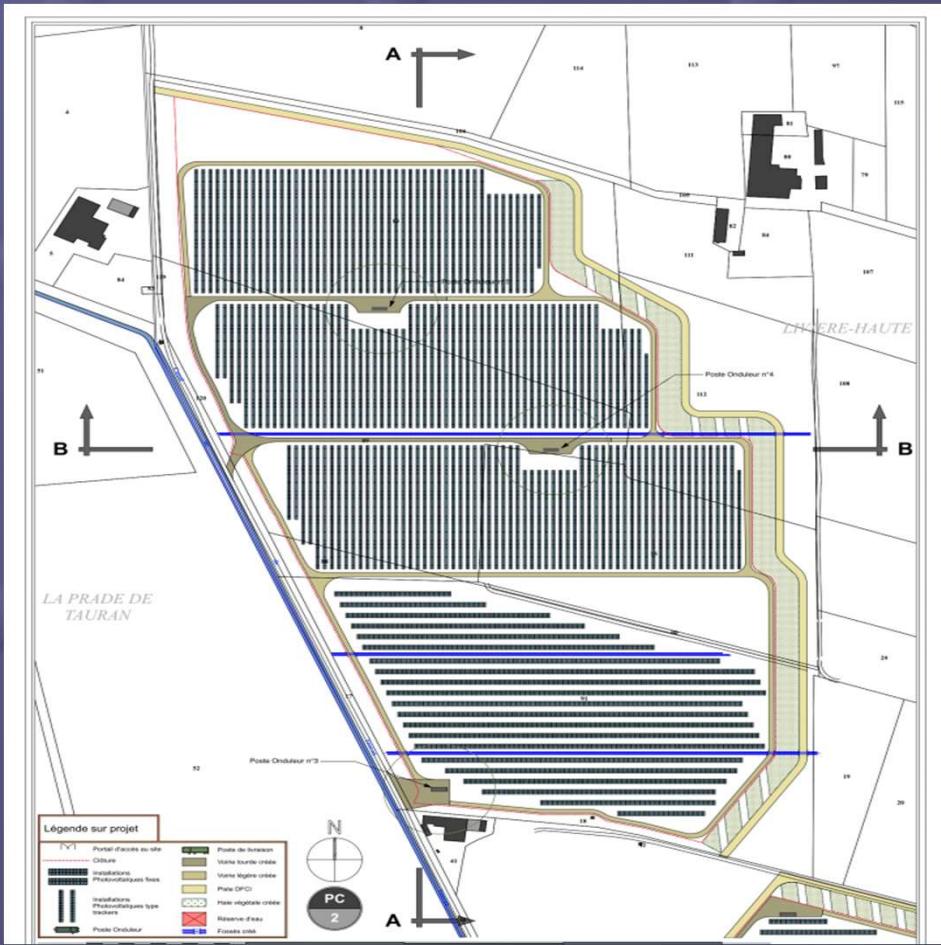
Pour les câbles reliant le panneau solaire au régulateur et le régulateur à la batterie, les sections des câbles utilisées doivent être choisies en fonction de l'intensité du courant. Ceci est également valable pour les câbles reliant le régulateur à l'utilisateur .

<i>Puissance crête du panneau (Wc)</i>	<i>Courant de charge max. (I)</i>
11	0,7
25	1,5
51	3,07
63	3,07

Courant de charge en fonction de la puissance crête du panneau

Maîtriser les principes de base d'une implantation

Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque



- IMPLANTATION
- Topographie

- Environnement extérieur
- Contraintes locales
- Contraintes d'installation

Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

TOPOGRAPHIE

- Pour le matériel standard pente N-S max 30%, pente E-W 10%
- Éviter les accidents de terrain, sinon terrassement (cher)
- Penser à la circulation
- Attention aux pentes N -> augmenter l'espace inter tables
- Attention à la pente des voiries



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

ANALYSE DE LA VEGETATION

- *Prendre en compte le zone à fort enjeu environnemental
- *Prendre en compte la croissance future de la végétation
- *Eviter les zones ombragées



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

Surface disponible en Wc/ha

Structure fixe :

- *En fonction de l'espace inter-rangée le taux de couverture du sol varie de 50 à 70%
- *Il faut maintenir des allées de 3m de large pour la circulation
- *Inclinaison 15° en Tunisie
- *Densité de puissance de 1 à 1,5MWc/ha
- *Orientation Sud ou Est Ouest
- *Coût d'achat et de maintenance plus faible



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

Surface disponible en Wc/ha

Structure suiveuse 1 axe :

- *Terrain plat uniquement (5% de pente maximum)
- *Taux de couverture 50%
- *Rotation +/- 55°
- *Densité de puissance de 1 MWc/ha
- *Coût d'achat et de maintenance plus important
- *Gain de production 20%



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

CHOIX DU TYPE DE STRUCTURE

TRACKER



- Meilleure répartition journalière
- Installation plus onéreuse



Fixe



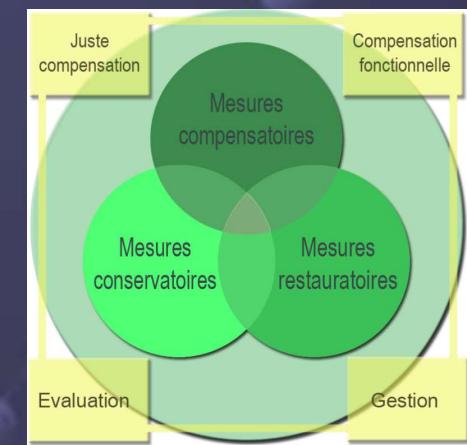
- Pic de production le midi
- Meilleur taux de couverture

LE GAIN DU TRACKER DOIT ETRE ETABLIS POUR CHAQUE SITE

Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

Etude d'impact

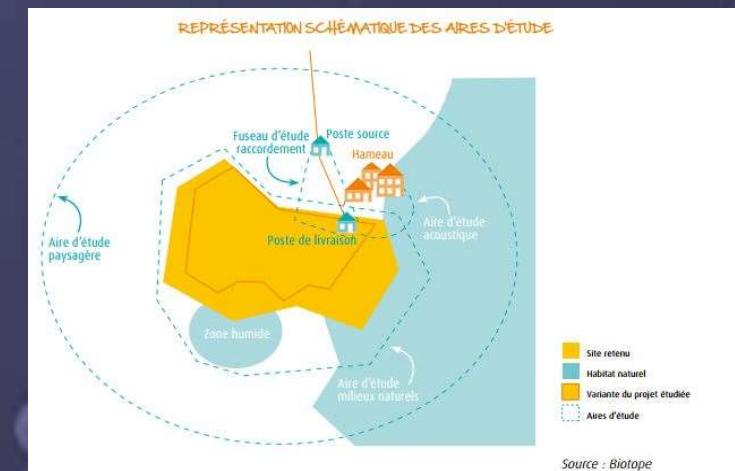
- A pour objectif de déterminer l'impact de l'implantation d'une centrale PV sur l'environnement :
 - Faune
 - Flore
 - Citoyens
 - Environnement



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

Etude d'impact

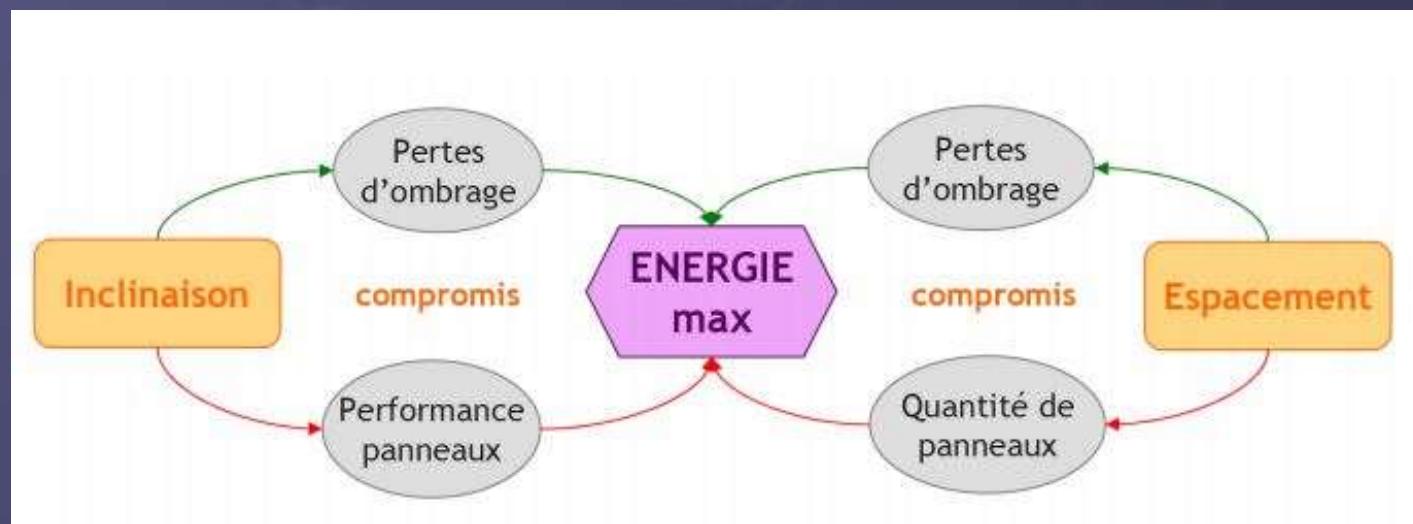
- L'étude se porte sur 4 saisons , hors demande ou dérogation particulière:
 - Détermination des cycles de vie de la faune
 - Observation des cycles de la flore
 - Observations de l'impact sur environnement selon les saisons (écoulement d'eau, retenue, contraintes)



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

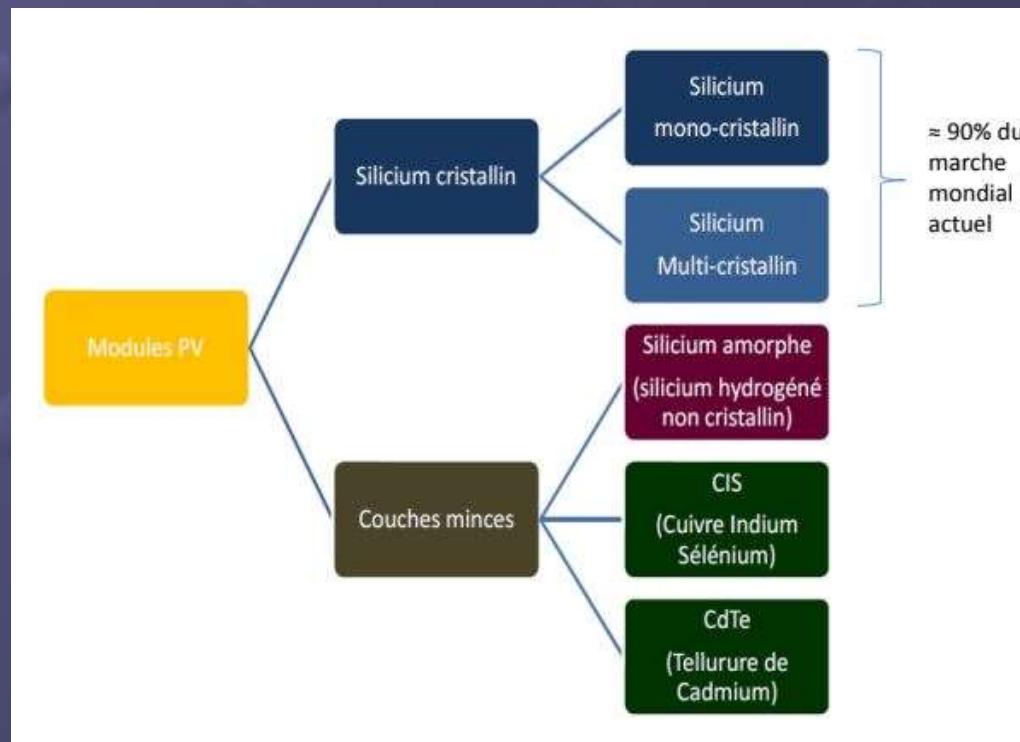
BASE DE L'IMPLANTATION PV

Compromis entre le taux de couverture du site et l'inclinaison des modules photovoltaïque



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

CHOIX DU MODULE



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

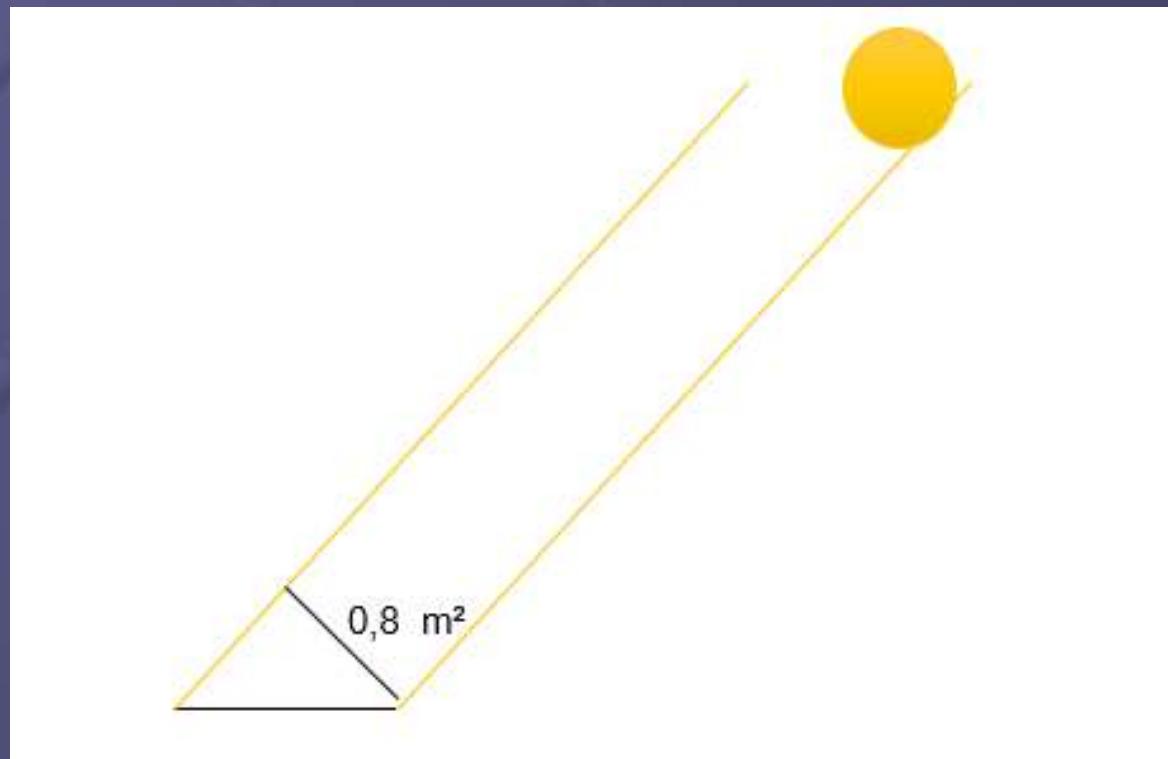
INFLUENCE DE L'ORIENTATION ET DE L'INCLINAISON

