

MANUEL DU FORMATEUR

Un outil pour l'enseignement de l'électricité solaire appliquée aux systèmes solaires domestiques



Écrit par Jean-Paul Louineau, Alliance Soleil Sarl

VERSION FINALE : Janvier 2006

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite sous aucune forme, par la copie, la photographie, le microfilm, ou aucun autre moyen sans permission antérieure de ETC TTP, les Pays-Bas ou de Alliance Soleil Sarl, France.

Ce document a été financé par ETC/TTP, les Pays-Bas.

ETC/TTP et Alliance Soleil ne peuvent être rendus responsables de dommages résultant de l'application des méthodes décrites. N'importe quelle responsabilité à cet égard est exclue.

Table des matières**Les 12 MODULES DU MANUEL DU FORMATEUR**

Numéro du module	Titre	Nombre de pages
1	Introduction du manuel aux formateurs	35
2	Unités de mesure et formules de base en électricité et énergie	18
3	Introduction aux systèmes solaires domestiques	11
4	Le client, la satisfaction de ses besoins avec l'énergie solaire	19
5	Module PV	19
6	Régulateur de charge	14
7	Batterie	23
8	Récepteurs, onduleurs et câbles	18
9	Dimensionnement et devis	18
10	Installation	13
11	Maintenance	22
12	Service Après-vente	15
		225

Table des matières : ANNEXES

	Nombre de pages
MODULE 5 : Module PV	
• Module polycristallin 5 Wc, Photowatt	1
• Module polycristallin 20 Wc, Photowatt	1
• Module polycristallin 40 Wc, Photowatt	1
• Module polycristallin 40 et 50Wc, BP Solar	4
• Module mono-cristallin 75 Wc, BP Solar	3
• Module polycristallin 80 Wc, BP Solar	3
• Module polycristallin 75 Wc, Total Energie	1
• Notice d'installation et entretien pour modules Total Energie	5
• Module silicium amorphe 4-20 Wc, Free Energie Europe	2
• Module mono-cristallin 55 Wc, Shell Solar	2
• Module multicristallin 105 Wc, Shell Solar	2
• Module couche mince CIS 40Wc, Shell Solar	2
• Module amorphe multicouche, 32-64 Wc, Unisolar	2
MODULE 6 : Régulateur de charge	
• Régulateur Solsum 5,0/6,6/8,0/8,8, Steca	2
• Contrôleur de charge solaire 8 – 30 A, Steca	2
• Régulateur GCR 8 – 30 A, BP Solar	1
• Régulateur 6 – 20 A, SunSaver – Morning star	2
• Régulateur Ener 10, 12 et 20, Total Energie	1
MODULE 7 : Batterie	
• Batterie ouverte 65 à 250 Ah, Hoppeke	2
• Batteries ouvertes, plusieurs types, Exide	5
• Batteries ouvertes stationnaires tubulaires, BP Solar	2
• Batteries étanches gel, BP Solar	2
• Batteries étanches AGM, Saphir	3
• Batteries étanches AGM, Hawker	2
MODULE 8 : Câbles et accessoires principaux	
• Eclairage fluorescent, Total Energie	1
• Eclairage halogène, Total Energie	1
• Eclairage avec lampe fluo-compacte	1
• Onduleurs Joker 200 à 2000 W, BP Solar	1
• Onduleurs Sinus SI 400 à 3500 W, BP solar	2
• Onduleurs Picollo, Domino, Allegro 150 à 1000 W, Total Energie	1
• Onduleurs 150 à 500 W, Xantrex	2
• Conservateur à vaccins (OMS), Electrolux / Total Energie	1
• Réfrigérateur / conservateur domestique 150 à 300 litres, Total Energie	1
MODULE 9 : Dimensionnement et devis	
• Exemple de dimensionnement simplifié d'une petite installation	1
• Exemple de dimensionnement simplifié d'une installation avec onduleur	1
• Formulaire de dimensionnement simplifié d'une installation	1
• Exemple d'estimation de prix d'une installation	1
• Formulaire d'estimation de prix d'une installation	1

Il n'y a pas d'annexes pour les modules 1, 2, 3, 4, 10, 11 et 12.

MODULE 1 : Introduction du manuel aux formateurs

1	GÉNÉRALITÉS SUR CE MANUEL.....	2
2	GROUPES CIBLES.....	2
2.1	FORMATEURS ET INSTITUTIONS	2
2.2	ÉTUDIANTS / PARTICIPANTS	2
3	OBJECTIFS DE LA FORMATION	3
4	SUPPORTS PÉDAGOGIQUES CLÉS.....	4
4.1	MANUEL DU FORMATEUR.....	5
4.2	LE GUIDE	5
4.3	STRATÉGIES ET EXAMENS DE QUALIFICATION DES TECHNICIENS ET FORMATEURS.....	5
4.4	VIDÉOS DE FORMATION.....	6
5	CAS DES FORMATIONS EN ENTREPRISES OU ONG SOLAIRES	7
5.1	NIVEAU GÉNÉRAL REQUIS	7
5.2	DURÉE DES FORMATIONS	7
6	CAS DES FORMATIONS EN CENTRE DE FORMATION PROFESSIONNELLE.....	8
6.1	NIVEAU GÉNÉRAL REQUIS	8
6.2	TYPE DE FORMATION : CLASSIQUE OU MODULAIRE	8
6.3	INTÉGRATION DU PV : SUGGESTIONS POUR LA FORMATION 'CLASSIQUE'	9
6.4	INTÉGRATION DU PV : SUGGESTIONS POUR LA FORMATION 'MODULAIRE'	9
7	STRUCTURE DU MANUEL DU FORMATEUR.....	10
8	INITIATION AUX TECHNIQUES DE FORMATION	11
8.1	PRINCIPES DE BASE	11
8.2	LES QUALITÉS D'UNE FORMATION.....	12
8.3	LES QUALITÉS DU FORMATEUR OU DE LA FORMATRICE IDÉALE.....	13
8.4	STRUCTURE DE LA FORMATION	14
8.4.1	<i>Préparation de la formation</i>	15
8.4.2	<i>La connexion</i>	17
8.4.3	<i>La Transmission</i>	19
8.4.4	<i>L'activation</i>	21
8.4.5	<i>Phase de mémorisation</i>	22
8.4.6	<i>Phase de consolidation</i>	23
8.4.7	<i>Clôture de l'apprentissage</i>	25
8.5	CONSEILS POUR L'UTILISATION OPTIMALE DES VIDÉOS DE FORMATION	26
8.6	FICHE ATTENTE DES PARTICIPANTS ET FICHE D'ÉVALUATION D'UNE FORMATION	27
9	ESTIMATION DU MATÉRIEL NÉCESSAIRE POUR CONDUIRE UNE FORMATION	30
9.1	INTRODUCTION	30
9.2	INSTRUMENTS DE MESURES / OUTILLAGE	31
9.3	MATÉRIEL SOLAIRE ET MATÉRIEL 12 V	32
9.4	MATÉRIEL ÉLECTRIQUE STANDARD.....	34
9.5	MATÉRIEL DIDACTIQUE.....	35

1 Généralités sur ce manuel

Ce manuel est une partie essentielle d'un ensemble de documents pédagogiques développés grâce à l'appui financier de ETC Energy et dans ce cadre, aux expériences de formations de techniciens et de formateurs en énergie solaire, acquises par J-P Louineau avec des organisations telles que URDT en Ouganda, la SSD au Mali, ou bien BIOSOL d'ASRAMES en République Démocratique du Congo (plus de 20 sessions de formation de techniciens et de formateurs solaires au total). Ce manuel, ainsi que les documents associés n'auraient pu être produits sans l'appui et la confiance accordée par Willeke Parmentier (coordinatrice ETC Energy / TTP), à son auteur, depuis 1998.

Cette version (janvier 2006) est la mise à jour de la version française de janvier 2004.

Elle ne peut être copiée sans l'autorisation de son auteur (J-P Louineau, Alliance Soleil Sarl, France) ou l'autorisation de ETC Energy / TTP (les Pays-Bas).

Elle peut être utilisée par diverses organisations de formation dans les pays francophones, après la permission des éditeurs. Il peut être nécessaire de l'adapter aux circonstances locales et cela est d'ailleurs souhaitable pour rendre les sessions de formation percutantes et à propos.

Ce manuel est une aide pédagogique de référence à l'usage des formateurs ou formatrices, pour leur permettre de délivrer un cours complet sur les techniques de dimensionnement, d'installation et d'entretien des systèmes solaires domestiques.

2 Groupes cibles

2.1 *Formateurs et institutions*

Ce manuel de formation est destiné aux professeurs d'écoles d'apprentissage (pour CAP d'électricien, électrotechnicien, mécanique générale), aux enseignants en école secondaire (travaux pratiques de physique, électricité appliquée) et également aux entreprises ou ONG impliquées dans des programmes d'électrification rurale.

2.2 *Étudiants / participants*

Cette formation s'adresse aux groupes ou individus suivants :

- Elèves en école à vocation technique (préparant un C.A.P d'électricien, mécanicien, travaux du bâtiment) ;
- Techniciens solaires indépendants, ayant une bonne expérience dans l'installation des systèmes domestiques, mais ne sachant pas encore dimensionner ou faire la maintenance des systèmes.
- Techniciens, nouvellement recrutés par des sociétés solaires (fournisseurs ou prestataires de services solaires), auquel il faut fournir un vernis technique de qualité.

3 Objectifs de la formation

L'objectif global est de former des techniciens solaires de terrain, capables de vendre, d'installer, de réparer et de maintenir des systèmes solaires domestiques.

Le concept de base se résume ainsi ;

Former et Qualifier
des technico-commerciaux de terrain, plutôt que de simples techniciens-installateurs.

Ce cours doit permettre aux formateurs de s'assurer que les étudiants ou participants auront acquis les connaissances et compétences suivantes :

Compétences	Eléments de contenu – détails
Connaissance des composants et du fonctionnement d'un système solaire domestique Connaissance des avantages et limites	Caractéristiques principales et fonctionnement de chaque composant Fonctionnement de l'ensemble (ex : couple régulateur / batterie)
Dimensionnement simplifié d'un système solaire domestique	Dimensionnement basé sur les besoins énergétiques de la clientèle (récepteurs, durée d'utilisation), sur les données météo (production énergétique des PV modules), sur le type de batteries utilisées (profondeur de décharge). Choix des composants selon les disponibilités sur le marché local / national.
Etablissement d'un devis	Notions de prix d'achats, coûts de main d'œuvre, transport, marge bénéficiaire (rapport qualité / prix).
Installation d'un système solaire domestique	Installation des composants selon les règles de l'art (depuis le choix de l'orientation / inclinaison des modules PV, au choix de l'emplacement des lampes et leur fixation)
Formation des usagers	Techniques d'information et de formation des usagers (usage / respect des consignes / maintenance de routine).
Maintenance d'un système solaire domestique	Maintenance de chaque composant, y compris évaluation du comportement de l'utilisateur et sa formation continue. Petites réparations.
Notions d'entrepreneuriat (voir aussi Etablissement de devis) ¹	Communication en milieu rural, marketing, gestion, innovation, services à la clientèle (SAV). ² Mise à jour technique continue (nouveaux produits et technologies)

¹ Dans le cas du Mali, avec la participation de la SSD Yeelen Kura et son module de formation destiné aux entrepreneurs ruraux.

² SAV : Service Après Vente

4 Supports pédagogiques clés

Voici la palette des outils utiles et nécessaires pour la conduite des formations :

Désignation	Description	Objectifs	Cible
1. Manuel du formateur : <i>Manuel à l'usage des formateurs 'Systèmes solaires domestiques'</i>	12 modules (environ 220 pages, format A4) avec Annexes aux modules (64 pages, format A4, (janvier 2006, J.P.L))	Support de cours du formateur (avec proposition d'exercices pratiques, techniques de formation, liste d'équipements)	Formateur
2. Guide : <i>Guide Pratique du Solaire Photovoltaïque dimensionnement, d'installation et de maintenance des petits systèmes solaires photovoltaïques</i>	Version française : 48 pages, format A5, (ISBN 2-913620-32-9, 2005, J.P.L)	Un manuel de référence pour les techniciens(nes) et un manuel d'enseignement	Techniciens et étudiants solaires
3. Stratégie et examens de qualification des techniciens et formateurs	Contient des examens pratiques et théoriques prêt à l'emploi (45 pages, janvier 2006, J.P.L)	Permettre la qualification des techniciens jusqu'au niveau de formateurs	Technicien expérimenté Formateur expérimenté
4. Vidéo de formation			
Vidéo : <i>Installation de Systèmes Solaires Domestiques</i>	Version française : Format VHS et CD ROM, 23 minutes (août 2003, J.P.L)	Illustration du chapitre 11 du Guide : Procédures et techniques d'installations des systèmes solaires	Formateurs et participants
Vidéo : <i>Utilisation et Entretien des Systèmes Solaires Domestiques</i>	Version française : Format VHS et CD-ROM, 19 minutes (août 2003, J.P.L)	Illustration des chapitres 3, 4 et 12 du Guide (description d'un système solaire, avantages, limites, entretien par l'utilisateur).	Formateurs et participants, Clients et usagers des systèmes
Vidéo³ : <i>Servicing and Maintenance of Small Solar Systems</i>	Version anglaise Vidéo VHS (version anglaise, tournée en analogique) (Avril 1999, JPL)	Illustration du chapitre 12 du Guide : Procédures de maintenance des petits systèmes solaires	Formateurs et participants

Bien entendu, pour conduire une formation, il faut un minimum de matériel. Une liste et méthode pour déterminer les besoins en matériels sont proposés à la fin de ce module.

³ Cette vidéo fut la première des vidéos de formation. Elle a été tournée et produite en 1999 avec peu de moyens en temps et matériel. Sa qualité d'image ne permettait pas une traduction française.

4.1 Manuel du formateur

Ce **manuel du formateur** comprend 12 modules et leurs annexes.

Ce manuel est une version développée du **Guide Pratique du Solaire Photovoltaïque, Dimensionnement, Installation et Maintenance**, noté **le Guide**. La plupart des 'Modules' correspondent à des 'Chapitres' du Guide. Il comprend aussi un ensemble d'annexes, essentiellement constitué de documents techniques de fabricants de matériels.

Module	Nom du module	Chapitre correspondant du Guide
1	Introduction au manuel au formateur	-
2	Unités de mesures et formule de base en électricité et énergie	2
3	Introduction aux systèmes solaires domestiques	3
4	Le client, la satisfaction de ses besoins ... avec l'énergie solaire	4
5	Module PV <i>(avec annexe)</i>	5
6	Régulateur de charge <i>(avec annexe)</i>	6
7	Batterie <i>(avec annexe)</i>	7
8	Récepteurs, onduleurs et câbles <i>(avec annexe)</i>	8, 9
9	Dimensionnement et devis <i>(avec annexe)</i>	4
10	Installation	11
11	Maintenance et entretien	12
12	Service Après-vente	13, 14

4.2 Le Guide

Le **Guide Pratique du Solaire Photovoltaïque, Dimensionnement, Installation et Maintenance**, noté **le Guide**, a été conçu pour accompagner chaque technicien, dans ses activités de bureau et sur le terrain pour les installations et la maintenance. Il a été également rédigé comme un support pédagogique à remettre aux étudiants pendant les sessions de formation. Le Guide contient des conseils et procédures pratiques, faciles à mettre en œuvre pour :

- L'évaluation des besoins énergétiques du client ;
- Le dimensionnement d'un système et le choix des équipements de qualité ;
- L'installation, l'entretien et la réparation des systèmes ;
- Le conseil et la formation de la clientèle.

Il contient également un glossaire des termes utilisés, une bibliothèque technique et des sites internet.

Il doit être remis à chaque étudiant ou participant.

4.3 Stratégies et examens de qualification des techniciens et formateurs

Ce document propose une stratégie et des examens types pour qualifier les participants ayant reçu une ou plusieurs formations. Il existe 4 niveaux de qualification :

1. technicien monteur (homme ou femme);
2. technicien de maintenance et dépannage (homme ou femme) ;
3. concepteur (homme ou femme);
4. finalement le niveau formateur (homme ou femme).

4.4 Vidéos de formation

Ces vidéos illustrent certaines parties du cours. Leur contenu est décrit ci-après :

1. Une vidéo de formation *Installation de Systèmes Solaires Domestiques*

Sujets traités	Durée
Introduction	00.0 – 2.34
Qu'est-ce que l'installation d'un système solaire ?	2.34 – 3.20
Qu'est-ce qu'un petit système solaire ?	3.20 - 5.45
Méthodologie d'installation	5.45 – 6.20
Préparation pour l'installation, une étape cruciale	6.20 – 10.38
Installation du module solaire	10.38 – 12.45
Installation du régulateur	12.45 – 13.20
Préparation et installation de la batterie	13.20 – 16.40
Astuces d'installation des récepteurs et des câbles	16.40 – 18.58
La finition	18.58- 22.08

2. Une vidéo de formation *Utilisation et Entretien des Systèmes Solaires Domestiques*

Sujets traités	Durée
Introduction	00.0 – 2.11
Pourquoi promouvoir les systèmes solaires ?	2.11 – 3.06
Qu'est-ce qu'un petit système solaire ?	3.06 – 6.22
Principaux avantages des petits systèmes solaires	6.22 – 7.30
Principales limites des petits systèmes solaires	7.30 – 8.15
Comprendre, pour mieux bénéficier de votre système	8.15 – 10.52
L'entretien de votre système	10.52 – 14.14
Sécurité et Protection de l'environnement	14.14 – 15.10
Observations finales	15.10 – 15.31

3. Une vidéo de formation *Maintenance and Servicing of Small Solar Systems*⁴

Sujets traités	Durée
Introduction	00.0 – 2.42
What is Servicing?	2.42 – 3.13
Small Solar Systems Components	3.13.- 4.57
Essential tools	4.57 – 5.42
Preparation for Servicing	5.42 – 6.51
Solar Module Servicing	6.51 – 10.02
Regulator Servicing	10.02 – 11.33
Battery Servicing	11.33 – 16.13
Load Servicing	16.13 – 17 .10
The Finishing Touches for Servicing	17.10 – 18.53

⁴ Cette vidéo fut la première des vidéos de formation. Elle a été tournée et produite en 1999 avec très peu de moyens en temps et matériel. Sa qualité d'image ne permettait pas une traduction française.

5 Cas des formations en entreprises ou ONG solaires

5.1 Niveau général requis

Le niveau intellectuel indispensable à l'acquisition des connaissances et compétences nécessaires est égal ou inférieur à ce qu'il est nécessaire pour l'obtention d'un CAP⁵ d'électriciens-monteurs'. Le niveau de complexité des calculs reste modeste.

5.2 Durée des formations

☞ Les supports pédagogiques sont à exploiter pour des sessions en général assez courtes. La réponse aux questions suivantes permettra d'estimer les durées nécessaires : *S'agit-il de former des techniciens monteurs, des techniciens-concepteurs, ou encore de former des techniciens chargés de la maintenance de systèmes bien identifiés ?*

☞ La durée de la formation sera variable selon le niveau scolaire et/ou technique des participants (expériences avec systèmes solaires ou non). On peut estimer une durée minimum de 3 jours (à raison de 8 heures par jour). Une durée de 15 jours est préférable, alors que l'idéal est sans doute une durée de 3 semaines, pour former un technicien avec toutes les compétences requises et définies en début de ce module (section 3).

☞ Les modules ont une durée comprise entre 5 et 20 heures. Ce temps de formation par module peut varier fortement en fonction de l'importance que l'on veut attacher aux travaux pratiques.

Module	Désignation	Durée moyenne	Durée minimum pour une formation complète
1	Introduction au manuel au formateur	-	-
2	Unités de mesures et formule de base en électricité et énergie	10	4
3	Introduction aux systèmes solaires domestiques	8	6
4	Le client, la satisfaction de ses besoins ... avec l'énergie solaire	8	8
5	Module PV	8	8
6	Régulateur de charge	6	8
7	Batterie	12	6
8	Récepteurs, Onduleurs et câbles	8	4
9	Dimensionnement et devis	10	10
10	Installation	16	10
11	Maintenance et entretien	12	6
12	Service Après-vente	4	2
Total		102	72

(Durée comprenant les travaux pratiques)

☞ Il est tout à fait envisageable de préparer une formation qui n'utilise seulement que quelques modules sur les 12.

⁵ Certificat d'Aptitudes Professionnelles

6 Cas des formations en centre de formation professionnelle

6.1 Niveau général requis

Le niveau intellectuel indispensable à l'acquisition des connaissances et compétences nécessaires à un technicien en systèmes solaires domestiques est égal ou inférieur à ce qu'il est nécessaire pour l'obtention d'un CAP⁶ d'électriciens-monteurs'. Le niveau de complexité des calculs reste modeste (ex : pour le dimensionnement simplifié, pour les chutes de tension), ainsi que le niveau de difficultés concernant le choix des composants ou celui des techniques d'installation.

6.2 Type de formation : classique ou modulaire

D'une manière générale, il existe deux types de pédagogies pour la formation en vue de l'obtention du CAP.

1. La Formation dite 'classique', en cours depuis de nombreuses années (dans les CFP publics et privés).
2. La formation dite 'modulaire', en cours d'implémentation (depuis quelques années dans certains CFP).

Formation classique

Elle consiste, en général, de l'enseignement de matières 'classiques' (ex : mathématiques, langues, dessin industriel, électrotechnique, schéma, etc.). Elle est sanctionnée par un examen théorique et pratique de fin d'études. La durée 'officielle' de la formation est de deux ou trois ans selon les pays. Le nombre d'heures d'enseignement est compris entre 2200 et 3300 heures pour l'ensemble des sujets (Base : 35 heures par semaine et 32 semaines d'enseignement par an).

Formation modulaire

L'approche pédagogique repose sur un programme défini par une série de compétences concernant le métier d'électriciens-monteurs. Les compétences comprennent les compétences particulières au métier et les compétences plus générales. Chaque compétence est enseignée dans un module (ex : module 'Utilisation des appareils de mesures', Module 'Entretien et dépannage des systèmes électriques', module 'Analyse des circuits à courant continu, etc.)

L'obtention du CAP par la formation modulaire consiste en l'obtention de tous les modules au cours des 2 ou 3 années de formation (obtention de crédits). La formation n'est donc pas sanctionnée par un examen, mais par l'obtention des modules les uns après les autres. L'ordre d'obtention des modules est flexible, cependant certains modules sont obligatoires avant l'obtention de certains autres.

⁶ Certificat d'Aptitudes Professionnelles

6.3 Intégration du PV : suggestions pour la formation 'classique'

Pour intégrer le thème 'Systèmes photovoltaïques domestiques' dans le curriculum des élèves de CAP, une des stratégies consiste à inclure des nouveaux sujets dans les matières existantes. On obtient alors le tableau ci-après :

Matières existantes au CAP	Sujets existants (utiles pour les systèmes solaires)	Nouveaux sujets à introduire	Temps nécessaire réparti sur 1, 2 ou 3 ans (Heures)
Dessin industriel	Dessin (vue simple, perspective, etc.)	Dessin de structure de montage des modules solaires (ex. en toiture ou sur poteau)	5
Technologie	Composants des systèmes électriques solaires (batteries, éclairage fluorescent, réglettes lumineuses)	Composants des systèmes PV (modules solaires, régulateur, batteries (durée de vie / profondeur de décharge))	20
Schéma	Représentation graphique des principaux composants électriques / schéma unifilaire –multifilaire, etc.	Symbole des modules PV, onduleurs	1
Electro-technique	Courant continu, courant alternatif, puissance, énergie, rendement, consommation, dimensionnement des câbles (chute de tension) et des protections électriques,	Notions d'ensoleillement, Dimensionnement (énergie consommée par les récepteurs = énergie produite par modules PV)	5
Travaux pratiques	Utilisation des multimètres Câblage des circuits de distribution (simple allumage, va-et-vient, prise, boîte de dérivation, protection) Installation, maintenance et dépannages	Câblage du générateur PV (l'ensemble module, régulateur, batterie) Dépannages générateurs PV	30
Formation en 'entreprenariat'	Néant	Module SSD : description d'une société de services en zones rurales, marketing, organisation	5
Stages en entreprises	Stages en entreprises	Stages en entreprises	0
Evaluation/examen	Néant	Contrôle théorique / Travaux pratiques	8
Total			74

Le temps nécessaire indiqué est indicatif. Cela signifie qu'il faudrait par exemple, intégrer 5 heures de cours dans le cours d'électrotechnique.

