

**CAHIER DE CAPITALISATION N° 4**

4

Le modèle technique de la plateforme

Capitalisation de l'expérience du Projet d'électrification rurale dans le Brakna (PERUB) – Mauritanie

*Programme réalisé par le GRET, en collaboration avec l'APAUS
(Agence de promotion de l'accès universel aux services)*

Le programme PERUB a été financé par :



l'Union européenne

(dans le cadre de la Facilité Énergie du 9^e FED)



l'APAUS

(Agence de promotion de l'accès universel aux services)

Il a été mis en œuvre par le



Août 2011

Cette capitalisation n'aurait pu voir le jour sans les contributions de l'ensemble de l'équipe PERUB.

Rédaction : Benjamin Trouilleux

Coordination : Julien Cerqueira, Bernard Gay et Samba Camara

Plans : Ibrahima N'Diaye

Cartographie : Julien Cerqueira

Photographie : Benjamin Trouilleux

Maquette : Nancy Cossin

Sommaire

I. UNE SOLUTION TECHNIQUE ADAPTÉE AU POTENTIEL ET AUX CONTRAINTES DE LA RÉGION	3
II. LES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME DE PRODUCTION ET DE CONTRÔLE DE L'ÉNERGIE	4
1. Le système de production de l'électricité	4
2. Le système de contrôle de l'électricité	5
• Les batteries	5
• Les régulateurs de charge et de décharge	6
III. APPROCHE GÉNÉRALE DU DIMENSIONNEMENT	7
1. Le dimensionnement des modules photovoltaïques	7
2. Le dimensionnement des batteries	8
3. Le dimensionnement du régulateur et des câbles	8
IV. DESCRIPTIF TECHNIQUE DES SERVICES D'UNE PLATEFORME	9
1. Le congélateur solaire	9
2. Le moulin solaire	11
3. Le système de soudure	14
4. Le système 200 V AC	17
5. Le chargeur de batteries et les kits d'éclairage individuels	21
6. La plateforme complète	24
V. LE DESCRIPTIF DU GÉNIE CIVIL D'UNE PLATEFORME	25
1. Un bâtiment adapté aux services proposés	25
2. Un bâtiment adapté aux contraintes techniques	26
3. La construction d'une plateforme	27
VI. ENSEIGNEMENTS	27

Le Programme d'électrification rurale dans le Brakna (PERUB)

De 2008 à 2011, le Gret a mis en œuvre un programme expérimental d'électrification rurale (PERUB) dans la région du Brakna en Mauritanie. Dans ce cadre, 24¹ Plateformes de services électrifiés (PSE) ont été installées dans des villages enclavés énergétiquement, d'environ 1 000 habitants et ayant fait part de leur motivation.

Une plateforme est un bâtiment, équipé de panneaux solaires, dans lequel différents types de services électrifiés sont exploitables.

Toutes les plateformes sont équipées des services de base suivants :

- la charge de téléphones portables ;
- la charge de batteries pour les kits d'éclairage individuels. Ces kits sont proposés par le Gret et peuvent être acquis par les villageois.

En fonction des besoins du village, d'autres services complémentaires peuvent être installés :

- une télévision couleur ;
- un moulin solaire à céréales ;
- un à quatre congélateurs solaires ;
- quatre prises pour des services artisanaux comme la réparation de pneus, la coiffure, la couture, etc. ;
- un système de soudure à l'arc.

La plateforme est un bien public. Le bâtiment appartient à la commune et les équipements électriques à l'APAUS (Agence de promotion de l'accès universel aux services). L'APAUS en délègue la gestion au village.

La Plateforme de services électrifiés est gérée communautairement par un Comité d'électrification villageois (CEV) élu par le village. Le Comité emploie un gérant et une guichetière chargés de la gestion quotidienne de la plateforme et de l'exploitation des services de base. Les services complémentaires sont exploités par des privés, des coopératives ou des associations du village. Le Gret a installé les équipements de production et de contrôle de l'électricité permettant aux exploitants de brancher leurs équipements d'usage à la plateforme.



1. 25 plateformes étaient initialement prévues mais un village s'est désisté trop tardivement pour pouvoir être remplacé.

I UNE SOLUTION TECHNIQUE ADAPTÉE AU POTENTIEL ET AUX CONTRAINTES DE LA RÉGION

Un contexte particulier

Les villages ciblés par le programme sont enclavés énergétiquement et géographiquement. Ces villages ne bénéficieront pas à court ou moyen terme de l'électrification par réseaux. Seules trois villes de la région du Brakna sont électrifiées par des centrales autonomes. Les villages cibles sont pour la plupart loin des centres économiques et énergétiques que représentent ces villes électrifiées. L'enjeu est donc double : ces villages sont difficiles d'accès et ne peuvent pas actuellement être raccordés à aucun réseau existant.

Une solution « tout solaire » adaptée

Dans ce contexte, le Gret a proposé une solution d'électrification intermédiaire : la plateforme de services électrifiés. La plateforme constitue un modèle d'électrification situé entre l'équipement individuel (panneau solaire, groupe électrogène) et le réseau électrique régulé (centrale). Les plateformes de services électrifiés sont donc des solutions hors réseaux et autonomes, qui ont pour but d'améliorer les conditions socio-économiques des populations de la zone par l'accès à de l'électricité.

Ce modèle de plateforme s'appuie sur le potentiel énergétique principal de la région : le soleil. La Mauritanie reçoit un ensoleillement moyen d'environ 5 kWh/m².j, ce qui représente une énorme source d'énergie. Ces plateformes sont des bâtiments équipés de panneaux solaires qui convertissent les rayons du soleil en électricité. Cette électricité est alors stockée dans des batteries avant d'être utilisée par les équipements d'usage tels que le moulin, le congélateur, etc. Le système est protégé dans son ensemble par des régulateurs de charge/décharge. Ces plateformes ont été conçues pour favoriser un accès collectif et productif à l'électricité.

L'éclairage individuel des ménages est rendu possible grâce à la mise en place de kits d'éclairage individuels. Ces kits sont composés d'une batterie rechargeable dans la plateforme et de lampes basse consommation pour éclairer différentes pièces de la maison.

Au-delà du potentiel énergétique que représente le soleil dans la région, la solution « tout solaire » permet de combler les faiblesses des plateformes fonctionnant avec des groupes électrogènes au diesel. Ces dernières nécessitent un approvisionnement régulier en carburant, une maintenance par un technicien qualifié et un suivi régulier par un opérateur technique. Ces impératifs ne sont pas adaptés à la zone d'intervention où les villages sont d'accès difficile, éloignés les uns des autres et dans lesquels les compétences techniques en mécanique sont très faibles. Les systèmes solaires, quant à eux, nécessitent peu d'entretien quotidien. Enfin, les panneaux photovoltaïques ont une durée de vie très longue, de l'ordre de plus de 20 ans, sans altération significative des performances. Cependant, des systèmes « tout solaire » demandent un investissement financier très supérieur aux autres solutions et impliquent de mettre en place un mécanisme pour le renouvellement des équipements ayant une faible durée de vie comme les batteries par exemple.

Un système modulaire simple à dimensionner et à mettre en place

Dans les plateformes, la production d'électricité est indépendante pour chaque service. Les différents services ont leurs propres panneaux photovoltaïques, leurs batteries et leur régulateur : ils sont autonomes. Ce choix permet d'éviter qu'un service consomme trop d'énergie par rapport aux autres. Ainsi, tous les services peuvent fonctionner en même temps dans les plateformes. Le dimensionnement n'a donc pas été global mais modulaire. Chaque service a été dimensionné en fonction de l'utilisation anticipée et de la puissance de l'équipement d'usage. L'addition des systèmes électriques de chaque service constitue la plateforme de services électrifiés. La production d'électricité par panneaux photovoltaïques permet une certaine modularité que les groupes électrogènes ne permettent pas. Cette modularité permet d'ajouter ou d'enlever des services facilement dans les plateformes. La séparation des différents systèmes a aussi été un choix stratégique permettant de limiter l'impact de la

panne d'un équipement sur l'ensemble des services de la plateforme. L'inconvénient principal de ce système est que certains services ne consomment pas la totalité de l'énergie produite, qui est alors perdue.

La plateforme permet le fonctionnement des équipements d'usage suivants :

- un à quatre congélateurs solaires de 166 litres fonctionnant en 24 V (DC) ;
- un système de soudure à l'arc fonctionnant en 24 V et 36 V (DC) ;
- un moulin solaire à céréale fonctionnant en 24 V (DC) ;
- un système 220V (AC) pour :
 - quatre prises artisans (réparation de pneus, coiffure, couture, etc.),
 - une prise pour une télévision couleur,
 - un système de charge de téléphones portables (30 voies),
 - l'éclairage de la plateforme ;
- une station de charge de batteries à 8 voies en 12 V et des kits d'éclairage individuels.

II LES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME DE PRODUCTION ET DE CONTRÔLE DE L'ÉNERGIE

La plateforme de services électrifiés est constituée d'éléments de production et de contrôle de l'électricité permettant de faire fonctionner les équipements d'usage.

1. Le système de production de l'électricité

Les rayons du soleil sont convertis en électricité grâce à des cellules photovoltaïques monocristallines constituant un module. Le module génère du courant continu (DC). Dans les plateformes, les modules installés ont une puissance crête de 90 Wc avec une tension nominale de 12 V. Ces valeurs sont théoriques ; le rendement des panneaux diminue avec la chaleur et avec leur âge. Ce phénomène est pris en compte dans le dimensionnement des systèmes. La puissance et la tension varient en fonction de l'ensoleillement.



L'assemblage de plusieurs modules constitue un panneau photovoltaïque. Cet assemblage peut se faire de différentes façons afin d'être adapté aux caractéristiques des équipements d'usage. Lorsque le montage de deux modules est fait en parallèle, la tension résultante ne varie pas mais l'intensité est la somme des intensités des deux modules. Ce montage est donc adapté aux équipements fonctionnant en 12 V (DC) et nécessitant une forte intensité. Lorsque le montage de deux modules est fait en série, la tension résultante est la somme des tensions de chaque module (24 V DC) mais l'intensité ne varie pas. Le couplage de ces montages et l'augmentation du nombre de panneaux permettent d'obtenir les valeurs de tension et d'intensité souhaitées pour une utilisation optimale. Chaque service de la plateforme possède donc un nombre et un assemblage de panneaux différents. Au maximum une plateforme peut être équipée de 43 modules, soit une puissance crête de 3 870 Wc.

La quantité d'électricité produite par les modules est dépendante de la quantité d'énergie solaire reçue. Afin d'optimiser ce paramètre, l'inclinaison et l'orientation des panneaux doivent être définies avec précision. Dans le cadre du programme, l'inclinaison des panneaux était de 18°. Cette inclinaison correspond environ à la latitude moyenne des sites. Les panneaux sont fixés sur un support métallique fabriqué avec la bonne inclinaison et l'ensemble est scellé sur le toit de la plateforme. La fixation au toit doit être très résistante pour éviter l'arrachage des panneaux par le vent. L'installation sur le toit permet de sécuriser les panneaux contre le vol ou la casse et permet de raccourcir la distance du câblage pour le raccordement des équipements électriques.

Cependant, cela implique une maintenance plus fastidieuse. En effet, le gérant doit nettoyer fréquemment les panneaux afin d'enlever la poussière et les excréments d'oiseaux qui diminuent significativement leur productivité. Le bâtiment est orienté de façon à ce que les panneaux soient orientés plein sud. Aucune ombre ne doit atteindre les panneaux pendant la journée ; la zone d'implantation de la plateforme doit donc être dégagée.

2. Le système de contrôle de l'électricité

■ Les batteries

Face à la dépendance à la lumière du système photovoltaïque (la production d'énergie diminue s'il y a des nuages ; elle est nulle la nuit), il est important de mettre en place un dispositif de stockage de l'électricité générée par les panneaux. Cela se fait grâce à des batteries qui sont conçues pour emmagasiner l'électricité et la restituer de manière constante en courant continu sur de longues périodes.