		FACTEUR DE TRANSPOSITION (TUNIS)				
		Période : 1 année - Irradiation global horizontale = 1735 kWh/m ²				
Inclinaison	Orientation	O	SO	S	SE	E
0°	O	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30°	SO	0,92	1,05	1,10	1,05	0,93
60°	S	0,76	0,91	0,98	0,93	0,77
90°	SE	0,56	0,66	0,67	0,67	0,57
Trackers :		Trackers 2 axes :	FT = 1,45 (132% optimum plan fixe)			
Est / Ouest trackers :		FT = 1,17 (106% optimum plan fixe)				
Nord / Sud trackers, inclinaison = lat. -10°		FT = 1,40 (127% optimum plan fixe)				

0,56

Position à éviter si elle n'est pas imposée

INFLUENCE DE L'ORIENTATION ET DE L'INCLINAISON



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

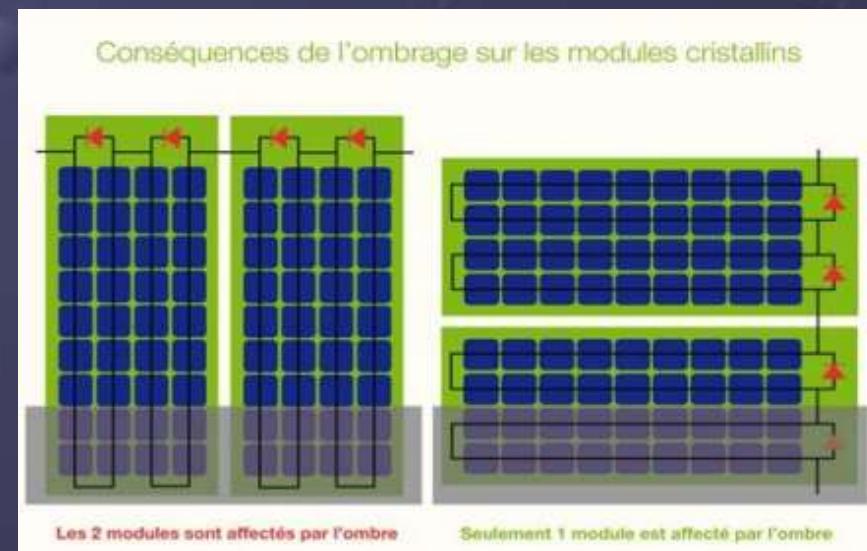
OMBRAGES

- *L'ombrage d'une partie d'un module photovoltaïque a des conséquences sur l'ensemble des modules avec lequel il est raccordé
- *Les ombrages des structures de support sur les modules situés à l'arrière n'ont lieu qu'en fin de journée, ils sont pris en compte par les simulations
- *Attention aux ombrage liés à la végétation
- *Attention aux ombrages liés au relief
- *Attention aux développements futurs (immeubles, antennes...)

Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

EFFET DE L'OMBRE

- Le courant d'un module PV ou d'un champ est limité par celui de la plus mauvaise cellule ou du mauvais module
- L'ombre va jouer le même effet : si une seule cellule de la chaîne est à l'ombre, le courant total sera limité par le courant de cette cellule
- Il est donc impératif d'éviter au maximum les ombres provoquées par les obstacles proches



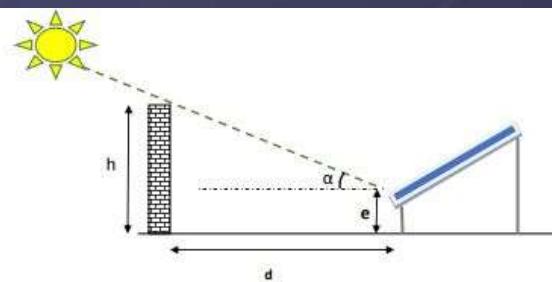
Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

INFLUENCE DU FACTEUR D'OMBRAJE

- Diminution du rayonnement direct
- Masques lointains (montagne, constructions, végétation...)
- Masques proches (structures de modules PV précédentes)

$$d = \frac{h - e}{\tan \alpha}$$

$\approx 2(h-e)$

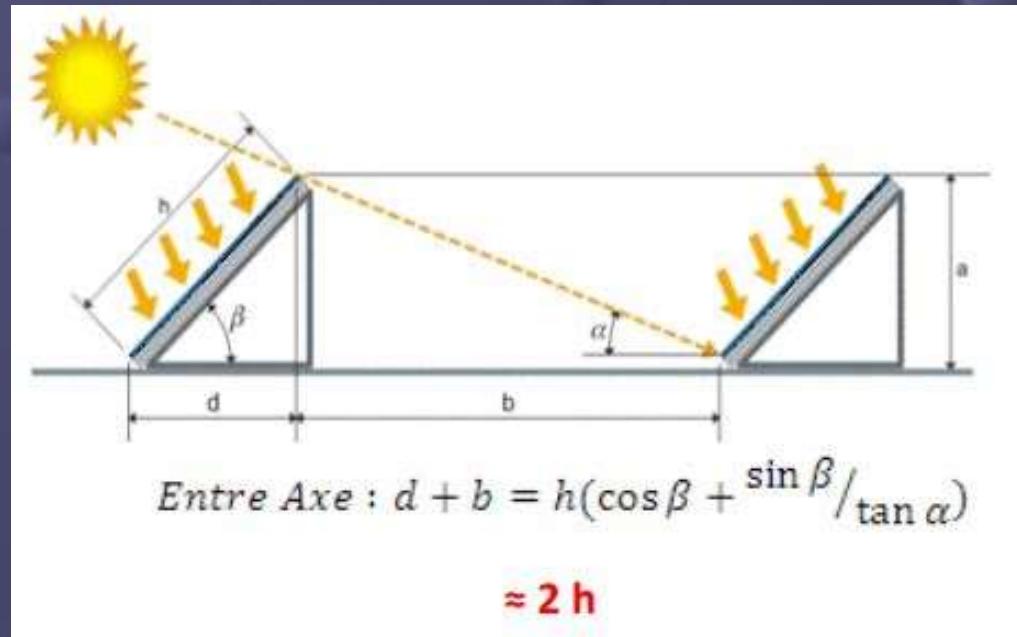


*α est l'angle azimut permettant l'ensoleillement de la surface totale du panneau le 21 décembre à 10h:00 du matin (27°C en Tunisie
(Données <http://www.sunearthtools.com>)*

Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

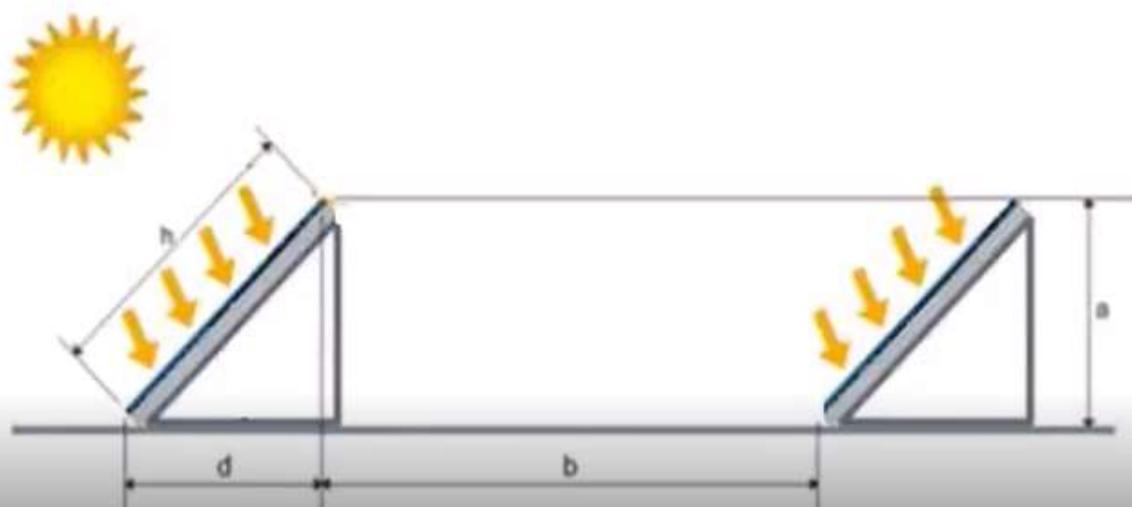
DIMENSIONNEMENT DES ALLEES INTER-RANGEES

- Calcul du pitch

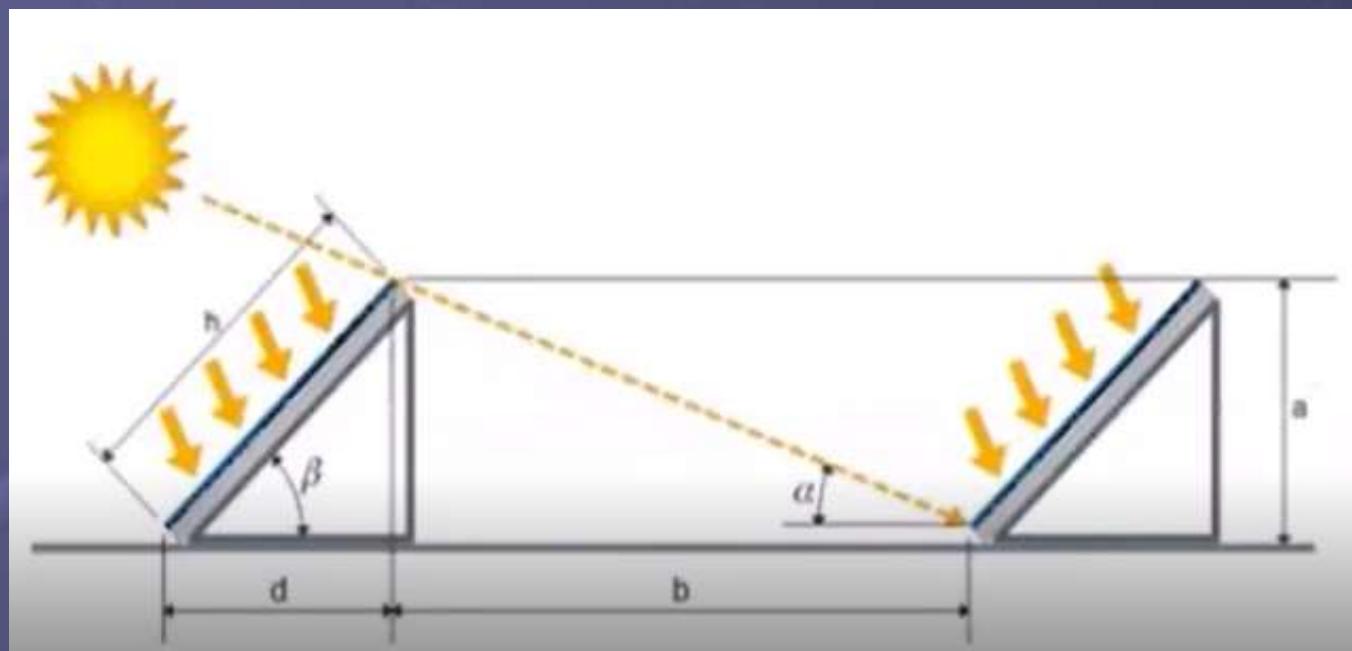


Exercice

- Calcul de la distance inter rangée pour une centrale
- Module cristallin
- Positionnement vertical => 2 modules en portrait
- Taille du module $L = 2 \text{ m}$ / $l = 1\text{m}$
- Angle de la structure 15°
- Hauteur solaire 21 décembre à midi : 30°



Exercice

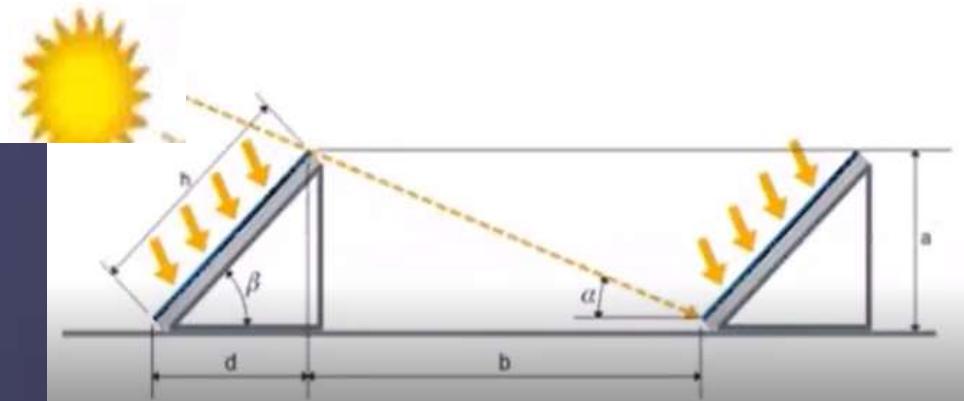


Exercice

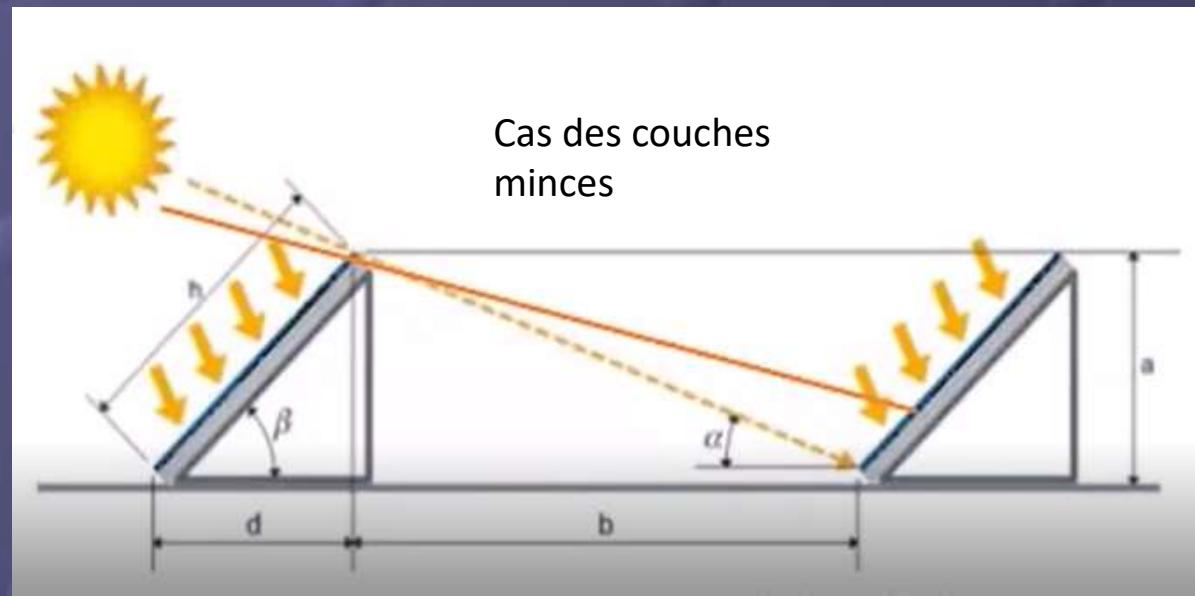
- Calcul du pitch
- $\tan(\alpha) = a/b \Rightarrow b = a/\tan(\alpha)$
- $\sin(\beta) = a/h \Rightarrow a = h * \sin(\beta)$
- $b = h * \sin(\beta)/\tan(\alpha)$