6.4 Intégration du PV : suggestions pour la formation 'modulaire'

Il s'agit simplement de rajouter un autre module aux modules existants : le module 'systèmes solaires photovoltaïques domestiques'.

Le Manuel à l'usage des formateurs 'systèmes solaires domestiques' comprend tous les éléments de fondation de ce module ou peut être utilisé comme tel. Ce module devra alors être présenté officiellement aux autorités du Ministère de l'Education des pays concernés et aux agences d'électrification rurale (ex : AMADER au Mali).

7 Structure du manuel du formateur

Chaque module de ce manuel est structuré à l'identique et consiste en 5 ou 6 chapitres principaux :

	Chapitre	Commentaires
1	Objectifs	Énumération des principaux thèmes abordés
2	Durée moyenne du module	Durée d'enseignement proposé en heures
3	Équipement nécessaire	Liste de matériel nécessaire pour la conduite du module (matériel technique : modules solaires, etc.)
4	Contenu de module	Substance principale du cours : informations sur les sujets abordés, exercices pratiques.
5	Topogramme	Dessin synthétique qui résume un module en une page
5 (ou 6)	Feedback et évaluation	Évaluation des acquis des participants / étudiants – étape nécessaire pour vérifier les acquis.

- ☞ Chaque module propose des exercices théoriques (ex : utilisation de formules) et des exercices pratiques à donner aux étudiants, pendant le cours, ou comme travail du soir. Les réponses de tous les exercices sont fournies dans chaque module.
- ☞ Les modules **5, 6, 7 et 8** comprennent des annexes pour illustrer concrètement les connaissances transmises : notices techniques de matériel, formulaire de dimensionnement, formulaire de devis, etc.
- ☞ Intentionnellement, certaines informations sont répétées d'un module à l'autre.

8 Initiation aux techniques de formation

8.1 Principes de base

Les techniques de formation (techniques pédagogiques) proposées sont basées sur les expériences acquises par l'auteur en matière de formation⁷. La méthodologie proposée pour faciliter et animer cette formation est basée sur les principes suivants :

- ☑ Chaque participant a un mode préférentiel d'apprentissage.
- ☑ Chaque personne apprend mieux quand il est dans un état de détente concentré. Le stress inutile est absent de l'apprentissage. L'effort n'est pas déconnecté du plaisir.
- ☑ Les émotions jouent un rôle essentiel dans l'apprentissage, comme source d'énergie et de motivation ; elles favorisent la mémoire à long terme.
- ☑ Le formateur et les participants ont une large palette de connaissances et d'expériences à partager. Ils doivent coopérer.
- ☑ Le contenu des programmes est négocié entre les formateurs et les participants.
- ☑ Les moyens d'apprentissage sont 'sur mesure' et adaptables à tous moments.
- ☑ Les travaux pratiques représentent au moins 50 % des activités
- ☑ L'erreur fait partie du processus d'apprentissage.
- ☑ L'humour respectueux des personnes est nécessaire.

Il est fortement conseillé d'adhérer à ces principes, avant et pendant une session de formation.

*Ce que j'entends une fois, je l'oublie ;
Ce que je vois, je m'en souviens ;
Ce que je fais, je le connais.*

(Traduction d'un poster
de l'Education Nationale
Sud-Africaine, affiché
dans les écoles, 1999 -
2000)

⁷ Et en s'appuyant sur l'excellent livre 'Former sans ennuyer', auteur Bernard Hourst, 2002. Code ISBN 2-7081-2757-8, Editions d'Organisation, 1, rue Thénard, 75240 Paris Cedex 5.

8.2 Les qualités d'une formation

Commentaires / illustrations

<p>1. Avoir de la valeur</p>	<p>➔ Les bénéficiaires de la formation ont le sentiment que leur temps est bien investi, que ce qu'ils vont apprendre sera utilisable dès leur retour au travail, mais aussi sur le plan personnel.</p>
<p>2. Etre claire</p>	<p>➔ Il s'agit de bien faire distinguer les différents niveaux d'importance des informations transmises (ex : la connaissance des procédures d'installation des systèmes est plus importante que la connaissance du principe de fonctionnement d'une batterie.)</p>
<p>3. Etre sur mesure</p>	<p>➔ Les bénéficiaires profitent au mieux de ce qui est enseigné (ex : ceci suppose que le niveau de connaissances des bénéficiaires est bien cerné, d'où la nécessité d'une évaluation au début de la formation).</p>
<p>4. Avoir une bonne structure</p>	<p>➔ Trop structurée, elle risque de devenir ennuyeuse et 'à sens unique'. Mal structurée, elle semblera peu organisée, et peut conduire les bénéficiaires à douter du sérieux de la formation, donc des formateurs.</p>
<p>5. Avoir une durée adaptée</p>	<p>➔ Les apprenants ont un temps d'attention limité (ex : cycle de 20 minutes en moyenne). Il faut en tenir compte afin de ne pas noyer les bénéficiaires de nouvelles connaissances, au risque de les décourager.</p>
<p>6. Faciliter la mémorisation</p>	<p>➔ Il s'agit de mélanger harmonieusement la transmission de nouvelles connaissances avec des exemples et travaux pratiques d'application.</p>
<p>7. Etre compréhensible</p>	<p>➔ Une présentation des informations par 'couches' de complexités s'avère souvent efficace (ex : expliquer le fonctionnement de chaque composant d'un système solaire, puis l'interaction entre deux composants, puis ensuite entre tous les composants, ceci permet enfin d'expliquer le fonctionnement d'un système solaire).</p>
<p>8. Etre réaliste</p>	<p>➔ Cela signifie que l'on ne peut pas transformer des bénéficiaires en techniciens photovoltaïques chevronnés en 5 jours de formation. Il faut donc définir des objectifs réalistes et s'y tenir pendant une formation.</p>
<p>9. Pousser à l'action et à l'autonomie</p>	<p>➔ Puisqu'une formation doit aboutir à l'utilisation des informations transmises, ces dernières doivent être appliquées par les bénéficiaires <u>pendant</u> la formation. Surtout, ne dites pas : 'cette procédure que vous devez appliquer sur le terrain, nous n'avons pas le temps de l'appliquer en formation, on fera autrement'. Quel modèle donne alors le formateur ?...il pousse à ne pas passer à l'action.</p>

8.3 Les qualités du formateur ou de la formatrice idéale

Le formateur doit avoir, ou à défaut, développer les qualités suivantes :

	<i>Commentaires / illustrations</i>
1. L'amour et la maîtrise du sujet enseigné.	☞ Le formateur croit en ce qu'il dit. Ce qu'il dit a de la valeur pour lui.
2. De l'énergie, de la joie, une attitude positive.	☞ Le dynamisme de la voix et des gestes aide les agents à rester attentifs.
3. De bonnes facultés à organiser l'apprentissage, de manière à être clair, efficace et captivant.	☞ Minutieux dans sa préparation, il optimise la formation aux besoins des participants.
4. Un sens de l'autorité bien développé.	☞ Il est cohérent entre ce qu'il dit et fait. Il est crédible et authentique. Il inspire le respect.
5. Humilité et respect pour soi-même et pour les autres.	☞ Il est responsable de la formation et du groupe.
6. Un bon équilibre entre confiance en soi et confiance dans les autres.	☞ Il est expérimenté et transmet son savoir en toute confiance, avec comme objectif de renforcer la confiance en soi des participants.
7. Une bonne compréhension des processus psychologiques des personnes et groupes.	☞ Il évalue le comportement des individus et du groupe, afin de déceler tout blocage ou stress inutile.
8. Des capacités à bien observer ce qui se passe dans un groupe.	☞ Il a un regard perspicace et observateur. Il sait prendre le pouls de l'audience.
9. Une capacité à expliquer clairement	☞ Il a de l'imagination et sait présenter un sujet sous divers angles d'approche.
10. Un bon sens de l'humour et du théâtre	☞ Ceci renforce les liens avec les participants. L'humour aide à apprendre. ☞ Il maîtrise sa voix, en volume, vitesse et intensité en fonction des circonstances. Il crée de l'émotion !

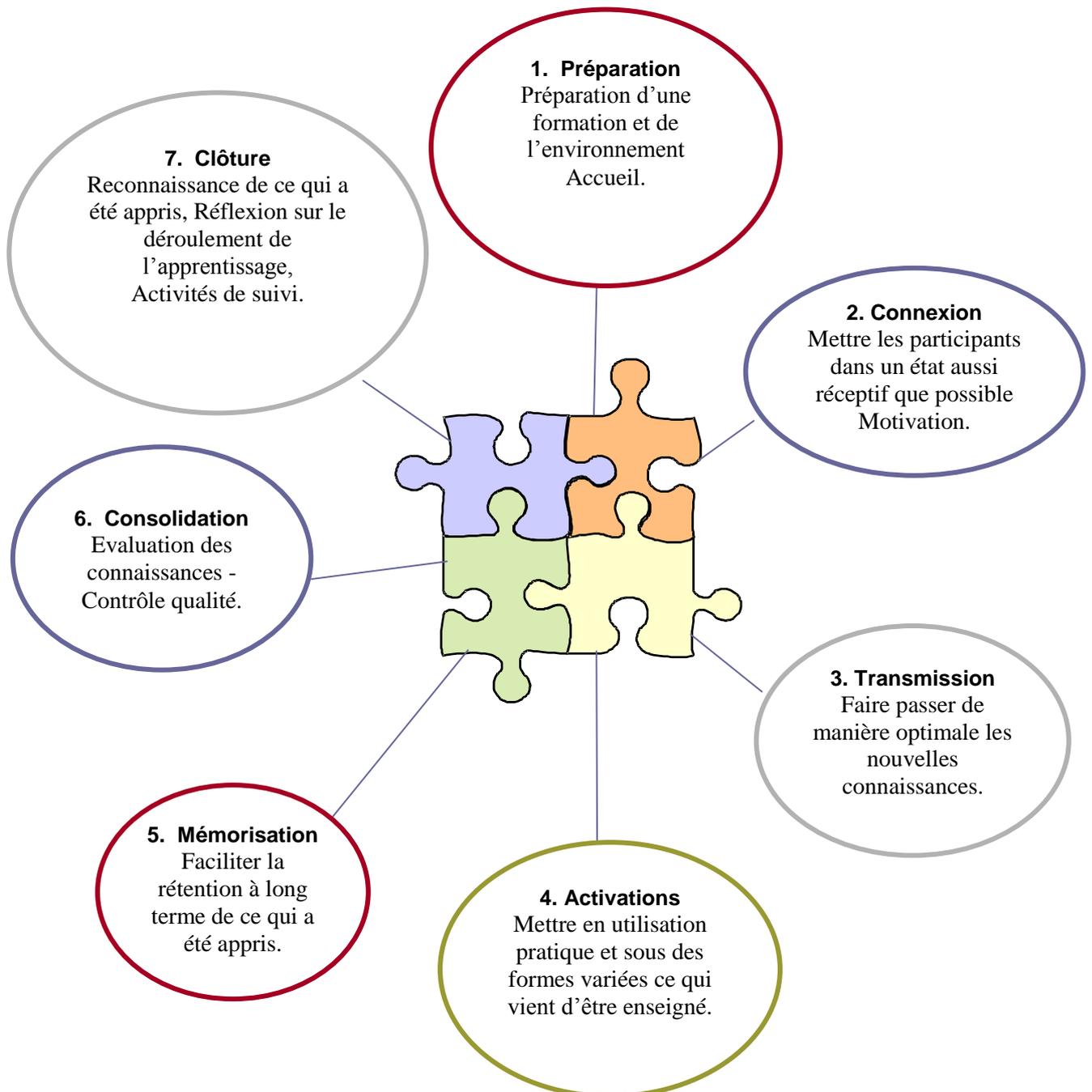
Il est difficile d'avoir toutes les qualités mentionnées dans la section précédente, mais les connaître est essentiel pour progresser. Dans tous les cas, il faut **absolument éviter** de :

- ☒ Donner l'impression d'avoir mal préparé un sujet.
- ☒ Répondre aux questions d'une manière insatisfaisante et s'en contenter.
- ☒ Ne pas être au courant des informations récentes sur son domaine de spécialité.
- ☒ Etre en dehors de son planning horaire, être incapable de terminer à temps.
- ☒ Ne pas impliquer les participants.
- ☒ Ne pas établir de rapports personnels.
- ☒ Utiliser des commentaires sexistes, racistes ou un humour déplacé.

8.4 Structure de la formation

Nous vous conseillons de passer par les 7 étapes ci-après.

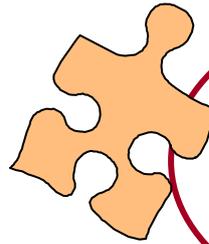
Ces étapes ne sont pas toujours chronologiques. Par exemple, la phase de 'Préparation' est en début de formation, mais aussi tout au long de la formation (ex : après chaque évaluation de fin de journée, il est souvent nécessaire d'adapter le programme en fonction de la vitesse d'apprentissage des bénéficiaires). De même, la 'Transmission' est une activité quotidienne, sauf le dernier jour d'une formation. Pour ces raisons, les phases d'une formation sont représentées sous la forme graphique ci-dessous, dans le but de montrer l'interaction entre les phases pour réussir le *puzzle* d'une bonne formation :



8.4.1 Préparation de la formation

Avant le début de la formation :

Il est nécessaire de passer par les étapes suivantes:



1. Préparation

- Préparation d'une formation
- Préparation de l'environnement
- L'accueil.

1. Définir et clarifier les objectifs de la formation.
2. Se renseigner au mieux sur le groupe des apprenants (niveau de connaissances, les faiblesses, les attentes, le niveau de motivation).
3. Etablir les moyens d'évaluation afin de mesurer si les objectifs de la formation seront atteints (ceci permet de mieux identifier les sujets à enseigner). Le mode d'évaluation peut être un test écrit, seul ou en équipe. L'évaluation peut être à chaud (pendant la formation) ou à froid (plusieurs semaines ou plusieurs mois après la formation).
4. Evaluer les ressources disponibles (personnel formateur, matériel, temps).
5. Lire et étudier attentivement l'ensemble du matériel pédagogique. Faire les exercices pratiques prévus et vérifier les résultats, avant de les reproduire en cours.
6. Préparer un programme de formation
7. Informer de la formation le plus tôt possible. Ce peut être un courrier avec les objectifs de la formation, les détails de l'organisation mais aussi éventuellement, un questionnaire à remplir, un travail préparatoire éventuel.
8. Préparer le contenu de la formation : il sera basé sur toutes informations à transmettre. Le cours pourra s'inspirer de précédentes formations. Le cours se prépare avec ce Manuel du Formateur et le *Guide Pratique du Solaire Photovoltaïque*⁸.
9. Préparer des supports d'activités (ex : posters). Ils devront être clairs, colorés et donner une impression de sérieux.
10. Préparation logistique (salle, et matériel technique, voir aussi le **dernier chapitre de ce module**).

Choisir et préparer la salle de formation. S'assurer qu'elle soit :

- ◆ D'une taille égale à environ 2 fois la place prise par les participants en place assise ;
- ◆ Bien éclairée, tranquille (faible bruit de voisinage) et sans écho ;
- ◆ Propre et en ordre ;
- ◆ Confortable (ex : avec ventilateurs plafonniers pour la climatisation) ;
- ◆ Equipée d'espaces d'affichage ;
- ◆ Décorée avec des posters (ex : clients heureux souriants) ;
- ◆ Equipée de points d'eau ou pour prendre le thé ;
- ◆ Equipée de points de fourniture d'électricité pour matériel pédagogiques (TV), mais aussi pour poste radiocassette (pour ambiance musicale de détente).

⁸ Livre '*Guide Pratique du Solaire Photovoltaïque, manuel pour techniciens et techniciennes, dimensionnement, installation et maintenance, 2eme édition*, écrit par Jean-Paul Louineau et publié en 2005 par Systèmes Solaires (financement ETC / Fondation Hulsebosch Prior Fond, Fondation Energies pour le Monde, ADEME et Alliance Soleil sarl).

Début de formation

Le premier jour, comme chaque jour, l'accueil des bénéficiaires est une étape cruciale.

Préparation quotidienne du formateur :

Sur le plan physique

Soigner l'aspect extérieur : habits, coiffure, netteté.

Avoir un visage détendu, confiant et un sourire chaleureux.

La voix doit être claire, bien timbrée.



*Sur le plan mental
(pour faire le plein d'énergie, de concentration et de plaisir)*

Faire un bref exercice de respiration

Se 'tourner le film', avec le plus de détails possibles, de la formation à venir : la 1^{ère} heure, le premier jour.

Se remémorer les noms et prénoms des participants.

Le premier jour : Ce jour va donner le ton de la formation. Il est nécessaire de :

- ◆ De donner un accueil chaleureux (sourire, poignée de main).
- ◆ De se présenter en tant que formateur.
- ◆ Lancer une activité pour faire connaissance (tour de table, attentes des participants).
- ◆ Indiquer les aspects pratiques : horaires des repas, des pauses, travail demandé en soirée, etc.
- ◆ Distribuer le Guide, dès le début de la formation (Si possible, donner le Guide avant la formation afin que les participants puissent s'y familiariser).
- ◆ Montrer une des **vidéos de formation**, en introduction.
- ◆ Faire au moins un exercice pratique le premier jour.

Soigner l'environnement émotionnel et social

En plus de créer un environnement 'physique' idéal, il faut s'attacher à créer un environnement émotionnel et social de qualité.

- ◆ Favoriser la confiance en soi de chacun des participants.
- ◆ Utiliser un langage positif (il n'y a pas de problèmes, il n'y a que des solutions).
- ◆ Ecouter les participants (leurs craintes et angoisses de ne pas réussir ou comprendre).
- ◆ Laisser de la place à l'humour et la fantaisie : On peut apprendre très sérieusement et bien s'amuser.
- ◆ Etre toujours disponible et accessible pour permettre à chaque participant de poser des questions en dehors des cours.

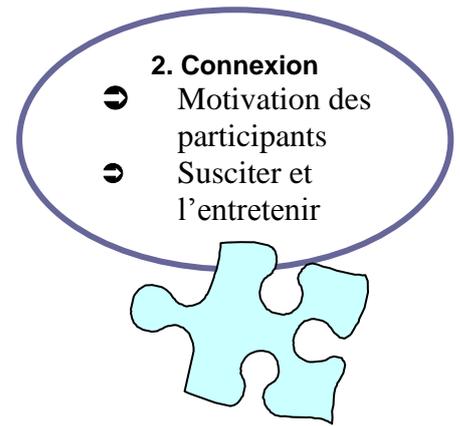
A ne pas oublier : Erreur = OK et Langage > 0 (positif)

8.4.2 La connexion

Il s'agit de créer une dynamique d'apprentissage:

Donner l'envie d'apprendre – Donner l'envie d'avoir envie.

Il faut donc savoir motiver les 'troupes' (assurer la connexion).....et savoir identifier la démotivation (la déconnexion).



Comment susciter et entretenir la motivation ?

<i>Techniques</i>	<i>Commentaires</i>
1. Réussir l'introduction d'un cours	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ex : Raconter une histoire, une anecdote frappante sur le solaire en zones rurales.
2. Donner du sens et présenter les bénéfices futurs de la formation.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ex : Expliquer que le cours du matin sera indispensable pour câbler un système solaire au cours de l'après-midi.
3. Rendre le début facile	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ex : expliquer que la maîtrise des procédures de maintenance permettra aux participants d'acquérir une notoriété de professionnels et d'obtenir des promotions internes.
4. S'assurer que l'apprentissage de nouvelles notions aille de pair avec les capacités des participants.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pour augmenter la confiance des participants. Ex : poser des questions simples à répondre et féliciter les bonnes réponses.
5. Tenir compte du fait que le temps de compréhension n'est pas le même pour tous.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Un apprentissage trop facile ennuie. Trop difficile, il décourage.
6. Etablir un bas niveau de stress – mettre les participants à l'aise	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Donner du travail supplémentaire à ceux qui comprennent vite (ex : '<i>quand vous aurez fini, faites tel ou tel exercice</i>').
7. Favoriser les activités en équipe	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ex : encourager, féliciter tout effort.
8. Mesurer le niveau d'attention et de compréhension.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ex : Exercices pratiques en petits groupes.
9. Montrer régulièrement ce qui a été appris, c.a.d. le progrès accompli, marquer des 'points d'ancrage'⁹.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Est-ce que les participants sont dans la salle 'mentalement'? Est-ce que le courant passe ou ne passe pas ?
10. Soigner la qualité des relations entre les participants et entre le formateur et les participants	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Par de simple tests, des jeux, ou par la création de posters par les participants. ➤ Faire des pauses fréquentes ; ceci permet de mesurer la cohésion du groupe.

⁹ Point marquant un certain niveau de connaissances acquis (ex : Différence entre tension à vide ou en charge).

Reconnaître la déconnexion

En s'aidant du tableau ci-dessous, il suffit d'observer les participants pour mesurer l'état de déconnexion.

Observation de l'état de déconnexion



Agir pour un retour vers l'état de connexion

La confusion dans un travail en cours		Simplifier le travail demandé.
Une difficulté à se concentrer		Changer de rythme.
Un manque d'énergie		Faire une pause ou raconter une histoire qui prête à réflexion ou une histoire drôle.
L'ennui, la somnolence		Changer de sujet, ou aborder le sujet sous un angle différent (ex : passer de la théorie aux exercices pratiques solaires).
L'incapacité de s'exprimer, de prendre une décision.		Reprendre le sujet jusqu'au stade où les participants peuvent exprimer clairement ce qu'ils ont appris (sous forme de jeu ou de révision). Ce sera le 'point d'ancrage' pour la session suivante.

Les causes de déconnexion sont nombreuses. Ce peut être un manque d'eau, de nourriture, d'exercices physiques, un manque de sommeil, mais aussi des excès (digestion de repas, trop de bruit, stress émotionnel). Mais trop souvent, l'état de déconnexion est causé par le formateur :

- ◆ Il est ennuyant, il rabâche¹⁰ le sujet ...les participants s'ennuient.
- ◆ Il parle d'un ton monocorde et est assis dans sa chaise...les participants dorment.
- ◆ Il parle trop vite...les participants ne peuvent pas comprendre.
- ◆ Il passe d'un sujet à l'autre sans arrêt, ...les participants sont dans la confusion la plus totale.
- ◆ Il répond aux questions, mais très souvent à coté du sujet.

¹⁰ Rabâcher : répéter un sujet toujours sous le même angle, la même méthode.

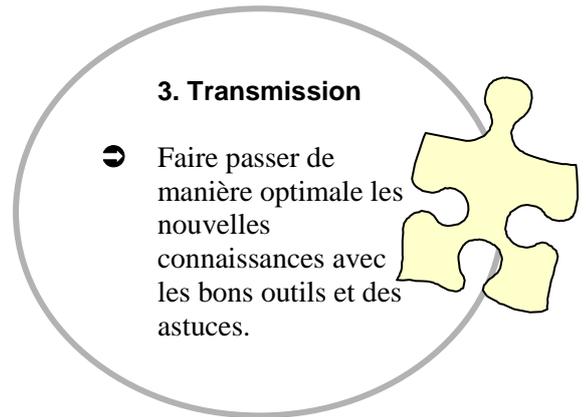
8.4.3 La Transmission

Il est bon de rappeler ici que chaque personne a un mode préférentiel d'apprentissage (ex : certains apprennent mieux en écoutant, d'autres en voyant une démonstration pratique, alors que certains préfèrent lire l'information dans un document). Il faut donc enseigner de manière différente selon la manière d'apprendre de chacun des participants.