Cette capacité de restitution de l'électricité est exprimée en Ampère heure (Ah). Théoriquement, une batterie de 100 Ah peut fournir un courant de 1 ampère pendant 100 heures. La seconde caractéristique d'une batterie est sa tension nominale.

Dans les plateformes, les batteries sont toutes de 12 V. Comme pour les modules, le type de montage des batteries permet d'adapter la tension et l'intensité aux besoins des différents services de la plateforme. Un montage en parallèle de deux batteries (12 V / 100 Ah) permet d'additionner leur capacité (200 Ah) tout en conservant une tension de 12 V en sortie. Un montage en série de ces mêmes batteries permet d'augmenter la tension de sortie (24 V) tout en conservant une capacité de 100 Ah.



Dans les plateformes, deux types de batteries au plomb sont utilisés pour deux usages bien spécifiques :

- **Des batteries solaires** à électrolyte liquide sont utilisées pour les services qui doivent fonctionner la nuit et qui nécessitent un courant stable et continu pendant une longue période, comme les congélateurs. Ces batteries sont particulièrement adaptées à ce type d'usage car elles ont une grande profondeur de décharge, de l'ordre de 80 % de la capacité de la batterie. La profondeur de décharge indique le niveau jusqu'auquel la batterie peut être déchargée sans impliquer de détérioration de celle-ci. La durée de vie d'une batterie est caractérisée par son nombre de cycles (une charge et une décharge constituent un cycle). Les batteries solaires ont une durée de vie élevée car elles permettent un grand nombre de cycles.
- **Des batteries de démarrage** sont utilisées pour les services nécessitant un fort courant au démarrage comme le moulin et la soudure. Ces batteries permettent de fournir un courant de forte intensité très rapidement, ce qui détériorerait trop vite des batteries solaires. Cependant, les batteries de démarrage ne supportent pas bien les décharges de plus de 40 %. Leur utilisation doit donc se limiter à des systèmes qui ne fonctionnent que le jour. Les batteries jouent alors un rôle de stabilisation du courant et permettent d'éviter les variations de puissance disponible dues au passage d'un nuage par exemple. Ces batteries ont une durée de vie estimée deux fois plus courte que les batteries solaires.

De manière générale il est difficile d'anticiper la durée de vie d'une batterie. Celle-ci dépend fortement de l'utilisation qui en est faite pour chaque service.

Cependant, un contrôle régulier du niveau de l'électrolyte et un système de régulation de la charge/décharge bien réglé allongent la durée de vie de ces équipements.

■ Les régulateurs de charge et de décharge



La fonction principale des régulateurs dans le système est de protéger les batteries. Les panneaux photovoltaïques, les batteries et l'équipement d'usage de chaque service sont branchés à un régulateur.

Cet équipement contrôle l'état de charge de la batterie en mesurant sa tension. Il coupe l'alimentation en électricité des batteries par les panneaux lorsque le seuil haut de charge (tension de charge) est atteint. De même, il coupe l'alimentation en électricité de l'équipement d'usage par les batteries lorsque le seuil de déclenchement de la sécurité anti décharge profonde (tension basse de charge) est atteint.

Ces seuils sont programmables et, plus ils sont définis de manière raisonnable, plus la durée de vie des batteries sera allongée. En effet, la surcharge et la décharge profonde des batteries entraînent des réactions chimiques trop poussées qui peuvent les détériorer durablement.

Les régulateurs sont aussi équipés d'une diode série anti-retour de courant évitant que le courant emmagasiné par les batteries pendant la journée ne soit consommé par les panneaux la nuit.

Enfin, ils protègent l'installation dans son ensemble contre une utilisation excessive en jouant le rôle de disjoncteur au-delà d'une intensité définie (supérieure aux intensités de fonctionnement de chaque élément du système).

Cet équipement ne nécessite pas d'entretien particulier à part un dépoussiérage régulier et une vérification des LED indiquant l'état de charge des batteries.

III APPROCHE GÉNÉRALE DU DIMENSIONNEMENT

Dans les plateformes, le dimensionnement du système s'est fait par service. Chaque service possède son propre système de production et de contrôle de l'électricité. Le dimensionnement par service cherchait à faire coïncider au maximum l'énergie à produire avec l'énergie réellement consommée par l'équipement d'usage. Afin d'avoir un dimensionnement optimal, les étapes suivantes ont été suivies pour les services de la plateforme.

1. Le dimensionnement des modules photovoltaïques

La principale difficulté dans le dimensionnement des services réside dans l'évaluation de l'énergie réellement consommée par l'équipement d'usage. Celle-ci est dépendante de l'utilisation qui va en être faite et n'est donc pas toujours facile à déterminer. Cette étape est importante car elle est le point de départ du dimensionnement.

Calcul de l'énergie consommée par jour (E_c)

Il s'agit de déterminer la quantité d'énergie consommée par l'équipement d'usage au cours d'une journée. Pour cela, deux paramètres sont importants, le nombre d'heures d'utilisation de l'équipement dans une journée et la puissance de fonctionnement de celui-ci en Watts (W).

E_c (Wh/j) = Nombre d'heures
d'utilisation par jour x Puissance
de fonctionnement du récepteur

Exemple : Énergie consommée par 6 lampes (12 V) de 12 Watts qui fonctionnent 7 heures par jour : **$7 \times (6 \times 12) = 504$ Wh/j**

Calcul de l'énergie à produire (E_p)

Une fois l'énergie consommée connue, il faut déterminer la quantité d'énergie que les modules photovoltaïques devront produire. L'énergie à produire est supérieure à l'énergie consommée car il y a des pertes dues au rendement des différents équipements (modules, batteries, régulateur, onduleur), à l'incertitude météorologique, à l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison et aux déperditions dans les câbles. Ces pertes sont intégrées dans le calcul grâce à un coefficient correcteur (k).

Pour le dimensionnement des services des plateformes, le coefficient utilisé est 1,65. Ce chiffre est particulièrement élevé car il prend aussi en compte la charge des batteries si l'appareil fonctionne toute la journée. Enfin, cette majoration garantit une certaine marge de sécurité.

E_p (Wh/j) = $E_c \times k$

Exemple : Énergie à produire pour les 6 lampes : **$504 \times 1,65 = 832$ Wh/j**

Calcul de la puissance crête (P_c) des modules à installer

La puissance crête des modules à installer pour un fonctionnement optimal du service dépend de l'énergie à produire mais aussi de l'ensoleillement moyen sur le site.

Pour le Sud de la Mauritanie, la valeur de l'ensoleillement est de 5 kWh/m².j.

P_c (Wc) = E_p / ensoleillement

Exemple : Puissance crête à installer : **$832 / 5 = 166$ Wc**
Dans ce cas de figure, il semble adapté d'installer deux modules de 90 Wc.

Ce calcul nous donne alors la puissance crête du générateur à installer pour satisfaire les besoins en énergie évalués. Pour atteindre cette valeur, il est souvent nécessaire d'assembler plusieurs modules. De manière générale, la puissance installée doit toujours être supérieure au résultat de ce calcul afin d'avoir une marge de sécurité supplémentaire. Ce surdimensionnement permet en outre de recharger les batteries tout en utilisant l'équipement d'usage à pleine puissance.

2. Le dimensionnement des batteries

Maintenant que nous connaissons le nombre de modules à installer, il faut que notre système soit capable de fournir de l'énergie en continu pendant une certaine période pour faire face à la nuit, aux intempéries et aux pannes éventuelles qui pourraient survenir.

Pour cela, les batteries doivent être dimensionnées selon quatre valeurs :

- l'énergie consommée (E_c) par l'équipement d'usage ;
- le nombre de jours d'autonomie (N) que les batteries doivent fournir au système ;
- la profondeur de décharge maximale (D) acceptable pour la batterie (70 % pour les batteries solaires et 30 % pour les batteries de démarrage dans le cadre du PERUB) ;
- la tension (U) de la batterie (12 V pour le PERUB).

Grâce à ces valeurs, nous pouvons calculer la capacité (C) en Ah des batteries à installer.

$$C \text{ (Ah)} = (E_c \times N) / (D \times U)$$

Exemple : Capacité à installer pour un fonctionnement optimal et trois jours d'autonomie :
 $(504 \times 3) / (0,7 \times 12) = 180 \text{ Ah}$

Pour ce système, il semble adapté d'installer une batterie solaire de 200 Ah.

Comme pour les modules, plusieurs batteries peuvent être installées pour atteindre la capacité voulue. Il faut favoriser l'atteinte d'une valeur supérieure au calcul afin d'avoir une marge de sécurité importante.

3. Le dimensionnement du régulateur et des câbles

L'ampérage du régulateur doit être supérieur à l'intensité fournie par les panneaux et à l'intensité appelée par l'équipement d'usage. Si ces valeurs sont respectées, le régulateur pourra protéger convenablement le système contre les surintensités et les courts-circuits.

Dans le cadre du PERUB, le dimensionnement des câbles n'a pas été fait par calcul mais par expérience. Dans un système photovoltaïque de faible tension, l'intensité est souvent élevée dans les câbles, ce qui provoque des pertes par échauffement. Par exemple, la baisse de tension due à l'échauffement dans une installation de trois lampes de 13 W à 15 mètres des batteries avec une tension de 12 V peut atteindre 4,3 % si le câble a une section de 1,5 mm². Avec un câble de 10 mm², les pertes se situent aux alentours de 0,65 %.

Afin de limiter les pertes dans les câbles, trois principes ont été respectés :

- réduire au maximum la longueur des câbles : les panneaux sont positionnés sur le toit, ce qui permet d'avoir des longueurs de câble inférieures à 10 mètres ;
- diminuer l'intensité dans les câbles : cela s'est fait en augmentant la tension dans les câbles (dans la mesure du possible, la tension 24 V est utilisée) ;
- adapter la section des câbles : la plupart des systèmes de la plateforme utilisent des câbles de forte section (> 10 mm²).

IV DESCRIPTIF TECHNIQUE DES SERVICES D'UNE PLATEFORME

1. Le congélateur solaire

Dans les villages du programme, aucun système de production de froid n'existe. Les villageois ramènent parfois de la glace de la ville dans des glacières pour leur utilisation personnelle. Les besoins en service de froid sont donc liés à la production de glace, à la conservation d'aliments par congélation et à la réfrigération de boissons.

Le congélateur

Pour répondre à ces besoins, le Gret a proposé aux exploitants d'acquérir un réfrigérateur/congélateur bahut solaire avec une température d'utilisation programmable de -20°C à $+12^{\circ}\text{C}$. Le constructeur du congélateur fournit des données de consommation en fonction de la température de congélation et de la température ambiante. Le temps d'ouverture du congélateur par jour est évalué à 20 minutes (en temps cumulé) pour un fonctionnement 24h/24. Ces données ont permis au Gret de dimensionner le système de production et de contrôle de l'énergie.

Une plateforme peut être équipée de quatre congélateurs maximum. Chaque congélateur a son système de production et de contrôle de l'électricité indépendant.