$H=2*L$ (2 modules de 2m chacun)

$B=1.8m$



Exercice



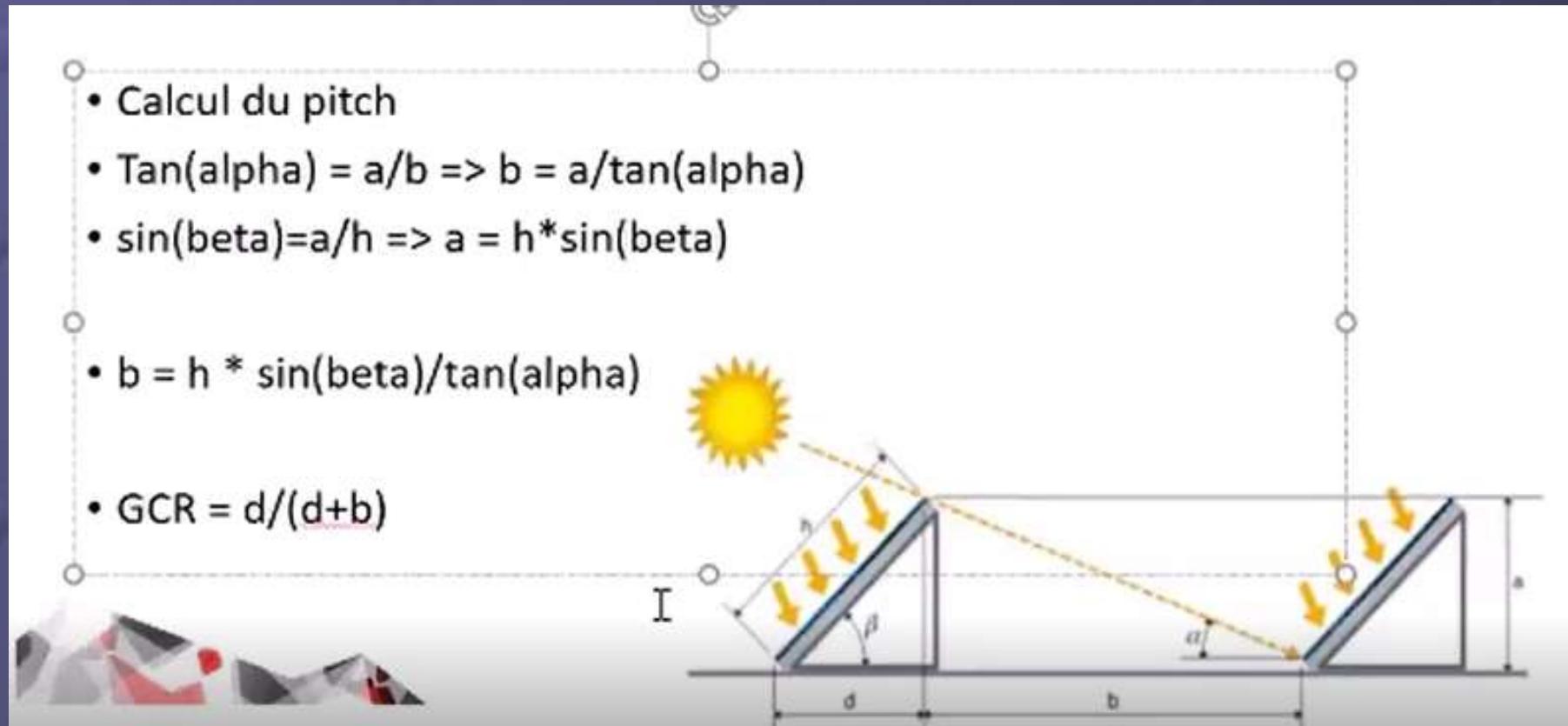
Avec les couches minces l'ombrage à midi le 21 Décembre
soit sur une partie du module

sn1

sana najar; 10/12/2021

Exercice

- Calcul du pitch
- $\tan(\alpha) = a/b \Rightarrow b = a/\tan(\alpha)$
- $\sin(\beta) = a/h \Rightarrow a = h * \sin(\beta)$
- $b = h * \sin(\beta)/\tan(\alpha)$
- $GCR = d/(d+b)$



GCR: Taux de couverture

sn1

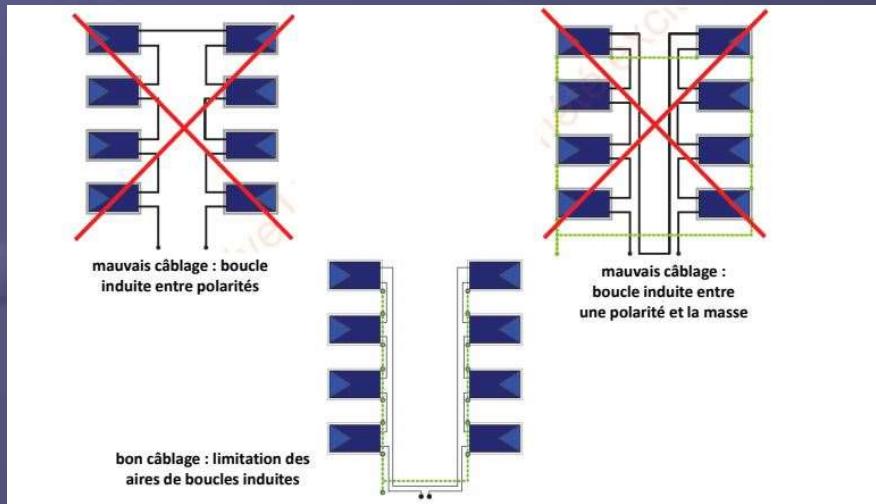
sana najar; 10/12/2021

Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

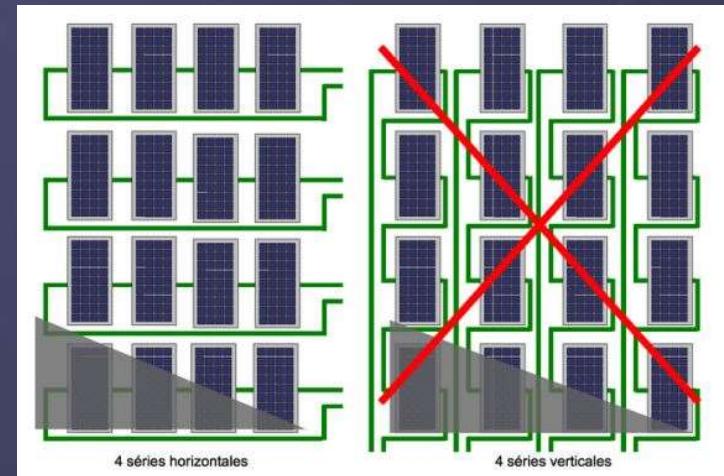
INFLUENCE DU CABLAGE

STRING = chaîne de modules en série

Boucle induite



Limiter les effets d'ombrage



Maîtriser les principes de base d'une implantation Photovoltaïque

CONTRAINTE CLIMATIQUE

*La valeur dimensionnante est une vitesse de référence

- Sur 50 ans
- À 10 mètres de hauteur
- En moyenne de 10 minutes

Elle doit être validée par un bureau de calcul de structure

En général, l'ordre de grandeur en Tunisie se situe entre 20m/s et 30m/s

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

1^{ère} étape

Choix de la station et de l'angle d'inclinaison des modules

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

2^eme étape : Estimation de la consommation CJ

Diagram illustrating the calculation of daily consumption (C_{ij}) and total daily consumption (C_j) based on the number of hours of use per day.

$$C_{ij} = P_i * N_{hij}$$

Where:

- Consommation journalière du récepteur i
- Nombre d'heures d'utilisation par jour
- Puissance nominale du récepteur i

$$C_j = \sum_i C_{ij}$$

Table of receptacle characteristics:

Récepteur	Tension de fonctionnement [V]	Puissance nominale [W]
TV couleur	230	80 - 120
Lampe fluorescente	12 - 230	8 - 20
Ventilateur	12 - 230	50 - 75
Fer à repasser	230	60
Radio	12 - 230	30 - 50

Pour compenser les pertes, la consommation journalière est majorée de 33% et parfois même de 50%.

$$C_{jP} = \frac{(C_j * 133)}{100}$$

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

3^{eme} étape : Choix de la tension de fonctionnement Courant continu (Tfcc)

La tension de fonctionnement dépend des différents composants disponibles sur le marché (module, régulateur, convertisseur, batterie,...), des récepteurs à alimenter et de la consommation.

<i>Puissance [W]</i>	<i>Tension de Fonctionnement</i>
0 - 500	12
500- 1000	24
> 1000	48 ou 60

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

4^eme étape : Calcul de la charge journalière
(Exprime les besoins quotidiens en électricité (Ah))

$$C_{nj} = \frac{CjP}{T_{fcc}}$$

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

5^eme étape : Calcul de la puissance crête des modules Solaires (PcM)

$$P_{cM} = \frac{C_j P}{Q_j}$$

consommation journalière majorée [Wh].

Rayonnement solaire global journalier (moyenne annuelle)

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

6^eme étape : Calcul du nombre des modules

$$NmN = \frac{PcM}{Pm}$$

Puissance délivrée par un module (Wc)

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

7^{eme} étape : Calcul du capacité des batteries

A partir de la consommation journalière corrigée, du nombre de jours d'autonomie souhaité et la profondeur de décharge imposée par les performances des batteries, on détermine la capacité des batteries :

$$CAH = \frac{CjP * NjA}{DmB}$$

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

8^{eme} étape : Dimensionnement du régulateur

Le régulateur dépend de:

- ↳ La tension de charge du système
- ↳ Le courant de charge maximal (caractéristique du module)
- ↳ Courant maximal de décharge des batteries

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

9^eme étape : Dimensionnement onduleurs

Caractérisé par une tension DC max

A Ne pas dépasser cette
tension en entrée

Nombre maximale de modules en série / entrée MPPT

$$N = V_{max} / (V_{oc} \times 1,15)$$

- V_{max} [V] : Tension maximum admissible par l'onduleur
- V_{oc} [V] : Tension en circuit ouvert d'un module à modifier selon température max (norme UTE C15-712-1)
- 1,15 : Coefficient de sécurité (UTE C15-712-1)

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

9^eme étape : Calcul de la section des câbles électriques

Dans une installation solaire photovoltaïque à basse tension, il est très important de limiter au maximum les pertes d'énergie dans les câbles. Et pour calculer leur section on utilise soit le tableau suivant:

<i>L</i> <i>IMPP</i>	2	5	10	15	20
1	1	1	1,2	2,5	2,5
2	1	1,5	2,5	4	6
4	1	2,5	6	10	10
8	2,5	6	10	16	25
16	4	10	25	35	50

Soit: $S_{nc} = \frac{2 * L * IMPP}{56 * V_{ch}}$ → Courant de charge du module (donné dans la fiche technique)

L : longueur du câble d'aménée;

V_{ch} : Chute de tension maximale permise dans les câbles.

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

Choix des technologies -Tunisie

Température Ambiante

- Température Ambiante importante en Tunisie pouvant atteindre les 50°.
- Température module pouvant atteindre les 70 °
- Les principales contraintes de la température :
 - Décroissance efficience module
 - Problème du fusible
 - Problème au onduleur
 - Problématiques ventilation onduleur .

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

Choix des technologies -Tunisie

Effet des températures

➤ Choix du module

- Privilégier les modules présentant les meilleures caractéristiques température / Courant – Tension

TEMPERATURE RATINGS		MAXIMUM RATINGS	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C	Operational Temperature	-40~+85°C
Temperature Coefficient of P_{MAX}	-0.41%/°C	Maximum System Voltage	1500V DC(IEC)
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.32%/°C	Max Series Fuse Rating	15A
Temperature Coefficient of I_{sc}	+0.055%/°C		

- Privilégier les modules Bi verre qui peuvent sur le long terme présenter de meilleures réponses à l'effet de température

➤ Choix des protections électriques

- Bien valider les équipements de protection électrique au cours du dimensionnement !!
- Considération des montées en température dans les boites

Dimensionnement d'une installation Solaire Photovoltaïque

Application 1

On désire réaliser une installation solaire photovoltaïque autonome dans les environs de Tunis pour un logement disposant les récepteurs suivants:

Récepteur	Puissance	Nombre	Heures d'utilisation
TV couleur	100 w	1	5
Fer à repasser	60 w	1	1
Radio	40 w	1	8
Lampes électriques	50 w	5	6
Lampes Fluo	15 w	3	2
Frigo	70 w	1	24

Utilisation de PVsyst

Utilisation de PVsyst

Sommaire

- Présentation
- Base de données
- Conception
- Inclinaison et orientation
- Scènes d'ombrage
- Système et pertes détaillées
- Explication du rapport final

Utilisation de PVsyst

1. Présentation



PVsyst V6.63 - PREMIUM - Logiciel pour Systèmes Photovoltaïques

Fichiers Préférences Langue Licence Aide

Choisissez une section

Pré-dimensionnement

Conception du projet

Bases de données

Outils

Sortir

Description

Gestion des bases de données météo et composants.