Il existe une panoplie d'outils de transmission plus ou moins adaptés à chaque situation.

La boîte à outils de transmission

Mis à part, la présentation 'traditionnelle' sous forme d'un cours en classe devant les participants assis, il existe d'autres outils :



Un choix d'outils

1. Cours magistral
2. La mise en scène / le théâtre
3. Schéma / dessin
4. Des histoires
5. Le topogramme
6. Travaux pratiques de base
7. Des jeux

Illustrations / commentaires

- A éviter chaque fois que possible, mais dans certains cas, un cours magistral de courte durée est très efficace.
- Jeux de rôles où les participants se mettent en situation (ex : techniciens, clients, etc.).
- Un dessin ou un schéma électrique fixent les idées, mieux que de longues explications.
- Ex : Bien raconter une expérience vécue qui sert d'exemple.
- Voir des exemples dans les sections 5 des modules 2, 3, 4, 5 et 6.
- Préparés par le formateur ou par les participants pour démontrer un phénomène.
- 'Questions pour un Champion solaire'. Jeux sur des séquences vidéos : 'cherchez l'erreur dans une installation solaire ou dans le comportement d'un technicien vis-à-vis d'un client'.

Petit schéma vaut mieux que grand discours !

Aspects pratiques fondamentaux pour favoriser la transmission

1. Principe de la multitude des débuts et des fins	<p>☛ Il a été prouvé que l'on apprend mieux en début et en fin de session. Il faut donc multiplier le nombre de sessions courtes (ex : 20 minutes) et bien clôturer chaque fin de session.</p>
2. Etre sûr de la qualité des informations transmises	<p>☛ Les informations transmises doivent être : crédibles, utiles, à jour, précises et acceptables par tous (bien distinguer les faits et les opinions).</p>
3. Bonne cohérence entre langage verbal et langage du corps	<p>☛ Prendre le temps de réfléchir avant de parler, prendre conscience des mouvements de son corps et maîtriser sa voix.</p> <p>Selon un spécialiste en communication :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 7 % de notre communication viennent des mots, - 38 % de notre voix, - 55 % de notre langage corporel. <p>c'est-à-dire que les participants retirent un grand nombre d'informations de ce qui n'est pas dit verbalement.</p>
4. Principe des fondations (ou des couches)	<p>☛ C'est présenter les nouvelles informations en augmentant progressivement leur complexité.</p>

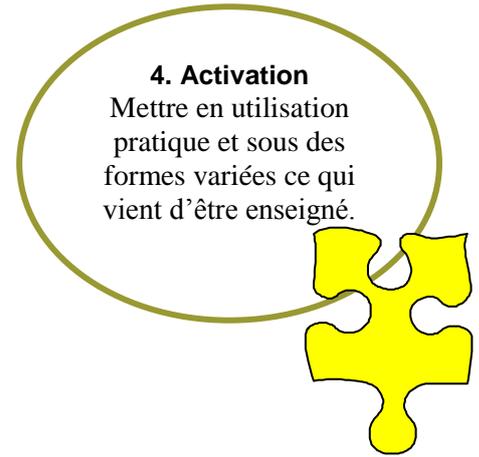
Tableau : Exemple d'enseignement selon le principe des couches

<i>Couches</i>	<i>Nouvelles connaissances</i>	<i>Activités</i>
1 ^{ère} Couche:	Un module solaire produit de l'électricité par conversion directe du rayonnement lumineux. Sans ensoleillement, il n'y a pas de production de courant.	Placer un module au soleil et mesurer le courant. Placer le module dans une boîte noire, mesurer le courant. Faites conclure
2 ^{ème} couche	L'ensoleillement est maximum à midi et lorsque le ciel est clair, sans nuages. Il est de 1000 W/m ² environ	Cours magistral.
3 ^{ème} couche	Le module solaire produit son courant maximum lorsque l'ensoleillement est de 1000 W/m ² .	Faites mesurer chaque heure le courant produit par un module depuis le matin, jusqu'au soir.
4 ^{ème} couche	Le courant maximum est noté 'Courant de court-circuit' ou I _{cc} . Le courant I _{cc} dépend aussi de la température du module, de la propreté du module et des ombres portées.	Faire lire la plaque signalétique d'un module où I _{cc} est indiqué. Faites mesurer I _{cc} avec un module sale, ensuite propre, avec et sans ombre.

8.4.4 L'activation

Cette phase est fondamentale, puisque d'une manière générale, on considère que dans un groupe en formation :

- 70% ne comprendront pas en profondeur les informations nouvelles, sauf si elles sont mises en application pendant la formation.
- Les informations ne s'ancreront dans la mémoire à 'long terme' que si :
 - Elles sont revues au moins 3 fois.
 - Elles sont revues de 3 manières différentes.



Quelques principes simples

1. Décentrement	➤ le formateur n'est plus au centre du processus d'apprentissage. Ce sont les participants qui deviennent <u>individuellement</u> ou <u>par groupe</u> , des centres d'activités, sous la responsabilité du formateur. Le formateur reste donc toujours présent et actif.
2. 50 % du temps	➤ Le temps d'activation doit représenter au moins 50 % du temps de la formation. Attention, les travaux pratiques peuvent traîner en longueur s'ils ne sont pas correctement organisés (pouvant constituer des pertes de temps difficiles à récupérer par la suite).
3. Préparation	➤ Ex : Avant la formation, le formateur doit avoir fait l'exercice pratique lui-même pour connaître sa durée et les conclusions à en tirer.
4. Rythme soutenu	➤ Les temps d'activation doivent avoir un rythme soutenu.
5. Qualité des résultats	➤ Le résultat d'activation doit être clair et de qualité aux yeux de tous. Ex : il faut absolument bien conclure après des travaux pratiques ; des résultats mitigés et non expliqués jetteront dans le trouble les participants.

Exemples d'activation (individuelles ou en petits groupes)

◆ Faire une recherche dans un manuel d'une information demandée.
◆ Exercices de calculs, de dessins de schéma électriques (dans et hors session).
◆ Faire un résumé d'une session.
◆ Réaliser un poster.
◆ Rechercher des mots clés sur un sujet (ex : tension à vide, ou en charge pour une batterie)
◆ Etude de cas (cas d'un mauvais client abusant d'un système solaire).
◆ Jeux de Questions / Réponses, 'Trouver l'erreur' ; 'Question pour un Champion'
◆ Faire des exercices pratiques : installation selon les procédures, mesures de consommations électriques, recherches de pannes.

8.4.5 Phase de mémorisation

En règle générale, la plus grande partie de ce que nous apprenons aujourd'hui sera oublié dans les 24 heures, à moins qu'il y ait une démarche volontaire pour consolider cette information dans la mémoire à 'long terme'.



5. Mémorisation

Faciliter la rétention à 'long terme' de ce qui a été appris.

Quelques techniques de base

1. Soigner l'atmosphère de la formation
2. Ne pas parler trop vite
3. Rappeler régulièrement de ce qui a été appris
4. Faire des pauses nombreuses et courtes
5. Laisser du temps avant de passer d'une notion à une autre.
6. Laisser aux participants le soin de reformuler des connaissances nouvelles
7. Soigner les supports pédagogiques

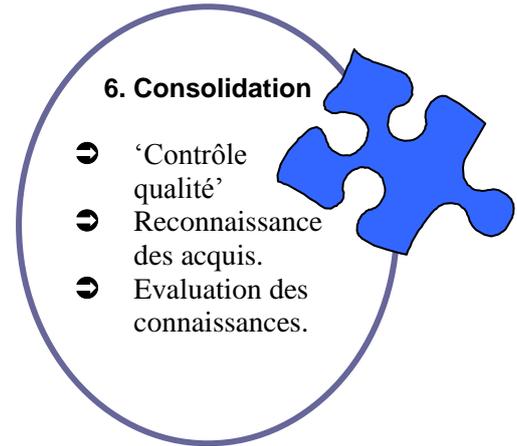
- Ceci afin d'assurer une détente concentrée des participants : humour, fantaisie et droit à l'erreur. Le stress a un effet bloquant sur le fonctionnement de la mémoire.
- Adapter le débit avec la difficulté du sujet (ex : lentement pour une formule à mémoriser, rapidement pour une blague).
- Le rythme de rappel : la règle de 10 / 48 / 7
 - Après 10 minutes,
 - Dans les 48 heures,
 - Après 7 jours.

Attention la répétition à l'identique est ennuyeuse. Il faut préférer des rappels rapides. Ex : une question posée, un exposé rapide par un participant.
- Il ne s'agit pas d'une pause 'thé', mais plutôt une petite coupure qui permet aux participants de se détendre un peu.
- Ex : laisser prendre des notes.
- Ceci permet aux participants de s'approprier une information ou un concept.
- Ex : Poster soigné avec au centre la formule à retenir. Il est conseillé d'afficher le ou les posters sur les murs. Les posters affichés font appel à la vision non consciente (apprentissage sans effort).
- Jeux de mots ou chansons.
- Ex : Créer les dix commandements du technicien solaire.

8.4.6 Phase de consolidation

Cette phase est le 'contrôle qualité' de la formation.

Il s'agit de vérifier ce que les participants ont appris, d'évaluer le niveau de compétences acquis et de faire reconnaître les acquis pour renforcer la confiance.



Vérifier la qualité des acquis

Pour garantir un bon apprentissage :

1. Identifier le plus tôt possible une mauvaise compréhension
2. Faire reconnaître le bon apprentissage des connaissances

- ➔ Toute mauvaise compréhension est difficile à corriger par la suite, bien plus difficile que faire apprendre une nouvelle notion.
- ➔ Ceci donne confiance aux participants, renforce leur motivation pour aller de l'avant.
- ➔ Les participants doivent mesurer leur niveau de compréhension et de mémorisation (Ex : Compléter le tableau des attentes en pourcentage des compétences acquises ; féliciter / célébrer à chaque fois que cela est possible).

Evaluation des compétences

1. Utiliser différentes formes d'évaluation pendant la formation
2. Travail à la maison

- ➔ Personnelles ou en petits groupes : tests théoriques ou pratiques, jeux, installations sur le terrain.
- ➔ Ceci permet à travers un travail personnel ou en petits groupes de mieux mémoriser les connaissances.
- ➔ Le travail proposé doit être bref et stimulant, afin de ne pas gâcher le plaisir d'apprendre.

Principe des tests pour l'évaluation des compétences

Un test doit être conçu comme un point de contrôle sur la route d'un succès certain des participants. Rappelons-nous l'histoire d'un enfant qui apprend à marcher...il tombe, il tombe encore...mais éventuellement il marchera, mieux il courra ensuite ! Doit-on punir un enfant lorsqu'il tombe en essayant de marcher ?

Il faut toujours :

- ◆ Tester pour le succès, jamais pour l'échec,
- ◆ Faire pratiquer beaucoup avant de tester,

- ◆ Proposer au début des tests faciles,
- ◆ Etre clair sur les compétences demandées,
- ◆ Faire régulièrement des tests non notés, non ramassés,
- ◆ Faire des tests auto-corrigés par les participants.

Formes possibles :

- ◆ Tests individuels,
- ◆ Test à faire à deux ou en équipe,
- ◆ Formulaire à compléter (ex : Fiche d'entretien d'un système),
- ◆ Questionnaire à réponses multiples,
- ◆ Exercices pratiques de câblage d'un système, de maintenance ou de dépannage.

TESTER AVANT ET APRES

Il peut être très productif de proposer la même évaluation Avant et à la Fin de formation. En début de formation, cela permet de mesurer le niveau de compétences des participants au niveau du formateur et au participant de mesurer ce que l'on attend de lui. Cette évaluation n'est, bien sûr, pas notée. La seconde fois, cela permet aux participants de valider les connaissances acquises et prendre conscience du progrès accompli.

Note importante en cas d'évaluation pour la Qualification des participants

Dans le cas où la formation est délivrée dans le but de qualifier les participants, il faut se reporter au document intitulé : '**Stratégie et examens de qualifications des techniciens et formateurs**'.

Conseils à l'élaboration de posters

- *Est-ce que les idées clés sont présentes ?*
- *Est-ce qu'ils donnent une impression de professionnalisme ?*
- *Est-ce que les couleurs sont bien choisies ?*
- *Est-ce que les idées sont dans un ordre logique ?*

Conseils pour dessiner un poster :

- *Pas plus de 7 mots par ligne,*
- *Pas plus de 7 lignes sur chaque poster,*
- *Textes courts, une idée par phrase.*

Conseils à l'utilisation :

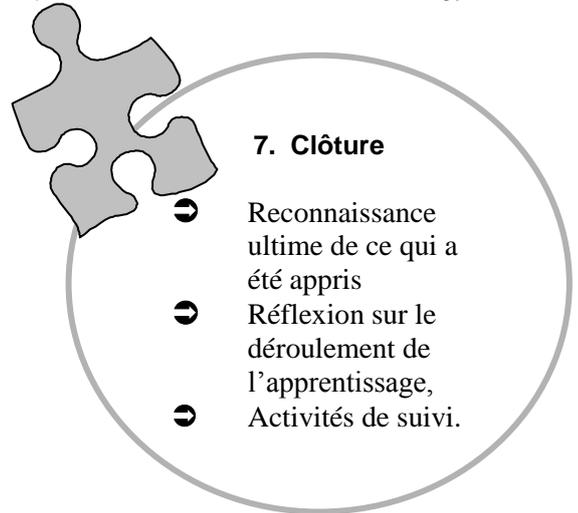
- *Les afficher stratégiquement (en face ou sur les côtés de la salle selon l'importance du message).*
- *Les afficher près des participants car ils doivent pouvoir être lus sans effort depuis leur place assise.*

8.4.7 Clôture de l'apprentissage

C'est la dernière pièce du puzzle de la formation. Il est souhaitable de bien terminer un cours, une simple journée, aussi bien qu'une formation complète.

Activités pour reconnaître le travail accompli

Les activités de clôture permettent de reconnaître que tous ont bien travaillé, bien appris et bien vécu ensemble. Il faut imaginer et créer des activités plaisantes et enrichissantes pour terminer sur une note positive. Voici quelques idées :



En fin de journée	<ul style="list-style-type: none"> - Compléter le tableau des attentes des participants (en pourcentage). - Discuter brièvement des aspects non-techniques de la formation (ex : le courant passe-t-il ? l'ambiance générale ? les améliorations à apporter ?). - Ranger la salle tous ensemble. - Prendre un repas ensemble ou une boisson.
--------------------------	--

En fin de formation Célébration !	<ul style="list-style-type: none"> - Retour d'information des participants sur le déroulement de la formation (aspects techniques ou non-techniques), sous forme de discussions ou/et sous forme de questionnaire. - Rédiger la charte du parfait technico-commercial solaire de terrain - Discussion sur l'après-formation avec les participants. - Rangement de la salle et des équipements, - Revoir des photos ou des séquences vidéo illustrant les temps forts ou des situations humoristiques (prises pendant la formation), - Fêter le travail bien fait : repas de fête, cadeaux, certificats. - Prendre une photo de groupe.
--	---

L'après-formation

Il s'agit pour le ou les formateurs :

- D'analyser les résultats des évaluations de compétences,
- D'analyser les résultats de l'évaluation de la formation et des formateurs par les participants (en tirer les leçons pour les formations suivantes).
- De rendre compte aux responsables du déroulement de la formation,
- De proposer des recommandations sur la suite à donner à la formation (ex : formation continue, nouvelle formation à programmer, suivi des techniciens formés sur le terrain).

8.5 Conseils pour l'utilisation optimale des vidéos de formation

L'usage des vidéos de formation est simple et se montre très efficace¹¹, à condition de suivre les quelques conseils suivants :

☞ Visionner les vidéos plusieurs fois, avant la formation.

Quand visionner une vidéo ?

☞ Visionner une **vidéo** dans les cas suivants :

- ▶ Comme introduction à une matière.
- ▶ Pour illustrer les procédures pratiques d'installation.
- ▶ Pour détendre l'atmosphère (changement de sujet après un peu 'trop' de théorie).

☞ Visionner une vidéo avant une pause, ou pour faire une pause. Ne jamais visionner une **vidéo**, après un repas, l'effet pourrait être soporifique.

☞ Ne pas hésiter à regarder une **vidéo**, plusieurs fois à quelques heures ou jours d'intervalles, sans toutefois lasser les participants.

Comment visionner une vidéo ?

☞ Rassembler les participants autour du téléviseur ; Constituer un groupe soudé devant la TV (comme pour regarder un match de football : transformer ce temps ensemble en moment de plaisir !)

☞ Visionner une **vidéo**, avec et sans volume. Questionner les participants sur ce qu'ils comprennent ou ne comprennent pas. Demander à un participant de faire la voix-off.

☞ Fractionner la projection d'une vidéo (en respectant les séquences, plutôt que de laisser 'dérouler' la bande.

☞ Utiliser la télécommande du magnétoscope ('Pause' / 'Ralenti'), plutôt que les boutons en façade de l'appareil.

Dans le cas où une caméra (caméscope) est disponible pendant la formation :

☞ Filmer les exercices pratiques et le cas échéant les visites sur le terrain. Au cours de la formation, repasser les scènes les plus intéressantes et faire réagir les participants en proposant des jeux : 'Chercher l'erreur', 'Question pour un Champion solaire'.

¹¹ Les vidéos de formation ont été utilisées avec succès pendant plusieurs formations de techniciens en Ouganda, Mali, Madagascar, Sénégal et République démocratique du Congo.

8.6 Fiche attente des participants et Fiche d'évaluation d'une formation

A l'attention des participants : **Fiches de vos attentes**

1. *Présentation du participant*

Nom : _____
 Prénom : _____
 Age : _____
 Diplôme : _____
 Spécialité : _____
 Fonction : _____
 Organisation : _____
 Adresse complète : _____

Nombre total d'installations à dimensionner / installer / maintenir ou réparer :	Années d'expériences en installation / maintenance et réparation :
Types d'installation à dimensionner / installer / maintenir ou réparer :	

3. *Quels sont vos besoins essentiels ? (cochez dans les cases)*

	<i>Théorie</i>	<i>Pratique</i>
<i>Dimensionnement des systèmes</i>		
<i>Installation des systèmes</i>		
<i>Maintenance des systèmes</i>		
<i>Réparation des systèmes</i>		

3. *Qu'attendez-vous de cette formation ?*

4. *Sur quels points pensez-vous que le(s) formateur(s) doivent particulièrement porter leur attention ?*

5. *Quel est votre état d'esprit avant cette formation ?*

(Entourer les adjectifs qui vous correspondent)

Curieux	Intrigué	Content	Expectatif	Sceptique	Indifférent
Ravi	Soulagé	Confiant	Optimiste	Serein	Enthousiaste
Inquiet	Effrayé	Accablé	Découragé	Agacé	Enervé
Furieux					

A l'attention des participants : **Questionnaire de Fin de Formation**

Votre Nom : _____ (facultatif) date : _____

1. *Votre première impression sur cette formation*

Notez de 1 (médiocre) à 10 (excellent)

• Clarté de la formation	
• Efficacité de l'apprentissage	
• Facilité d'apprentissage	
• Atmosphère de la formation	

2. *Entourez votre sentiment général (trois maximum) à la fin de cette formation*

Content – soulagé – enchanté – serein – découragé – fatigué – harassé – enthousiaste – heureux – léger – satisfait – amusé – sceptique – confus – inquiet – assuré – confiant – encouragé – stimulé – agacé – furieux – frustré

3. *Ecrivez ce que vous avez le plus apprécié, ou ce qui vous a semblé particulièrement intéressant*

4. *Ecrivez ce que vous avez le moins apprécié, ou ce qui vous a semblé avoir peu d'intérêt*

5. *Est-ce que le temps prévu pour cette formation vous a semblé :*

• largement suffisant ?	
• tout juste suffisant ?	
• à peine suffisant ?	
• insuffisant ?	

6. *Essayez de résumer en une phrase votre impression générale de la formation ?*

7. Remarques particulières

- Sur la pédagogie employée (déroulement de la journée, horaires de formation, théorie en alternance avec pratique, etc.)

- Sur l'organisation matérielle

- Sur le ou les formateurs

- Autres remarques

8. Vos suggestions pour des formations futures

Merci pour vos réponses.

9 Estimation du matériel nécessaire pour conduire une formation

9.1 Introduction

Afin de faciliter la préparation d'une session de formation comprenant les 12 modules du Manuel à l'usage de Formateurs 'Systèmes solaires domestiques' (version janvier 2006), la liste de matériel nécessaire est disponible au début de chaque module. Cependant, il s'est avéré qu'il était pratique d'avoir une liste globale pour l'ensemble des modules : une check-list. Ceci pour permettre une préparation d'ensemble plus rapide. En outre, il est pratique d'avoir également cette liste catégorisée ainsi :

1. instruments de mesures et outillage,
2. matériel spécifique solaire (ex : module photovoltaïque, régulateur, etc.),
3. matériel électrique non spécifique au solaire (ex : interrupteurs, câbles, etc.),
4. matériel didactique (ex : tableau, craie, matériel de projection, etc.)

Finalement, le matériel est listé avec des quantités minimum exprimées ainsi :

1/s	→	quantité par session : 1 équipement par session avec 10 à 15 élèves
1/e	→	quantité par élève : 1 équipement par élève
1/2e	→	quantité par élève : 1 équipement pour 2 élèves
1/3e	→	quantité par élève : 1 équipement pour 3 élèves

Cette présentation permet d'estimer les quantités de matériel nécessaire selon le nombre d'élèves par session (session avec un minimum de 5 et un maximum de 15 élèves). Bien entendu, les quantités indiquées ne sont pas des valeurs absolues ; elles peuvent être adaptées au cas par cas.

9.2 Instruments de mesures / outillage

Module	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Outillage d'électricien *	1/2e		1/2e								
Multimètre CA-CC -10 A	1/2e		1/2e								
Multimètre CA 20 A	2/s		2/s								
Pince ampèremétrique CA-CC 40 A	1/s		1/s								
Niveau à bulle				1/3e		1/3e			1/3e	1/3e	
Boussole				1/3e					1/3e	1/3e	
Inclinomètre à bulle				1/s					1/s	1/s	
Densimètre						1/3e			1/3e	1/3e	
Cellule PV de référence**			1/s	1/s					1/s	1/s	
Entonnoir						1/3e			1/3e	1/3e	

Exemple d'application	
Session avec 12 participants	commentaires
6	
6	
2	
1	
4	
4	
1	
4	
1	
4	

- * Outillage d'électricien comprenant au minimum : 1 pince à dénuder, 1 pince coupante, 1 pince multiprise, 2 tournevis plats, 2 tournevis cruciformes, 1 double mètre à ruban, 1 petit marteau)
- * le multimètre CC / CA 10 A : multimètre à affichage digital (budget 10 à 20 €) pour toutes les mesures en CC.
- * le multimètre CC / CA 20 A : multimètre à affichage digital (budget 50 à 100 €) pour des mesures en tension et courant précises en CA.
- ** Ou bien petit module de 5 à 10 Wc.