CONGÉLATEUR	Tension d'entrée (U)	Volume	Température d'utilisation	Température ambiante	Consommation journalière (Ec)
Caractéristiques	24 V	166 litres	- 10° C	40° C	770 Wh/j

Dimensionnement du système pour un congélateur

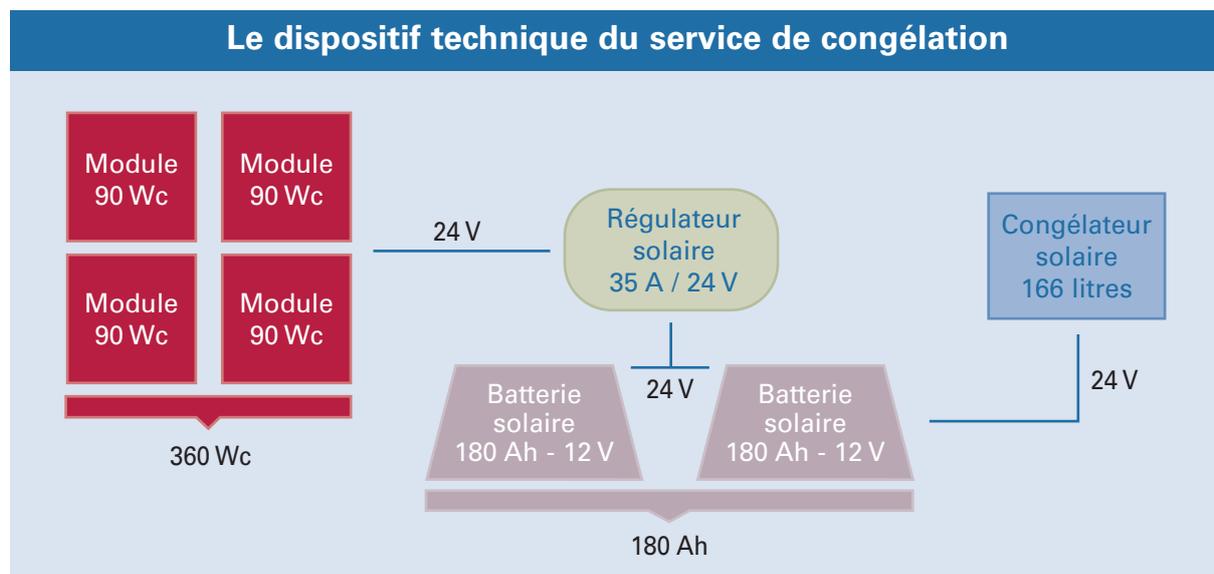
Les panneaux à installer doivent avoir une puissance crête totale supérieure ou égale à 255 Wc.

CONGÉLATEUR	Consommation journalière (Ec)	Coefficient correcteur (k)	Ensoleillement	Puissance crête à installer (Pc)
Valeurs pour le dimensionnement des modules	770 Wh/j	1,65	5 kWh/m ² .j	255 Wc

CONGÉLATEUR	Consommation journalière (Ec)	Autonomie (N)	Taux de décharge (D)	Tension (U)	Capacité à installer (C)
Valeurs pour le dimensionnement des batteries	770 Wh/j	3 jours	70 %	24 V	138 Ah

Les batteries à installer pour que le congélateur fonctionne quotidiennement et soit capable d'être autonome en cas de manque de soleil doivent avoir une capacité d'au moins 138 Ah. Cela correspond à une autonomie de 72h pour la conservation d'aliments déjà congelés.

Solution technique installée



De manière générale, le dimensionnement des équipements a été surévalué dans les plateformes afin de limiter les problèmes techniques liés à un dimensionnement un peu juste. Ce surdimensionnement s'explique aussi par des conditions climatiques de température particulièrement élevées et des utilisations des équipements pas toujours optimales (nombre d'ouvertures, insertion de produit chaud, etc.). D'après les calculs, la puissance crête à installer pour un congélateur est de 255 Wc. Le Gret a choisi d'installer par congélateur une puissance de 360 Wc. Le montage se fait en mettant en parallèle deux panneaux constitués de deux modules de 90 Wc en série (quatre modules en tout). Cela permet d'avoir une tension de 24 V en sortie vers les batteries.

Les panneaux sont branchés sur un régulateur de charge de 35 A. Celui-ci sert à protéger le système ; il est calibré pour contrôler la charge et la décharge des batteries. Les câbles entre les panneaux photovoltaïques et le régulateur ont une section de 10 mm².

Les batteries solaires sont branchées au régulateur. La capacité nécessaire au bon fonctionnement du congélateur étant de 138 Ah, le Gret a installé une capacité de 180 Ah en montant deux batteries de 180 Ah / 12 V en série. Cela permet de fournir une tension de 24 V au congélateur.

Le congélateur est directement branché aux batteries car il dispose d'un régulateur de décharge interne. Le régulateur installé ne sert donc que pour surveiller la charge excessive des batteries. Un fusible de 15 A est installé entre les batteries et le congélateur afin de protéger le congélateur contre les surintensités.

Ce dimensionnement assure un fonctionnement continu du service de congélation ou de réfrigération 24h/24 et 7 jours/7.

Retour d'expérience d'utilisation du système

Sur l'ensemble des congélateurs installés, la majorité est utilisée en mode congélation. Même si la production de glace est assez limitée par le volume et la puissance du congélateur, on observe une utilisation pour la congélation d'aliments (poulet, poisson, etc.), la production de crème glacée et la réfrigération de boissons locales (bissap, jus de fruit, etc.).

L'autonomie des congélateurs pendant la nuit et les journées nuageuses est bonne grâce au dimensionnement réalisé ; le service est continu. Cependant, cette autonomie dépend de l'utilisation qui est faite du congélateur. En effet, plusieurs exploitants se sont plaints d'une augmentation de la température pendant la nuit. Cela arrive lorsque les congélateurs sont chargés de produits chauds en fin de journée, que le nombre d'ouvertures prévu dans la journée a été dépassé ou que le remplissage est excessif.

Précaution d'utilisation pour un fonctionnement optimal

Le bon fonctionnement du congélateur dépend de l'utilisation qui en est faite. Il est important de ne pas le charger avec des produits chauds. Il est préférable d'attendre que cela refroidisse à la température ambiante avant de les insérer. De plus, il est très important de limiter le nombre d'ouvertures du bahut afin d'optimiser la conservation du froid dans le congélateur. Il est conseillé de ne pas charger ou décharger le congélateur produit par produit. Il faut plutôt adopter une organisation permettant par exemple de charger et décharger le congélateur au lever du soleil. Les produits glacés sont alors conservés dans des glacières pendant la journée pour la vente à la pièce. De même, en cas de réduction importante de l'ensoleillement, il est primordial de veiller à ne pas rajouter de produits dans le congélateur.

L'entretien et la maintenance du système se font principalement grâce à un dégivrage régulier du congélateur qui permet d'optimiser sa consommation d'énergie. Le nettoyage régulier de l'équipement est conseillé pour des raisons d'hygiène mais aussi pour dépoussiérer les grilles de ventilation et d'aération. Leur encombrement peut augmenter la consommation d'énergie. Le congélateur doit être placé dans une salle couverte et aérée, à l'abri des rayons du soleil.

Quel investissement pour le système de congélation ?

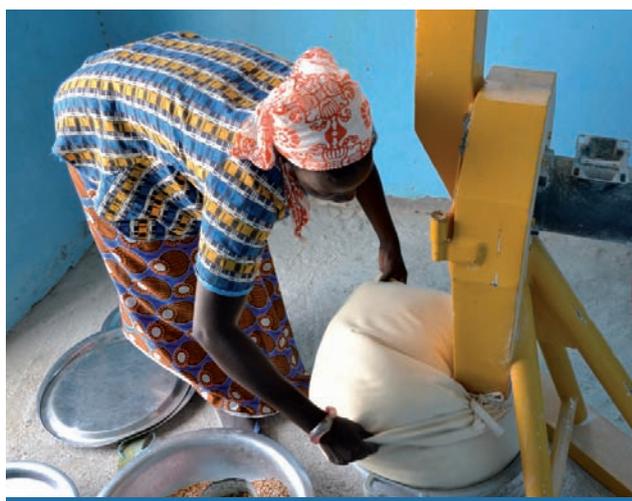
CONGÉLATEUR	4 modules PV 90 Wc Supports	1 régulateur 35 A / 24 V	2 batteries solaire 200 Ah	1 congélateur solaire 166 litres	Total ²
Coûts d'investissement pour le système	364 400 MRO	45 000 MRO	160 000 MRO	320 000 MRO	889 400 MRO soit 2 400 €

370 MRO = 1 €

D'après les retours d'expérience, il paraît difficile de réduire le dimensionnement du système pour en abaisser les coûts. Les risques de coupures seraient trop grands et pourraient avoir un impact sur la qualité du service. Les équipements installés sont de haute gamme mais il paraît dangereux pour la durabilité du système de vouloir réduire les coûts en investissant dans des équipements de moins bonne qualité.

2. Le moulin solaire

Dans les villages du programme ayant décidé d'acquérir un moulin solaire, la mouture des céréales (mil, riz, etc.) se faisait dans la ville électrifiée la plus proche. Cela implique un coût de mouture assez élevé lorsque l'on prend en compte le transport. Concevoir un système solaire pour un moulin électrique a été un réel défi technique permettant de libérer les villageois de cette contrainte.



L'équipement

Un moulin fonctionnant en courant continu n'est pas courant. Cet équipement a été trouvé au Sénégal et permet une utilisation sur des panneaux solaires fournissant du courant continu en 24 V. Ce moulin à marteaux fonctionne avec une puissance très élevée de 1 500 W. Cependant, l'avantage de ce moulin est qu'il peut ne pas être utilisé à pleine puissance. Le remplissage du moulin par des céréales se fait

2. À ce total s'ajoute des surcoûts d'environ 10 % pour le transport et 10 % pour les petites fournitures de raccordement.

via une entrée que l'on peut augmenter ou rétrécir. Cela régule le débit de mouture et donc l'intensité du courant de fonctionnement du moulin. Grâce à ce dispositif, on utilise une intensité comprise entre 25 A et 50 A au lieu des 62 A nécessaires au fonctionnement maximal du moteur.

Pour le dimensionnement, il a été défini que l'ampérage du moulin serait en moyenne de 40 A pour une puissance de 960 W et que celui-ci serait utilisé seulement pendant les horaires d'ouverture de la plateforme (correspondant aux horaires d'ensoleillement).

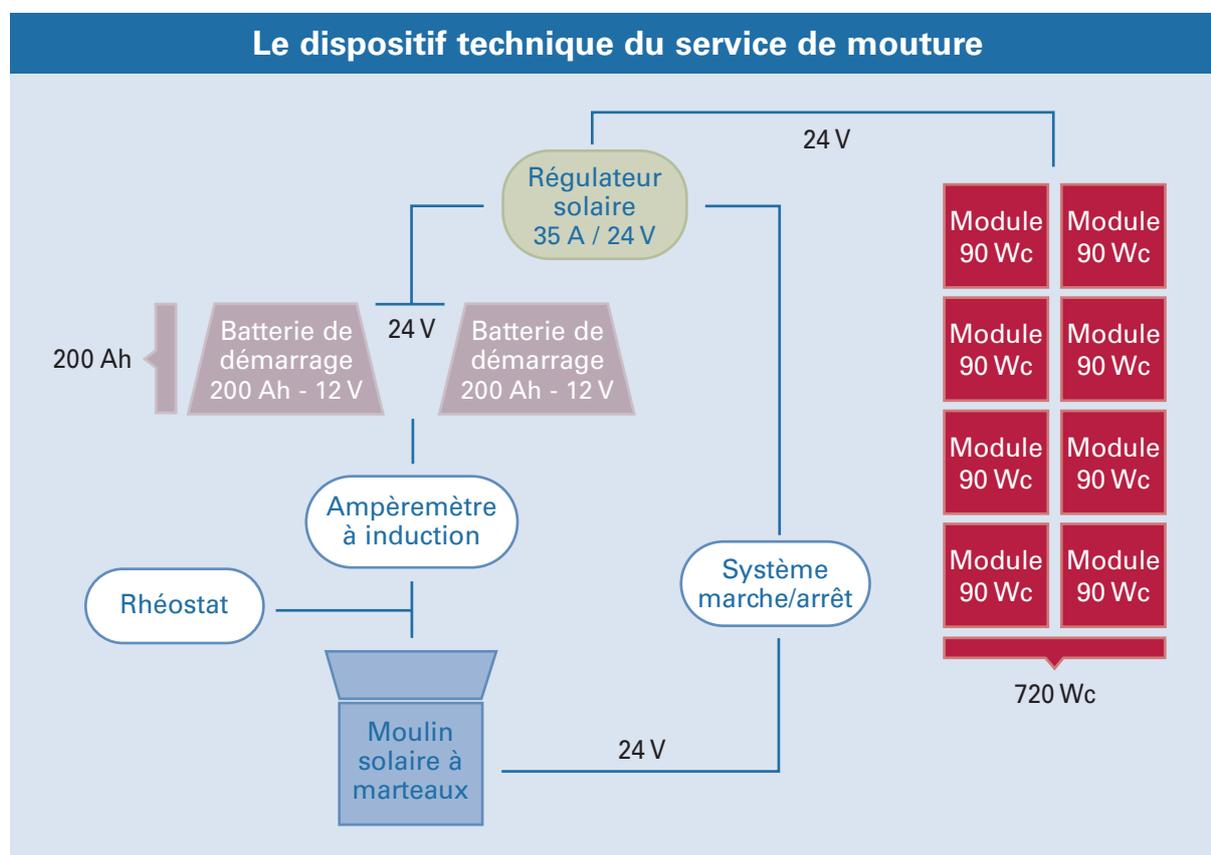
MOULIN	Tension d'entrée (U)	Nombre d'heures d'utilisation	Puissance de fonctionnement	Consommation journalière (Ec)
Caractéristiques du moulin solaire	24 V	6 h/j	960 W	5 760 Wh/j