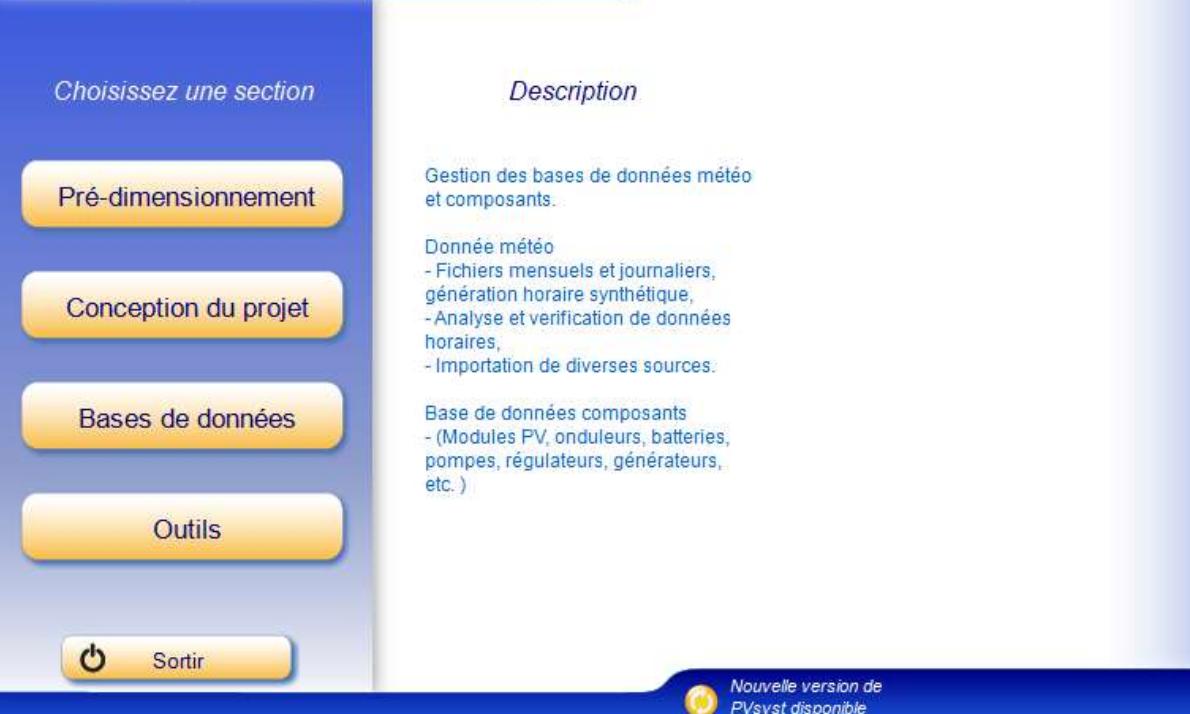
Donnée météo

- Fichiers mensuels et journaliers, génération horaire synthétique,
- Analyse et vérification de données horaires,
- Importation de diverses sources.

Base de données composants

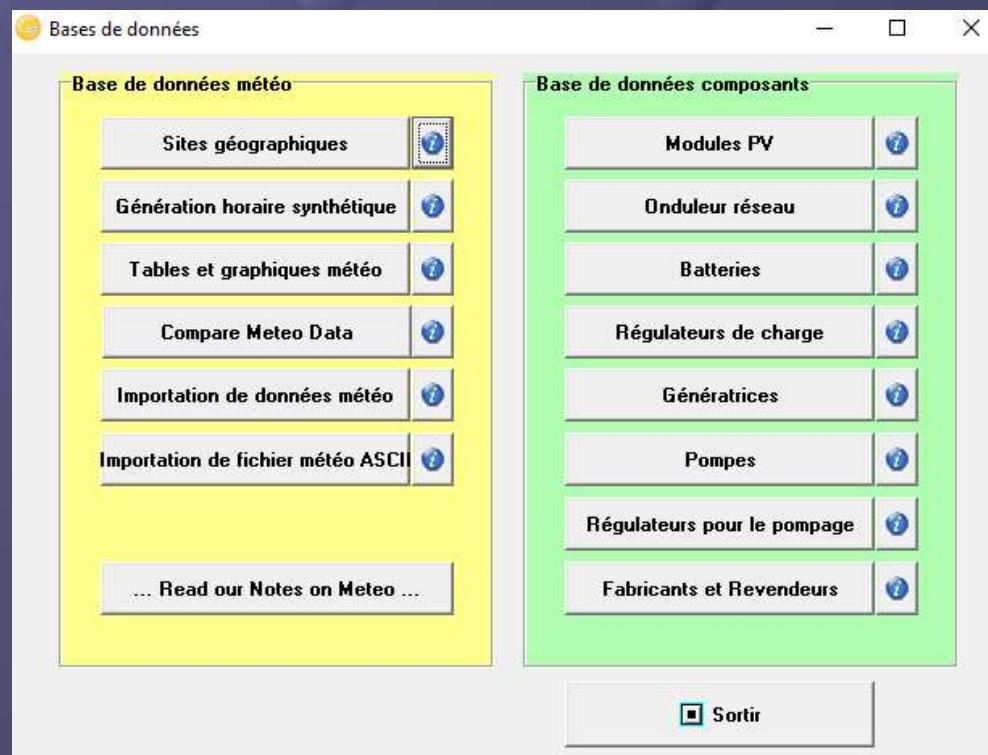
- (Modules PV, onduleurs, batteries, pompes, régulateurs, générateurs, etc.)

Nouvelle version de PVsyst disponible



Utilisation de PVsyst

2. BASE DE DONNEES COMPOSANTS

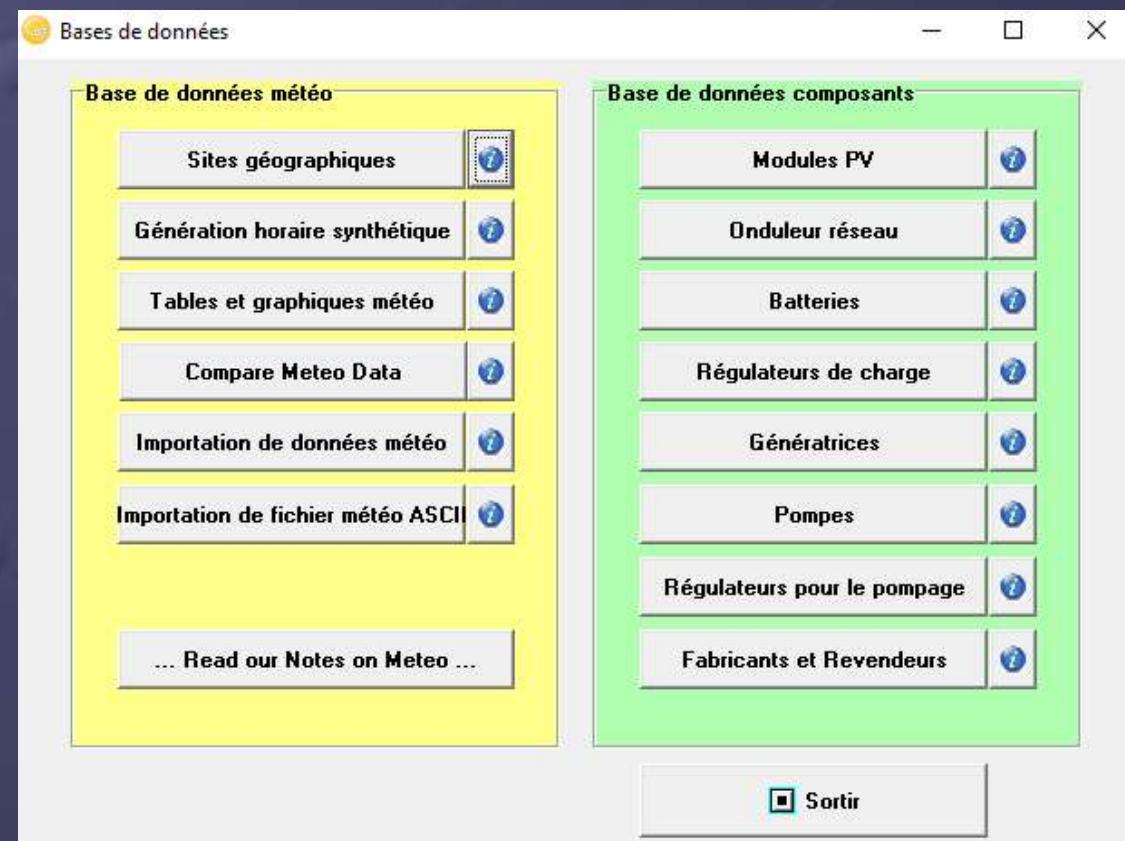


Utilisation de PVsyst

2. BASE DE DONNEES METEO

Sites géographiques

Nécessaire pour avoir les bonnes données météorologique du site
Données internes ou importées



Utilisation de PVsyst

2. BASE DE DONNEES METEO

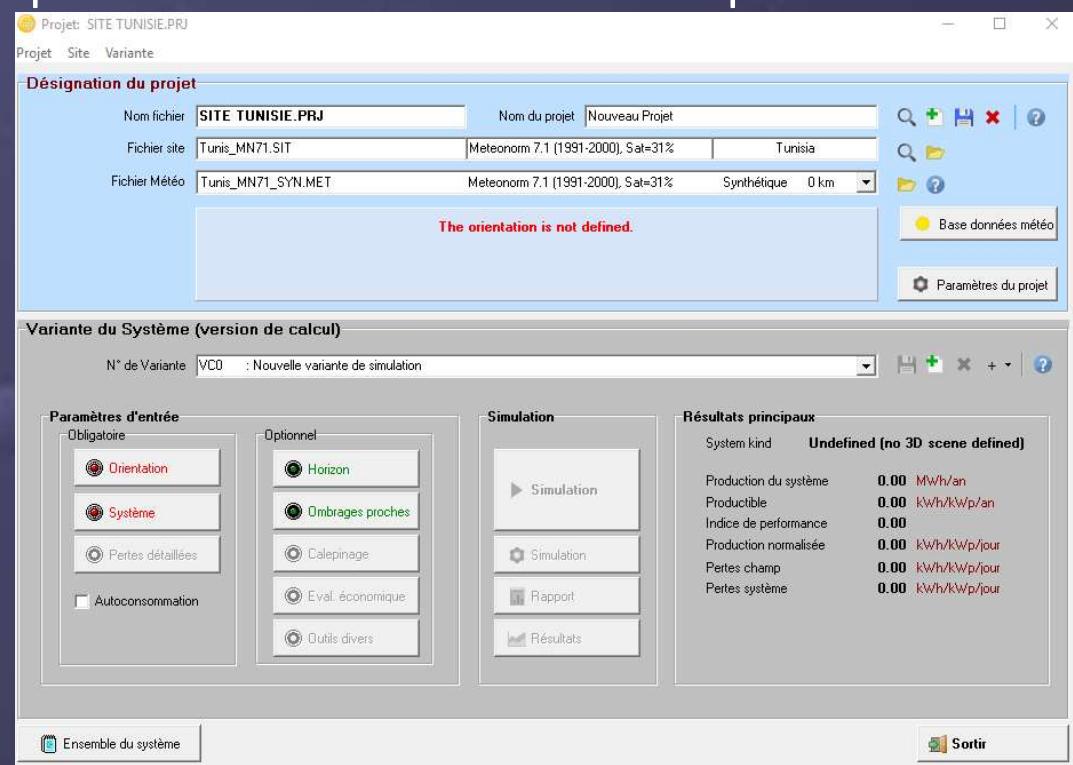
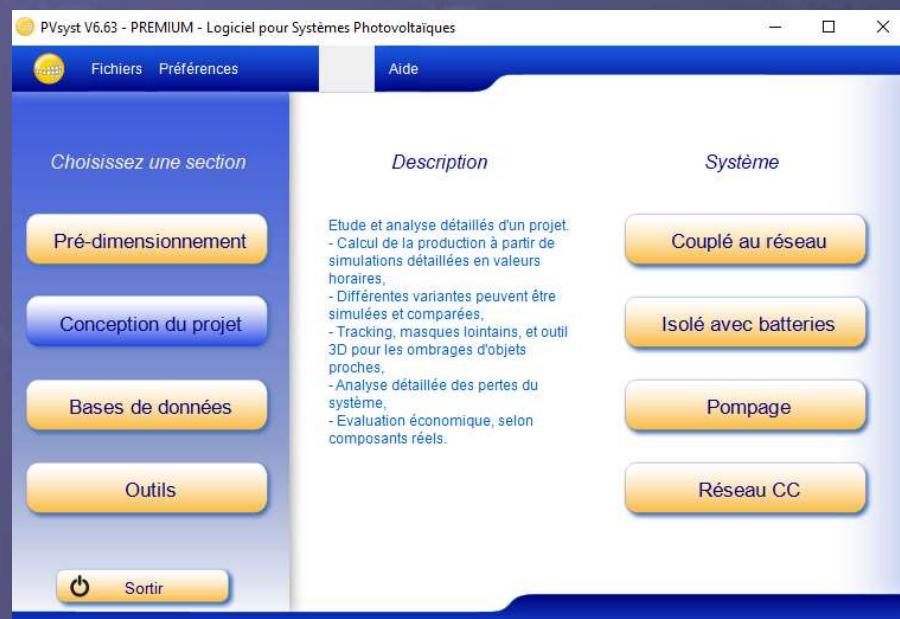
Sites géographiques

- PVsyst fonctionne avec des données horaires
- Possibilité de génération de données horaires à partir de données mensuelles
- Données rayonnement global horizontal
- Données rayonnement diffus
- Données température

Utilisation de PVsyst

3. CONCEPTION DE PROJET

Plusieurs variantes sont possible pour permettre d'étudier toutes les possibilités