9.3 Matériel solaire et matériel 12 V

Module	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<u>Générateur PV</u>											
Module 10 ou 20 Wc mono / polycristallin -12 V			1/s	1/s					1/s	1/s	
Module 12 Wc Si-a		1/s	1/s	2/s					1/s	1/s	
Module 19 Wc Si-tandem		1/s	1/s	2/s	2/s				2/s	2/s	
Module 40 à 60 Wc Si poly -12 V	1/s	1/s	1/s	1/2e	2/s				1/2e	1/2e	
Module 40 à 60 Wc Si Mono – 12V	1/s	1/s	1/s	1/2e					1/2e	1/2e	
Régulateur 5 A		1/s			1/s				1/3e	1/3e	
Régulateur 10 A		1/s			1/s				1/3e	1/3e	
Régulateur 20 A		1/s			1/s				1/3e	1/3e	
2 Batteries 4 Ah 6 V ou 1 batterie 7 Ah 12 V	1/3e				1/3e	1/3e	1/3e			1/3e	
Batterie 12 V 50 à 100 Ah (bon état)	1/s	1/s			2/s	1/s	1/s		1/3e	1/3e	
Batterie 12 V 50 à 100 Ah mauvais état						2/s			2/s	2/s	
<u>Récepteurs</u>											
Ampoule de 3 W à 10 W 12 V	1/2e		1/s		2/s			1/e	1/e	1/e	
Ampoule de 20 W à 50 W 12 V	1/2e		1/s		2/s			1/e	1/e	1/e	
Réglette ou CFL 8 W / 12 V	1/2e	1/s	1/3e		2/s	1/3 e		1/e	1/e	1/e	
Réglette ou CFL 13 ou 20 W / 12 V	1/2e	1/s	1/3e		2/s	1/3 e		1/e	1/e	1/e	

Exemple d'application	
Session avec 12 participants	Commentaires
1	
2	
2	
6	
6	
4	
4	
4	
4	
4	
2	
12	
12	
12	
12	

Module	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ampoule 100 W - 230 V	1/s		2/s				2/s				
Lampe LED 12 V	1/s	1/s	1/s				1/s	1/s	1/s	1/s	
TV N&B 12 V -15 à 25 W	1/s	1/s	1/s				1/s	1/s	1/s	1/s	
TV couleur 12 et 230 V, 35 à 60 W	1/s	1/s	1/s				1/s	1/s	1/s	1/s	
Radiocassette 12 V (et 230 V)	1/s	1/s	1/s					1/s	1/s	1/s	
Petite radio 3, 6 ou 9 V	1/s	1/s	1/s					1/s	1/s	1/s	
Autre récepteur 12 V			1/s					1/s	1/s	1/s	
Ventilateur 12 V					1/s				1/s	1/s	
Tube fluorescent endommagé		1/s									
Onduleur 100 à 300 W / 12 V signaux carrés		1/s					1/s		1/s	1/s	
Onduleur 100 à 300 W / 12 V sinusoïdal		1/s					1/s		1/s	1/s	
Convertisseur CC – CC		1/s					1/s		2/s	2/s	
Torche (2 piles)	1/s										

Exemple d'application	
Session avec 12 participants	Commentaires
2	
1	
1	
1	
1	
1	
1	
1	
1	
1	
2	
1	

9.4 Matériel électrique standard

Ce matériel est généralement disponible dans les établissements de formation technique. Ce matériel doit être disponible tout au long de la formation.

Module	Quantité minimum	Commentaires
Câble rigide ou souple 2 x 1,5 mm ²	10 m / 2e	(consommables)
Câble rigide ou souple 2 x 2,5mm ²	25 m / 2e	(consommables)
Câble rigide ou souple 2 x 4 mm ²	20 m / s	(consommables)
Câble rigide ou souple 2 x 6 mm ²	10 m / s	(consommables)
Porte fusible avec fusible 5 A	1 / 3e	
Porte fusible avec fusible 10 A	1 / 3e	
Disjoncteur 10 à 16 A	1 / 2e	
Interrupteurs (apparent)	5 / 2e	
Prise (apparent)	1 / 2e	
Boîte de dérivation	1 / e	
Barrette (bornier de raccordement)	5 / 2e	(type dominos, plusieurs tailles)
Ruban isolant	2 / s	(consommables)
Attaches câbles	200 / s	
Lots de visserie /clous	1 / s	(consommables)

Exemple d'application	
Session avec 12 participants	Commentaires
60m	
150m	
20m	
10m	
4	
4	
6	
30	
6	
12	
30	
2	
200	
1	

9.5 Matériel didactique

Description	Qté minimum	Commentaires
<u>Documents</u>		
Manuel à l'usage du Formateur ' Systèmes solaires domestiques'	1	(1 par facilitateur)
Guide Pratique du Photovoltaïque, à l'usage des techniciennes et techniciens, Dimensionnement, Installation et Maintenance (version septembre 2005)	1/e	
Vidéo 'Utilisation et entretien des petits systèmes solaires'	1/s	
Vidéo 'Installation des petits systèmes solaires'	1/s	
Tout autres vidéos disponibles (ex : vidéo ADEME)*	1/s	
<u>Matériel de bureau</u>		
Punaises (1 boîte)	1/s	
Rouleau de scotch (bande large)	2/s	
Feutre de couleur (lot de 4 couleurs)	4/s	
Papier pour poster / flipchart (blanc ou couleur)	50/s	
Craie blanche (boîte de 50)	1/s	
Craie couleur assortie (boîte de 50)	1/s	
TV couleur 230 V ou 12 V, 40 cm de diagonale	1/s	
Magnétoscope et télécommande et câbles audio-vidéo	1/s	
Vidéoprojecteur	1/s	(si possible)
Rallonge électrique avec multiprise	2/s	
Cahier ou bloc-notes quadrillé 5 x 5	1/e	
Bic	1/e	
Crayon papier	1/e	
Calculatrice (solaire de préférence)	1/e	

*ADEME : Agence Française de l'environnement et de la Maîtrise de l'énergie.

Exemple d'application	
Session avec 12 participants	Commentaires
1 ou ...	(dépend du nombre d'animateurs)
12	
1	
1	
1	
1	
2	
4	
50	
1	
1	
1	
1	
1	
12	
12	
12	
12	

MODULE 2 : Unités de mesure et formules de base en électricité et énergie

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE MOYENNE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	Qu'est-ce que l'Energie ?	3
4.2	Différentes formes d'Energie	4
4.2.1	Énergie potentielle.....	4
4.2.2	Énergie calorifique.....	4
4.2.3	Énergie chimique.....	4
4.2.4	Énergie solaire	4
4.2.5	Énergie électrique.....	4
4.3	Conversion d'Energie : notion de rendement	5
4.3.1	La loi sur la quantité	5
4.3.2	La loi sur la qualité	5
4.3.3	Rendement énergétique.....	6
4.3.4	Unité pour l'Energie : (Wh).....	6
4.4	Qu'est-ce que la Puissance ?	7
4.4.1	Unité de Puissance : W.....	7
4.5	Relations entre Puissance et Energie	7
4.6	Notions de base d'électricité	8
4.6.1	Type de courant : CA et CC.....	8
4.6.2	Tension (U).....	9
4.6.3	Intensité (I)	9
4.6.4	Relations entre la Tension et le Courant : $Puissance = U \times I$ en CC	10
4.6.5	Relations entre la Tension et le Courant : $Puissance = U \times I$ en CA	11
4.6.6	Relation entre la Tension et le Courant : $U = R \times I$	12
4.6.7	Capacité électrique d'une batterie et énergie stockée : $E = C \times U$	13
4.6.8	Diverses combinaisons de formules avec des exemples.....	13
4.7	Unités utilisées spécifiquement pour l'énergie solaire	15
4.8	Schémas électriques	16
4.8.1	Symboles et grandeurs francophones et anglophones	16
5	TOPOGRAMME	17
6	ÉVALUATION ET FEED-BACK	18

1 Objectifs

Ce module a pour objectifs de présenter :

- Les concepts et les principales lois fondamentales concernant l'énergie.
- Les concepts liés à l'électricité (tension, courant, courant continu et alternatif).
- Le concept de la résistance électrique (chutes de tension dans les câbles).
- Les unités de mesures pour l'énergie, la puissance, la tension, le courant et la capacité d'une batterie.
- Les représentations standard des composants électriques (c.-à-d. schémas).
- Les circuits électriques simples.
- L'utilisation des multimètres sur des circuits électriques simples (mesures de tension, intensité et continuité).

2 Durée moyenne du module

10 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Lampe torche complète avec piles	1
Lampe fluorescente de 8 W – 12 V CC	1
Lampe fluorescente de 13 W – 12V CC	1
Ampoule incandescente de 3 W – 12 V CC	1
Ampoule de 50 ou de 60 W - 12 V CC (ampoule de voiture)	1
Ampoule incandescente 20 à 100 W en 230 V CA	
Pile (1,5 V, taille AA)	1
Pile (1,5 V, taille C)	1
Petite batterie 6 Ah - 6 V ou 4 Ah - 6 V	2
Batterie de 12 V avec fusible	1
Panneau solaire 11 Wc	1
Panneau solaire 20 Wc	1
Panneau solaire 32 Wc	1
Panneau solaire 50 Wc	1
Multimètre CA/CC	2
Petits câbles avec des pinces 'crocodile'	10
Câble 2 x 2,5 mm ²	2 x 25 m
Câble 2 x 0,75 mm ²	2 x 25 m

4 Contenu

4.1 Qu'est-ce que l'Energie ?

Exercice : Qu'est-ce que l'énergie ?

On peut s'attendre aux réponses suivantes :

- L'énergie, c'est du charbon de bois, du pétrole.
- Il faut de l'énergie pour labourer un champ ou pour jouer au football.
- On obtient de l'énergie en mangeant.
- Chacun a besoin d'énergie pour vivre.
- L'énergie nous maintient chaud, en vie.
- L'électricité, c'est de l'énergie.
- Une personne malade n'a plus d'énergie
- Un cheval a plus d'énergie qu'une personne
- Etc.

Essayer de trouver un point commun à ces commentaires afin de mieux préciser ce qu'est l'énergie.

Le problème est qu'on ne peut pas *voir* l'énergie. Par contre, on peut voir des personnes ou des animaux qui sont capables de libérer de l'énergie. On peut voir des événements se produire grâce à l'énergie (ex : les plantes qui poussent grâce au soleil, les vêtements qui sèchent au soleil), mais on ne peut pas voir l'énergie, elle-même.

L'énergie modifie l'état des choses.

Voici quelques exemples de changements, provoqués par l'énergie :

- Un colis que l'on soulève,
- Une personne qui transporte de l'eau,
- Un feu, qui cuit les aliments
- Une ampoule ou une bougie éclairant une salle.

Chacun de ces événements est causé par une certaine consommation d'énergie. Ces événements sont différents les uns des autres, simplement parce qu'il existe plusieurs formes d'énergie.

Définition du dictionnaire : ***Energie***

Faculté que possède un système pour fournir du travail mécanique ou son équivalent (par exemple : fournir de la lumière, de la chaleur).

4.2 Différentes formes d'Énergie

4.2.1 Énergie potentielle

Une masse placée plus haute que le sol est chargée d'*énergie*. Un ressort comprimé a de l'*énergie*. Cette *énergie potentielle* est *stockée*, dans l'attente d'être libérée. En effet, si on fait tomber la masse sur le sol, un changement intervient, la masse prend de la vitesse et heurte violemment le sol. Si le ressort comprimé est relâché subitement, il se détend brutalement (libérant son énergie).

4.2.2 Énergie calorifique

L'énergie calorifique est l'énergie contenue, par exemple, dans une bouilloire d'eau chaude. Plus l'eau est chaude, plus elle contient d'énergie. On verra par la suite que toutes les formes d'énergie finissent par être transformées en chaleur, à des températures de plus en plus basses, et donc, de moins en moins utiles. On dit que la chaleur est une forme dégradée de l'énergie.

4.2.3 Énergie chimique

L'énergie chimique, c'est l'énergie stockée dans les carburants, tels que le pétrole, le gaz ou encore dans le bois. L'énergie stockée dans une batterie de voiture ou dans une pile neuve est de l'énergie chimique. Cette énergie permet d'allumer une ampoule, par exemple.

4.2.4 Énergie solaire

Les rayons du soleil sont chargés d'énergie en provenance du soleil. Ils provoquent donc de multiples changements ou événements quotidiens : ils nous réchauffent, ils éclairent la surface de la terre, ils font pousser les récoltes et les sèchent ensuite. Sans soleil, il n'y aurait aucune vie sur terre : il ferait trop froid, il n'y aurait quasiment aucune végétation.

La plupart de nos ressources énergétiques actuelles viennent du soleil. En effet, les combustibles fossiles (c.-à-d. charbon, pétrole) ne sont que des arbres ou animaux, vieux de plusieurs millions d'années (qui ont vécu grâce à la lumière du soleil), et qui ont été décomposés, puis comprimés sous terre pour devenir du combustible. L'énergie du vent et des barrages hydrauliques est aussi la conséquence d'événements causés par l'énergie du soleil (évaporation des mers). Le bois, énergie utilisée pour la cuisson ou le chauffage, vient des arbres, qui ne peuvent se développer qu'avec la lumière du soleil.

L'énergie solaire se propage par des ondes : ondes lumineuses, ondes infrarouges et ondes ultra-violettes. On peut comparer les ondes lumineuses avec les ondes (vagues) des océans, qui peuvent faire chavirer les navires, avec leur énergie, dévastatrice lors des tempêtes. Une autre théorie a été développée pour expliquer les phénomènes liés à cette énergie, c'est la théorie des particules d'énergie. L'énergie solaire est constituée de particules d'énergie en provenance directe du soleil : les *photons*, d'où l'énergie *photovoltaïque*.

4.2.5 Énergie électrique

L'électricité transporte de l'énergie d'un endroit vers un autre, par exemple, depuis une centrale électrique vers une petite ville et puis vers les consommateurs. Cette énergie sert à allumer des ampoules, alimenter des radios ou des téléviseurs.

4.3 Conversion d'Énergie : notion de rendement

L'énergie peut passer d'une forme à une autre. A chaque transformation, on dit communément, que l'énergie est *utilisée*.

Exemple d'une lampe-torche quand l'interrupteur est en position *allumé*

énergie chimique (pile)	>>>	énergie électrique (l'électricité dans l'ampoule)	>>>	énergie lumineuse et chaleur (l'ampoule éclaire et est chaude)
-----------------------------------	-----	--	-----	---

La manière dont l'énergie change d'une forme à une autre, est gouvernée par quelques principes scientifiques fondamentaux, qui concernent la *quantité* et la *qualité* :

'Rien ne se perd, tout se transforme'

4.3.1 La loi sur la quantité

Chaque fois que l'énergie d'un système est convertie d'une forme vers une autre, la quantité d'énergie reste constante.

En d'autres termes, l'énergie n'est jamais détruite, mais toujours transformée. Cela semble fantastique, puisque le monde ne manquerait jamais d'énergie. Adieu les crises énergétiques ! C'est là où une deuxième loi entre en ligne de compte...*la loi sur la qualité*.

4.3.2 La loi sur la qualité

La quantité d'énergie demeure toujours la même, mais sa qualité se détériore, à chaque transformation.

A chaque conversion d'énergie, de la chaleur est produite. C'est souvent en énergie calorifique basse température, qu'il est difficile à transformer en énergie utile. Voici quelques exemples :

- De l'énergie chimique (essence) est consommée pour propulser une voiture. Une partie de cette énergie chimique finit dans l'atmosphère : chaleur des gaz d'échappement et chaleur évacuée par le radiateur. Le chauffeur, qui désire uniquement se déplacer, n'a pas besoin de la chaleur produite par le moteur. Cette énergie calorifique est inutile et inévitable, car la conversion d'une forme d'énergie vers une autre n'est pas efficace à 100 %.
- Une pile convertit de l'énergie chimique en énergie électrique pour allumer une ampoule. Cette énergie est transformée en lumière et en chaleur, qui, ensemble, chauffent l'air autour de la torche. L'énergie est finalement dissipée sous forme de chaleur.

Exercice :

Allumer une lampe torche et enlever le verre protecteur. Laisser les étudiants, toucher la chaleur générée par l'ampoule. Les aider à conclure que l'énergie chimique a été convertie en énergie lumineuse et en énergie calorifique.

4.3.3 Rendement énergétique

Voici, la formule du *rendement énergétique* :

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{\text{Energie Sortie}}{\text{Energie Entrée}}$$

Le rendement énergétique est toujours inférieur à 1 (inférieur à 100%).

Exemples de valeur de rendement énergétique :

- Energie stockée dans le bois / Energie solaire tombant sur les feuilles = 1 à 4 %,
- Energie produite par une cellule solaire / Energie solaire reçue sur la cellule = 5 à 25 %,
- Energie mécanique fournie par un moteur de voiture / Energie chimique contenue dans le carburant = 20 à 30 %.
- Energie électrique stockée dans une batterie / Energie électrique nécessaire pour charger la batterie = 75 à 90 %.

Un jour ensoleillé, mettre un module de 40 à 50 Wc au soleil, et le relier directement à une ampoule incandescente de voiture (par exemple une ampoule de clignotant, de 3 à 5 W (Ne pas choisir une réglette fluorescente). Ne connecter ni régulateur, ni batterie.

L'ampoule s'allumera (mettre l'ampoule à l'ombre du module pour bien visualiser qu'elle s'éclaire).

Attendre environ 15 à 30 minutes d'exposition au soleil. Faire toucher la surface du module par les étudiants. Le module doit être très chaud.

Expliquer alors que, tandis que le module convertit une partie de l'énergie solaire en électricité (l'ampoule est allumée), il convertit également une autre partie de l'énergie solaire, en énergie calorifique (car le module est très chaud).

4.3.4 Unité pour l'Energie : (Wh)

L'énergie est mesurée en *Joule*¹ dans le système international d'unité. Cependant, cette unité est peu utilisée par l'industrie électrique. Le Joule est remplacé par le **Watt-heure (Wh)**.

Le Wattheure est l'énergie consommée par un appareil de 1 W pendant 1 heure.

Exemples :

- L'unité communément reconnue de l'électricité est le kilowatt-heure (1 kilowatt x 1 heure = 1 kWh = 1000 Wh).
- Un litre de pétrole contient approximativement 11 kWh (c.-à-d. 11 000 Wh)!
- Une batterie de 100 Ah C₁₀₀ en 12 V contient 1,2 kWh maximum (100 Ah x 12 V = 1200 Wh = 1,2 kWh).

¹ Un joule, c'est l'unité d'énergie correspondant au travail d'une force d'un Newton se déplaçant sur un mètre (1 Joule = 1 W x 1 seconde ; 1 Wh = 3600 J).

4.4 Qu'est-ce que la Puissance ?

La puissance décrit à quel *rythme*, quelle *vitesse*, quelle *force*, une conversion énergétique s'opère. La transformation peut être rapide ou lente, elle fera intervenir la même quantité d'énergie, mais la puissance en jeu sera différente. Illustration :

- Si l'on considère deux hommes, ayant à couper chacun une planche de bois identique. Si l'un effectue le travail en cinq minutes et l'autre en 30 minutes, on dira que le premier est plus fort, plus *puissant* que l'autre. Cependant, ils ont fait le même travail (même quantité d'énergie) : scier une planche de bois.
- Un jour ensoleillé, des vêtements fraîchement lavés sécheront plus rapidement qu'un jour nuageux (c.-à-d. 2 heures au lieu de toute une journée). Le soleil a plus de *puissance*, lorsqu'il n'y a pas de nuages.

4.4.1 Unité de Puissance : W

La puissance est mesurée en **Watt** ou **kWatt (1 kilowatt = 1000 W)**.

Exemples : Une ampoule de 20 W est plus puissante qu'une ampoule de 3 W.
Un générateur diesel de 3 kilowatts (c.-à-d. 3000 W) est plus puissant qu'un générateur de 650 W.

4.5 Relations entre Puissance et Energie

La Puissance et l'Energie sont reliées par le facteur *Temps* :

$$\text{Energie} = \text{Puissance} \times \text{Temps} \quad \rightarrow \quad \mathbf{E = P \times Temps} \quad (\text{Wh}) = (\text{W}) \times (\text{h})$$

- Dans l'exemple préalable, chacun des deux hommes a scié sa planche dans des délais différents, mais la quantité d'énergie consommée est identique.

$$\mathbf{\acute{E}nergie} = \text{Puissance importante} \times \text{Temps court} = \text{Puissance faible} \times \text{Temps long}$$

- Le même raisonnement est valable pour le séchage des vêtements au soleil.

$$\mathbf{\acute{E}nergie} = \text{Puissance solaire importante} \times \text{Temps court} = \text{Puissance solaire faible} \times \text{temps long}$$

- Si une TV de 40 W est allumée pendant 1 heure, consommera-t-elle la même quantité d'énergie qu'une lampe fluorescente de 8 W allumée pendant 5 heures ?

$$\mathbf{\acute{E}nergie} = 40 \text{ W} \times 1 \text{ heure} = 8 \text{ W} \times 5 \text{ heures} = 40 \text{ Wh} \rightarrow \text{Oui !}$$

Exercice :
Calcul de divers besoins énergétiques en multipliant la puissance de divers appareils par leur période d'utilisation.

4.6 Notions de base d'électricité

Exercice : lecture de plaques signalétiques
 - sur une lampe (ampoule de voiture, tube fluorescent),
 - au dos d'une radio,
 - sur un générateur / groupe électrogène,
 - sur un module solaire (au dos du module).

Réponse : on doit pouvoir lire des valeurs de : Puissance, Tension de fonctionnement, Type de courant, et dans certains cas, l'intensité consommée, la fréquence, etc... Noter les résultats dans un tableau comme ci-dessous :

L'exercice ci-dessus permet de déduire ce qui caractérise généralement un composant électrique :

Information disponible sur un appareil électrique	Abréviations	Unités
• La <i>puissance</i> (consommée si c'est un récepteur) ou (produite si c'est un générateur) en Watt	P	(W)
• La <i>tension d'utilisation</i> en Volts	U	(V)
• Le <i>courant</i> (consommé si c'est un récepteur) ou (produit si c'est un générateur) en Ampères	I	(A)
• Le <i>type de courant</i> (CA : courant alternatif ou CC : courant continu)	CA/CC	-
• La <i>fréquence</i> en Hertz (seulement pour les appareils en CA)	f	(Hz)

4.6.1 Type de courant : CA et CC²

Il y a deux principaux types de courants électriques :

- Courant alternatif (CA) : Il est produit par les alternateurs dans les centrales de production d'électricité, par les groupes électrogènes, par les turbines hydrauliques, ou par un onduleur dans un système solaire. Le courant produit par le réseau ou par un onduleur est donc du courant CA. Le CA fluctue de manière cyclique selon sa fréquence en Hertz (par exemple : le courant du réseau 50 Hz est égal à zéro 100 fois par seconde. Les fluctuations sont si rapides que le courant apparaît constant, toutefois il varie de manière sinusoïdale.
- Courant continu (CC) : Il est produit par les piles jetables ou rechargeables, par les batteries et par les modules solaires. Le courant et la tension ne varient pas. Ils sont constants ou continus.

² CA (Courant Alternatif) en français et AC en anglais (alternative current) – CC (Courant Continu) en français et DC en anglais (Direct current)

4.6.2 Tension (U)

La *tension*, notée **U**, est la différence de potentiel électrique entre deux points d'un circuit. On peut dire qu'il s'agit de la *pression*, qui pousse ou force l'électricité dans un circuit.

La tension est mesurée en **Volts (V)**. Cette unité permet de mesurer la force électromotrice (d'un panneau solaire) ou la différence de potentiel (sur un récepteur).

Elle est toujours mesurée en plaçant les cordons de mesures du multimètre entre deux points (il n'y a aucun besoin d'ouvrir un circuit). Le multimètre est placé en *parallèle* sur le circuit.

Aux bornes d'un générateur d'électricité (une batterie, un groupe électrogène, un panneau solaire), la mesure de la tension indique le niveau de 'pression' électrique disponible pour faire fonctionner des appareils.

Exercice :

Mesures de tension (circuit ouvert) aux bornes d'une pile, d'une petite batterie (bonne et mauvaise) et de plusieurs petits modules solaires (à l'aide d'un multimètre).

Expliquer l'utilisation du multimètre : toujours placé en parallèle pour mesurer la tension.
Demander aux étudiants de dessiner les divers circuits de mesure au tableau.

Aux bornes d'un récepteur électrique (une lampe, un moteur, une radio), la mesure de la tension indique si l'appareil reçoit de l'électricité et quelle est la tension d'alimentation de l'appareil.

Exercice :

Réalisation et dessin schématique des circuits électriques simples (batterie/pile, câbles et lampes) avec mesures de la tension aux bornes des batteries/piles et de lampes de différentes puissances. (Insérer un fusible de protection dans le circuit).

Insister, au niveau du multimètre :

1. sur le choix du type de tension à mesurer (CC ou CA)
2. sur le choix du calibre de mesure
3. sur l'emplacement des cordons de mesures (sur le multimètre et sur le circuit),
4. sur l'importance de la prise de notes des valeurs mesurées.