Dimensionnement du système pour le moulin solaire

Le dimensionnement du système (modules et batteries) du moulin est particulier. Dans la théorie, pour avoir une production de 5 760 Wh/j, il faudrait installer des modules pour une puissance crête de 1 900 Wc. Cela représenterait 21 modules de 90 Wc. Cette solution n'était pas envisageable financièrement. Il a donc été décidé de sous-dimensionner volontairement le système de production d'électricité et d'utiliser les batteries seulement pour stabiliser le courant généré par les modules photovoltaïques. Le moulin ne fonctionne donc pas à sa puissance maximum.

Solution technique installée

Le système installé dans les plateformes comprend huit modules de 90 Wc. Ils constituent un ensemble de quatre panneaux branchés en parallèle constitués eux-mêmes de deux modules en série. Cela permet d'avoir une tension de sortie de 24 V et une intensité de plus de 20 A.



Les panneaux sont reliés à un régulateur de 35 A / 24 V. Deux batteries de démarrage de 200 Ah et 12 V sont montées en série pour obtenir du 24 V en courant continu. Elles sont branchées au régulateur pour être protégées contre la surcharge. Dans ce système, des batteries de démarrage sont utilisées car à l'allumage, le moulin effectue un fort appel de courant pouvant atteindre 62 A en quelques secondes. Des batteries solaires s'useraient trop vite avec ce type d'utilisation. Afin de limiter la détérioration des batteries de démarrage, le moulin est livré avec un rhéostat qui permet, par une action manuelle de l'utilisateur, de démarrer en douceur le moulin en augmentant progressivement l'ampérage de mouture voulu.

Afin de protéger davantage le système, un ampèremètre à induction a été installé. Il indique en temps réel l'intensité du courant de fonctionnement du moulin. Cette donnée permet à l'utilisateur d'adapter le débit de mouture pour utiliser le moulin entre 25 A et 50 A.

Le moulin est directement branché aux batteries. Un dispositif de maintien en marche (marche/arrêt) du moulin, équipé d'une bobine, est branché au régulateur. Lorsque l'utilisateur utilise le moulin jusqu'à atteindre le seuil de décharge des batteries (ici fixé à 30 %), le régulateur active le système d'arrêt qui éteint le moteur du moulin. Les batteries de démarrage sont ainsi protégées.

Le moulin est équipé d'un fusible de 80 A qui se déclenche en cas de dysfonctionnement ou de bourrage impliquant une surintensité. Ce type de fusible n'étant pas facilement disponible en Mauritanie, un disjoncteur de 63 A a été installé. Si l'utilisateur dépasse les 63 A, le disjoncteur saute et coupe l'alimentation.



Précautions d'utilisation pour un fonctionnement optimal

Ce système a été conçu pour fonctionner lorsque le soleil est au plus haut et par temps clair. Il faut utiliser le moulin entre 10h et 16h afin de pouvoir l'utiliser sans coupure.

Afin de protéger le système et plus particulièrement les batteries, il faut lors de l'utilisation réguler le débit de mouture afin que l'ampérage de fonctionnement affiché par l'ampèremètre se situe entre 25 A et 50 A.

L'entretien et la maintenance du système se font par un nettoyage régulier du démarreur, des batteries et de la salle du moulin qui est très poussiéreuse. Il faut aussi éviter les petits cailloux dans les céréales qui peuvent abîmer le tamis du moulin. Enfin, pour atteindre une production supérieure à 130 kg/jour, il faut préparer les céréales en les décortiquant, en les trempant puis en les séchant au soleil afin d'en faciliter la mouture.

Retour d'expérience d'utilisation du système

Le système réalisé permet une utilisation pendant six heures en continu du système. Quelquefois les exploitants doivent arrêter la mouture pendant 30 minutes avant de la reprendre, notamment lorsque l'ensoleillement n'est pas au maximum.

Cependant, de manière générale les exploitants utilisent très régulièrement le moulin dans la journée sans problèmes de coupure. Au maximum relevé, les exploitants arrivent à atteindre 130 kg de mouture de céréale par jour. Le moulin ne fonctionne que 30 minutes à une heure sur les batteries (sans soleil).

Le dimensionnement réalisé constitue un bon rapport entre le coût d'investissement et la durée journalière d'utilisation. Il ne semble pas pertinent d'augmenter considérablement le coût d'investissement pour pouvoir utiliser le moulin à des heures où la luminosité est faible.

Ce dimensionnement en flux tendu implique qu'une journée nuageuse peut fortement perturber l'activité du meunier. Cependant, nous ne sommes pas dans le cas d'un service critique ayant besoin d'une autonomie de fonctionnement au risque de perdre une production (contrairement à la congélation par exemple).

Un inconvénient soulevé par les exploitants est la faible capacité de mouture journalière du moulin (130 kg/j). En effet, les systèmes concurrents au diesel peuvent atteindre plus de 300 kg/j. Cependant il paraît difficile d'augmenter significativement cette production ou alors au prix d'un investissement beaucoup plus lourd en équipements.

Quel investissement pour le système de mouture ?

MOULIN	8 modules PV 90 Wc	1 régulateur 35 A / 24 V	2 batteries démarrage 200 Ah	1 moulin solaire 24 V	Total ³
Coûts d'investissement pour le système	728 800 MRO	45 000 MRO	130 000 MRO	600 000 MRO	1 500 800 MRO soit 4 064 €

370 MRO = 1 €

L'investissement pour le système de mouture est assez lourd. Cependant, vu le dimensionnement en flux tendu réalisé, il paraît difficile de réduire le dimensionnement des équipements et donc le coût total.

3. Le système de soudure

Dans les villages cibles, la plupart des réparations métalliques (charrettes, outils, barrières, portes, fourneaux, etc.) se faisaient dans la ville électrifiée la plus proche avec les frais de transport et la perte de temps que cela implique. Il y a donc un fort besoin d'un système de soudure au sein de la plateforme. Concevoir un système de soudure à l'arc, très énergivore, dans un système « tout solaire » est une prouesse encore jamais réalisée. L'équipe du programme a conçu un système après une longue période de test avec des soudeurs de la région.

Dimensionnement du système pour la soudure

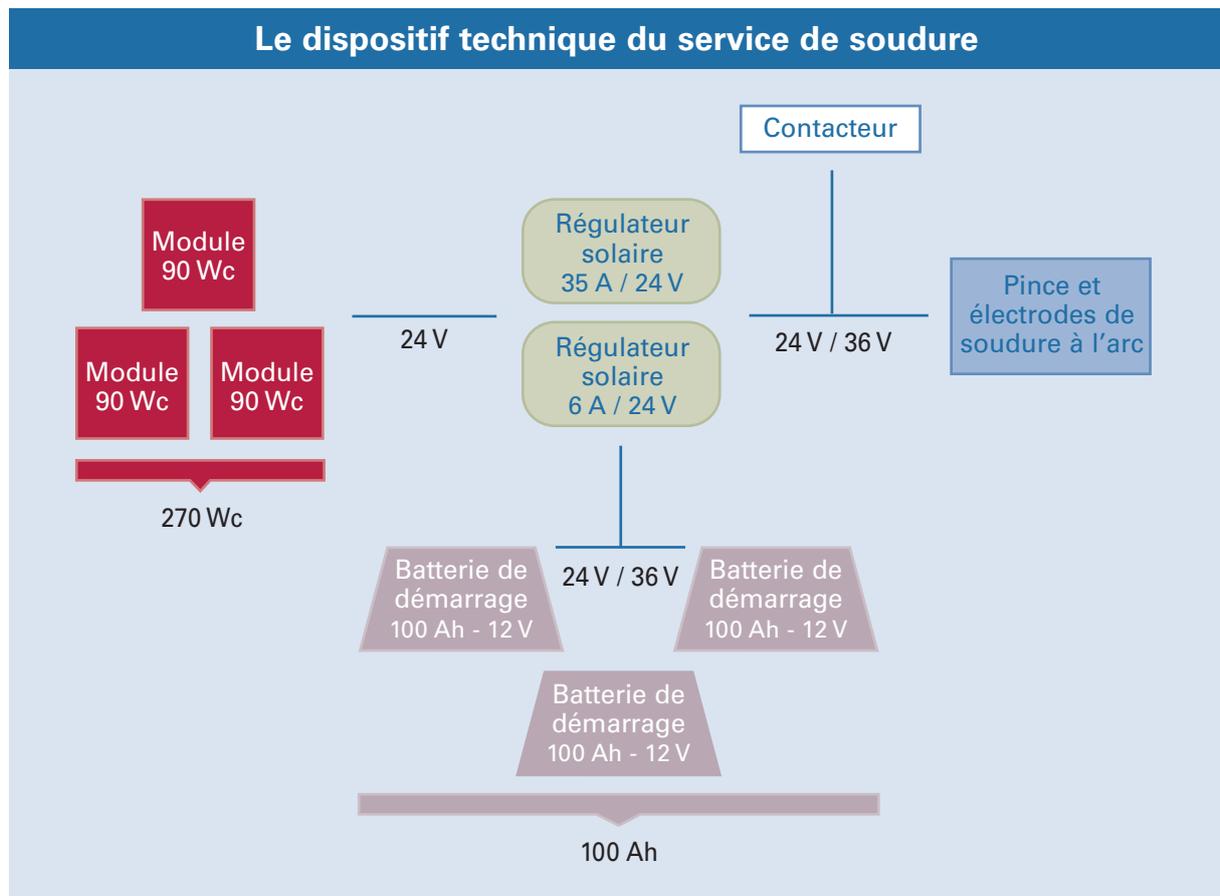


L'utilisation du système doit être possible pendant toute la journée de 10h à 16h sachant que le temps effectif de soudure dépasse rarement une heure par jour.

Des batteries sont installées pour stabiliser le courant et apporter la tension voulue pour le fonctionnement des équipements.

Les batteries doivent fournir une tension et un courant stable pendant la journée mais pour des durées très courtes. Lorsqu'elles sont utilisées, elles sont rechargées immédiatement après. Les batteries de démarrage sont encore une fois bien adaptées à ce type d'utilisation.

3. À ce total s'ajoute des surcoûts d'environ 10 % pour le transport et 10 % pour les petites fournitures de raccordement.