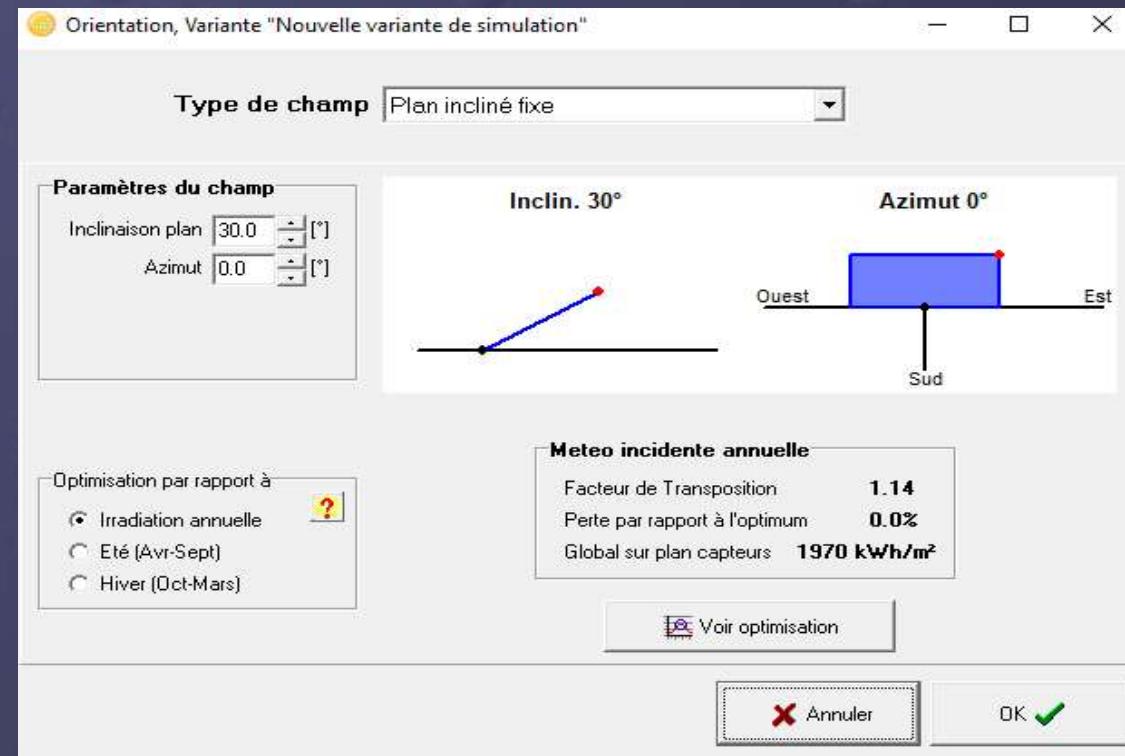
Utilisation de PVsyst

4. INCLINAISON ET ORIENTATION

ORIENTATION

L'orientation et l'inclinaison sont réglable dans ce volet

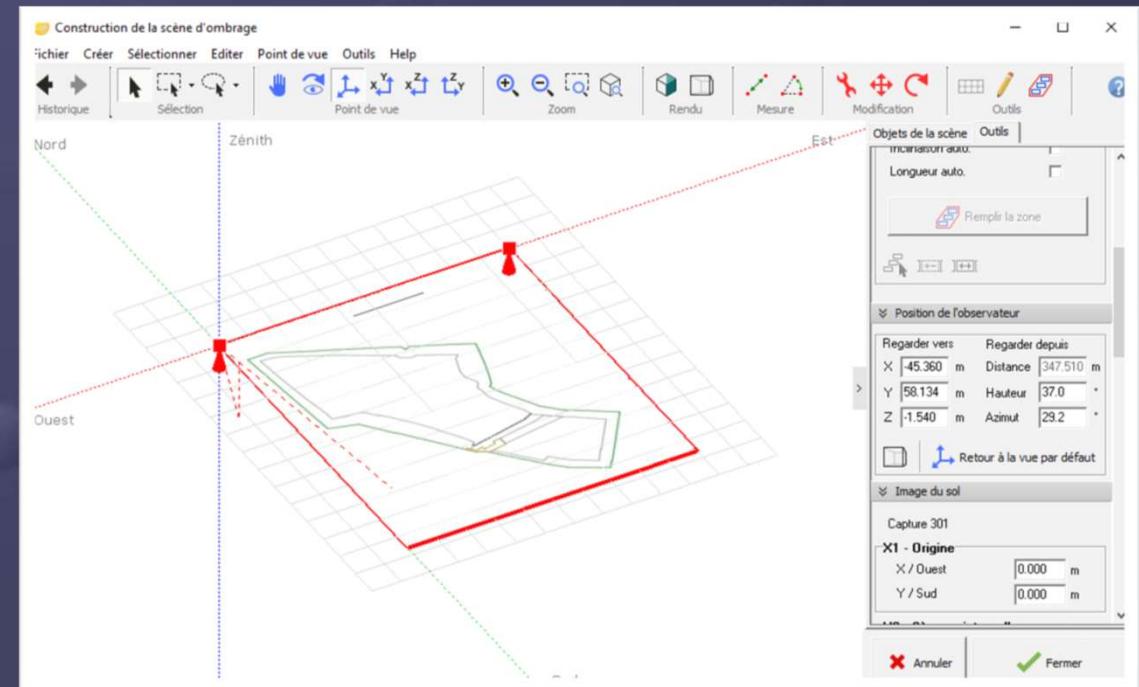
L'azimut est par rapport au sud



Utilisation de PVsyst

3. SCENES D'OMBRAGES PROCHES

Importer une image de sol en format jpeg ou png
Permet d'avoir le contour de la centrale à l'échelle

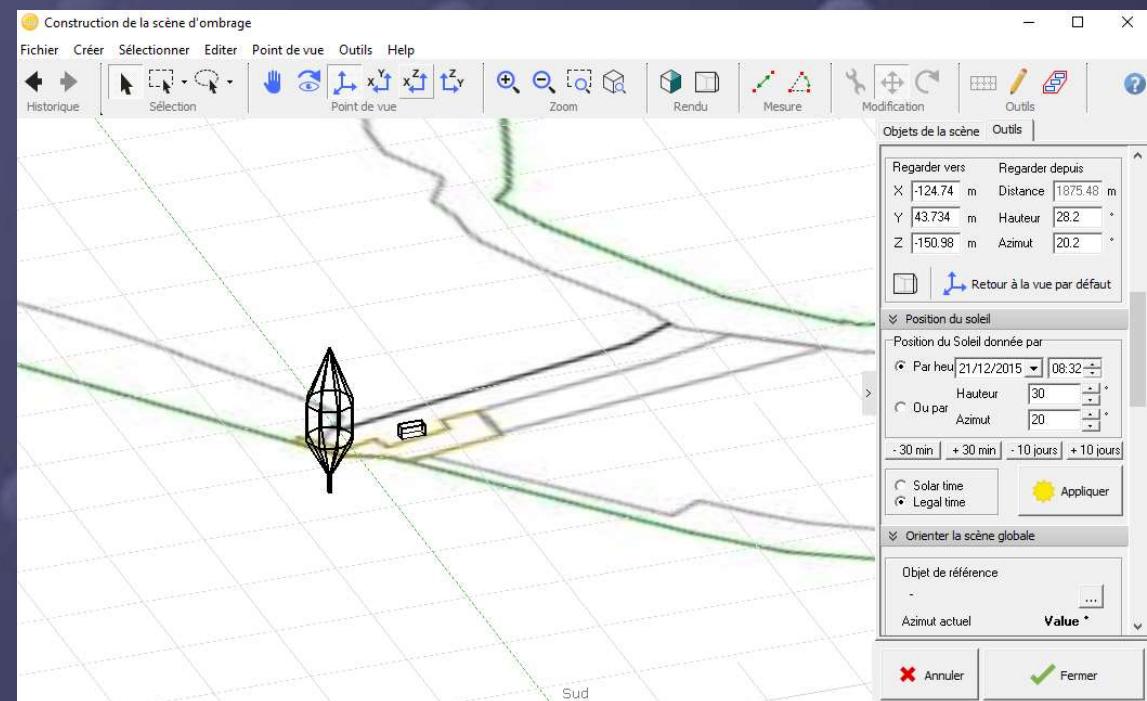


Utilisation de PVsyst

5. SCENES D'OMBRAGES PROCHES

Créer des objets d'ombrage proches tels que :

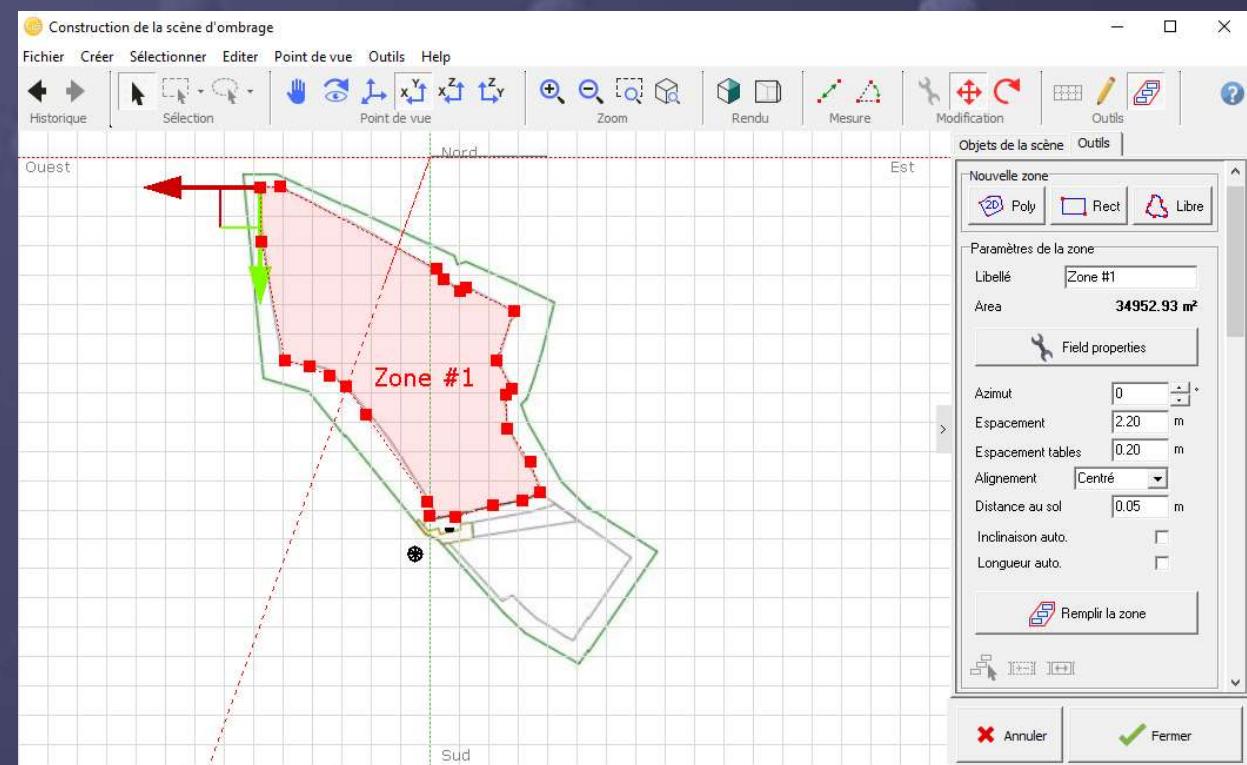
- Arbre
- Poste de Livraison
- Clôture ...