4.6.3 Intensité (I)

L'*intensité*, notée **I**, d'un courant est la mesure du *flux*, du *débit*, d'électricité circulant dans un circuit. Elle indique combien d'électricité est consommée par un récepteur, ou est produite par un générateur, au moment de la mesure.

L'*intensité* du courant électrique est mesurée en **Ampère (A)**, à l'aide d'un multimètre.

Sa mesure nécessite que l'on ouvre le circuit électrique pour y insérer le multimètre à l'endroit où l'on désire mesurer l'intensité du courant électrique. Les cordons de mesures et

le multimètre sont alors traversés par le courant électrique à mesurer. On dit que le multimètre est placé en *série*³.

Exercice :

- Réalisation d'un circuit simple (batterie 12 V, fusible, fils, un interrupteur et une lampe)
- Insertion d'un multimètre (en position ampèremètre) en débranchant les fils appropriés.
- Mesure de l'intensité consommée par les récepteurs
Insister sur l'emplacement du multimètre (et sur le choix du calibre)
- Dessin des divers circuits électriques (au tableau ou sur bloc-notes) – Apprentissage de la prise de notes et utilisation des tableaux de résultats.

Insister, au niveau du multimètre :

1. sur le choix du type d'intensité à mesurer (CC ou CA)
2. sur le choix du calibre de mesure
3. sur l'emplacement des cordons de mesures (sur le multimètre et sur le circuit),
4. sur l'importance de la prise de notes des valeurs mesurées.

4.6.4 Relations entre la Tension et le Courant : Puissance = U x I en CC

$$\text{Puissance (P)} = \text{Tension} \times \text{Intensité} \rightarrow P = U \times I \quad (\text{W}) = (\text{V}) \times (\text{A})$$

Exercice :

La formule ci-dessus peut être vérifiée et validée par l'exercice suivant, avec les valeurs de tension et d'intensité, mesurées lors des exercices précédents :

Avec le tableau suivant, notez les valeurs de mesures qui ont été prises dans les exercices précédents.

Description des récepteurs	Tension mesurée (V)	Intensité mesurée (A)	U x I	Valeur nominale de puissance indiquée sur les récepteurs
Lampe numéro 1				
Lampe numéro 2				
Etc...				

Comparer les résultats des calculs (U x I), avec les valeurs de puissance indiquées par les fabricants sur les appareils.

Montrer que, si la puissance nominale d'un appareil n'est pas indiquée sur l'appareil, il est alors possible d'estimer sa puissance, en mesurant l'intensité et la tension à ses bornes.

Montrer que, si la puissance d'un appareil est connue, ainsi que sa tension, on peut alors calculer l'intensité consommée avec la formule : $P = U \times I$.

³ Il est possible de mesurer l'intensité sans couper le circuit, mais dans ce cas, il faut disposer d'une pince ampèremétrique (fonctionnant en CC et en CA).

4.6.5 Relations entre la Tension et le Courant : Puissance = U x I x cos φ en CA

Puissance (P) = Tension x Intensité x Facteur de puissance

$$\rightarrow P = U \times I \times \cos \varphi \quad (W) = (V) \times (A)$$

Le cos φ mesure le déphasage entre le courant et la tension. Le cos φ est sans unité.

Ce déphasage dépend uniquement du type de récepteurs à alimenter. Il n'y a pas de déphasage pour une résistance électrique (lampe incandescente : cos φ = 1). Par contre, un moteur en CA a besoin de puissance active (U x I x cos φ en Watt pour la puissance mécanique : rotation du moteur) et de puissance réactive (U x I x sin φ, en VAR pour la magnétisation des bobines). Dans ce cas, le cos φ est de l'ordre de 0,7.

Cos φ dépend du type de récepteurs :

Type de récepteurs	Valeur de Cos φ	Commentaires
Lampe incandescente	1	(ou une résistance électrique)
Lampe fluorescente CA avec ballast électromagnétique	0,5 à 0,8	avec starter et ballast/bobine
Lampe fluorescente CA avec ballast électromagnétique avec condensateur de compensation	0,8 à 0,9	avec starter, ballast/bobine et condensateur
Lampe fluorescente CA avec ballast électronique ou lampe fluo-compacte 'économique'	0,9 à 1	électronique remplaçant starter, ballast et condensateur et alimentant le tube en haute fréquence 25 à 60 kHz
Moteur électrique	0,5 à 0,8 (moy. 0.7)	Le facteur de puissance augmente avec la charge du moteur
Alimentation		

Pour fonctionner correctement, un appareil de 400 W avec un facteur de puissance de 0,8, nécessite une source de 500 VA ($U \times I = P / \cos \varphi = 400 / 0,8$). C'est la raison pour laquelle il vaut mieux choisir des récepteurs avec des cos φ voisins de 1, pour éviter d'installer par exemple des onduleurs de taille importante. D'autre part, lorsque le cos φ est faible, les courants deviennent plus importants, entraînant des chutes de tension importantes.

Exercice :

La formule ci-dessus peut être vérifiée et validée en mesurant courant et tension sur un circuit alimentant des récepteurs CA. Attention, il faut nécessairement des multimètres capables de mesurer des intensités et tensions CA.

Avec le tableau suivant, notez les valeurs de mesures et calculez la puissance.

Description des récepteurs	Tension mesurée (V) CA	Intensité mesurée (A) CA	$U \times I \times \cos \varphi$	Valeur nominale de puissance indiquée sur les récepteurs
Lampe incandescente				
Lampe fluo-compacte				
Petit moteur				

Comparer les résultats des calculs ($U \times I \times \cos \varphi$), avec les valeurs de puissance indiquées par les fabricants sur les appareils. Il aura été nécessaire d'estimer la valeur du cos φ.

4.6.6 Relation entre la Tension et le Courant : $U = R \times I$

Tension (U) = Résistance x Intensité $\rightarrow U = R \times I$ (V) = (ohm) x (A)

R est la résistance électrique. Elle est mesurée en ohm, notée (Ω). La résistance électrique mesure l'opposition que manifestent certaines matières au passage du courant électrique (ex. un fil de cuivre, dit matériau *conducteur*, est moins résistant au passage du courant que les matières plastiques, dites *isolantes*).

La résistance d'un câble peut être mesurée avec un multimètre, en position *ohmmètre*⁴.

Exercices :

- Réalisation d'un circuit électrique simple (batterie de voiture de 12 V, fusible, 20 mètres de câbles 2 x 2,5 mm², un interrupteur pour commander une ampoule de 50 W -12 V).
- Mesure de la résistance des composants suivants : interrupteur Ouvert, interrupteur Fermé, le câble de 20 mètres, l'ampoule, à l'aide d'un multimètre, en position ohmmètre.
- Lorsque l'ampoule est allumée, mesure de la tension aux bornes de l'interrupteur, aux bornes de l'ampoule, aux bornes des différentes sections de câbles et aux bornes de la batterie. Mesure de l'intensité consommée par la lampe.
- Evaluation de la luminosité de la lampe.
- Dessin du circuit électrique.

Insister sur l'utilisation correcte du multimètre pour les mesures de : tension, intensité et résistance. Obtenir un tableau de résultats, semblable à celui proposé ci-dessous.

Composants	Résistance (mesurée) (ohm)	Longueur du fil (m)	Intensité mesurée (A)	Tension mesurée (V)	Calcul de la chute de tension $U = R \times I$
Batterie					
Entre batterie et interrupteur		1m			
Interrupteur					
Entre interrupteur et lampe		20m			
Ampoule					
Fil entre ampoule et interrupteur		19m			

Exercice :

- Répétition de la même expérience, mais avec un câble de faible section : 2 x 0,75 mm² (ou même de section plus faible).
- Conclusion sur l'impact : du choix des sections de câble, des longueurs de câble
- Conclusion sur la difficulté de mesurer avec un ohmmètre (multimètre) les petites valeurs de résistance (par exemple, la résistance d'un câble de faible longueur).

⁴ La précision de la mesure sera très faible, sauf pour les grandes longueurs de câbles.

4.6.7 Capacité électrique d'une batterie et énergie stockée : $C = I \times t$ et $E = C \times U$

La capacité d'une batterie est la quantité d'électricité qu'elle peut stocker⁵.

$$\text{Capacité (C)} = \text{Intensité} \times \text{Temps} \rightarrow \mathbf{C = I \times Temps} \quad (\text{Ah}) = (\text{A}) \times (\text{h})$$

C'est l'intensité que peut délivrer une batterie pendant un certain temps.

Si on multiplie la *capacité* par la *tension*, on obtient des Wh qui est l'énergie stockée par la batterie :

$$\text{Energie (Wh)} = \text{Capacité} \times \text{Tension} \rightarrow \mathbf{E = C \times U} \quad (\text{Wh}) = (\text{Ah}) \times (\text{V})$$

$$\text{Energie (Wh)} = \text{Intensité} \times \text{Temps} \times \text{Tension} \rightarrow \mathbf{E = I \times Temps \times U} \quad (\text{Wh}) = (\text{A}) \times (\text{h}) \times (\text{V})$$

Exercice :

Quelle est l'énergie contenue dans une batterie de 75 Ah, 12 V lorsqu'elle est chargée à 100 % ?
Quelle est l'énergie stockée dans la même batterie, mais chargée à 50 % ?

Réponses :

$$E = C \times U = 75 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 900 \text{ Wh quand la batterie est chargée à 100 \% . ;}$$

$$E = C \times U = 75 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} \times 50 \% = 450 \text{ Wh lorsque la batterie est chargée à 50\% .}$$

4.6.8 Diverses combinaisons de formules avec des exemples

Exercice d'application des formules, comme dans le tableau ci-dessous, mais avec des valeurs de votre choix.

Formules	Exemples
$\mathbf{P = U \times I}$	La puissance d'une radio de 9 V, consommant un courant de 1,5 A est de : $\mathbf{P = 9 \text{ V} \times 1,5 \text{ A} = 13,5 \text{ W}}$
$\mathbf{E = P \times Temps}$	Si cette radio fonctionne pendant 6 heures, l'énergie consommée est de : $\mathbf{E = 13,5 \text{ W} \times 6 \text{ h} = 81 \text{ Wh}}$
$\mathbf{U = P / I}$	Une lampe de 8 W consommant un courant d'intensité de 0,666 A, fonctionne avec une tension $\mathbf{U = 8 \text{ W} / 0,666 \text{ A} = 12 \text{ V}}$
$\mathbf{P = E / Temps}$	Une lampe a consommé 16 Wh en 2 heures. Sa puissance est de $\mathbf{P = 16 \text{ Wh} / 2 \text{ h} = 8 \text{ W}}$

⁵ Attention, la capacité d'une batterie dépend de nombreux facteurs, en particulier, son régime de décharge (voir Module 7).

Formules	Exemples
$E = U \times I \times \text{Temps}$	Cette lampe a consommé : $E = 12 \text{ V} \times 0,666 \text{ A} \times 2 \text{ h} = 16 \text{ Wh}$.
$U = R \times I$	Un câble d'une résistance de 0,3 ohm traversé par un courant de 0,666 A causera une chute de tension de : $U = 0,3 \text{ ohm} \times 0,666 \text{ A} = 0,199 \text{ V}$.
$P = U \times I$	Ce câble dissipera une puissance calorifique : $P = 0,199 \text{ V} \times 0,666 \text{ A} = 0,13 \text{ W}$
$U = R \times I$	Un câble d'une résistance de 0,3 ohm traversé par un courant de 10 A aura une chute de tension de : $U = 0,3 \text{ ohm} \times 10 \text{ A} = 3 \text{ V}$.
$P = U \times I$	Ce câble dissipera une puissance calorifique de : $P = 3 \text{ V} \times 10 \text{ A} = 30 \text{ W}$ (cette puissance électrique est gaspillée !).
$E = U \times I \times \text{Temps}$	Si ce câble alimente une lampe de 12 V pendant 4 heures, ce câble consommera (dissipera) : $E = 12 \text{ V} \times 10 \text{ A} \times 4 \text{ h} = 480 \text{ Wh}$ (énergie gaspillée !).
$C = E / U$	Si une lampe en 12 V a consommé 16 Wh, elle a consommé : $C = 16 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 1,33 \text{ Ah}$.
$P_e = P_s / \eta$	Une TV de 50 W CA alimentée par un onduleur dont le rendement est de 75 %, nécessite : $P_e = 50 \text{ W} / 0,75 = 66,6 \text{ W (CC)}$. Les pertes d'énergie s'élèvent à $66,6 \text{ W} - 50 \text{ W} = 16,6 \text{ W}$.

4.7 Unités utilisées spécifiquement pour l'énergie solaire

Ces unités seront revues en détail plus tard, dans les autres modules, mais il est important de les mentionner à ce stade du cours :

- **Watt/m²** : cette unité mesure la *puissance instantanée* (le *rayonnement instantané* en provenance du soleil) reçue sur une surface d'un mètre carré.

La valeur maximum est 1000 W/m² sur une surface horizontale à midi par une journée ensoleillée. Si le temps est gris, nuageux, la puissance est inférieure à 1000 W/m².

- **kWh/m².jour** : cette unité mesure l'énergie qu'une surface au sol d'un mètre carré reçoit du soleil pendant une journée. C'est l'*ensoleillement* ou le *rayonnement au cours d'une journée* : l'*irradiation*.

Exemple 1 : À Bamako, au Mali ou bien à Kagadi en Ouganda, sur une base annuelle, l'ensoleillement journalier moyen est estimé à 5 kWh/m².jour dans le plan horizontal. Le mois le moins ensoleillé à Kagadi bénéficie d'un ensoleillement de 4,5 kWh/m².jour, seulement.

Exemple 2 : à Marrakech au Maroc, sur une base annuelle, l'ensoleillement moyen est estimé à 4,9 kWh/m² par jour dans le plan horizontal et à 5,4 kWh/m² sur un plan incliné à 40 degrés par rapport à l'horizontal.

- **Wc (Watt crête)** : cette unité mesure la puissance maximale qu'un module photovoltaïque solaire peut produire dans les conditions optimales d'ensoleillement et de température. C'est-à-dire quand la puissance instantanée du soleil est de 1000 W/m² et que les cellules du module sont à une température de 25 degrés centigrades.

4.8 Schémas électriques

Au cours des sessions précédentes, les étudiants ont créé leurs premiers petits circuits électriques. Il est opportun d'introduire les normes et codes internationaux de dessin pour représenter de manière standard l'ensemble des composants d'un schéma électrique.

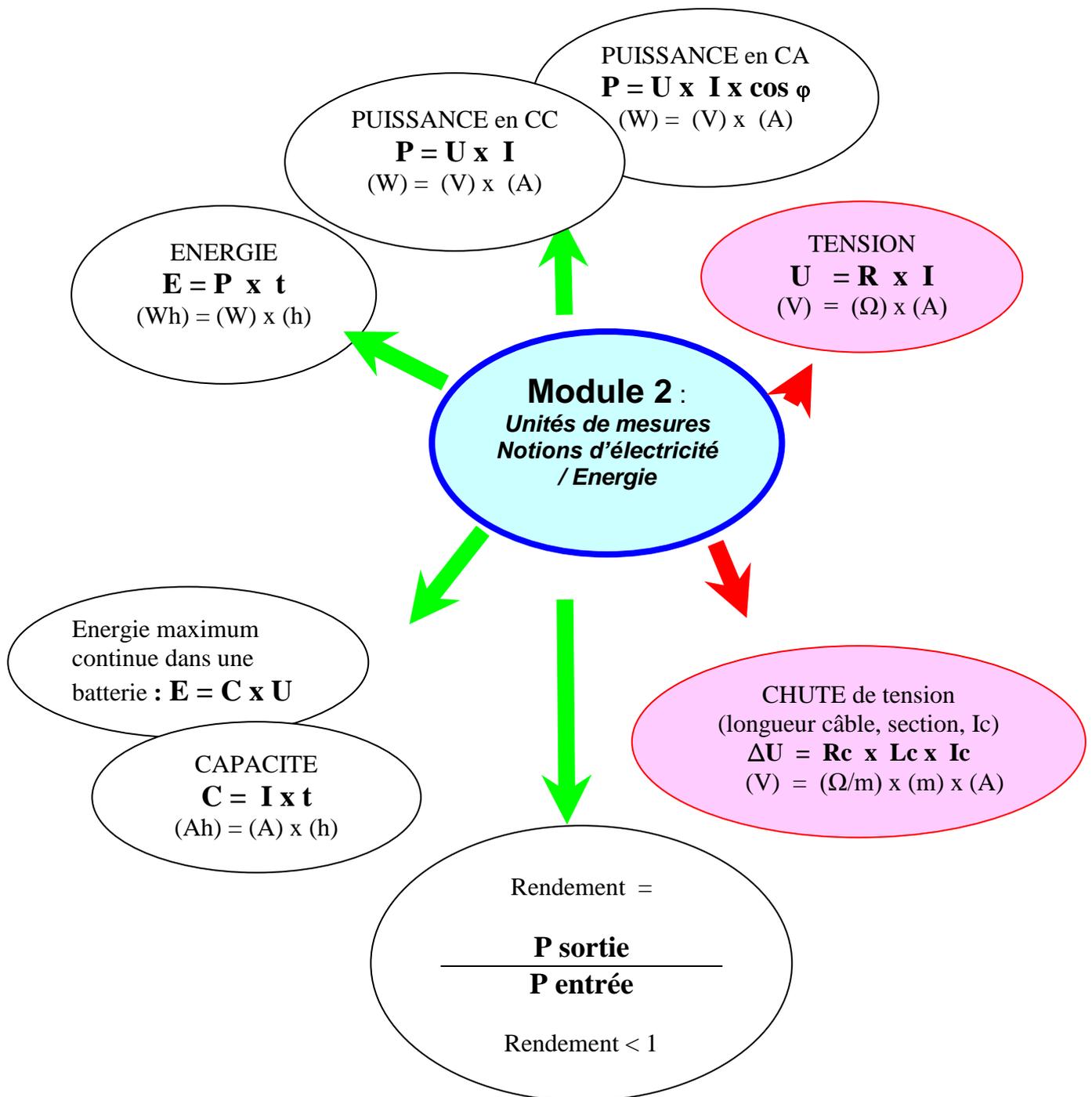
Avec les étudiants, réaliser un 'poster' avec les représentations standard des équipements suivants :

- Panneau solaire
- Régulateur
- Batterie
- Fil, câble (2 fils)
- Interrupteur
- Lampe
- Prise mâle et femelle
- Onduleur
- Boîte de raccordement
- Fusible
- Terre (prise de terre)
- Multimètre (ampèremètre, voltmètre, ohmmètre)
- Etc...

4.8.1 Symboles et grandeurs francophones et anglophones

	Symbole universel	Abréviation francophone	Abréviation anglophone	
Courant continu	≡	CC	<i>DC</i>	<i>Direct current</i>
Courant alternatif	~	CA	<i>AC</i>	<i>Alternating current</i>
Intensité (en V)		I	<i>I</i>	<i>Current</i>
Tension (en A)		U	<i>V</i>	<i>Voltage</i>
Résistance (en Ω)		R	<i>R</i>	<i>Resistance</i>
Courant de court-circuit		I _{cc}	<i>I_{sc}</i>	<i>Short-circuit current</i>
Tension en circuit ouvert		U _{co}	<i>V_{oc}</i>	<i>Open-circuit voltage</i>
Puissance crête (en watt crête)		P _c (W _c)	<i>P_p (W_p)</i>	<i>Watt peak</i>

5 Topogramme



Unités spécifiques au solaire :

Wc : Puissance maximum fournie par un module solaire donné

W/m² : Unité de mesure de la puissance solaire (1000 W/m² maxi)

kWh/m².jour : Unité de mesure de l'ensoleillement

6 Évaluation et feed-back

Cette section est fondamentale, car elle permet de s'assurer que les concepts et notions de ce module ont été compris et assimilés. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner les modules suivants, dans de bonnes conditions.

Evaluer si les étudiants rencontrent des difficultés pour :

- Choisir et appliquer les formules.
- Utiliser une calculatrice.
- Manipuler les formules (par exemple $P = U \times I \rightarrow U = P/I$ ou $I = P/U$).
- Se rappeler des unités de mesures.
- Etablir correctement les liens entre les grandeurs mesurées et les grandeurs calculées.

Toutes les incompréhensions doivent être identifiées et corrigées.

Pour conclure ce module, demander aux étudiants de réaliser des 'posters' avec les formules et unités de bases, ainsi qu'un 'poster' avec les normes de dessin des principaux composants d'un système solaire.

Ces 'posters' doivent ensuite être affichés, bien en évidence, dans la salle de cours, si possible au-dessus du tableau noir principal.

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des étudiants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux étudiants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les étudiants pour l'examen⁶.

⁶ Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, et non pour conduire à l'échec.

MODULE 3 : Introduction aux systèmes solaires domestiques

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	<i>Définition des systèmes solaires domestiques.....</i>	3
4.2	<i>Les applications des systèmes photovoltaïques dans le monde.....</i>	4
4.3	<i>Pourquoi et quand les systèmes solaires sont-ils une option ?.....</i>	6
4.3.1	<i>Exemples en zones rurales non raccordées au réseau électrique.....</i>	6
4.4	<i>Avantages et limites des systèmes solaires</i>	7
4.5	<i>Questions d'environnement et de sécurité.....</i>	8
4.5.1	<i>Tubes fluorescents</i>	8
4.5.2	<i>Batteries.....</i>	8
4.5.3	<i>Régulateurs.....</i>	9
4.5.4	<i>Modules PV</i>	9
5	TOPOGRAMME.....	10
6	ÉVALUATION ET FEEDBACK	11

1 Objectifs

Ce module couvre les sujets suivants :

- Définition d'un petit système solaire.
- Introduction aux principaux composants d'un petit système solaire.
- Les principales applications spécifiques des systèmes PV.
- Les avantages et les limites des systèmes PV.
- Recommandations concernant les aspects environnementaux (pollution, recyclage) et de sécurité.

2 Durée du module

5 – 10 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Petit système solaire complet (tous les composants d'un petit système solaire comme décrit dans ce module - chapitre 4.1)	1
Calculatrice solaire	1
Ventilateur électrique (12 V)	1
Tube fluorescent cassé (8 W ou 13 W)	1
Vidéo de formation (sur les étapes d'une Installation, ou sur l'utilisation et l'entretien des petits systèmes solaires, pour techniciens et usagers)	1

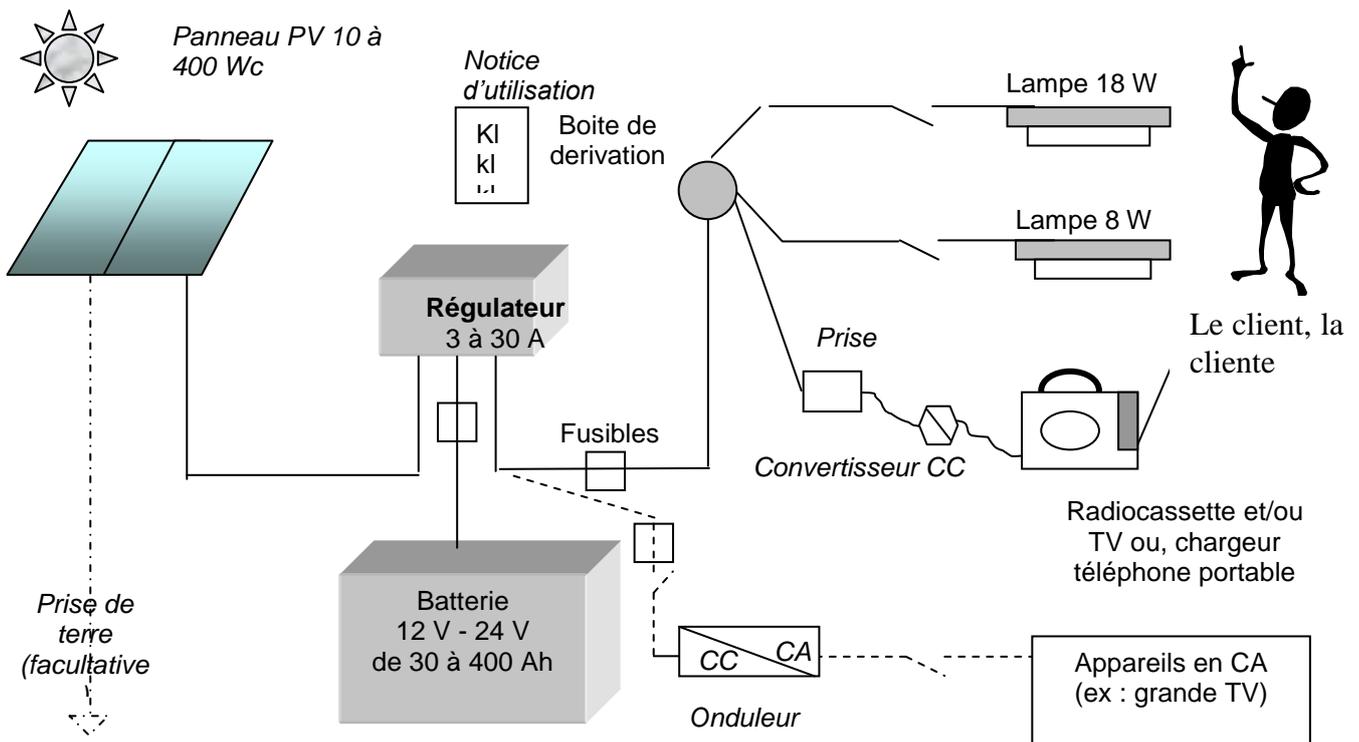
4 Contenu

4.1 Définition des systèmes solaires domestiques

Un petit système solaire est un ensemble complet d'équipements utilisés pour transformer la lumière du soleil en électricité et l'utiliser pour alimenter : lampes, radio, télévision et divers autres récepteurs électriques.