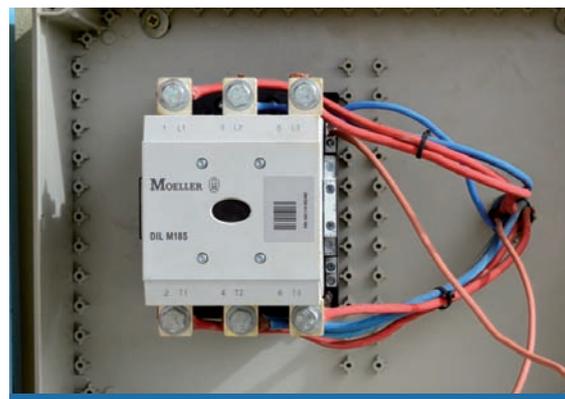
Solution technique installée

Dans le commerce, les postes de soudure classiques fonctionnent en 220 V AC. Ces postes consomment beaucoup et nécessiteraient une installation trop coûteuse (convertisseur, nombre de panneaux, etc.). La tension d'entrée de 220 V alimente les commandes du poste (résistance variable, régulateur, marche/arrêt), et un transformateur convertit cette tension en courant continu pour l'utilisation.

Il a donc été décidé de supprimer la partie de commande du poste pour ne finalement garder que le dispositif nécessitant le courant continu (électrodes et pinces). Cela permet d'utiliser directement le courant continu des panneaux ou des batteries. Le branchement directement sur les panneaux n'a pas donné de bons résultats à cause des légères variations de luminosité qui induisent des variations d'intensité. Le système s'est donc appuyé sur des batteries pour stabiliser le courant.

Différents tests de tension ont été réalisés pour avoir un système de soudure fonctionnant en 24 V (deux batteries en séries), 36 V (trois batteries en séries) et 48 V (quatre batteries en série). Le système en 48 V était trop puissant, seuls le 24 V et le 36 V étaient exploitables. Pour réaliser différents types de soudure, il a été décidé deux niveaux de tension différents. Le 24 V est utilisé pour la soudure de précision et le 36 V pour souder de plus grosses pièces.

Le système de 24 V est alimenté par deux modules PV de 90 Wc montés en séries (générant du 24 V) et est équipé de deux batteries de démarrage de 100 Ah/12 V en série pour avoir une tension de 24 V en sortie avec un régulateur 35 A / 24 V. Le système de 36 V vient se greffer sur le premier en ajoutant un module PV de 90 Wc autonome et une batterie en



série sur les équipements du système 24 V afin d'obtenir la tension de 36 V en sortie. Cette batterie est régulée grâce à un régulateur supplémentaire de 6 A / 24 V.

Pour que le soudeur puisse passer d'un système à l'autre, un contacteur 24 V / 185 A avec bobine intégrée a été utilisé. La première position du contacteur permet d'établir la connexion avec les deux premières batteries en série et ainsi fournir une tension de 24 V. La seconde position permet d'intégrer la troisième batterie dans le montage en série afin de fournir une tension de 36 V.

Les pinces et les électrodes de soudure sont branchées directement sur les batteries. Il faut donc un système pour protéger les batteries d'une décharge profonde. Pour cela, la bobine intégrée au contacteur a été reliée au régulateur de 35 A / 24 V afin que le régulateur coupe l'alimentation de la bobine lorsque le seuil de décharge profonde des batteries est atteint. Cela ouvre alors les contacts du contacteur, ce qui coupe l'alimentation du système de soudure.

Précaution d'utilisation pour un fonctionnement optimal

Comme pour le moulin, le système de soudure a été conçu pour fonctionner de façon optimale lorsque les panneaux reçoivent de l'énergie solaire, entre 10h et 16h de préférence. Il est préférable d'utiliser le système dans cette plage horaire pour pouvoir exploiter toute sa capacité. Lors de l'utilisation du système il faut respecter les règles d'usage pour un soudeur et travailler loin de produits inflammables. Il faut travailler dans des endroits aérés pour favoriser l'évacuation des gaz produits lors de la soudure. Les électrodes à utiliser doivent être adaptées à l'épaisseur des matériaux à souder. Lorsque les batteries atteignent leur seuil bas, le contacteur se déclenche et la soudure est interrompue. Dans ce cas, il faut attendre un certain temps que les batteries se rechargent avant que le système se réenclenche automatiquement.

Retour d'expérience d'utilisation du système

Les soudeurs des villages équipés par ce système ne rencontrent que très peu de problèmes lors de son utilisation. Ils peuvent travailler toute la journée avec un temps de soudure effectif de moins d'une heure en général. Le dimensionnement paraît donc adapté aux besoins des soudeurs qui sont satisfaits de pouvoir utiliser les deux modes de soudure (précision et classique). La soudure est toujours possible en cas d'intempéries grâce aux batteries, cependant il reste préférable de travailler par temps clair.

Au démarrage, l'appel de courant est d'environ 125 A ; celui-ci se stabilise autour de 70 / 80 A pendant l'utilisation. Il serait utile d'installer un fusible de 150 A sur les fils (porte électrode et masse) afin de protéger les batteries contre une liaison accidentelle de ceux-ci. Enfin, dans l'organisation spatiale du service, il est important d'éloigner les batteries du système de soudure car les batteries émettent des gaz très inflammables qui peuvent s'avérer dangereux au contact des étincelles de la soudure. Dans les plateformes, les batteries sont dans une pièce et le système de soudure est à l'extérieur.

Quel investissement pour le système de soudure ?

SOUDURE	3 modules PV 90 Wc Supports	1 régulateur 35 A / 24 V	1 régulateur 6 A / 24 V	3 batteries démarrage 100 Ah	Total ⁴
Coûts d'investissement pour le système	273 300 MRO	45 000 MRO	4 500 MRO	83 000 MRO	405 800 MRO soit 1 100 €

370 MRO = 1 €

Le dimensionnement du système étant en flux tendu, il paraît difficile que des modifications techniques puisse permettre de réduire l'investissement sans avoir d'impact sur les performances.

4. À ce total s'ajoute des surcoûts d'environ 10 % pour le transport et 10 % pour les petites fournitures de raccordement.



4. Le système 220 V AC

Certains services demandés par les villageois nécessitent du courant en 220 V alternatif. Ces demandes sont centrées autour de la charge de téléphones portables, l'artisanat (couture, réparation de pneus, coiffure, etc.) et la télévision. En plus de ces services, la plateforme doit être éclairée à l'intérieur et à l'extérieur. La plateforme a donc été équipée d'un dispositif fournissant de l'électricité en 220 V alternatif.

Les équipements

Le système proposé permet trois types d'usages :

- **La charge de téléphones** : ce service est composé d'un tableau de 30 prises, chaque prise pouvant être utilisée trois fois dans la journée sachant que la charge d'un téléphone prend en moyenne deux heures. La puissance appelée lors de la charge d'un téléphone ne dépasse pas 3 W.
- **La télévision couleur** : elle fonctionne avec une puissance de 120 W, pour une utilisation souhaitée de cinq heures par jour.
- **Les utilisations artisanales** : l'évaluation des besoins en énergie de l'artisanat est difficile à cause de la diversité des équipements qui peuvent être utilisés. Les besoins en énergie de l'artisanat n'ont pas été étudiés précisément dans le calcul de dimensionnement. Le choix a été fait de surdimensionner le système global. Sachant que la production est centralisée pour les trois services, la sous-utilisation de certains services et le surdimensionnement du système apportent l'énergie suffisante pour l'artisanat qui consomme peu d'énergie sur une journée mais qui a besoin d'une forte puissance sur de courtes périodes.

L'éclairage extérieur de la plateforme se fait à l'aide de trois lampes de 8 W devant fonctionner 10 h/jour et l'intérieur de la plateforme est éclairé par huit lampes de 13 W devant fonctionner 3 h/jour (20 h à 23 h).

CONSOMMATION	Puissance de fonctionnement	Nombre d'heures d'utilisation	Nombre de charges	Consommation journalière (Ec)
Télévision	120 W	5 h	-	600 Wh/j
Charge de téléphones	3 W	2 h	30	540 Wh/j
Artisanat	230 W	2 h	-	460 Wh/j
Éclairage extérieur	24 W	10 h	-	240 Wh/j
Éclairage intérieur	104 W	3 h	-	312 Wh/j
			Total	2 152 Wh/j

Dimensionnement du système 220 V

SYSTÈME 220 V	Consommation journalière (Ec)	Coefficient correcteur (k)	Ensoleillement	Puissance crête à installer (Pc)
Valeurs pour le dimensionnement des modules	2 152 Wh/j	1,65	5 kWh/m ² .j	710 Wc

La puissance crête des panneaux à installer doit être supérieure ou égale à 710 Wc pour un fonctionnement optimal de ces services.

SYSTÈME 220 V	Consommation journalière (Ec)	Autonomie (N)	Taux de décharge (D)	Tension (U)	Capacité à installer (C)
Valeurs pour le dimensionnement des batteries	2 152 Wh/j	3 jours	70 %	24 V	390 Ah

La capacité que doivent fournir les batteries pour que le système fonctionne en continu et malgré des coupures d'ensoleillement de longues durées est de 390 Ah.

Le système technique installé

Pour tous les usages en 220 V, la production et le stockage de l'électricité sont centralisés. Trois circuits distincts de distribution sont ensuite installés. Cette solution limite les risques liés au dimensionnement assez flou des différents circuits.

En effet, une solution centralisée permet une utilisation de l'énergie non consommée par d'autres services, dans notre cas l'artisanat. Cependant, cela rend le système plus dépendant des pannes : si le seul régulateur du système tombe en panne par exemple, tout le système est hors service.

Enfin, cela est possible car la puissance des équipements étant faible, le coût global est raisonnable.

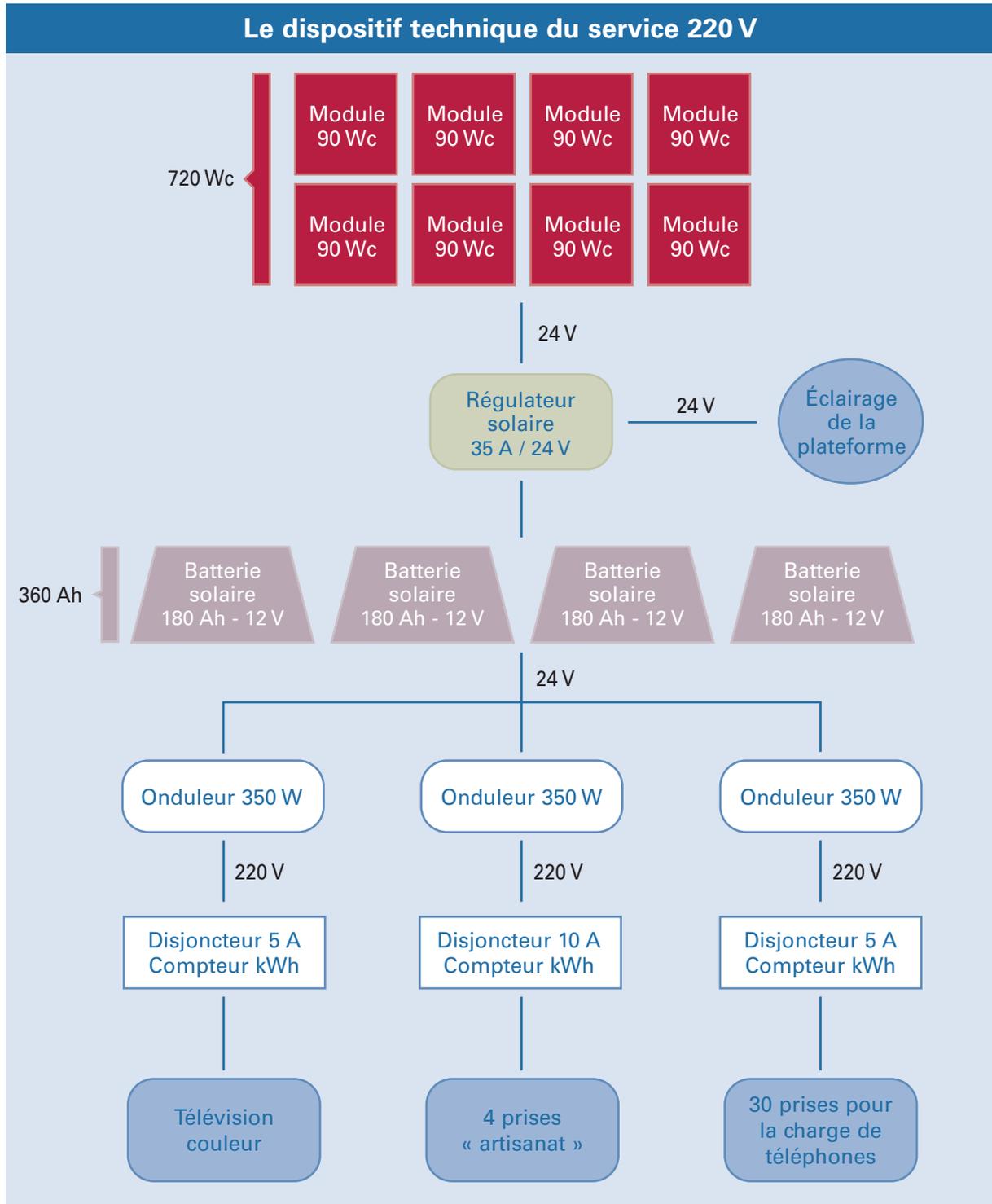
La puissance crête à installer est de 710 Wc ; huit modules de 90 Wc ont donc été installés. Cela représente 720 Wc pour une possibilité de production d'environ 2 180 Wh/j en prenant en compte les différentes pertes. Les modules sont montés en série deux à deux et les quatre panneaux constitués sont montés en parallèles (tension de sortie de 24 V).