Utilisation de PVsyst

5. SCENES D'OMBRAGES PROCHES

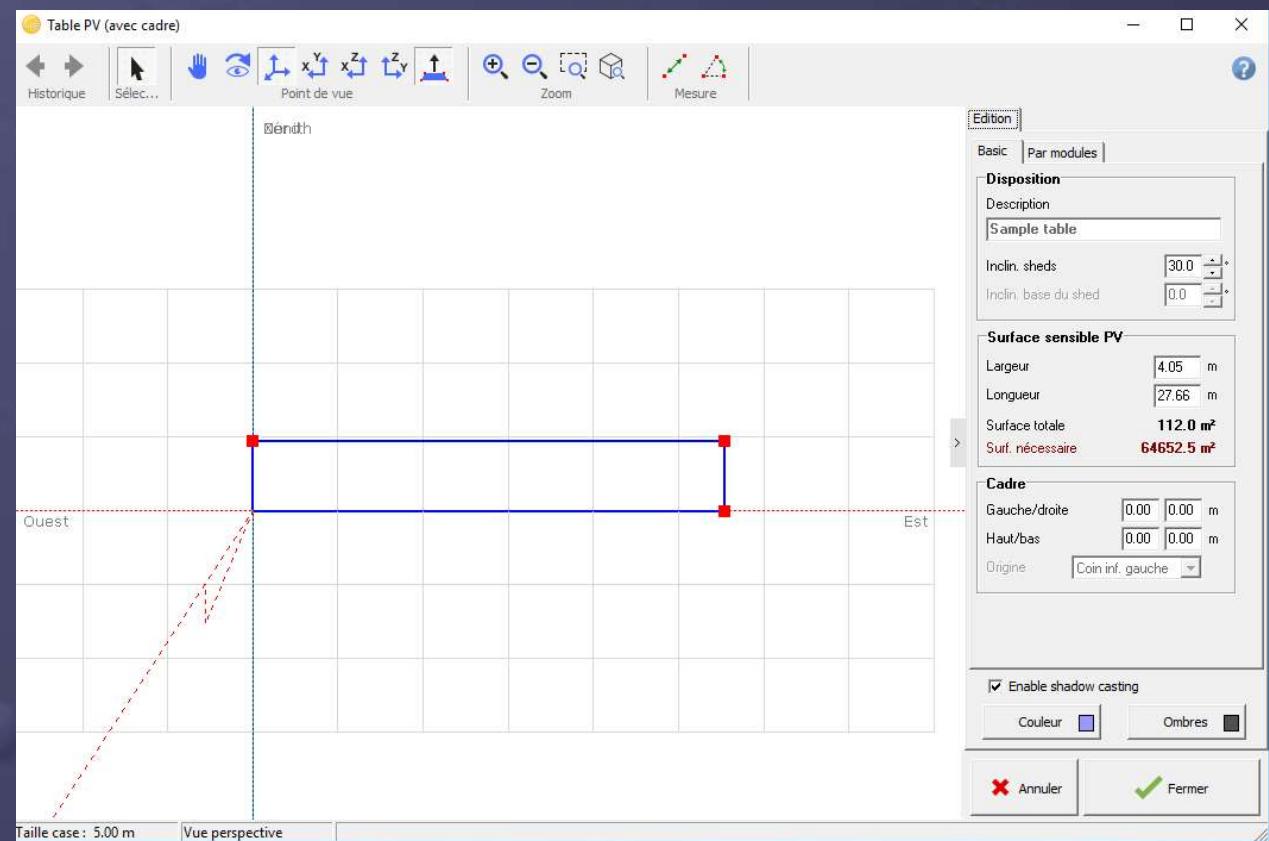
Création de zone



Utilisation de PVsyst

5. SCENES D'OMBRAGES PROCHES

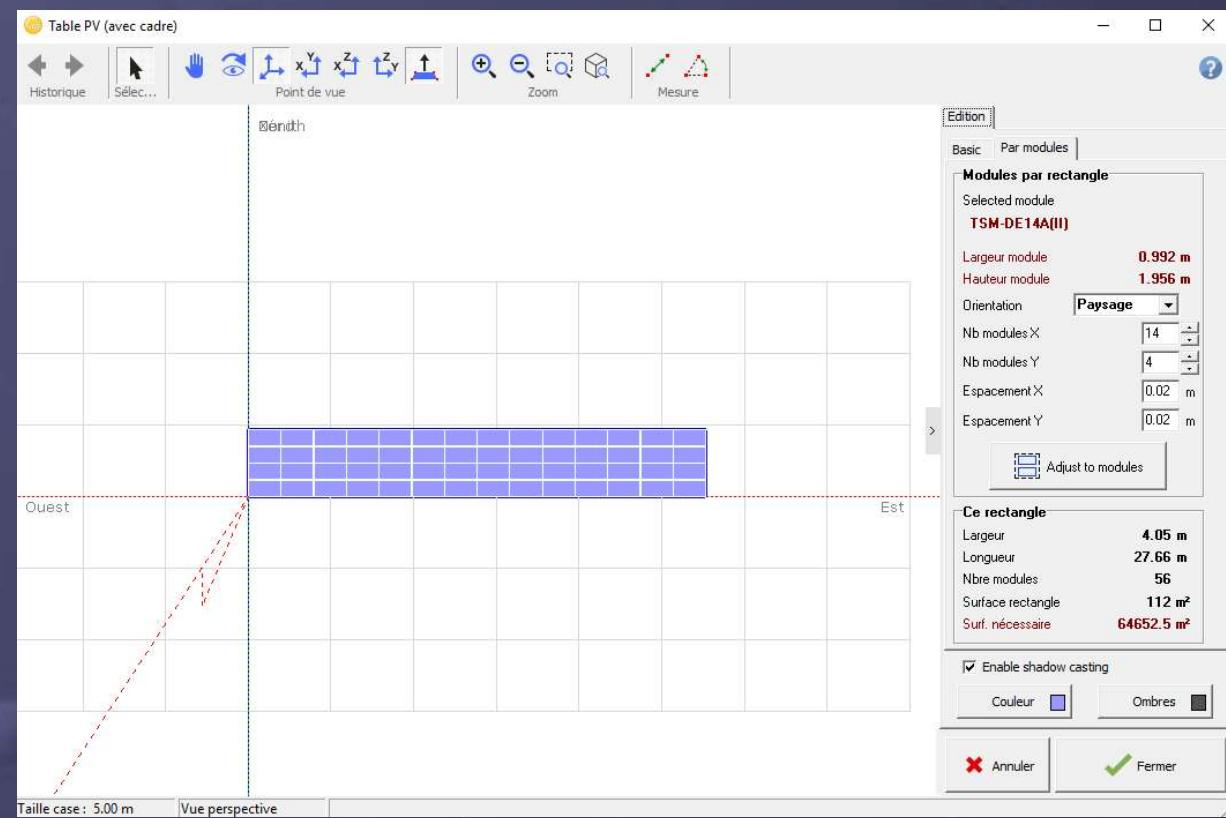
Remplir la zone de table de modules PV



Utilisation de PVsyst

5. SCENES D'OMBRAGES PROCHES

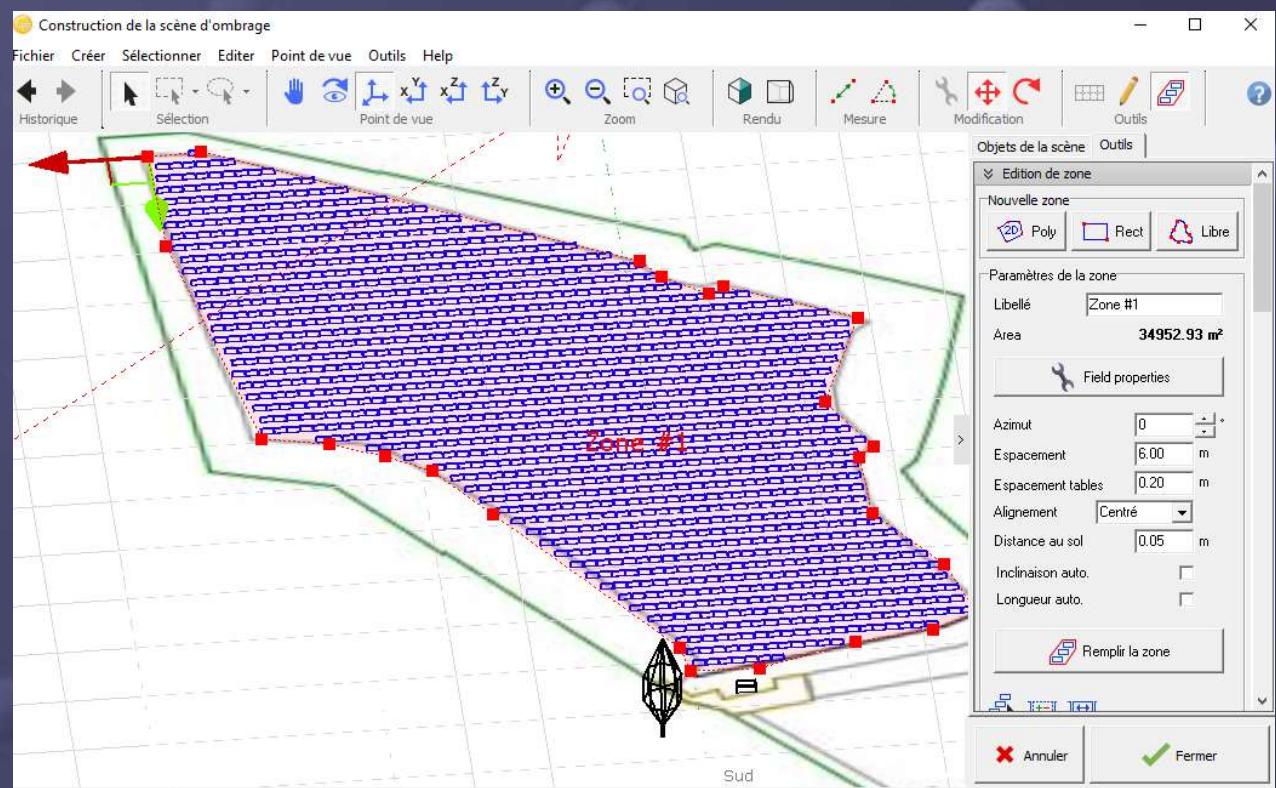
Remplir la zone de table de modules PV



Utilisation de PVsyst

5. SCENES D'OMBRAGES PROCHES

Besoin du pitch entre table



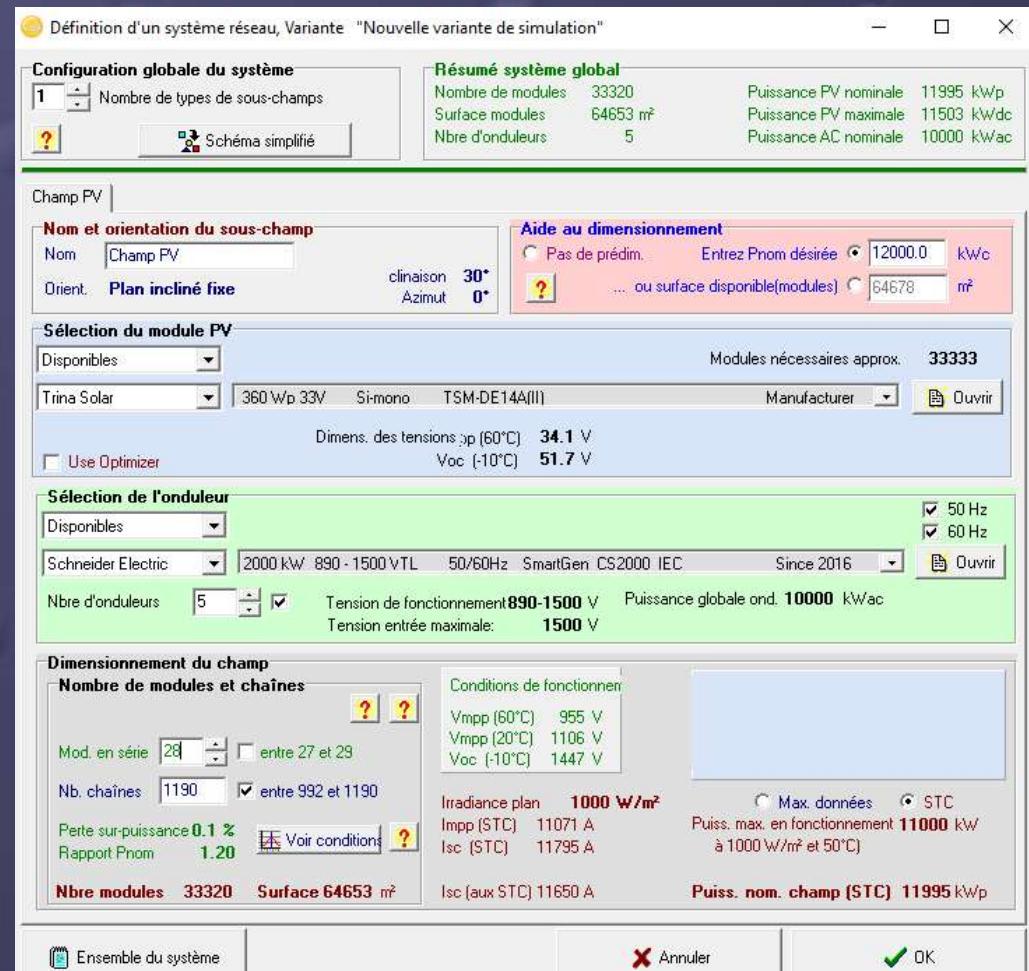
Utilisation de PVsyst

6. SYSTÈME DE PERTES

Cette partie permet de dimensionner la centrale PV

- La puissance du champ
- Les modules PV
- Le type d'onduleur

Le logiciel vérifie le nombre de chaînes et le nombre de modules PV par chaîne



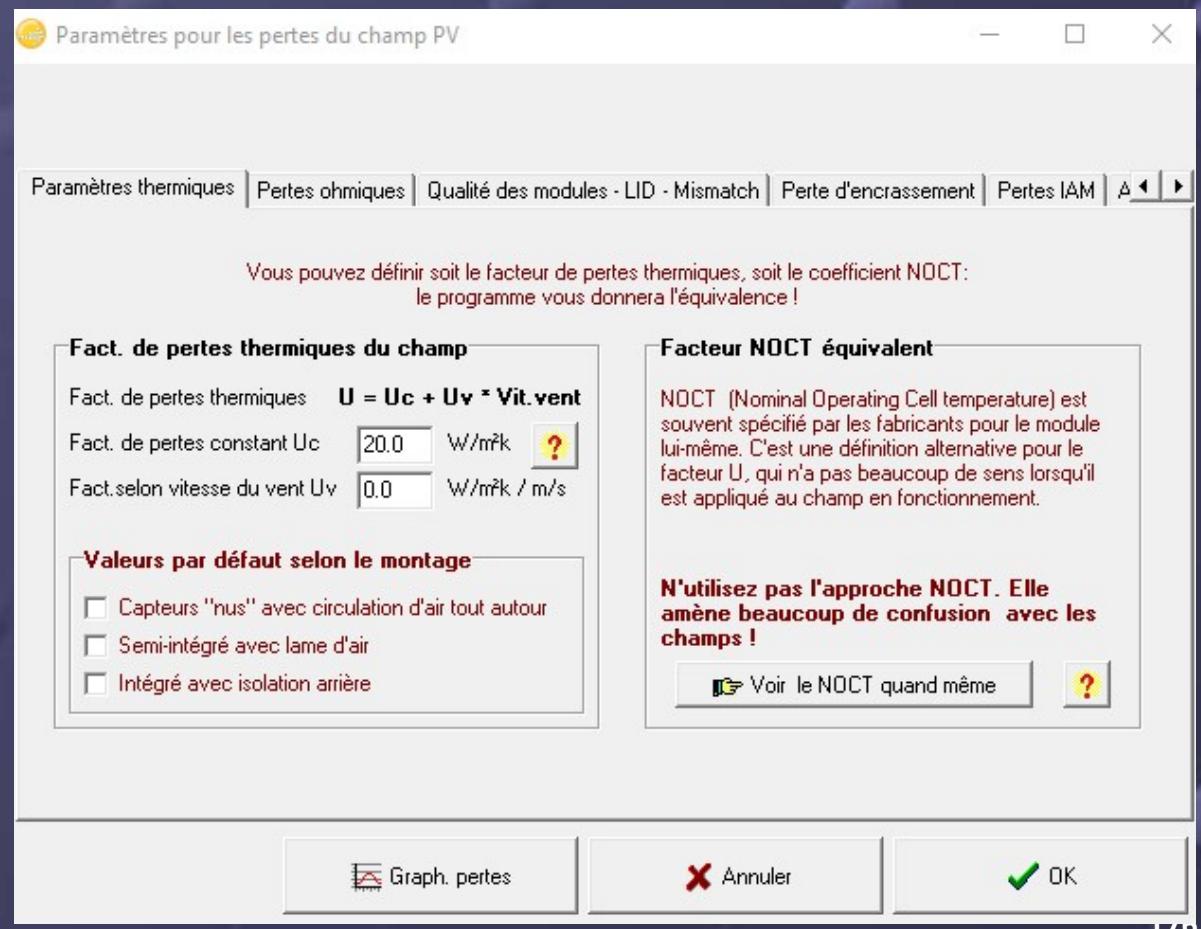
Utilisation de PVsyst

6. SYSTÈME DE PERTES

Pertes thermiques

Ce volet sert à définir le refroidissement des modules par rapport au type de pose