Sa puissance n'excède pas quelques centaines de Wc. Le système fournit généralement une tension nominale en courant continu (noté CC), de 12 V (jusqu' à 250 Wc) et de 24 V (au-delà de 250 Wc).

Cette tension peut être adaptée en fonction des appareils électriques. En effet, certains récepteurs ont une tension d'alimentation inférieure à 12 V ou 24 V. Par ailleurs, d'autres fonctionnent en courant alternatif (noté CA) et nécessitent une tension de 230 V_{CA} (exceptionnellement 115 V_{CA}).



Un petit système solaire PV est composé de **5 éléments principaux** :

Composants		Fonctions
1	L'utilisateur	Il paie, utilise et entretient les systèmes. Il fait partie du système !
2	Le panneau photovoltaïque	Composé de modules photovoltaïques raccordés les uns aux autres et fixés sur une structure support, il produit la quantité requise d'électricité.
3	Le régulateur	Il protège la batterie contre les surcharges et les décharges profondes pouvant l'endommager.
4	La batterie	Elle stocke l'énergie électrique.
5	Les récepteurs	Ce sont les appareils qui utilisent l'électricité : lampes, radios, télévisions, chargeurs de téléphones portables
	Câbles :	<i>Ils assurent le raccordement des composants (incluant la mise à la terre et les accessoires de fixation des câbles).</i>
	Convertisseur :	<i>Il adapte la tension CC délivrée par la batterie à la tension d'alimentation du récepteur si elle est plus haute ou plus basse.</i>
	Onduleur :	<i>Il transforme le courant continu en courant alternatif (CC en CA) pour l'alimentation des récepteurs fonctionnant en CA.</i>

4.2 Les applications des systèmes photovoltaïques dans le monde

Grâce aux systèmes photovoltaïques, l'énergie solaire est convertie directement en électricité. L'électricité ainsi produite trouve des applications extrêmement variées. Depuis les années 1970, les domaines d'utilisation sont quasiment illimités :

- ▶ depuis quelques milliwatts (mW) pour les calculatrices solaires,
- ▶ de 50 à 400 Wc pour les petits systèmes solaires (ex : les systèmes domestiques),
- ▶ plusieurs kilowatts (kW) pour les stations de pompage solaires ou les relais de radiocommunication,
- ▶ jusqu'à plusieurs mégawatt (MW) pour des centrales de puissance raccordées au réseau national.

Depuis 1991, d'autres applications se sont répandues en Europe, au Japon et aux Etats-Unis :

- ▶ Il s'agit de l'intégration des modules photovoltaïques dans les façades des bâtiments (ex : bureau, usines) pour des systèmes allant jusqu'à 5 MWc par installation.
- ▶ Il s'agit également de l'installation de modules photovoltaïques sur les toitures de maisons individuelles (de 1 à 5 kWc par installation) avec raccordement sur le réseau électrique national. On peut prendre, par exemple, le programme des 70 000 logements au Japon et le programme des 100 000 toits PV en Allemagne.

Bien que l'électricité produite demeure plus chère que celle produite de manière conventionnelle, ces programmes ont permis une accélération de la Recherche et Développement, et surtout un fort accroissement de la production mondiale de modules PV (1195 MW par an en 2005, contre 70 MW par an en 1994¹); phénomène qui a, dans l'ensemble, un impact favorable sur la réduction des coûts. Cette réduction des coûts bénéficient aux clients désirant des systèmes solaires domestiques, ceux auxquels l'on s'intéresse dans ce cours, c'est-à-dire, les habitants en zones rurales des pays en voie de développement.

Exercice : Elaboration de la liste des applications PV connues des étudiants, avec l'ordre de grandeur de la puissance des installations.

Conception d'un 'poster', suivant le format ci-dessous.

Types d'applications	Puissance PV des systèmes
Calculatrices solaires	Milliwatt
Torches solaires	0,5 Wc
Jouets	0,5 Wc
Clôtures électriques	5 à 10 Wc
Lanternes portables	2 à 10 Wc
Eclairage de sécurité routière ou de navigation	2 à 50 Wc
Radio HF, VHF	50 à 100 Wc
Radio HF avec radio E-mail	50 à 100 Wc
Petits systèmes domestiques pour l'éclairage, les radios et les TV	10 à 200 Wc
Ordinateur portable avec imprimante jet d'encre	100 à 150 Wc
Ordinateur de bureau (avec écran cathodique et unité centrale) avec imprimante jet d'encre	150 à 300 Wc
Réfrigérateurs à vaccins	100 à 300 Wc
Téléphonie rurale	200 à 500 Wc
Systèmes de surveillance du réseau électrique	20 à 40 Wc
Systèmes de pompage de l'eau (eau potable, irrigation)	50 Wc à plusieurs kilowatts
Systèmes reliés au réseau électrique (habitation individuelle)	1 à 5 kWc
Systèmes reliés au réseau électrique (centrales, bureau, usines)	5 kWc à 4 MWc (4000 kilowatts)
Centrales électriques PV	100 kWc à 10 MWc

¹ Source : www.outilssolaires.com / Renewable Energy World Magazine.

4.3 Pourquoi et quand les systèmes solaires sont-ils une option ?

L'un des freins les plus connus à la large diffusion des systèmes solaires PV est le prix d'achat initial. Cependant, il faut signaler que, bien que ce dernier reste élevé (environ 2,5 à 5 €/Wc en 2005 – prix des modules PV), il a nettement baissé au cours des années (35 €/Wc en 1975 – prix des modules PV).

Le coût initial des systèmes n'est pas forcément un frein majeur. En effet, les clients peuvent être prêts à payer plus, pour un système solaire produisant de l'électricité, dans des conditions de fiabilité, de sûreté, de sécurité et de confort, supérieures aux autres sources d'énergie conventionnelles (bougies, lampes à pétrole, groupe électrogène à essence, etc.). Voici quelques exemples :

4.3.1 Exemples en zones rurales non raccordées au réseau électrique

- Une clinique privée choisira un système solaire pour remplacer les bougies et les lampes à pétrole. Les clients seront enclins à choisir cette clinique parce qu'elle dispose d'un bon éclairage, nécessaire à un travail de qualité de jour comme de nuit.
- Un bar ou un restaurant augmentera et fidélisera sa clientèle grâce à un petit système solaire pour l'éclairage et l'ambiance musicale.
- Un cultivateur achètera un petit système solaire, par exemple, après la vente de sa récolte de café, pour améliorer les conditions de vie et d'études de ses enfants. Cela lui coûtera peut-être plus cher que d'acheter des bougies, mais il investit pour la réussite de sa famille.

Il y a de nombreux cas où les systèmes PV sont plus économiques (meilleur marché à la longue) que les systèmes conventionnels (bougies, lampes à pétrole, groupes électrogènes), car malgré un coût d'investissement élevé, les coûts de fonctionnement sont généralement bas.

En règle générale, les systèmes PV sont rentables lorsque la quantité d'électricité requise (c.-à-d. la consommation quotidienne d'énergie électrique) est relativement petite et lorsque le lieu d'utilisation est éloigné du réseau national, et bien sûr, d'autant plus rentable si le prix du carburant est élevé (pétrole lampant, essence, diesel).

Exercice : Enumération des activités quotidiennes pour lesquelles les étudiants ont besoin d'énergie

Parmi ces activités, quelles sont celles qui peuvent être alimentées avec systèmes PV ? Expliquer les raisons qui amènent à choisir ou non un système PV (puissance, temps d'utilisation, éloignement du réseau électrique, prix du carburant, etc.).

4.4 Avantages et limites des systèmes solaires

Les systèmes PV, comme toutes les autres technologies, ont des avantages et des inconvénients. Il est fondamental de ne pas sous-estimer les inconvénients, les limites. Certes, il est nécessaire d'être enthousiaste pour promouvoir les systèmes solaires, mais cela n'implique pas que l'on doit masquer les petits inconvénients et les limites de ces systèmes. Il faut savoir être honnête.

Il suffit d'informer clairement les clients potentiels aussi bien des avantages, que des limites des systèmes solaires.

Exercice : Enumération des principaux avantages et inconvénients des systèmes PV, et élaboration d'un tableau (comme ci-dessous).

Demander aux étudiants d'expliquer leurs réponses. En analysant leurs réponses, le formateur se fera une idée du niveau de connaissances des étudiants.

Demander aux étudiants de réaliser un 'poster' des avantages et des limites. Ce 'poster' sera complété pendant le déroulement du cours, au fur et à mesure de l'avancement dans les connaissances.

Principaux avantages	Principales limites / inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût d'exploitation. Plus besoin de pétrole, de bougies ou de piles - Durée de vie : plus de 20 ans pour les modules solaires de bonne qualité. - Faible maintenance comparée à la majorité des systèmes énergétiques fonctionnant avec des sources conventionnelles tels que les groupes électrogènes. - Peu d'entretien pour l'utilisateur ou l'utilisatrice (uniquement nettoyage des modules et vérification du niveau d'électrolyte de la batterie). - Moins onéreux sur le long terme que les piles pour l'alimentation des radios et radio cassettes. - Facilement modulables (en ajoutant un module, un point lumineux, etc.). - Produit une lumière de qualité supérieure à celle des bougies et lampes tempêtes. - Utilisation aisée et sûre (évite les risques d'incendie encourus par l'utilisation de bougies et lampes tempêtes). - Risque minime d'électrocution. - Silencieux. - Pas d'émission de gaz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'achat élevé. - La batterie est le composant le plus fragile du système et nécessite un entretien rigoureux. - La performance du système dépend du respect des consignes d'utilisation et de qualité et fréquence de la maintenance qui, bien que minimale, doit être effectuée par l'utilisateur ou l'utilisatrice. - La formation de l'utilisateur ou de l'utilisatrice est nécessaire pour l'exploitation et l'entretien. - L'énergie disponible est limitée par le nombre de modules installés. - Ne peut pas fournir d'électricité pour des applications de forte puissance telles que : les fers à repasser, bouilloires électriques ou réfrigérateurs de taille significative (au risque de sur dimensionner l'installation). - Fragilité : la majorité des modules solaires sont en verre et peuvent être brisés en cas de vandalisme. - Les modules peuvent être facilement volés sauf si des précautions sont prises lors de l'installation (ex : choix judicieux de l'emplacement, fixation avec écrou auto-cassant nécessitant une clé spéciale). - Les dépenses de renouvellement de composants sont rares, mais d'un montant assez élevé.

Visionner la vidéo '*Utilisation et Entretien des systèmes solaires domestiques*', section : Avantages et Limites, pour clôturer ce chapitre.

4.5 Questions d'environnement et de sécurité

Les petits systèmes solaires ne présentent pas de danger particulier pour l'environnement. Cependant, ils doivent être considérés comme étant potentiellement dangereux, comme toute autre source de production d'électricité ayant une tension similaire.

- Ne jamais commencer à travailler sur un système PV sans avoir compris son principe de fonctionnement (ceci vous permettra d'éviter de créer des court-circuits endommageant l'équipement et de vous blesser, ou de blesser des usagers).
- Avant de jeter des composants défectueux, réfléchir d'abord à une possible utilisation future, afin de recycler ce qui peut l'être, et lire les notices techniques disponibles pour connaître les conditions de recyclage.

4.5.1 Tubes fluorescents

- Les tubes fluorescents ne doivent pas être jetés sans précaution ; ils contiennent du mercure et d'autres composants très polluants pour l'environnement. Les tubes fluorescents usagés doivent être convenablement stockés. Dans certaines villes², on collecte les tubes fluorescents pour recyclage. Si le stockage ou le recyclage est impossible, il vaut mieux les jeter dans des latrines, par exemple, que de les laisser sur un tas d'ordures, souvent à portée des enfants.

Montrer aux étudiants, le dépôt poudreux à l'intérieur d'un tube fluorescent (à l'aide d'un tube cassé).

Faire extrêmement attention en manipulant cet échantillon. Il est conseillé de placer le tube cassé dans un récipient en plastique transparent et étanche.

4.5.2 Batteries

- Les batteries usagées ne doivent pas être jetées comme de simples ordures ménagères. Les batteries doivent être retournées aux fabricants pour recyclage. Les matériaux récupérés serviront à fabriquer de nouvelles batteries. Si le retour chez le fabricant est impossible, il est conseillé de stocker les batteries dans un endroit à l'abri des intempéries et du public.
- Les batteries représentent le plus important risque pour la sécurité. Dans le cas de l'utilisation de batteries "ouvertes", une attention toute particulière doit être apportée en raison du caractère corrosif de l'acide et du caractère inflammable et explosif de l'hydrogène émis. Les batteries étanches renferment l'électrolyte sous forme de gel, ainsi ce dernier ne peut se déverser et présente donc moins de risques. Dans les deux cas, il faut faire preuve d'une extrême prudence afin de ne pas endommager l'enveloppe de la batterie (voir également le **module 7**).

² Notamment en Europe, aux Etats-Unis et en Afrique du Sud.

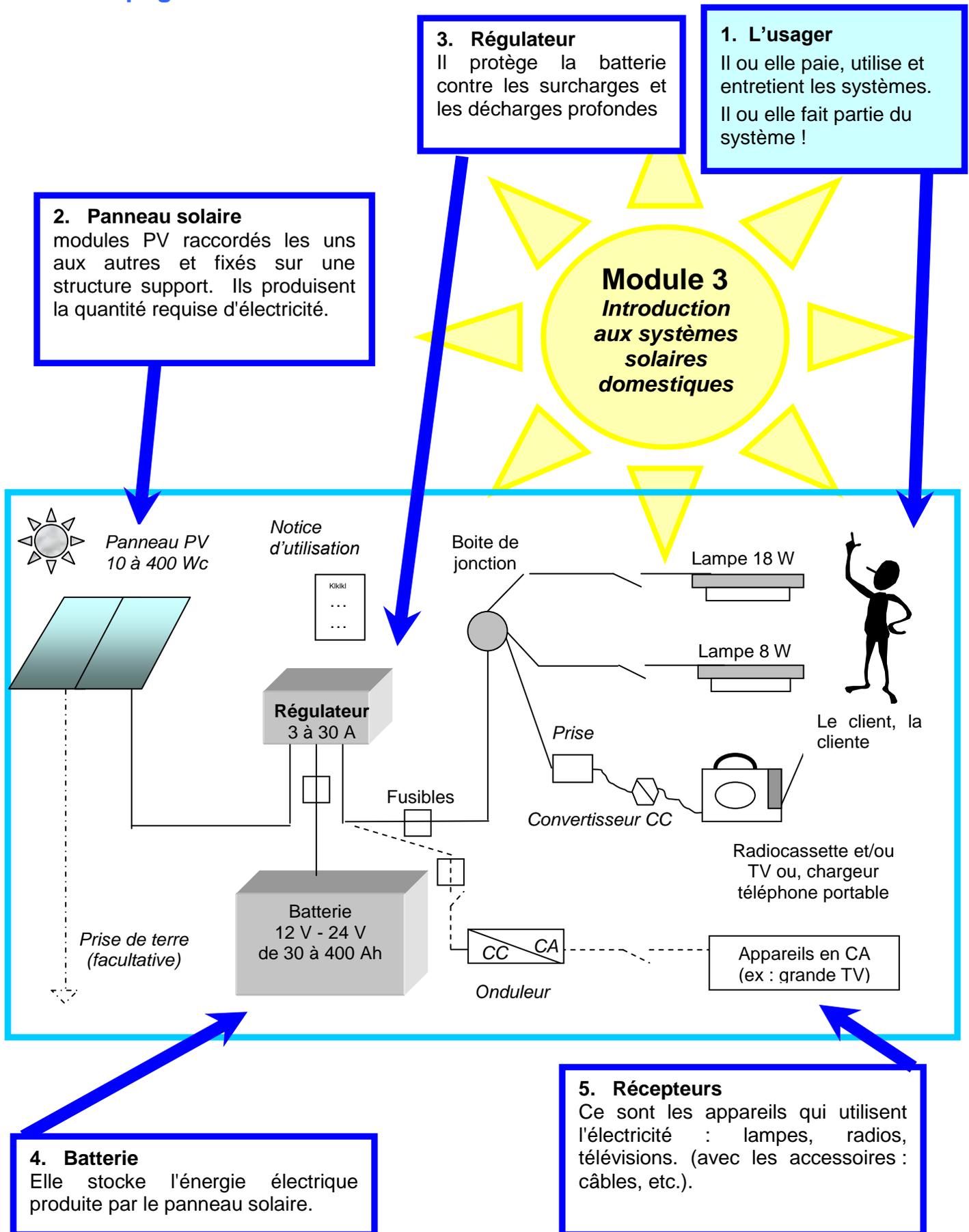
4.5.3 Régulateurs

- Les régulateurs hors service (en panne), qui ne peuvent pas être réparés, doivent être stockés en atelier. Il sera alors possible de réutiliser certains de leurs composants électroniques pour réparer d'autres régulateurs.

4.5.4 Modules PV

- Il est plutôt rare d'être amené à stocker des modules endommagés (hors service), car leur fiabilité est excellente et leur durée de vie est très longue (10 à 20 ans). En outre, comme les modules bénéficient d'une *garantie* du fabricant, ce dernier reprend en général les modules défectueux, en échange de modules neufs. Dans le cas où la *garantie* n'est plus valide, par exemple, si la vitre d'un module a été cassée (par un jet de pierre), il faut stocker le module à la déchèterie municipale, si elle existe. Dans le cas rare où le module ne fonctionne plus et est hors garantie (ex : rupture d'une connexion entre deux cellules après 20 ans de bons et loyaux services !), mais demeure intact, on peut le transformer en table de salon ou table pour le thé. L'effet est garanti sur les visiteurs.

5 Topogramme



6 Évaluation et feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les étudiants ont compris et assimilé les concepts et notions de ce module. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner les modules suivants, dans de bonnes conditions.

Pour conclure sur ce module, Il est suggéré de demander aux étudiants (en équipe ou en session individuelle) de :

- Produire un poster représentant le schéma électrique d'un petit système solaire (sans oublier l'utilisateur et la notice d'utilisation sur le poster).
- Enumérer au moins dix applications PV avec la fourchette de puissance crête correspondante.
- Enumérer les avantages et les limites des petits systèmes solaires.
- Décrire, pour chaque composant principal d'un système solaire, les précautions à prendre pour préserver l'environnement et pour éviter tout accident corporel.

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des étudiants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux étudiants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen³.

³ Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 4 : Le client, la satisfaction de ses besoins avec l'énergie solaire

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	Pourquoi aborder, en premier, le sujet du 'client' ?	3
4.1.1	<i>Retour d'expériences</i>	3
4.2	Le client : une personne CLE	4
4.2.1	<i>Comment créer de bonnes relations avec la clientèle</i>	4
4.3	Principe général de dimensionnement des systèmes PV	5
4.3.1	<i>Topogramme du dimensionnement d'un système PV</i>	6
4.3.2	<i>Les étapes du dimensionnement</i>	6
4.4	Evaluation des besoins énergétiques du client	7
4.4.1	<i>Tableau : Besoins énergétiques du client</i>	8
4.4.2	<i>Tableau : Puissance électrique typique de divers récepteurs</i>	10
4.5	La ressource solaire	11
4.5.1	<i>Irradiation ou Ensoleillement (kWh/m².jour)</i>	11
4.5.2	<i>Rayonnement solaire : Puissance maximum = 1000 W/m²</i>	11
4.5.3	<i>Relation entre Rayonnement solaire et Irradiation</i>	13
4.6	Le choix de l'irradiation pour un site	14
4.6.1	<i>Où obtenir et comment choisir les valeurs d'irradiation du site recherché ?</i>	14
4.6.2	<i>Exemple pratique : Kagadi, au Nord-Ouest de l'Ouganda</i>	15
4.6.3	<i>Remarques sur les fluctuations saisonnières</i>	16
4.6.4	<i>Valeurs d'irradiations illustrant les variations saisonnières</i>	16
4.7	Le client : satisfaire ses besoins avec la ressource solaire	17
4.7.1	<i>Formule de calcul de la puissance crête d'un panneau PV</i>	17
5	TOPOGRAMME	18
6	ÉVALUATION ET FEEDBACK	19

1 Objectifs

Ce module a pour objectif de couvrir les sujets suivants :

- L'importance de la connaissance du client et de ses besoins énergétiques.
- L'évaluation des besoins énergétiques du client.
- La découverte de la ressource solaire (puissance instantanée, irradiation, les fluctuations en fonction du temps, des saisons, etc.).
- Le choix de la valeur de l'irradiation solaire.
- La relation de base entre les besoins énergétiques du client et la ressource énergétique solaire.

2 Durée du module

5 - 10 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Un ensemble de lampes halogènes 10, 20 et 50 W (12 V CC)	1
Un ensemble de lampes fluorescentes de 7, 8, 9 et 11 W (12 V CC)	1
Un ensemble de diverses ampoules de voiture (12 V CC)	1
Radiocassette (12 V CC)	1
Petite Radio (à piles)	1
Convertisseur CC-CC	1
Chargeur 12 V de téléphone portable	1
Multimètres	2
Un ensemble de câbles et accessoires	1
Données d'ensoleillement du pays, de la région où se déroule la formation.	1

4 Contenu

4.1 Pourquoi aborder, en premier, le sujet du 'client' ?

Le client, comme indiqué dans le **module 3**, est un *composant*, une *partie* essentielle, du système ; c'est pourquoi ce module, concernant le client et ses besoins, est présenté avant d'étudier en détail dans les autres modules, les composants *techniques* d'un système solaire (c.-à-d. panneau solaire, régulateur, batterie, etc.).

Exercice : Quelles sont les raisons principales qui font que le client (l'utilisateur du système) est important jusqu'au point de choisir d'aborder le sujet du *client* avant les sujets plus techniques ?

Réponse : D'une part, un technicien doit, pour réussir, bien connaître sa future clientèle (ses besoins, ses habitudes, son pouvoir d'achat). D'autre part, il doit également être convaincu que les clients doivent être formés à la bonne utilisation du système pour assurer un fonctionnement durable.