Les panneaux sont branchés à un régulateur de 35 A / 24 V qui permet de protéger les quatre batteries solaires de 180 Ah/12 V chacune.

Les batteries sont montées en série deux à deux et le tout est monté en parallèle pour ainsi obtenir une tension de 24 V en sortie et une capacité de 360 Ah.

Le système de stockage a été largement surdimensionné afin de récupérer l'énergie non utilisée et de la restituer lorsque davantage de services fonctionnent en même temps.



Chaque service a son circuit indépendant de distribution jusqu'à l'équipement d'usage.

• La télévision

Le premier circuit, pour la télévision, est composé d'un onduleur de 350 W branché sur les batteries. L'onduleur permet de convertir le courant continu de 24 V fourni par les batteries en courant alternatif de 220 V. La puissance nominale de l'onduleur (350 W) doit couvrir l'ensemble des puissances appelées par les récepteurs électriques branchés dans le circuit et fonctionnant simultanément. Un onduleur consomme de l'énergie, les modèles installés ont un mode « stand by » qui permet à l'onduleur



de ne fonctionner que lorsqu'une charge est détectée afin d'optimiser sa consommation. L'onduleur possède un propre régulateur pour protéger les batteries contre la décharge profonde. C'est pourquoi il peut y être branché directement. Après l'onduleur, un disjoncteur de 5 A est branché pour protéger le système contre les courts-circuits et les surintensités. Enfin un compteur permet de connaître la consommation du service.

• L'artisanat

Le second circuit est composé d'un onduleur de 1 500 W, d'un disjoncteur de 10 A, d'un compteur et de quatre prises de courant pour brancher des équipements pour l'artisanat. L'onduleur de 1 500 W permet d'utiliser des équipements qui demandent une forte puissance de fonctionnement comme un compresseur d'air par exemple.

• La charge de téléphones portables

Le troisième circuit alimente la charge de téléphones portables. Ce circuit est composé d'un onduleur de 350 W, d'un disjoncteur de 5 A,



d'un compteur et d'un tableau de 30 prises de courant. Le tableau est équipé d'une boîte de dérivation alimentant indépendamment trois lots de dix prises afin d'éviter qu'un problème sur une prise n'entraîne l'arrêt total du service.

• L'éclairage de la plateforme

Les lampes pour l'éclairage de la plateforme sont branchées directement sur le régulateur. Il s'agit d'un fonctionnement autonome qui fonctionne en 24 V en courant continu.

Précaution d'utilisation pour un fonctionnement optimal

Ce système ne nécessite pas beaucoup d'entretien : un nettoyage régulier des équipements électriques et des équipements d'usage est suffisant. L'utilisation des prises d'artisanat doit être surveillée. C'est de ce circuit que la plupart des problèmes peuvent survenir car les utilisateurs y branchent leurs propres équipements. Les équipements branchés doivent être en bon état et l'ensemble des branchements ne doit pas dépasser 1 500 W au risque d'une coupure de l'électricité. Si le disjoncteur coupe l'alimentation de l'équipement, il ne faut pas recommencer immédiatement le branchement : il est nécessaire d'analyser la cause de la coupure avant de le relancer.

Retour d'expérience d'utilisation du système

Les exploitants sont pleinement satisfaits de l'utilisation des trois circuits.

La télévision est un des seuls services qui fonctionne la nuit, principalement pour regarder les matchs de football. Le système fonctionne bien et paraît même surdimensionné.

Les prises d'artisanat fonctionnent rarement en même temps et la plupart des problèmes ne viennent pas d'un manque d'énergie mais des équipements d'usage eux-mêmes qui sont parfois de mauvaise qualité. Le système en place permet le fonctionnement quotidien d'un ou deux tailleurs équipés de machines à coudre électriques, d'un coiffeur équipé d'une tondeuse électrique et d'un réparateur de pneus équipé d'un compresseur d'air. Ces services ne fonctionnent pas en continu et rarement en

même temps, ce qui est un avantage. La consommation totale cumulée de ces services n'est pas très grande et le dimensionnement réalisé est adapté à ces utilisations puisqu'aucune coupure n'est relevée.

Enfin, la charge de téléphones portables n'a jamais été coupée par manque d'énergie. Ce service semble lui aussi surdimensionné.

Dans le cadre expérimental du programme, le dimensionnement centralisé était une bonne solution afin de limiter les erreurs de sous-dimensionnement. Cependant, on peut observer que la télévision et la charge de téléphones portables n'ont pas besoin d'autant d'énergie. Le nombre moyen de charges de téléphones relevé étant de dix par jour, un module de 90 Wc et une batterie de 50 Ah / 12 V seront suffisants.

Grâce à l'expérience du programme, il paraît maintenant possible d'effectuer un dimensionnement de la production et du stockage de l'électricité par service afin de limiter les coûts d'investissement.

Pour chaque circuit, un compteur a été installé. Ce compteur permet de mesurer la consommation d'électricité des services.



Quel investissement pour le système 220 V AC ?

SYSTÈME 220 V	8 modules PV 90 Wc Supports	1 régulateur 35 A / 24 V	4 batteries solaires 180 Ah	3 onduleurs	3 disjoncteurs/compteurs	Total ⁵
Coûts d'investissement	728 800 MRO	45 000 MRO	320 000 MRO	560 000 MRO	110 000 MRO	1 763 800 MRO soit 4 770 €

370 MRO = 1 €

Une solution de production et de stockage par service permettrait de réduire le nombre de modules installés en collant au plus proche des besoins réels, et aurait un impact significatif sur l'investissement que représente ce système.

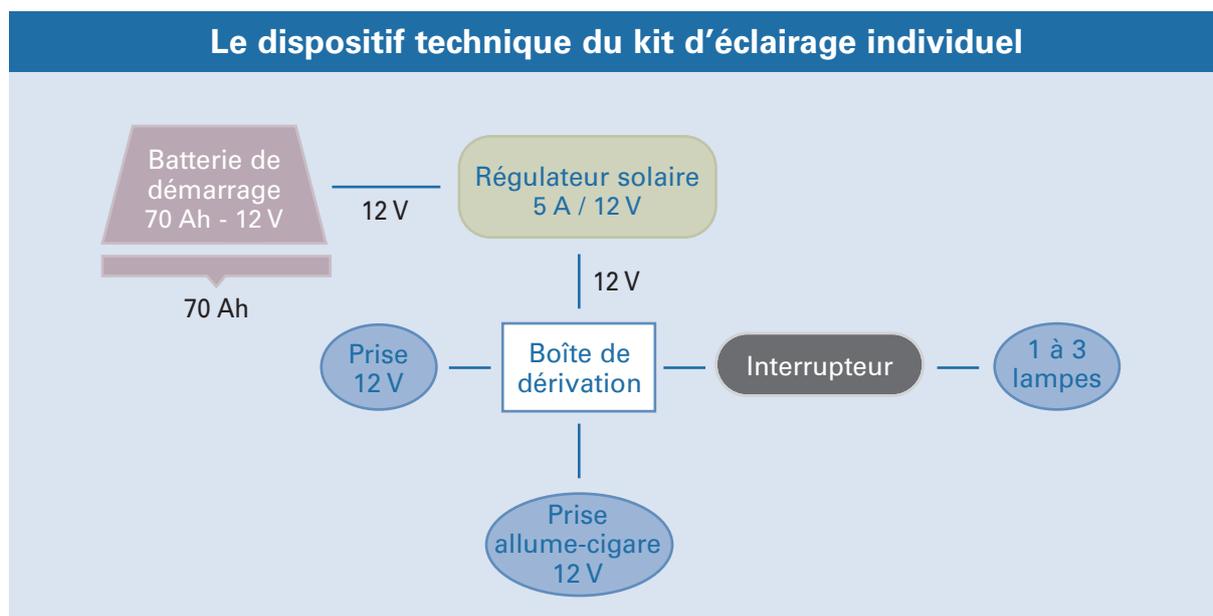
5. Le chargeur de batteries et les kits d'éclairage individuels

Un des besoins des villageois était l'éclairage individuel à domicile. Pour cela, deux solutions existent : l'installation de kits solaires individuels avec un module ou la mise en place d'une station de recharge de batteries communautaire avec l'installation de kits d'éclairage sans module dans les ménages.

La seconde solution se prête mieux au format de la plateforme car cela permet de créer un nouveau service qui constitue une nouvelle recette pour la plateforme. Cette solution a aussi l'avantage d'être moins chère pour les usagers.

5. À ce total s'ajoute des surcoûts d'environ 10 % pour le transport et 10 % pour les petites fournitures de raccordement.

Le kit d'éclairage individuel



Afin de fournir un éclairage de qualité, le Gret a proposé un kit d'éclairage comprenant une batterie, une à trois lampes de 11 W, une prise allume-cigare et une prise 12 V. Le dimensionnement a été fait pour l'utilisation d'une lampe, trois heures par jour pendant six jours ainsi que pour l'utilisation d'une radio 12 V durant une heure par jour pendant six jours. La charge de téléphones portables via la prise allume-cigare n'a pas été incluse dans le dimensionnement car elle ne représente que très peu de consommation.