Pour les centrales au sol, la valeur par défaut du montage sera « capteurs nu » qui sera égale à 29 W/m²k



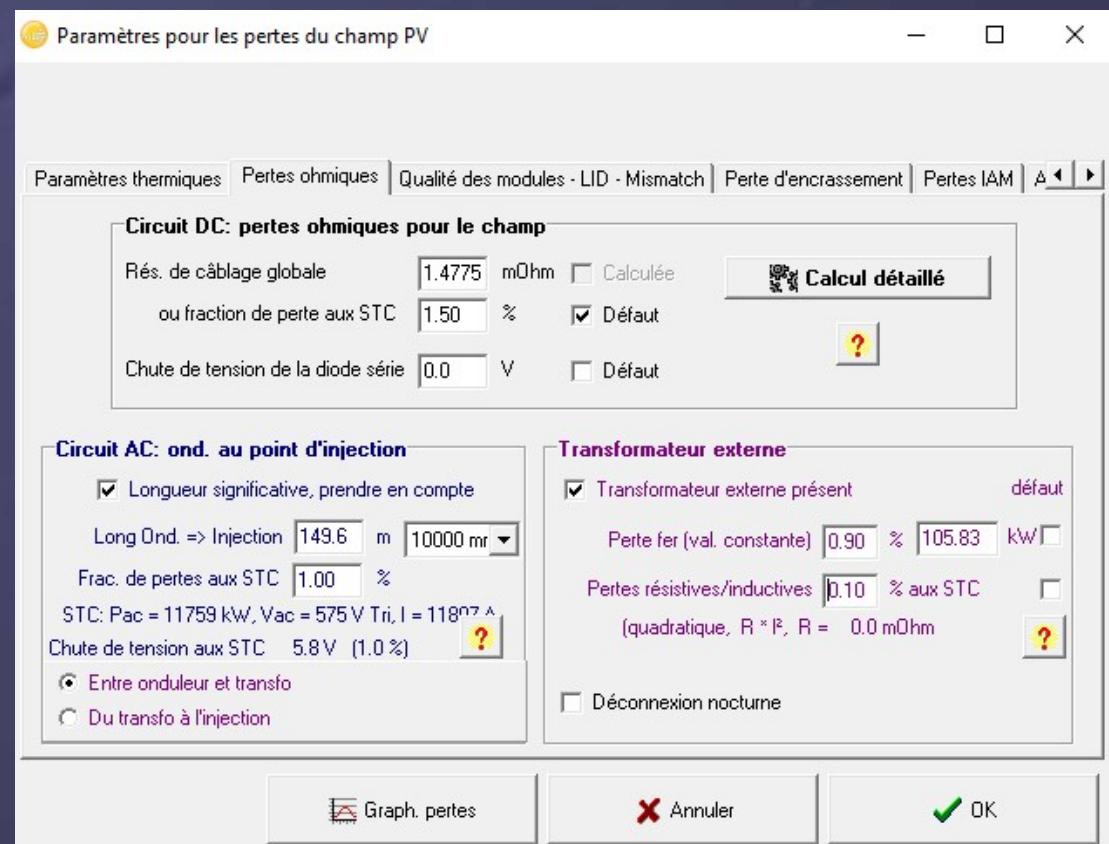
Utilisation de PVsyst

6. SYSTÈME DE PERTES

Pertes ohmiques

Ce volet sert à définir les pertes d'énergie due au câblage

Pour les centrales au sol, la valeur par défaut du montage sera « capteurs nu » qui sera égale à 29 W/m²k



Utilisation de PVsyst

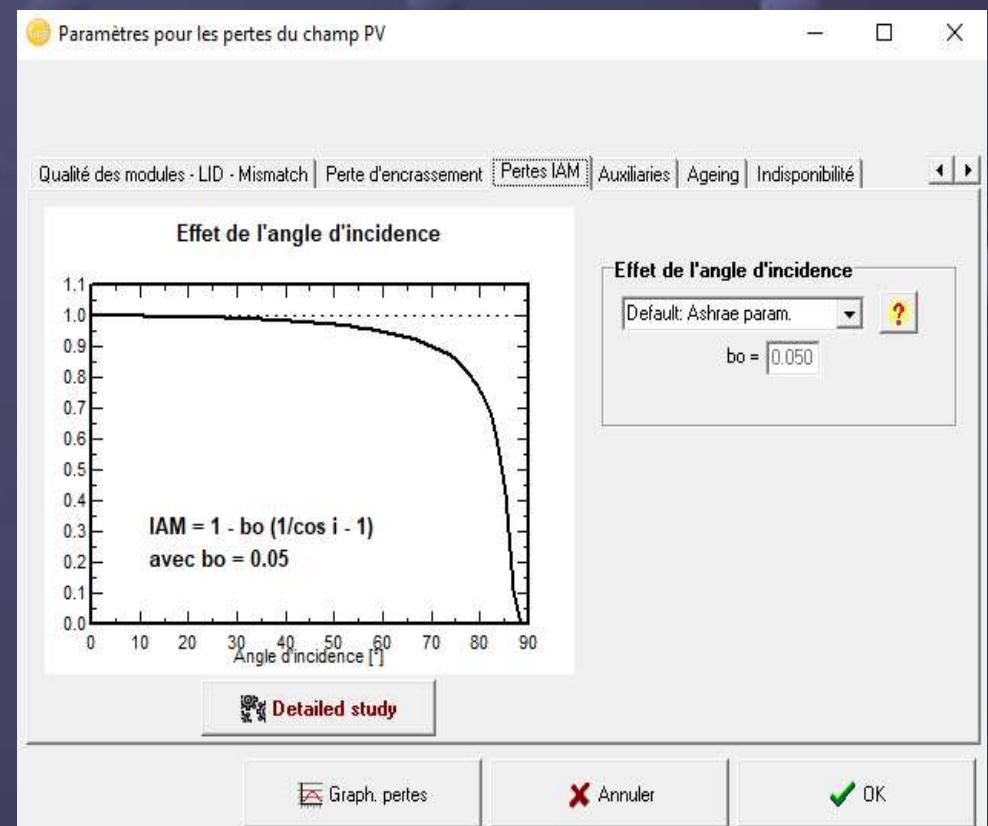
6. SYSTÈME DE PERTES

Pertes encrassement – IAM et indisponibilité

Les volets qui suivent permettent de régler :

- La perte due à l'encrassement du champ
- Les pertes IAM due à la réflexion des rayons du soleil par le module PV
- Le temps d'indisponibilité de la centrale (maintenance, pannes...)

es des modules PV sensiblement différentes dans la réalité



Utilisation de PVsyst

6. SYSTÈME DE PERTE DETAILLEES

ORDRE DE GRANDEUR

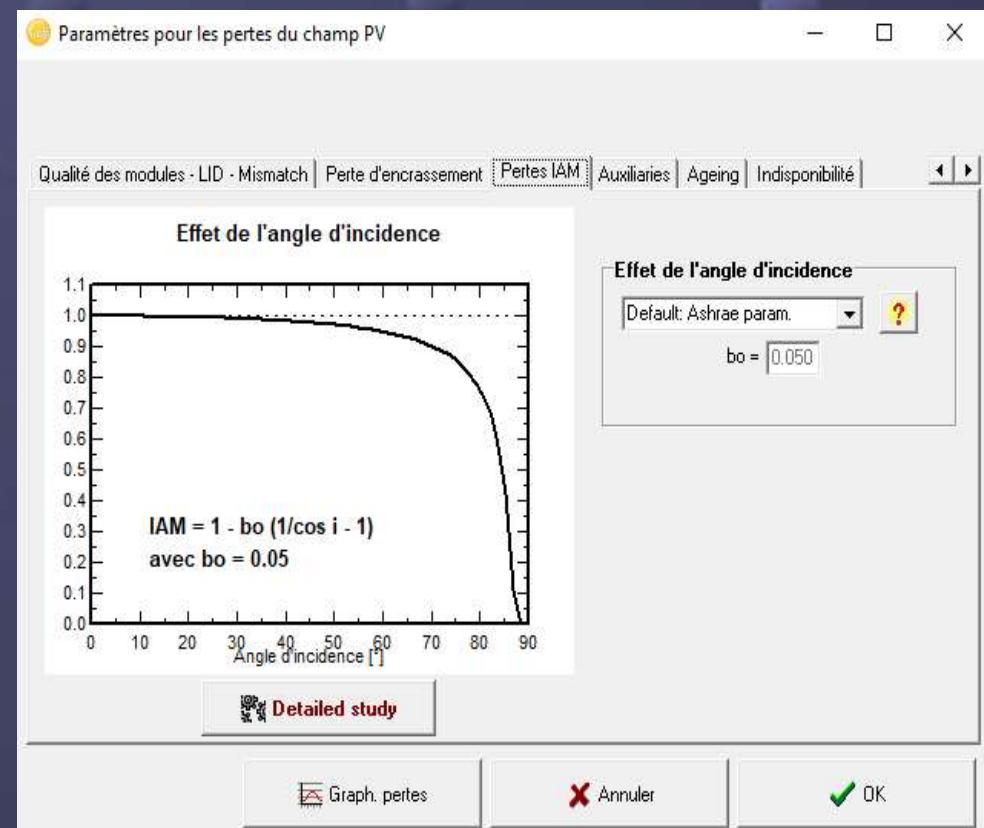
Dégradation annuelle : 0,5%

Indisponibilité technique

- Si contrat de maintenance : 1,5%
- Sans contrat de maintenance : 3 à 5%

Soiling

- Site normal : 1%
- Site exposé (autoroute, usine agricole...) : 2%
- Site désertique, avec beaucoup de poussière : 3 à 5%



Utilisation de PVsyst

7. Exploitation du rapport

La touche « simulation » permet d'éditer un rapport complet de la centrale PV

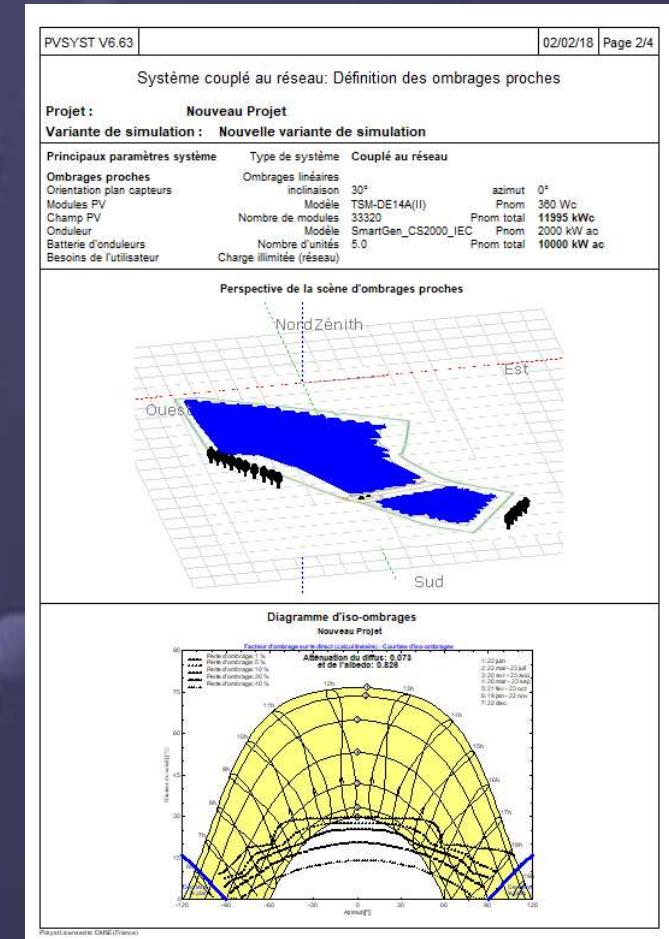
PVSYST V6.63	02/02/18	Page 1/4
Système couplé au réseau: Paramètres de simulation		
Projet : Nouveau Projet		
Site géographique	Tunis	Pays Tunisia
Situation	Latitude 36.83° N Temps défini comme Fus. horaire TU+1	Longitude 10.23° E Altitude 2 m
Données météo:	Albédo 0.20 Tunis Meteonorm 7.1 (1991-2000), Sat=31% - Synthétique	
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation		
Date de la simulation	02/02/18 à 12h35	
Paramètres de simulation		
Orientation plan capteurs	Inclinaison 30°	Azimut 0°
Modèles utilisés	Transposition Perez	Diffus Perez, Meteonorm
Horizon	Pas d'horizon	
Ombrages proches	Ombrages linéaires	
Caractéristiques du champ de capteurs		
Module PV	Si-mono	Modèle TSM-DE14A(II)
Custom parameters definition	Fabricant TRINA SOLAR	
Nombre de modules PV	En série	En parallèle 1190 chaînes
Nombre total de modules PV	28 modules	380 Wc
Puissance globale du champ	Nbre modules 3320	Puissance unitaire 11985 kWc Aux cond. de fonct.
Caractéristiques de l'onot. du champ (50°C)	Nominales (STC) 11985 kWc	11000 kWc (50°C)
Surface totale	U mpp 994 V	I mpp 11071 A
	Surface cellule 64553 m²	Surface cellule 58944 m²
Onduleur	Modèle SmartGen_CS2000_IEC	
Custom parameters definition	Fabricant Schneider Electric	
Caractéristiques	Tension de fonctionnement 890-1500 V	Puissance unitaire 2000 kWac
Batterie d'onduleurs	Nbre d'onduleurs 5 unités	Puissance totale 10000 kWac
Facteurs de perte du champ PV		
Enrassement du champ		Frac. pertes 2.0 %
Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	Uv (vent) 0.0 W/m²K / m/s
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ 1.5 mOhm	Frac. pertes 1.5 % aux STC
LID - "light induced degradation"		Frac. pertes 2.0 %
Perte de qualité module		Frac. pertes 1.0 %
Perte de "ismatch" modules		Frac. pertes 1.0 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM = 1 - bo (1/cos i - 1)	Param. bo 0.05
Facteurs de perte du système		
Perte AC entre onduleur et transfo	Tension onduleur 575 Vac tri	Frac. pertes 1.0 % aux STC
Transformateur externe	Conducteurs: 3x1000.0 mm² 150 m	Frac. pertes 0.9 % aux STC
	Perte fer (Connexion 24H) 105831 W	Frac. pertes 0.1 % aux STC
	Pertes résistives/inductives 0.0 mOhm	
Besoins de l'utilisateur :		
Charge illimitée (réseau)		