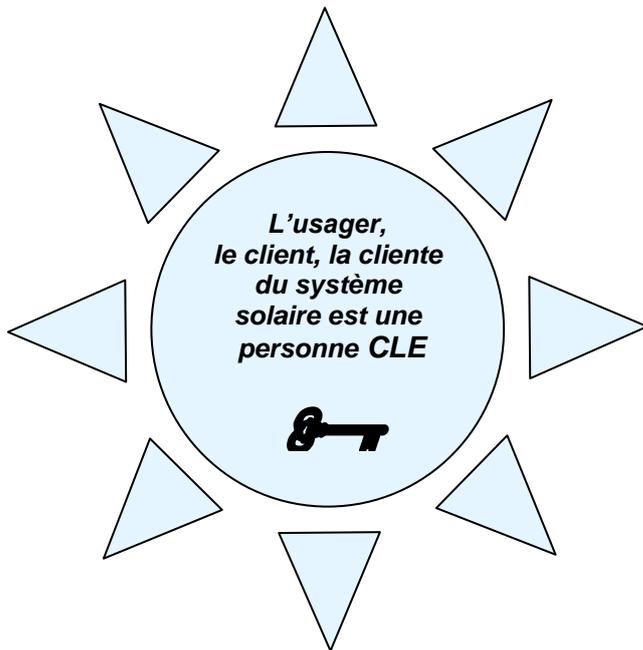
4.1.1 Retour d'expériences

Durant les trois dernières décennies, de multiples projets de diffusion de systèmes solaires ont été lancés dans différents pays.

- Dans les années 70 et les années 80, les projets étaient fondamentalement des projets de démonstration (ou de recherche appliquée). La plupart des systèmes solaires étaient fournis et installés gratuitement, ou bien ils étaient fortement subventionnés. Ces programmes ont fait face aux problèmes suivants :
 - médiocre fiabilité des composants.
 - mauvais dimensionnement des systèmes (*inadéquation avec les besoins des utilisateurs*), médiocre qualité des installations.
 - absence d'entretien, manque de pièces de rechange et de techniciens de maintenance.
 - *absence de formation des utilisateurs*.
 - engagement à court terme des fournisseurs de systèmes PV, avec pour conséquence aucun service après-vente, ou suivi des produits sur le terrain.
- Depuis la fin des années 90, la plupart des problèmes techniques de jeunesse concernant les composants ont été surmontés. Des produits de bonne qualité sont maintenant fabriqués en série (bien qu'il faille toujours imposer un processus de contrôle Qualité des équipements lors de leur réception). Les composants sont devenus fiables et meilleur marché. D'importants programmes de diffusion des systèmes ont été lancés. Cependant, les facteurs qui doivent toujours être considérés par les techniciens ruraux sont :
 - marketing (relationnel avec le client) : nécessité de connaître les besoins et le pouvoir d'achat des clients, nécessité de proposer des mécanismes de financement pour vendre des systèmes de taille adéquate et évolutive.
 - information et formation des clients à l'utilisation des systèmes PV.

Les expériences les plus récentes, y compris des expériences en Ouganda, Mali, Sénégal et en Afrique du Sud, montrent clairement qu'un des éléments prépondérants dans le succès de la large diffusion des systèmes PV, est le *relationnel créé et maintenu* entre les clients et les techniciens ruraux de proximité représentant des compagnies spécialisées en PV.

4.2 Le client : une personne CLE



Le client paiera pour l'installation et/ou l'utilisation du système.

Il l'utilisera et fera part des bonnes ou mauvaises performances.

Comme un bon automobiliste conduit sa voiture avec soin, afin de maintenir ses performances et limiter ses frais d'entretien, l'utilisateur d'un système solaire doit faire de même...*s'il connaît ou a été formé* à l'utilisation optimale du système.

L'utilisateur informera d'autres personnes des avantages des systèmes solaires.

Il deviendra un 'promoteur' de systèmes solaires, si et seulement si ses besoins ont été satisfaits.

Exercice : Enumération des tâches à effectuer par un technicien, avec les clients, les usagers des systèmes, pour réussir en milieu rural.

Réponses : Voir la section ci-dessous.

4.2.1 Comment créer de bonnes relations avec la clientèle

- Prendre le temps d'écouter les souhaits des utilisateurs, pour mieux identifier leurs besoins. S'assurer que les épouses soient présentes si le système est destiné aux usages domestiques.
- Exposer clairement la gamme des systèmes proposés, en termes de services rendus, garanties et service après-vente.
- Informer le client, l'utilisateur, des avantages et des limites des systèmes solaires, afin d'éviter toute déception (ex : annoncer clairement qu'un petit système solaire n'est pas approprié pour alimenter un fer à repasser électrique).
- Vendre les systèmes et les pièces de rechange à des prix accessibles (situés entre les prix du marché et vos coûts, pour assurer une marge bénéficiaire raisonnable).
- Former et informer l'utilisateur pendant l'installation des systèmes et à n'importe quel autre moment de la vie du système (ex : pendant la maintenance et les activités de réparations des pannes).
- Être disponible et facilement accessible pour l'utilisateur : être technicien au sein d'une communauté rurale est un avantage.
- Finalement, créer et entretenir de bonnes relations avec le client(e), l'utilisateur.

4.3 Principe général de dimensionnement des systèmes PV

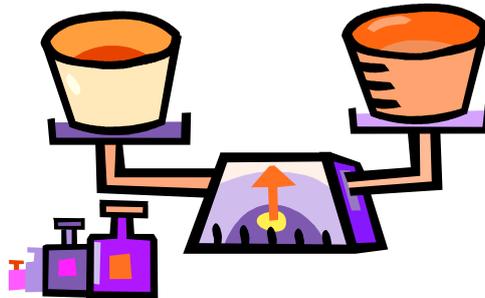
Note au formateur :

Ce chapitre explique le principe de base et les paramètres à considérer lors du dimensionnement d'un système PV. Ce chapitre ne couvre pas le processus détaillé de dimensionnement d'un système solaire. Ceci est traité plus tardivement dans le cours (c.-à-d. **module 9**), une fois que les participants ont étudié les aspects techniques des composants (c.-à-d. **modules 5, 6, 7 et 8**).

Principe de base :

Respecter l'équilibre entre l'énergie consommée par les récepteurs, et l'énergie produite par les panneaux solaires.

Energie électrique produite
chaque jour, par les panneaux
solaires > OU = Besoins quotidiens en
électricité de l'utilisateur



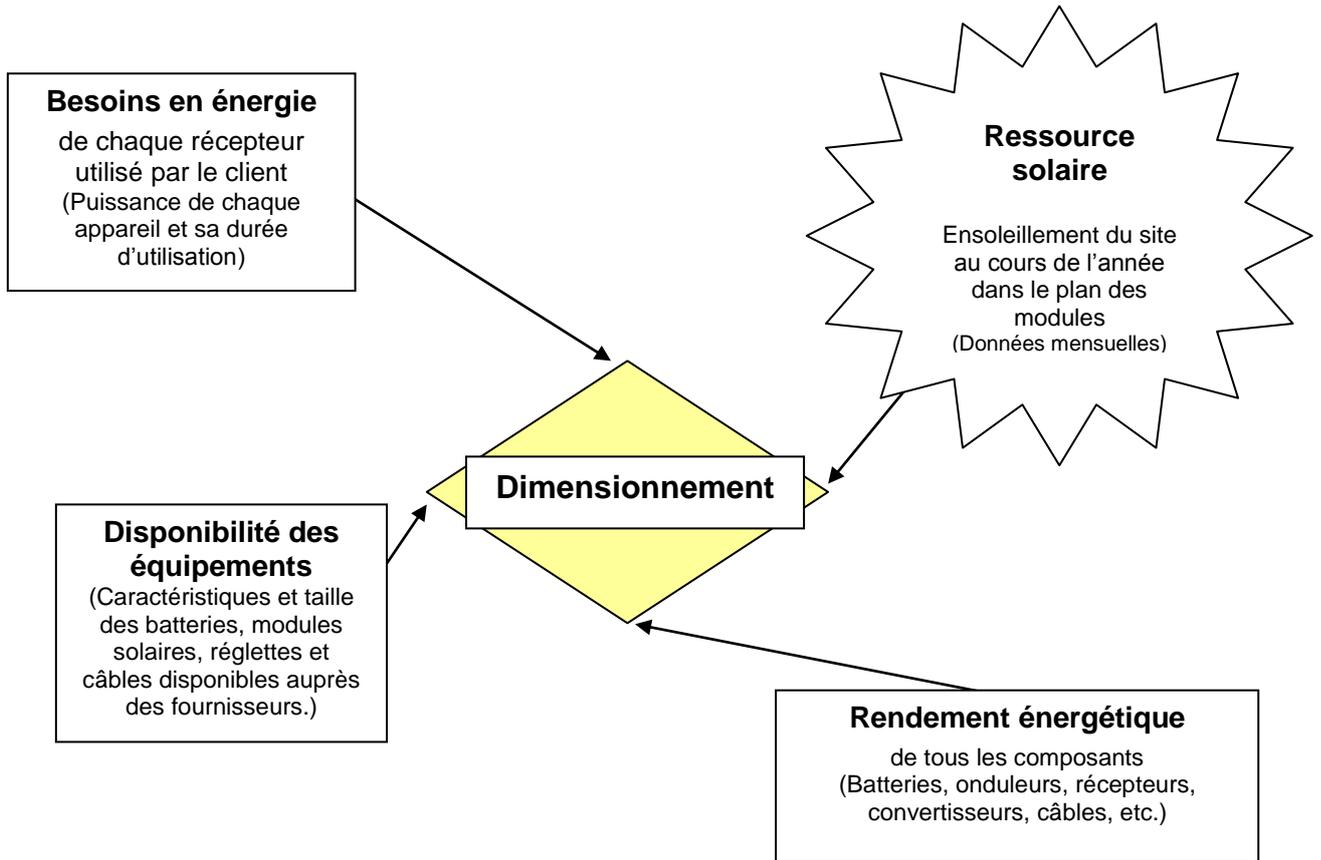
NB. : L'énergie consommée par les récepteurs devra toujours être inférieure à celles produite par les panneaux solaires

*Le dimensionnement d'un système solaire affecte son prix, sa qualité intrinsèque, et sa longévité.
Par conséquent, le dimensionnement est une étape cruciale, avant toute installation.*

Exercice :

Amener les participants à énumérer les paramètres affectant le dimensionnement d'un système solaire.
Avec leurs éléments de réponse, dessiner le topogramme de la section suivante.

4.3.1 Topogramme du dimensionnement d'un système PV



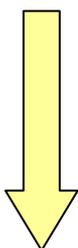
Quand l'ensemble des paramètres ci-dessus est connu, il est assez simple de dimensionner correctement un système qui répondra alors aux exigences du client et avec le meilleur rapport qualité / prix.

4.3.2 Les étapes du dimensionnement

Le dimensionnement doit suivre 5 étapes consécutives.

Exercice : Quelles sont les étapes nécessaires au dimensionnement ? Les classer dans un ordre logique.

Réponse : voir ci-dessous



1. **Evaluation des besoins énergétiques du client, de la cliente**
2. Dimensionnement du panneau solaire
3. Dimensionnement de la batterie
4. Choix du régulateur
5. Dimensionnement des câbles

4.4 Evaluation des besoins énergétiques du client

Exercice : Comment évalue-t-on les besoins en énergie d'un client ? Quelles sont les étapes nécessaires ?

Réponse : voir ci-dessous

Un technicien doit suivre les étapes suivantes :

1. Demander au client, à la cliente, premièrement : *quels types de récepteurs*, il ou elle, souhaite alimenter (lampes, radios, etc.), et deuxièmement : *la durée moyenne d'utilisation* quotidienne de ces récepteurs, et si il existe des usages saisonniers.

Astuce : La plupart du temps, il est judicieux de montrer les lampes ou réglettes proposées ou bien le type de radios ou de TV si le client n'en possède pas encore.

Astuce : Habituellement, les clients ont bien du mal à indiquer avec une précision suffisante les durées d'utilisation des appareils. Le technicien doit, par des questions croisées, obtenir absolument toutes les durées souhaitées d'utilisation et avec une bonne précision.

2. *Définir avec le client, la cliente, l'emplacement idéal des récepteurs selon leurs souhaits.* Il est conseillé de faire un croquis de la maison et d'y indiquer la position des lampes et des autres appareils, en y notant les dimensions des locaux. Ceci facilitera le dimensionnement des câbles et l'établissement du devis.
3. *Evaluer la consommation électrique de chaque appareil à connecter au système.* La puissance électrique est souvent marquée au dos des appareils.

Astuce : S'il n'y a pas d'indication de puissance, ni d'intensité consommée indiqués, il faut alors mesurer la puissance. Avec un multimètre, mesurer le courant consommé par l'appareil et sa tension d'alimentation, et en déduire la puissance. Les résultats peuvent être comparés avec le tableau 4.4.2 à la fin de ce **chapitre**.

4. *Expliquer qu'il est nécessaire de limiter le nombre et le type d'appareils susceptibles d'être alimentés par un système solaire, sinon le système sera inabordable.*

Expliquer au client que les fers à repasser, les bouilloires électriques et les plaques chauffantes ont des puissances trop importantes, ce qui entraîne des systèmes surdimensionnés et chers (ex : un système PV alimentant un fer à repasser une heure par jour coûtera au moins 5000 euros, alors qu'un système d'éclairage avec deux lampes allumées 3 heures par jour, coûtera 500 euros).

5. *Recommander des récepteurs à haut rendement énergétique, par exemple des tubes fluorescents plutôt que des ampoules ordinaires* (les lampes ordinaires sont des lampes à incandescence). Cela vaut particulièrement pour les lampes qui vont être utilisées plusieurs heures par jour (ex : dans la salle à manger).

Astuce : Si une lampe est allumée seulement quelques minutes par jour, par exemple, dans une salle de bains ou un couloir, alors une lampe incandescente de 5 ou de 10 W, peut être

choisie plutôt qu'une lampe fluorescente. Une ampoule incandescente est souvent moins coûteuse à l'achat et comme la durée d'utilisation quotidienne est courte, ce choix n'aura pas d'impact sur la taille du système.

Astuce : Préconiser l'utilisation d'un onduleur seulement si le client(e) possède des récepteurs récents qui ne fonctionnent qu'en CA et/ou si les longueurs de câbles sont trop longues (ex : plus de 20 mètres entre le régulateur et un récepteur et après avoir calculé les chutes de tension).

Astuce : Conseiller le remplacement de vieux récepteurs CA trop consommateurs par des récepteurs CC.

6. Tenir compte de l'évolution possible des besoins du client.
7. Finalement, compléter le tableau suivant avec les informations recueillies :

4.4.1 Tableau : Besoins énergétiques du client

Désignation des récepteurs électriques (marque, type, tension)	Localisation	Qté	X	Puissance * (W)	X	Durée d'utilisation (h)	=	Energie quotidienne consommée (Wh)	Intensité nominale** (A)
Lampe fluorescente, 12V	Cuisine	1	X	8	X	2	=	16	0,67
Lampe fluorescente, 12V	Pièce principale	1	X	8	X	4	=	32	0,67
Lampe fluorescente, 12V	Chambre à coucher	1	X	8	X	2	=	16	0,67
Radio, 3V et son convertisseur	Pièce principale	1	X	5	X	3	=	15	0,42
Consommation totale (Cj)								79	2,42

* La puissance est la puissance électrique consommée par un appareil. Habituellement, la puissance et la tension nominale sont marquées au dos des appareils. S'il n'y a pas d'indication de puissance électrique, ni de courant électrique consommé indiqués, mesurer le courant consommé par l'appareil et sa tension d'alimentation, avec un multimètre et en déduire la puissance ($P = U \times I$). Attention, cette méthode est valable pour les récepteurs alimentés en CC. S'il s'agit de mesurer la puissance d'un appareil fonctionnant en CA, il faut évaluer le *facteur de puissance* du récepteur et utiliser la formule suivante : $P = U \times I \times \text{facteur de puissance}$ (Voir **module 9**).

**Le courant nominal peut être déterminé à partir de la plaque signalétique (par exemple, si l'étiquette indique 8 W – 12V, alors en utilisant la formule : $I = P/U = 8 / 12 = 0,67$ A. Cette formule est valide pour des appareils CC.

Note au formateur :

Le tableau ci-dessus est repris dans le **module 9**. Le module 9 traite spécifiquement du dimensionnement détaillé des systèmes PV.

Jeu de rôle :

Deux participants forment un couple de clients, habitant une maison où ils désirent quelques lampes et un récepteur radio, une TV et un chargeur de téléphone portable. Tous les récepteurs sont en 12 V.

Un participant (ou deux participants) joue le rôle d'un technicien solaire.

Le technicien solaire doit alors estimer les besoins du client, et calculer les besoins énergétiques de ses clients potentiels.

Répéter le jeu de rôle avec les participants, jusqu'à ce que chaque participant ait bien compris comment estimer les besoins quotidiens de la clientèle.

Exercice : Quelles sont les besoins en énergie de la maison où vous vivez actuellement ? ou bien ceux de la maison de vos rêves !

Exercice :

Former des équipes de trois ou quatre techniciens. Donner à chaque équipe, des récepteurs dont la plaque signalétique a été, soit dissimulée, soit enlevée :

Exemple de récepteurs :

- une lampe fluorescente de 7 W, 12 V CC
- une réglette fluorescente de 8 W, 12 V CC
- une lampe fluorescente de 11 W, 12 V CC
- une lampe halogène de 10 W 12 V CC
- une lampe halogène de 20 W, 12 V CC
- une lampe halogène de 50 W, 12 V CC
- diverses ampoules 12 V de voiture
- un radiocassette
- une radio avec convertisseur
- un chargeur 12 V CC de téléphone portable (et téléphone)

Détermination de la puissance électrique de chaque récepteur.

(Les participants auront à réaliser un circuit électrique pour mesurer la tension et l'intensité de fonctionnement pour chaque appareil, et devront calculer la puissance électrique.)

Comparaison des puissances électriques calculées avec celles marquées sur chaque récepteur.

4.4.2 Tableau : Puissance électrique typique de divers récepteurs

Appareil	Puissance	Commentaire
Courant CC		
Réglette ou lampe fluorescente (ballast compris)	4 à 20 W	La puissance consommée dépend largement de la longueur de tube, et dans une moindre mesure de la qualité de fabrication du ballast.
Ampoule incandescente (12 V CC)	3 à 50 W	
Ampoule halogène (12 V CC)	5 à 50 W	
Radiocassette (1,5 V à 6 V CC)	0,5 à 5 W	
Radiocassette (9 V à 12 V CC)	5 à 20 W	
TV noir et blanc (12 V DC)	12 à 15 W	(35 cm de diagonale)
Couleur TV (25 à 35 cm de diagonale)	25 à 35 W	Alimentation en 12 V CC
Couleur TV (43 cm de diagonale)	35 à 50 W	Alimentation en 12 V CC
Magnétoscope (ou lecteur de DVD)	15 à 20 W	
Chargeur de téléphone portable	3 à 20 W	
Ventilateur plafonnier	35 W	
Réfrigérateur (à compression)	60 W	Le compresseur fonctionne 4 à 10 heures par jour
Courant CA <i>(appareils qui nécessitent l'emploi d'onduleur)</i>		
Réglette fluorescente (ballast compris)	4 à 70 W	La puissance dépend de la longueur de tube
Lampe fluo-compacte	4 à 25 W	
Ampoule incandescente	25 à 100 W	
Magnétoscope ou lecteur de DVD	10 à 20 W	
TV couleur (25 à 35 cm de diagonale)	35 à 50 W	
TV couleur (43 cm de diagonale et plus)	50 à 200 W	
Décodeur numérique satellite	15 à 30 W	
Ordinateur portable	30 à 100 W	
Ordinateur de bureau	120 à 200 W	avec écran cathodique
Ordinateur de bureau avec écran plat	80 à 120 W	avec écran plat
Imprimante à jet d'encre	20 à 40 W	
Scanner (à plat)	10 à 50 W	
Réfrigérateur	60 à 200 W	4 à 12 heures par jour
Photocopieur	600 à 2000 W	Rarement sur les petits systèmes
Bouilloire électrique	1000 W et plus	Jamais pour de petits systèmes PV !
Fer à repasser	1000 à 1500 W	
Plaque de cuisson	1000 à 5000 W	

4.5 La ressource solaire

4.5.1 Irradiation ou Ensoleillement (kWh/m².jour)

L'ensoleillement correspond à l'énergie totale quotidienne, en provenance du soleil, reçue par une surface horizontale.

Irradiation = E_j en kWh / m² . jour (kilowattheure par mètre carré et par jour).

L'irradiation n'est pas répartie uniformément sur la surface de la terre, pour les raisons suivantes :

- En raison de la géométrie sphérique de la terre, les régions situées sur l'équateur, comme l'Ouganda, ou proches de l'équateur, comme le Mali, reçoivent plus d'énergie que les régions situées vers les pôles, compte tenu de l'angle d'incidence des rayons solaires.
- L'irradiation varie avec le taux d'humidité dans l'air, la clarté de l'atmosphère (poussières), et les différences d'altitude. Même si deux régions sont à la même latitude, les différences d'irradiation peuvent être importantes. Par exemple, les régions désertiques (avec des climats très secs), reçoivent plus d'irradiation que des régions montagneuses ou des régions en bord de mer.

L'irradiation varie quotidiennement en fonction de la météo (journée ensoleillée ou journée pluvieuse), et varie au cours des saisons¹.

Principe de base

La quantité d'énergie électrique produite par les modules solaires PV est directement proportionnelle à l'Ensoleillement (noté aussi Irradiation) du site où sera installé le système.

Il est donc essentiel de connaître les valeurs d'irradiation (la ressource énergétique solaire) correspondantes à un site donné.

Exercice :

Montrer aux participants la carte ou les données d'ensoleillement du pays où se déroule la formation (ou alors les données d'ensoleillement correspondantes aux régions d'origine des participants).

Faire observer les variations géographiques et mensuelles.

4.5.2 Rayonnement solaire : Puissance maximum = 1000 W/m²

Sur terre, le rayonnement solaire maximal instantané est approximativement de 1000 W par m² à midi et dans les conditions suivantes : soleil au zénith (au-dessus de notre tête), temps très clair, air sec, aucune poussière, aucun nuage (sans pluie).

¹ La terre tourne autour du soleil en une année (le cycle des saisons). En même temps, la terre tourne sur elle-même chaque 24 heures (le cycle du jour et la nuit)

Exercice : Calcul de la surface d'un terrain qui serait nécessaire pour recevoir 3 kW de rayonnement solaire (soit l'équivalent d'un petit groupe électrogène).

Réponse : $3 \text{ kW} = 3\,000 \text{ W} / 1000 \text{ W/m}^2$, c.-à-d. un terrain de 3 m^2 (surface de $3\text{m} \times 1\text{m}$). Ce calcul est valable si le rayonnement solaire est de 1000 W/m^2 . C'est à dire à midi, avec un ciel sans nuage.

Cet exercice démontre que la puissance solaire reçue sur terre est énorme. En-est-il toujours ainsi ?

Exercice : Est-ce que la terre reçoit toujours le même rayonnement du soleil ? Qu'est-ce qui fait varier la puissance solaire arrivant sur terre ?

Réponse : voir ci-dessous

Le rayonnement instantané du soleil reçu sur une surface, varie à tous moments et dépend de :

- l'heure (la position du soleil),
- la météo : pluie, nuages (blancs ou gris),
- la clarté du ciel (la poussière),
- de la localité géographique
- des ombres portées (les masques),
- l'inclinaison de la surface.