KIT D'ÉCLAIRAGE	Puissance de fonctionnement	Nombre d'heures d'utilisation	Consommation journalière (Ec)
Lampe	11 W	3 h	33 Wh/j
Radio	9 W	1 h	9 Wh/j
		Total	42 Wh/j

KIT D'ÉCLAIRAGE	Consommation journalière (Ec)	Autonomie (N)	Taux de décharge (D)	Tension (U)	Capacité à installer (C)
Valeurs pour le dimensionnement de la batterie	42 Wh/j	6 jours	30 %	12 V	70 Ah

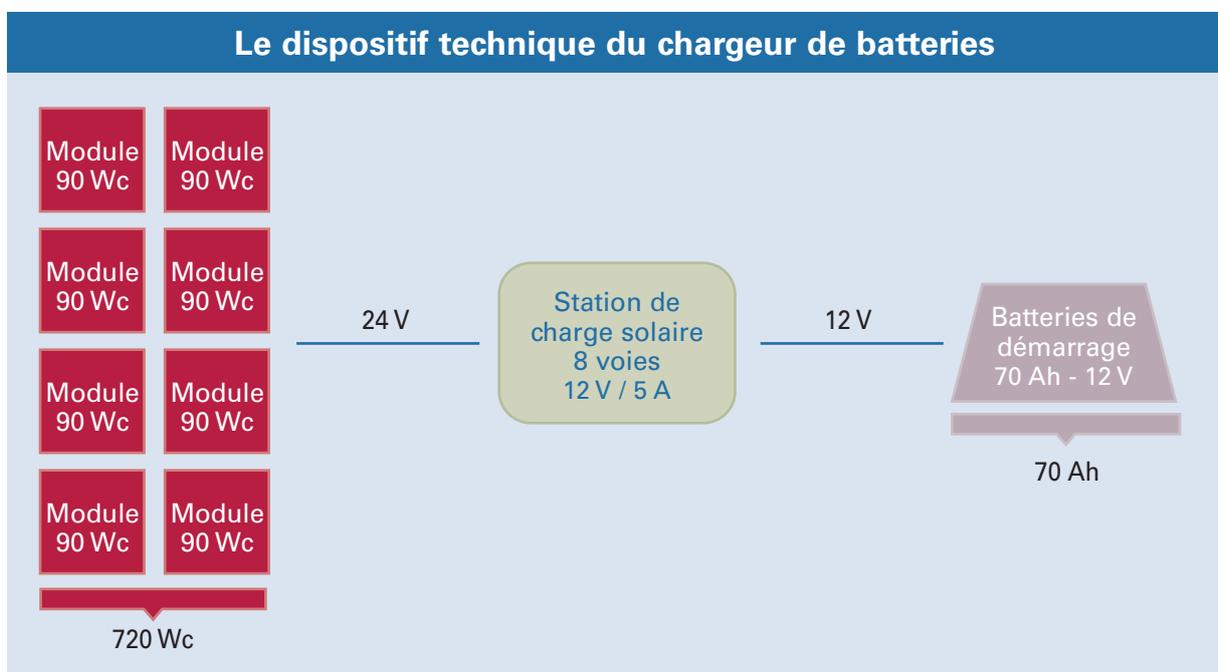
Pour le kit, la solution a été d'installer une batterie de démarrage de 12 V/70 Ah couvrant ainsi tous les besoins. Il a été décidé, pour des raisons économiques, de mettre en place des batteries de démarrage qui reviennent moins cher. Celles-ci sont protégées contre la décharge profonde par un régulateur 5 A/12 V. Le choix du type de batterie est important pour déterminer le type de station de charge à mettre en place.

Le dimensionnement de la station de charge

La station de charge doit permettre aux possesseurs de kits de venir recharger leur batterie en une journée à la plateforme pour un tarif défini. Le cas où plusieurs propriétaires viennent en même temps doit être pris en compte.



Le système de recharge de batteries proposé



Afin de pouvoir charger simultanément plusieurs batteries, le Gret a installé une station de charge solaire à 8 voies. Cet équipement est alimenté en 24 V et permet l'alimentation de 8 voies en 12 V/5 A pour la charge de batteries. Il a été décidé d'installer un module photovoltaïque par batterie (huit modules 90 Wc) afin de pouvoir charger les batteries en une journée. La station fonctionne avec huit voies autonomes permettant de charger simultanément huit batteries avec un état de charge différent. La station arrête automatiquement la charge de la batterie lorsque le seuil haut de charge est atteint.

Avec le dimensionnement réalisé, voici le potentiel du système :

RECHARGE BATTERIES	Production journalière	Rendement	Capacité de stockage	Capacité des batteries et tension	Taux de décharge	Nombre de batteries chargeables
Potentiel du système	2 180 Wh/j	80 %	1 760 Wh/j	70 Ah 12 V	30 %	7 par jour

Grâce au dimensionnement réalisé et au système de kit choisi, la station de charge permet de charger à 100 % sept batteries de kit en une journée.



Précaution d'utilisation pour un fonctionnement optimal

La station de charge ne nécessite pas d'entretien particulier et gère de façon autonome l'arrêt de la charge des batteries. Le gérant de la plateforme peut contrôler la tension des batteries à charger grâce à l'écran intégré de la station. Il peut grâce à cela détecter une batterie déchargée trop profondément et alors faire payer plus cher la recharge totale.

Concernant les kits d'éclairage installés chez les habitants, les lampes doivent être éteintes lorsqu'elles ne sont pas utilisées afin d'allonger la durée d'utilisation d'une charge de batterie. Le régulateur installé dans le kit ne doit jamais être déconnecté afin de préserver la durée de vie de la batterie. La batterie du kit doit être installée dans une pièce aérée et être positionnée en hauteur pour éviter que les enfants se blessent en la touchant.

Retour d'expérience d'utilisation du système

La charge de batterie n'est pas un service qui est utilisé à sa pleine capacité. Cela est dû au faible nombre de kits acquis dans les villages, en moyenne une vingtaine. Les utilisateurs des kits les rechargent en moyenne deux fois par mois. Il y a donc rarement plus de deux batteries en charge simultanément. Le dispositif étant largement surdimensionné, il serait possible d'en réduire la taille, ce qui le rendrait moins coûteux. Un des inconvénients de ce système est la lourdeur de la batterie qu'il faut transporter jusqu'à la plateforme.

Les kits d'éclairage fonctionnent techniquement très bien dans les villages. La fréquence de recharge varie fortement entre les ménages en fonction de l'utilisation qui en est faite. L'utilisation reste en moyenne assez faible, et chaque batterie de kit est rechargée entre une et deux fois par mois. Les ménages utilisent ces kits pour écouter la radio, charger leurs téléphones grâce à des adaptateurs allume-cigare et pour l'éclairage domestique. Le dimensionnement des kits est adapté aux besoins. Des utilisateurs cherchent à se procurer des téléviseurs 12 V qu'ils pourraient brancher sur la prise du kit, mais ce type de matériel n'est pas encore très répandu.

Quel investissement pour le système de recharge de batteries ?

RECHARGE DE BATTERIES	8 modules 90 Wc Supports	1 station de charge solaire	Total ⁶
Coûts d'investissement pour le système	728 800 MRO	140 000 MRO	868 800 MRO soit 2 350 €

370 MRO = 1 €

L'investissement nécessaire peut être fortement réduit en fonction de la quantité de batteries à charger dans le village, ou si le temps que prend la charge d'une batterie à la station n'est pas un élément important pour les usagers. Dans le cadre du PERUB, il était important que la batterie soit chargée dans la journée pour permettre d'avoir un éclairage continu du foyer.

6. La plateforme complète

Les modules nécessaires pour une plateforme complète, comprenant le maximum de services, ainsi que l'investissement complet par service sont présentés dans le tableau ci-contre.

6. À ce total s'ajoute des surcoûts d'environ 10 % pour le transport et 10 % pour les petites fournitures de raccordement.

LA PLATEFORME	Nombre de modules (90 Wc)	Puissance crête installée (Wc)	Production estimée avec pertes et rendements (Wh/j)	Investissement pour le service complet
Service congélateur (4)	16	1 440	4 360	3 557 600 MRO
Service moulin	8	720	2 180	1 500 800 MRO
Service soudure	3	270	820	405 800 MRO
Service 220 V	8	720	2 180	1 763 800 MRO
Service de charge batteries	8	720	2 180	868 800 MRO
Total	43 modules	3 870 Wc	11 720 Wh/j	8,1 millions MRO soit 21 900 €

$$\text{Total} = 21\,900 \text{ €}^7 / 370 \text{ MRO} = 1 \text{ €}$$

D'un point de vue global, la plateforme est un équipement qui permet de fournir cinq services en continu. Le système choisi et le dimensionnement effectué sont particulièrement adaptés à la zone qui jouit d'un ensoleillement fort et constant toute l'année.

Cela a donc permis de concevoir des services de forte puissance fonctionnant la journée. Seuls les congélateurs ont été conçus pour un fonctionnement 24h/24. Ce fort ensoleillement a aussi un impact négatif puisque la température dans les plateformes peut atteindre 40°C sur de longues périodes, ce qui a pour impact de diminuer le rendement de tous les équipements électriques.

V LE DESCRIPTIF DU GÉNIE CIVIL D'UNE PLATEFORME

Les principales contraintes pour la conception du bâtiment abritant les différents services sont le coût de la construction et l'anticipation des emplacements des équipements électriques.

Le plan de la plateforme a été élaboré en plusieurs étapes grâce à la construction de deux premiers types de plateformes tests. Les principales modifications pour arriver à la troisième et dernière version ont été d'optimiser le nombre de services ayant besoin d'une salle couverte en dur et de mettre l'accent sur l'utilisation en extérieur de certains services grâce à des hangars. Cela permet de réduire les coûts de construction de la plateforme.



1. Un bâtiment adapté aux services proposés

Le dimensionnement s'est donc fait en fonction de la place que nécessite chaque service.

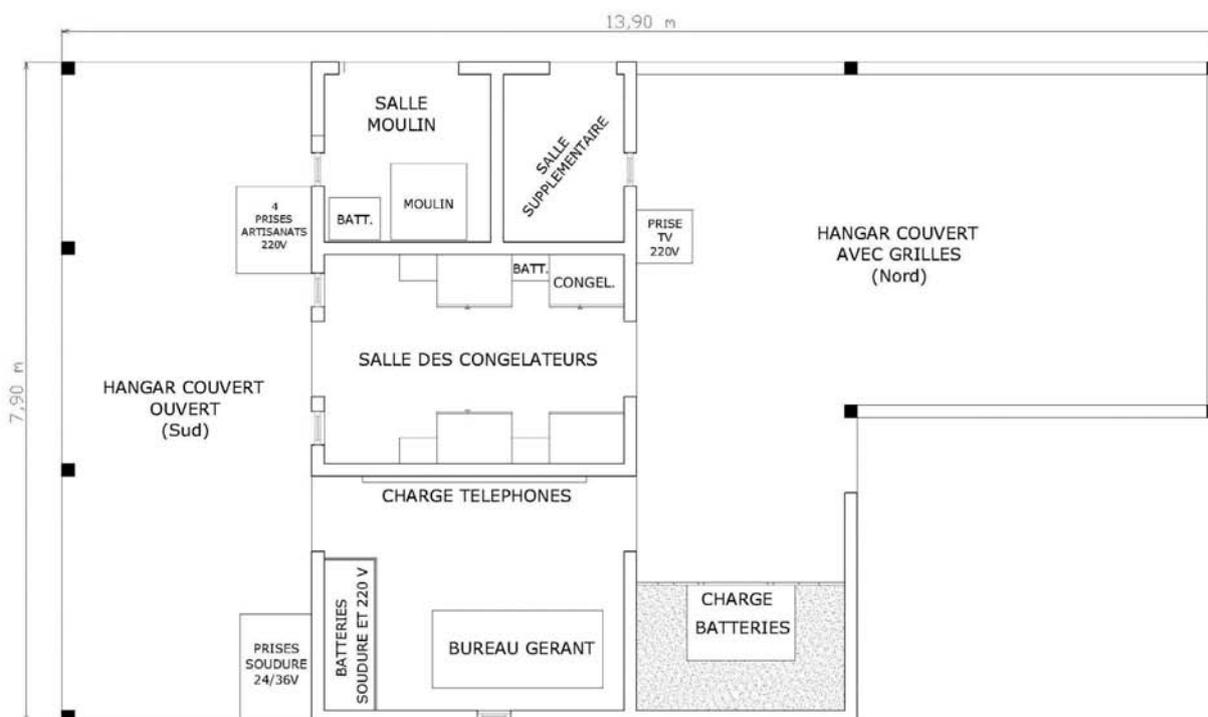
- La partie principale couverte et murée est en béton armé ; elle fait environ 28 m².