Utilisation de PVsyst

7. Exploitation du rapport

La 2^{ème} page montre

- la scène d'ombrage réalisée
- le diagramme d'ombrages lointains (horizon)

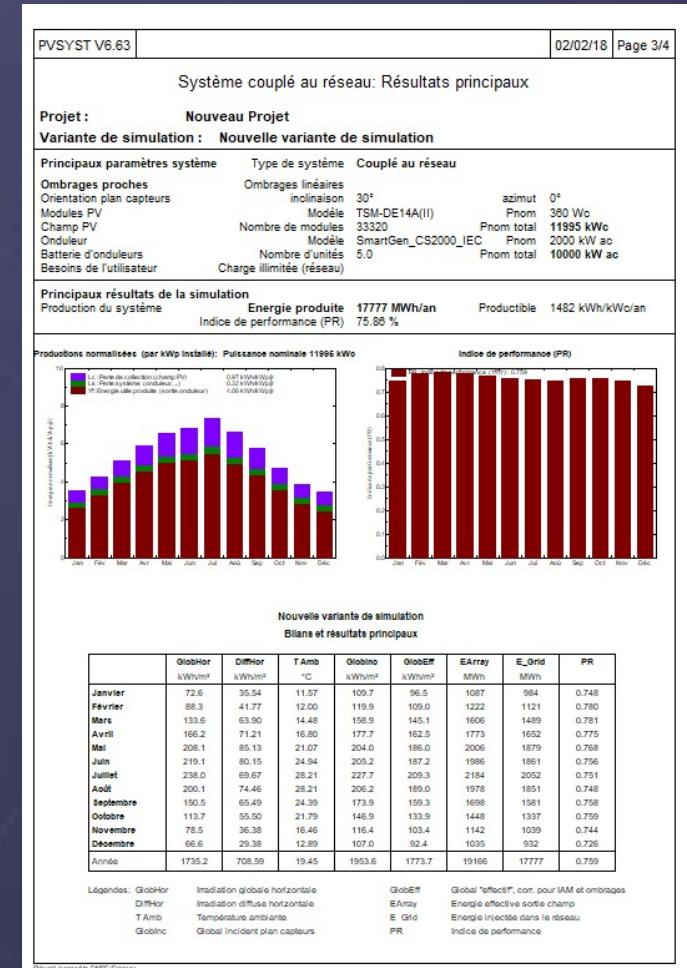


Utilisation de PVsyst

7. Exploitation du rapport

La 3^{ème} page montre

- L'énergie produite
- L'indice de performance (PR) (rapport entre le rendement réel et le rendement théorique de l'installation)
- Le productible
- Le bilan de l'irradiation et des températures sous forme de tableau



Utilisation de PVsyst

7. Exploitation du rapport

RAPPORT Le Ratio de Performance

$$PR = \frac{E}{\frac{G}{I} * P_c}$$

E : Energie produite (kWh)

G : Irradiation reçue par les modules (kWh/m²)

Pc : Puissance crête de la centrale (Wc)

I : Ensoleillement à STC (W/m²)

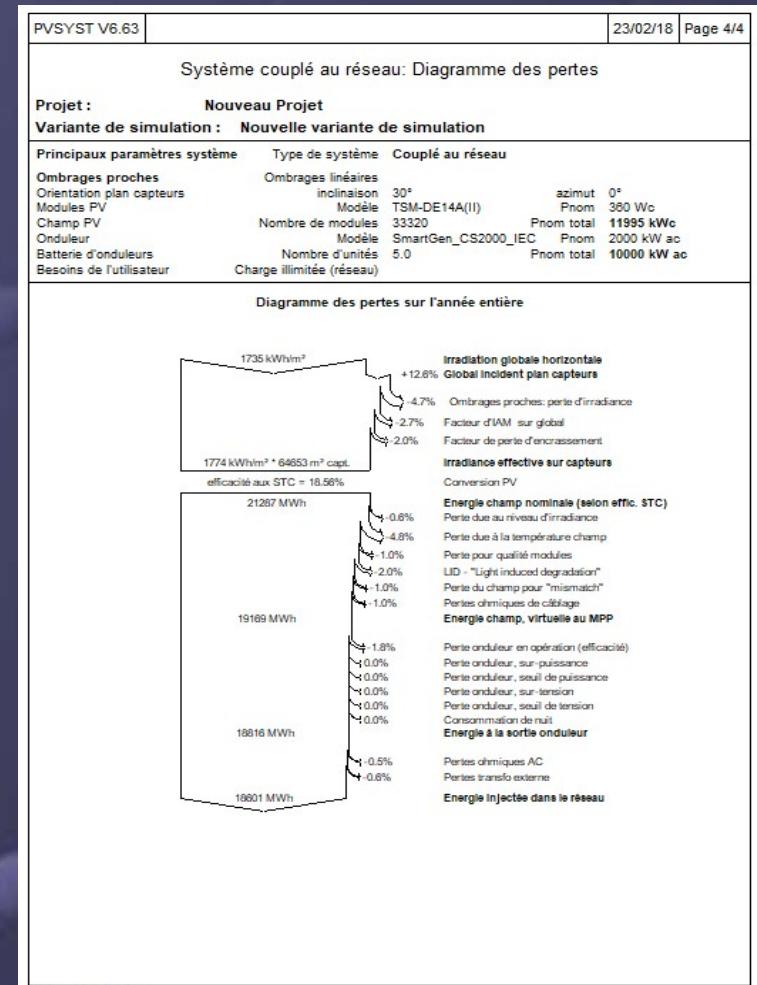
PVSYST V6.63		02/02/18 Page 3/4						
Système couplé au réseau: Résultats principaux								
Projet : Nouveau Projet								
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation								
Principaux paramètres système		Type de système	Couplé au réseau					
Ombages proches		Ombages linéaires						
Orientation plan capteurs		Inclinaison 30°	azimut 0°					
Modules PV	Modèle TSM-DE14A(II)	Pnom 380 Wc						
Champ PV	Nombre de modules 33320	Pnom total 11995 kWc						
Onduleur	Modèle SmartGen_CS2000_IEC	Pnom 2000 kW ac						
Batterie d'onduleurs	Nombre d'unités 5,0	Pnom total 10000 kW ac						
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)							
Principaux résultats de la simulation								
Production du système		Energie produite 17777 MWh/an	Productible 1482 kWh/kWc/an					
Indice de performance (PR)		75,88 %						
Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 11995 kWc								
Nouvelle variante de simulation								
Bilans et résultats principaux								
	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T Amb °C	Globino kWh/m²	GlobEF kWh/m²	EAray MWh	EGrid MWh	PR
Janvier	72,6	35,54	11,57	100,7	96,5	1087	984	0,748
Février	88,3	41,77	12,00	119,9	109,0	1222	1121	0,780
Mars	133,6	63,90	14,48	156,9	145,1	1606	1489	0,781
Avril	165,2	71,21	16,80	177,7	162,5	1773	1652	0,775
Mai	208,1	85,13	21,07	204,0	186,0	2006	1879	0,768
Juin	215,1	80,15	24,94	205,2	187,2	1986	1861	0,756
Juillet	238,0	69,67	28,21	227,7	209,3	2184	2030	0,751
Août	200,1	74,46	28,21	205,2	193,0	1976	1851	0,748
Septembre	160,5	65,49	24,39	173,9	159,3	1688	1581	0,758
Octobre	113,7	55,50	21,79	145,9	133,9	1448	1337	0,759
Novembre	78,5	36,38	16,46	116,4	103,4	1142	1039	0,744
Décembre	66,6	29,38	12,89	107,0	92,4	1035	932	0,726
Année	1735,2	708,59	19,45	1953,6	1773,7	19166	17777	0,759
Legendes: GlobHor = Irradiation globale horizontale DiffHor = Irradiation diffuse horizontale T Amb = Température ambiante Globino = Global incident plan capteurs				GlobEF = Global "efficif", c'est pour IAM et ombages EAray = Energie effective sortie champ E Grid = Energie injectée dans le réseau PR = Indice de performance				

(PVSYST license to GDFE (France))

Utilisation de PVsyst

7. Exploitation du rapport

La 4^{ème} et dernière page résume toutes les pertes sur l'année entière sous forme de diagramme



Utilisation de PVsyst

CdTe	Tedlure de Cadnium
Derating	Declassemement (perte de sa capacité sous un effet)
Ha	Hectare
IAM	Indice Air Masse
LCOE	Levelized Cost of Energy
PDL	Point de Livraison
STC	Standard Temperature Condition

Etude de Compatibilité

Le dimensionnement des onduleurs dépend des générateurs photovoltaïques de manière à ce que :

- La plage de tension d'entrée de l'onduleur est **compatible** avec la tension en circuit ouvert et la tension MPP du champ du module tout au long de l'année (à partir de 1000 W / m^2 à -10°C et 200 W / m^2 à 70°C)
- Le courant d'entrée admissible de l'onduleur **est supérieur** au courant maximum fourni par le champ des modules à 1000 W / m^2 et 70°C
- Le rapport entre la puissance nominale de l'onduleur et la puissance crête des générateurs correspondants est compris entre **0,8 et 1,2**

Etude de Compatibilité

Compatibilité en fonction de la tension

Le niveau de tension présent aux bornes de l'onduleur dans une chaîne est dérivé de la somme des tensions des modules interconnectés en série avec cette chaîne.

La tension d'un micro-onduleur représente la tension du panneau auquel il est lié.

La tension du panneau photovoltaïque et la tension du générateur photovoltaïque sont :

- Fortement affectées par la température (la tension sera considérablement réduite lorsque la température augmente).
- Faiblement affectées par le rayonnement solaire (la tension augmente très vite, puis reste relativement constante par rapport au rayonnement).

Etude de Compatibilité

Compatibilité en fonction de la tension

Afin d'atteindre la plage de tension MPP, nous devons utiliser **le coefficient de température du module** pour calculer la tension la plus élevée et la plus basse que le champ PV produira. Ces tensions devraient satisfaire ses conditions :

- inférieures à la tension maximale admissible par l'onduleur et supérieures à la tension minimale.

Etude de Compatibilité

Compatibilité en fonction de la tension

La tension extrême du module dans la chaîne est calculée en conditions hivernales les plus défavorables

Dans ces conditions, la tension à vide du module augmentera de :

$$\Delta V = (T_{min} - 25 \text{ } ^\circ C) \beta$$

Par conséquent, la tension maximale à l'entrée de l'onduleur est :

- $VOCMax = (VOC + \Delta V) \text{ NbMod en série}$

Etude de Compatibilité

Compatibilité En fonction de la tension

Dans une chaîne photovoltaïque la tension minimale des modules est calculée pour une température pouvant atteindre 85°C (seuil de la plage de fonctionnement de la plupart des modules photovoltaïques) pour une installation placée à l'air libre :

$$\Delta V = (T_{max} - 25^\circ C) \beta$$

Etude de Compatibilité

Compatibilité En fonction de la tension

D'où la tension minimale à l'entrée de l'onduleur est :

- $VOCMin = (VOC - \Delta V) \cdot NbMod \text{ en série}$

Avec :

T_{min} : C'est la température minimale du module prise à $-10^{\circ}C$

T_{max} : C'est la température maximale du module prise à $85^{\circ}C$

β : Représente un coefficient tension-température du panneau solaire donnée par le constructeur du module en $mV/{}^{\circ}C$

Etude de Compatibilité

Compatibilité en fonction du courant

A l'entrée de l'onduleur la valeur du courant DC est :

- Fortement affectée par le rayonnement solaire
- Faiblement affectée par la température (le courant augmentera légèrement lorsque la température augmente).

Etude de Compatibilité

Compatibilité en fonction du courant

Le courant maximal créé au niveau du générateur **ne doit pas dépasser** le courant d'entrée **maximal admissible** par l'onduleur.

Le nombre de chaînes liées en parallèle (le courant maximal du générateur photovoltaïque) est déterminé par la formule suivante :

$$ISCM_{Max} = (ISc + (TMax - 25) * \alpha) * N_{mod \text{ en parallèle}}$$

Avec :

α : Représente le coefficient courant-température du panneau solaire donnée par le constructeur et exprimé en mA/°C

Etude de Compatibilité

Compatibilité en fonction de la puissance

Les puissances du générateur photovoltaïque et de l'onduleur doivent avoir des valeurs proches.

En effet la puissance nominale AC de l'onduleur doit être égale à la puissance du GPV (sous les conditions STC) avec une tolérance de $\pm 20\%$.

Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW



Données :

Données géographiques

Le site de notre 'installation sera dans la ville de Tazarka appartenant au gouvernorat de Nabeul.

Coordonnées :

Latitude : 36,53°

Longitude : 10,82°

Altitude : 16m

Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW



Etape 1 : Pré dimensionnement

1. Déterminer l'irradiation solaire et la température moyenne de la ville de Tazarka et comparer les résultats à ceux de logiciel PVGIS (des trois dernières années)
2. Analyser la trajectoire du soleil, détailler les différentes courbes

Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW



Etape 2 : Conception du projet

1. Fixer l'inclinaison et l'orientation de l'installation PV et discuter les pertes par rapport l'optimum
2. Choisir les équipements nécessaires de l'installation

Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW

Etape 2 : Conception du projet

2.1. Choix des Modules PV

- a. Réaliser une étude comparative en termes de puissance, surface, nombre de modules et dimensions, entre les types suivants: **Tenesol, Solvis, Futurasun, Axitec, JA Solar,, Trina Soalr**



Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW

Etape 2 : Conception du projet

2.1.Choix des Modules PV

- b. Quels sont les modèles les plus adaptés dans notre cas. Comparer en utilisant P_{mmp} et les courbes : courant /tension
- c. Interpréter



Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW



Etape 2 : Conception du projet

2.2.Choix de l'onduleur

- a. Sélectionner le modèle ABB Trio
- b. Déterminer les principaux paramètres de ce modèle : la plage de fonctionnement MPPT et son efficacité
- c. Analyser la courbe d'efficacité de l'onduleur pour différentes tensions d'entrée

Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW



Etape 2 : Conception du projet

2.2.Choix de l'onduleur

- d. Détermine le facteur de puissance et la variation de la puissance maximale
- e. Interpréter
- f. Etudier les compatibilités Tension , Courant et puissance

Problème: Dimensionnement d'une installation PV de 20KW



Etape 3 : Analyse des pertes

3. Examiner le rapport PvSyst et analyser les différentes pertes



Le prochain chapitre: Centrales solaires à concentration