7. À ce total s'ajoute des surcoûts d'environ 10 % pour le transport et 10 % pour les petites fournitures de raccordement.

Elle est composée de plusieurs salles :

- une salle pour le gérant qui contient un bureau, le tableau de charge téléphone et les équipements de contrôle des services de soudure et du système 220 V ;
 - une deuxième salle qui peut accueillir jusqu'à quatre congélateurs avec leurs équipements électriques ;
 - le moulin est seul dans une autre salle avec une grande ouverture ;
 - une dernière salle, pour le moment vide, est prévue pour un potentiel service de chloration de l'eau. En attendant les villageois l'utilisent pour diverses activités (épicerie, etc.).
- La partie principale est complétée par deux hangars au sud et au nord :
 - le hangar sud permet d'abriter les prises pour les services de soudure et d'artisanat ;
 - le hangar nord abrite la prise pour la télévision. Ce hangar est équipé de grilles et de rideaux afin que seuls les villageois qui ont payé l'accès puissent regarder la télévision. Le service de recharge de batteries est situé dans le hangar nord. Il est protégé des vols par une grille.

Plan de la plateforme de services électrifiés



2. Un bâtiment adapté aux contraintes techniques

Dans le cadre d'une installation solaire, il faut respecter certaines conditions pour que le bâtiment permette un fonctionnement optimal des équipements électriques.

Le bâtiment est orienté plein sud pour pouvoir faciliter l'installation des panneaux sur le toit. Cette configuration permet de sécuriser les panneaux et de raccourcir la longueur des câbles pour le raccordement des services situés dans les pièces en dessous.

Toutes les salles sont équipées de bouches d'aération permettant une circulation de l'air même avec les portes fermées. Les aérations sont indispensables pour abaisser la température ambiante et ainsi améliorer le rendement des équipements électriques, mais aussi pour protéger les usagers contre les

dégagements de gaz des batteries. Dans la salle du gérant et pour le service de recharge de batteries, les batteries sont positionnées sur des bancs qui facilitent l'aération.

La saison des pluies est particulièrement forte dans la région. Certaines plateformes ont donc une dalle surélevée. Les batteries doivent être également surélevées pour éviter les risques liés à une inondation. Enfin, la plateforme est protégée des animaux par un grillage extérieur.

3. La construction d'une plateforme

	Équipe	Durée	Coût
Construction et matériaux génie civil	1 maçon 3 manœuvres	2 mois	3 300 000 MRO soit 9 000 €

370 MRO = 1 €

L'équipe technique du programme a dû accompagner les entreprises de construction du bâtiment et d'installation des équipements électriques pendant les différentes étapes du chantier afin de s'assurer de son bon déroulement. Il est important que l'électricien et le maçon travaillent ensemble à certaines étapes du chantier, notamment pour encastrer dans les murs du bâtiment les tubes qui serviront à faire passer les câbles électriques ultérieurement. De plus, une attention particulière doit être portée à la fixation des modules sur le toit. Cette fixation doit être très solide afin de résister aux vents violents. Le dispositif de fixation des supports métalliques des modules au toit doit être intégré dès le coulage de la dalle haute pour renforcer la solidité du système.

Les étapes importantes de validation du chantier sont les suivantes :

- vérification de l'implantation au sol (dimension, équerrage) ;
- validation de la fin des fouilles (profondeur, solidité des parois) ;
- vérification du coffrage et ferrailage avant le coulage de la dalle basse ;
- coulage/dallage bas (épaisseur, solidité) ;
- vérification du coffrage et ferrailage de la dalle haute ;
- coulage/dallage hourdis ;
- fin des enduits et finitions ;
- réception provisoire après la peinture ;
- réception définitive, six mois après la fin du chantier.

VI ENSEIGNEMENTS

Une plateforme « tout solaire »

Le choix d'un système de production d'électricité par modules photovoltaïques répond aux besoins des villageois. Ce système a comme avantage d'avoir une bonne fiabilité : les pannes et donc les réparations sont rares. La maintenance des équipements est faible et ne nécessite pas un niveau technique élevé et la durée de vie des équipements est élevée (sauf pour les batteries).

De plus, le système mis en place montre qu'un des principaux inconvénients du solaire, la puissance disponible, peut être techniquement contourné pour faire fonctionner des services comme le moulin ou la soudure. Enfin, le coût de fonctionnement est très faible puisqu'aucun *input* autre que le soleil n'est nécessaire.

Cependant, ce système souffre d'inconvénients comme sa dépendance à un ensoleillement fort et régulier. Cela peut poser problème pour le moulin et la soudure qui sont des services de forte puissance ne pouvant fonctionner que lorsque les panneaux reçoivent de l'énergie solaire. De plus, les technologies électriques installées sont complètement nouvelles dans les villages. Une formation technique conséquente des intervenants est donc indispensable. La fourniture d'équipements électriques de bonne qualité et adaptés au système et leur réparation n'est pas aisée en Mauritanie. Cela implique un danger pour le renouvellement des équipements en fin de vie et donc pour la pérennité de la plateforme. Enfin, le coût d'investissement de ce type de système est assez élevé.

Un système de production et de stockage par service

Le choix d'alimenter chaque service par des panneaux indépendants est un choix économique et pratique. Une solution centralisée aurait nécessité des équipements spécifiques de forte puissance (batteries tubulaires, onduleurs) qui coûtent trop cher pour l'utilisation prévue. Le fait que chaque service soit indépendant limite l'impact d'une panne d'un élément d'un service sur les autres services. Cela est très important, surtout lorsque la répartition des villages dans la région est étalée et que les interventions ne peuvent pas se faire rapidement. De plus, cela permet d'adapter le nombre de modules et de batteries aux services réellement installés dans la plateforme. Les services ne fonctionnant pas peuvent être retirés. Ce choix évite également qu'un service consomme beaucoup plus que les autres et puisse les empêcher de fonctionner. La contrepartie étant que l'énergie qui n'est pas utilisée par un service ne peut pas être récupérée pour d'autres utilisations. Pour des systèmes solaires de petite taille où les services sont mis en place en fonction de la demande des villageois, on privilégiera un dimensionnement par service pour avoir une plateforme modulable.

Un bâtiment adapté aux contraintes techniques du système

La troisième et dernière version du bâtiment prend en compte beaucoup de recommandations issues de l'expérience des deux premières. Cependant, certaines améliorations sont encore à prévoir. Tout d'abord, la présence de batteries dans la salle du gérant, proches du poste de soudure, représente un danger trop important. Ces batteries doivent être installées dans le hangar nord avec le service de charge de batteries. Cela permettrait une meilleure aération et une sécurité accrue pour les usagers de la plateforme. De plus, la plupart des usagers préfèrent utiliser les services en extérieur. Pour cela les hangars sont une bonne solution. Cependant, il faut faire attention à bien conserver une surface suffisante de béton armé pour l'installation des panneaux sur le toit. Enfin, les panneaux doivent être fixés très solidement au toit afin d'éviter qu'ils ne soient arrachés par les vents violents qu'il peut y avoir dans la région.

Les batteries, le point faible du système

Le système « tout solaire » permet de rendre accessible de l'énergie propre et renouvelable pour le fonctionnement de services productifs de forte puissance. Le point faible du système est l'utilisation indispensable de batteries pour le stockage de l'électricité. Ces batteries représentent une partie importante de l'investissement de départ et sont l'élément qui pèse le plus sur le montant de la redevance de renouvellement du fait de leur faible durée de vie (3-4 ans). Il faut donc en racheter régulièrement. Ce renouvellement régulier pose aussi des problèmes environnementaux puisque le recyclage des batteries est très limité en Mauritanie. Il paraît important dans le cadre de la généralisation des plateformes en Mauritanie de trouver ou monter un circuit de recyclage des batteries. De plus, les batteries sont les éléments du système qui demande le plus de maintenance. Enfin, il est difficile de trouver des batteries de bonne qualité bon marché en Mauritanie, ce qui pose des problèmes pour la pérennisation des plateformes sur le long terme.

Les mots du PERUB

APAUS (Agence de promotion de l'accès universel aux services) : agence mauritanienne chargée de mettre en œuvre une politique progressive de généralisation des services essentiels au développement économique et au bien-être social, notamment les services d'eau, d'électricité et de télécommunications. L'APAUS a cofinancé le PERUB à hauteur de 22 %.

Comité d'électrification villageois : organisation responsable de la gestion de la plateforme. Il est élu par l'ensemble des villageois et est composé d'un bureau de sept membres bénévoles résidents du village. Il embauche un gérant et une guichetière pour la gestion quotidienne de la plateforme.

Équipements de production et de contrôle de l'électricité : les équipements de production et de contrôle de l'électricité sont les panneaux solaires, les batteries, les régulateurs et les onduleurs. Ces équipements étaient installés par le Gret dans le cadre du programme. Ils apportent la puissance nécessaire au bon fonctionnement des équipements d'usage des exploitants.

Exploitant indépendant : coopérative, association ou privé qui exploite un service complémentaire de la plateforme.

Gérant : employé embauché par le Comité d'électrification villageois, chargé de l'ouverture et de la fermeture du centre, de la gestion des services de bases et de l'entretien de la plateforme.

Gret : ONG française intervenant en Mauritanie depuis plus de vingt ans. Le Gret a mis en œuvre le programme PERUB.

Guichetière : employée embauchée par le Comité. Elle vend aux villageois des tickets donnant accès à une charge de téléphone ou de batterie.

Équipements d'usage : équipements que les exploitants connectent à la plateforme pour leur activité. Par exemple, le congélateur, le moulin et la télévision sont des équipements d'usage.

Fonds de renouvellement : fonds approvisionné par les redevances de renouvellement payées par le Comité et les exploitants. Il sert à couvrir les frais de renouvellement des équipements de production et de contrôle de l'électricité (achat des équipements, transport et installation).

Maintenance : activité consistant à vérifier l'état de fonctionnement d'un équipement et à faire les réparations nécessaires pour augmenter sa durée de vie.

Plateforme (ou plateforme de services électrifiés) : bâtiment équipé de panneaux solaires alimentant en électricité des services (congélateur, moulin, soudure, télévision, artisanat, charge téléphone et charge batterie).

Redevances (gestion, renouvellement et entretien du bâtiment) : charges payées pour financer certains coûts de la plateforme. Trois redevances ont été mises en place :

- *la redevance de renouvellement* est calculée en fonction des équipements électriques qui composent le système de chaque service. Elle finance le renouvellement de ces équipements. Elle est payée par le Comité et par les exploitants indépendants ;
- *la redevance de gestion* est versée par les exploitants indépendants au Comité. Elle permet de répartir la prise en charge du coût du gérant et de la guichetière sur tous les services ;
- *la redevance d'entretien du bâtiment* est payée par les exploitants indépendants au Comité pour assurer le petit entretien du bâtiment.

Renouvellement : remplacement d'un équipement à la fin de sa durée de vie. Le coût du renouvellement peut être calculé de façon simple en divisant le prix d'achat par la durée de vie estimée de l'équipement.

Services (d'une plateforme) :

- *les services de base* sont la charge de téléphones portables et la charge de batteries. Ces services sont exploités par le Comité d'électrification villageois. On parle alors d'exploitation communautaire ;
- *les services complémentaires* sont la télévision, la soudure, le moulin, les congélateurs et les prises « artisanat ». Ces services peuvent être exploités par le Comité d'électrification villageois et/ou par des exploitants indépendants.

Village : regroupement de personnes plus ou moins dense en milieu rural. Le village n'est pas une entité administrative reconnue en Mauritanie. Chaque village dispose généralement d'un chef de village.

Le programme PERUB a été financé par :



l'Union européenne
(dans le cadre de la
Facilité Énergie du 9^e FED)



l'APAUS
(Agence de promotion de
l'accès universel aux services)