Exercice : Durant une journée entière, et toutes les heures, mesure de l'intensité de court-circuit et de la tension en circuit ouvert d'un module solaire, Enregistrement des résultats dans un tableau comme ci-dessous :

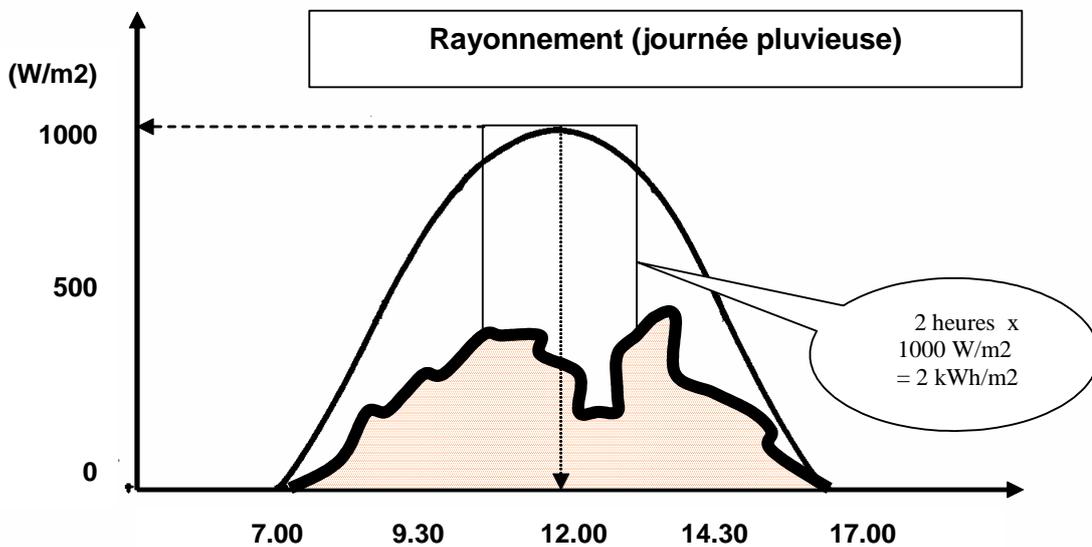
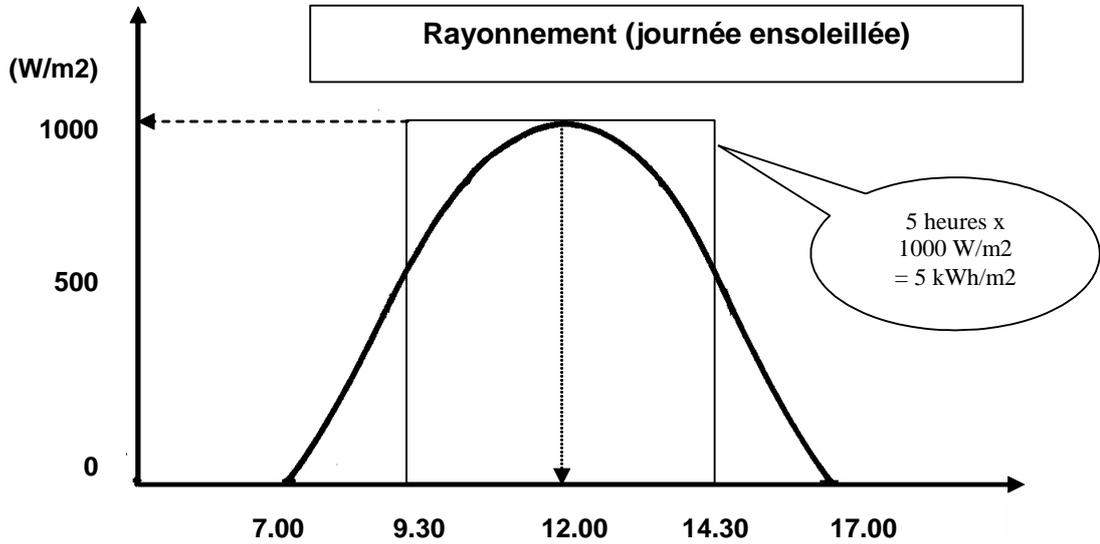
Date	Temps	Description du temps (ensoleillé, nuageux, pluvieux)	Intensité de court-circuit (A)	Tension en Circuit Ouvert (V)
	7.00			
	8.00			
	9.00			
	10.00			
	11.00			
	12.00			
	13.00			
	14.00			
	15.00			
	16.00			
	17.00			
	18.00			
	19.00			

À la fin de chaque journée, tracer un graphique de l'intensité de court-circuit en fonction du temps, en utilisant les données mesurées.

Note au formateur : Cette activité peut se dérouler pendant une journée seulement ou chaque jour d'une semaine. Les participants visualiseront comment la puissance du soleil change au cours du temps et en fonction des éléments extérieurs.

4.5.3 Relation entre Rayonnement solaire et Irradiation

Exercice : Est-ce que les graphiques ci-dessous sont semblables aux graphiques obtenus lors de l'exercice précédent ?
 Réponses : Conclure que l'intensité produite par un module solaire au cours d'une journée est proportionnelle à l'énergie solaire reçue.



La *puissance solaire* (le rayonnement instantané) change tout au long de la journée. Par contre, l'Irradiation augmente tout au long de la journée.

Les deux grandeurs sont reliées entre elles par le facteur Temps ($E = P \times \text{Temps}$).

$$\begin{aligned} \text{Irradiation} &= \text{Rayonnement} \times \text{Temps} \\ (\text{kWh} / \text{m}^2 \cdot \text{jour}) &= (\text{W} / \text{m}^2) \times (\text{heures}) \end{aligned}$$

4.6 Le choix de l'irradiation pour un site

Si les besoins énergétiques de l'utilisateur sont constants au cours de l'année, il est recommandé de choisir l'irradiation mensuelle la plus faible (dans le plan des modules). Ceci, pour s'assurer que, même lors du mois le moins ensoleillé, la batterie pourra être rechargée quotidiennement. En adoptant cette approche, il y aura un excès d'énergie pour les autres mois de l'année, dont l'utilisateur peut bénéficier.

Règle générale :

Il faut choisir la valeur d'irradiation dans le plan des modules et pour le mois le moins ensoleillé.

Principe de base pour orienter et incliner un module PV :

Orientation :

⇒ Une orientation vers le sud dans l'hémisphère nord (ex : Europe, Maroc, Mali, Laos, Soudan) et vers le nord dans l'hémisphère sud (ex : Madagascar, Polynésie française) ;

Inclinaison :

⇒ Sites proches de l'équateur où la latitude est entre 0 et 10° : angle de 10° pour permettre un meilleur écoulement de l'eau de pluie ;

⇒ Pour les pays de latitude supérieure à 10°, le panneau sera souvent incliné à un angle égal à la latitude du lieu pour recevoir un maximum de rayonnement tout au long de l'année ou un peu plus incliné (latitude + 10° ou latitude + 20°) pour recevoir un maximum de rayonnement pendant les mois les plus défavorables.

L'idéal est d'obtenir les données d'ensoleillement mensuel pour plusieurs angles d'inclinaison (ex : horizontal, 15°, 30°, 45°, 60° et 75°). Ces données permettent de choisir l'angle d'inclinaison du panneau et la valeur d'ensoleillement correspondante.

- Les données d'ensoleillement sur un plan horizontal sont suffisantes pour les pays ayant des latitudes comprises entre 0 et + ou – 10° (autour de l'équateur). En effet, le panneau sera installé avec un angle très faible (10° par rapport à l'horizontal).
- Pour les pays de latitude supérieure à 10°, le panneau sera souvent incliné à un angle égal à la latitude du lieu pour recevoir un maximum de rayonnement tout au long de l'année ou un peu plus incliné (latitude + 10° ou latitude + 20°) pour recevoir un maximum de rayonnement pendant les mois les plus défavorables.

4.6.1 Où obtenir et comment choisir les valeurs d'irradiation du site recherché ?

Elles peuvent être fournies par les institutions (ex : Ministère de l'Énergie), la météorologie nationale, ou bien auprès des fournisseurs ou fabricants de matériel photovoltaïque. Il est également possible d'obtenir des données d'ensoleillement sur certains sites internet.

Données d'irradiation solaire sur internet

<http://energy.caeds.eng.uml.edu>

<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

<http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/pv/countries/countries.htm>

Lorsque les valeurs d'irradiation ne sont pas disponibles pour le site concerné, il est possible de déterminer une valeur approchée à partir de valeurs connues sur des sites proches, comme il est illustré dans l'exemple suivant.

4.6.2 Exemple pratique : Kagadi, au Nord-Ouest de l'Ouganda

Il n'y a pas de données directement disponibles pour la zone de Kagadi. Cependant, on peut estimer que les conditions météorologiques de Kagadi sont voisines de celle de Kasese et de Rukoki Mubuku (car ces deux sites sont situés à 100 kilomètres au-dessous de Kagadi), et de Pakwero (situé à 150 kilomètres au-dessus de Kagadi).

Données d'ensoleillement pour quelques villes autour de Kagadi

	Kasese	Rukoki Mubuku (près de Kasese)	Pakwero (40 kms au- dessus de Masindi)
Distance approximative, à vol d'oiseau depuis Kagadi (kilomètre)	100	100	150
Janvier	4.86	5.32	5.44
Février	5.07	5.42	5.30
Mars	5.19	5.35	5.28
Avril	4.99	5.25	5.09
Mai	5.03	5.30	5.34
Juin	4.73	5.13	5.09
Juillet	4.49	4.67	4.38
Août	4.33	4.88	4.71
Septembre	5.06	5.45	5.15
Octobre	4.86	5.06	5.46
Novembre	4.98	5.09	5.31
Décembre	5.22	5.52	5.43
Moyenne par mois	4.90	5.21	5.16

Source : Météo nationale ougandaise – Données en kWh/m².jour sur une surface horizontale.

Il reste à choisir les valeurs minimum mensuelles. La moyenne de 4,33 + 4,67 + 4,38 est de 4,46 soit environ 4,5 kWh/m².jour.

Que signifie cette valeur ? On peut imaginer que c'est comme si le soleil restait à midi pendant 4,5 heures chaque jour (c.-à-d. le soleil se lèverait directement à 9h45 et resterait à la position de midi pendant 4,5 heures, puis se coucherait brutalement à 14h15. L'irradiation est donc égale à 1000 W/m² x 4,5 heures = 4,5 kWh/m². jour !

En pratique, la météo du jour aurait pu être comme ci-dessous :

Conditions 'Météo'		Calcul de l'Irradiation	
Pluvieux pendant 3 heures avec une puissance de 300 W/m ²		= 3 x 300	= 0,9 kWh/m ²
Ensoleillé pendant 3 heures avec une puissance de 700 W/m ²		= 3 x 700	= 2,1 kWh/m ²
Variable pendant 3 heures avec 500 W/m ²		= 3 x 500	= 1,5 kWh/m ²
		Total	= 4,5 kWh/m ²

4.6.3 Remarques sur les fluctuations saisonnières

Les fluctuations saisonnières peuvent être minimes, comme c'est le cas en Ouganda, car l'Ouganda est un petit pays à cheval sur l'équateur. Dans ce cas, les fluctuations sont principalement dues aux saisons des pluies et aux saisons sèches.

Pour certains pays, comme la République du Congo ou le Cameroun, et certains pays côtiers, les fluctuations saisonnières peuvent être importantes (ex : 3 kWh/m².jour pour le mois le moins ensoleillé et 6 kWh/m².jour pour le mois le plus ensoleillé sur le même site). Dans les pays européens, comme la France ou la Hollande, par exemple, les fluctuations saisonnières sont encore plus importantes. L'irradiation en hiver peut être cinq fois plus faible qu'en été (c.-à-d. moins de 1 kWh/m².jour en hiver et au-dessus de 5 kWh/m².jour en été) !

4.6.4 Valeurs d'irradiations illustrant les variations saisonnières

	Pays-Bas	Sud de la France	Pays d'Afrique du Nord	Sahel	Afrique Centrale	Afrique de l'est	Vietnam
Mois le moins ensoleillé	0,45	1,5	4,0	4,8	4,0	4,5	4,3
Mois le plus ensoleillé	4,9	7,0	6,5	7,0	5,5	7,0	6,0
Moyenne annuelle	2,7	4,2	5,0	6,5	5,0	5,5	4,9

Attention : ces valeurs ne sont qu'indicatives. Elles ne doivent pas être utilisées pour des dimensionnements.

Il s'agit de valeurs d'irradiation sur un plan horizontal. Cela signifie par exemple qu'il est possible d'obtenir davantage d'irradiation si on incline le ou les modules afin qu'il soit perpendiculaire au soleil à midi, pendant les mois les moins ensoleillés. Par exemple, dans le sud de la France, un panneau à l'horizontal recevra 1.5 kWh/m².jour, mais incliné à 60 degrés, il recevra de l'ordre de 3,5 kWh/m².jour.

4.7 Le client : satisfaire ses besoins avec la ressource solaire

Si l'on connaît l'*irradiation solaire* du site et les *besoins énergétiques* du client, il est possible d'estimer, avec une précision suffisante, la taille (la puissance crête) du panneau solaire nécessaire.

4.7.1 Formule de calcul de la puissance crête d'un panneau PV

$$\text{Puissance crête du panneau (Wc)} = \frac{\text{Besoins énergétiques du client (en Wh)}}{\text{Irradiation (en kWh/m}^2\text{.jour)} \times 0,70 \times 0,85}$$

Explications importantes
et
conditions d'application de la formule :

- ▶ la formule tient compte des pertes énergétiques dans les divers composants d'un système PV. Les chutes de tension dans les câbles, la chute de puissance causée par l'élévation de température du module en fonctionnement, les chutes de tension au niveau du régulateur et l'incertitude sur les données météorologiques sont prises en considération par le facteur 0,85. Le rendement énergétique de la batterie est pris en compte par le facteur 0,70. Ces valeurs ou coefficients correcteurs (0,70 et 0,85) sont des valeurs moyennes qui sont habituellement utilisées pour les systèmes bien dimensionnés.
- ▶ Le module doit être propre.
- ▶ Le module ne doit pas être ombragé par des arbres ou des bâtiments voisins.
- ▶ Le module doit être bien orienté et bien incliné, selon les règles de l'art (voir **module 10**). La valeur de l'irradiation doit correspondre à l'angle d'inclinaison du module.

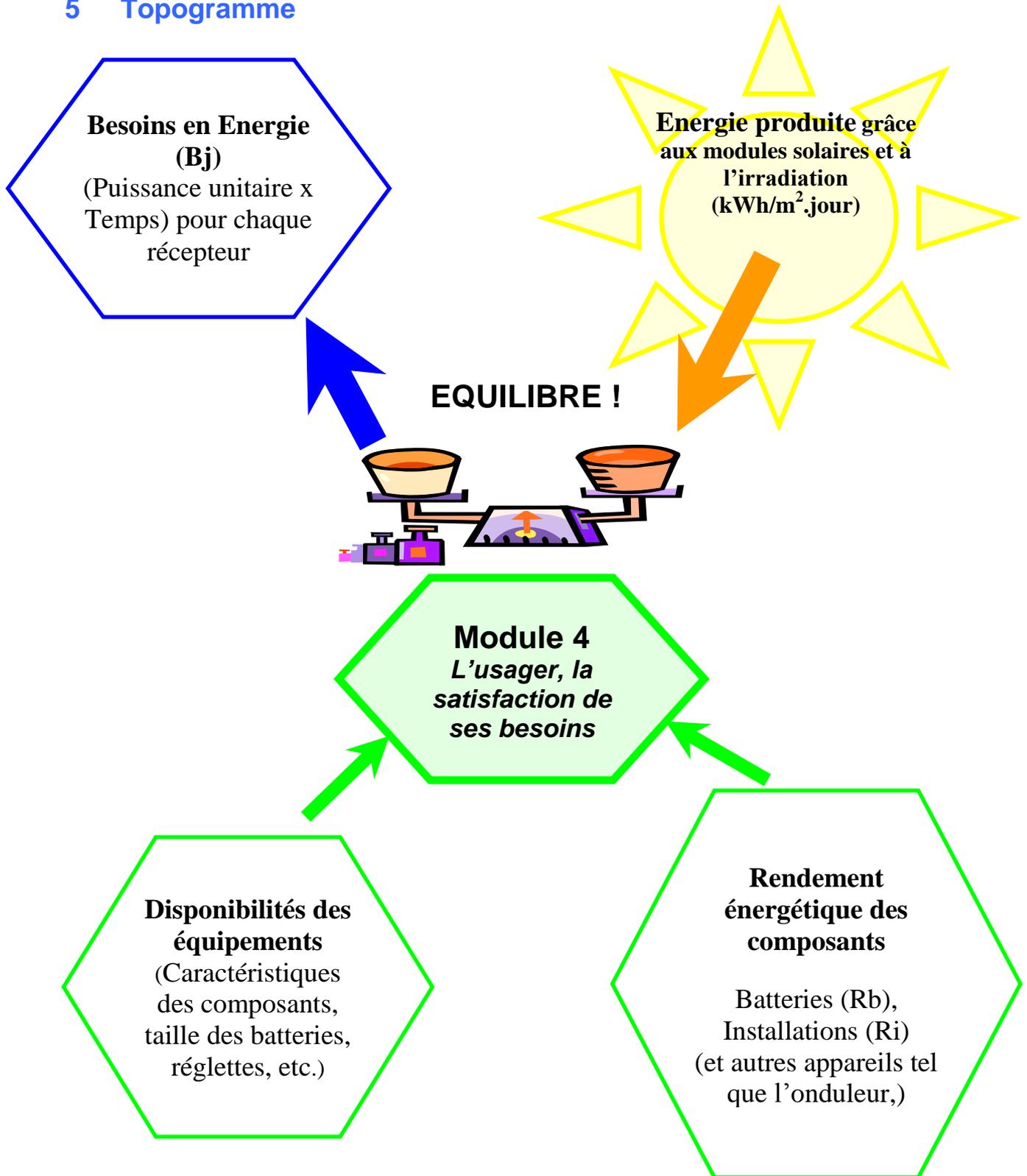
Exemple :

Si l'irradiation quotidienne est de 4,5 kWh/m² dans le plan du module et si les besoins énergétiques sont de 79 Wh par jour, alors la puissance crête du panneau sera de :

$$79 \text{ Wh} / (4,5 \text{ kWh/m}^2 \times 0,70 \times 0,85) = 29,5 \text{ Wc.}$$

Le client a besoin d'un module d'une puissance crête minimum de 30 Wc.

5 Topogramme



$$\text{Puissance crête du panneau} = B_j / (\text{Irradiation} \times R_b \times R_i)$$

6 Évaluation et Feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les principaux concepts et notions du module. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner, dans de bonnes conditions, les modules suivants.

Il est suggéré de demander aux participants (seul ou en équipe) de :

- Réaliser un poster regroupant les 5 étapes nécessaires au dimensionnement.
- Faire un tableau avec la liste des récepteurs les plus couramment utilisés et avec leur puissance respective.
- Calculer la consommation d'énergie du client suivant : 3 lampes de 8 W pendant 5 heures et 1 radio de 6 W pendant 8 heures.
- Expliquer la variation du rayonnement solaire au cours de la journée (en listant les facteurs d'influence).
- Expliquer la variation de l'irradiation au cours d'une journée (en listant les facteurs d'influence).
- Calculer la puissance nécessaire d'un module solaire lorsque l'irradiation quotidienne est de $4,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{jour}$ et que la consommation d'énergie quotidienne est celle calculée ci-dessus.
- Expliquer pourquoi on doit choisir l'irradiation du mois le moins ensoleillé. Dans quel cas, doit-on ne pas suivre cette règle ?

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen².

² Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 5 : Module PV

1	OBJECTIFS	2
2	DURÉE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU.....	3
4.1	Généralités et historique	3
4.1.1	<i>Principe de fonctionnement d'une cellule PV</i>	4
4.2	Divers types de cellules solaires	4
4.2.1	<i>Cellule au silicium monocristallin</i>	4
4.2.2	<i>Cellule au silicium polycristallin</i>	5
4.2.3	<i>Cellule au silicium amorphe</i>	6
4.2.4	<i>Cellules au silicium amorphe multi-jonction (multicouche)</i>	6
4.3	Module photovoltaïque	7
4.3.1	<i>Module au silicium cristallin (mono ou poly)</i>	7
4.3.2	<i>Modules amorphes</i>	7
4.3.3	<i>Boîte de jonction</i>	8
4.3.4	<i>Les diodes Bypass</i>	9
4.3.5	<i>Les diodes anti-retour</i>	9
4.4	Principales caractéristiques d'un module PV.....	10
4.4.1	<i>Puissance crête : P_c</i>	10
4.4.2	<i>Tension de circuit ouvert : U_{co}.....</i>	10
4.4.3	<i>Courant de court-circuit : I_{cc}</i>	11
4.4.4	<i>Variation de la puissance produite</i>	11
4.4.5	<i>Autres variables valides pour la plupart des modules</i>	12
4.4.6	<i>Tableau synthétique : technologie / prix / garantie.....</i>	12
4.5	Association de modules en série ou en parallèle.....	13
4.6	Énergie maximum produite par un module PV.....	14
4.6.1	<i>Orientation des modules.....</i>	15
4.6.2	<i>Inclinaison des modules</i>	15
4.6.3	<i>Module fixe ou module suivant le soleil ?</i>	15
4.7	Contrôle qualité : achat de modules PV.....	16
5	TOPOGRAMME	18
6	ÉVALUATION ET FEEDBACK.....	19

1 Objectifs

Ce module couvre les sujets suivants :

- les différentes technologies de modules solaires photovoltaïques.
- les principales caractéristiques techniques des modules solaires.
- l'estimation de l'énergie produite par un module.
- les aspects de contrôle de qualité lors de l'achat d'un module PV.

2 Durée du module

5 - 8 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Module solaire au silicium monocristallin 10 Wc (ex : module d'une lanterne portable)	1
Module solaire au silicium monocristallin 20 Wc	4
Module solaire au silicium monocristallin 40 Wc	1
Module solaire multi-cristallin (de 20 à 50 Wc)	1
Module au silicium amorphe (11 à 14 Wc)	1
Module solaire amorphe multi-jonction amorphe (32 Wc)	1
Autre type de module solaire (si possible)	1
Calculatrice solaire	5
Multimètre	5
Un ensemble de câbles et d'accessoires	1

4 Contenu

4.1 Généralités et historique

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs statiques capables de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

L'effet photovoltaïque a été découvert par le scientifique français Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque a d'abord été utilisé en photographie, pour mesurer les niveaux de lumière.

Le rendement énergétique de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique était d'environ 1 % au début des années 40. Il aura fallu attendre la fin des années 50, pour que les cellules PV aient un rendement suffisant pour être proposées pour la production d'électricité dans le cadre du programme spatial américain. Le premier satellite avec cellules solaires, Vanguard 1, fut lancé en 1958.

Dans les années 70, les premières applications photovoltaïques terrestres font leur apparition. Au début des années 80, la fabrication de cellules PV a atteint le stade industriel, grâce notamment à l'introduction d'usines partiellement automatisées.

Depuis l'avènement de la production de modules PV et jusqu'à ce jour, la majorité des cellules PV sont fabriquées à partir de silicium polycristallin ou monocristallin. D'autres technologies se sont développées, notamment les technologies à couches minces, notamment le silicium amorphe mono ou multi-jonction.

Jusqu'à présent, les technologies à couches minces ont des rendements plus faibles que les cellules mono ou polycristallines (inférieures à 10%). Les rendements maximum atteignent désormais 25 % pour les cellules au silicium monocristallin en conditions de recherche et jusqu'à 17 % pour les modules disponibles dans le commerce.

Toutes technologies confondues et sur le plan mondial, l'industrie PV produisait 5 MWc de modules en 1982, 560 MWc en 2002 et 1200 Wc en 2004 !

Année	Rendement cellules (maximum)	Production mondiale	Prix
1940	1%	Négligeable	-
1960	10%	Négligeable	> 100 €/Wc
1982	13%	5 MWc	10 €/Wc
2002	25%	1200 MWc	3-4 €/Wc

Exercice 1 : Quelle est la puissance produite par un module PV d'une surface de 1 m^2 sachant que son rendement est de 5 %, et qu'il est placé en plein soleil à midi ?

Réponse : A midi, le rayonnement instantané est de 1000 W/m^2 , par conséquent la puissance produite est de $1000 \times 1,0 \times 5 \% = 50 \text{ W}$. 5 % de l'énergie solaire est transformée en électricité.

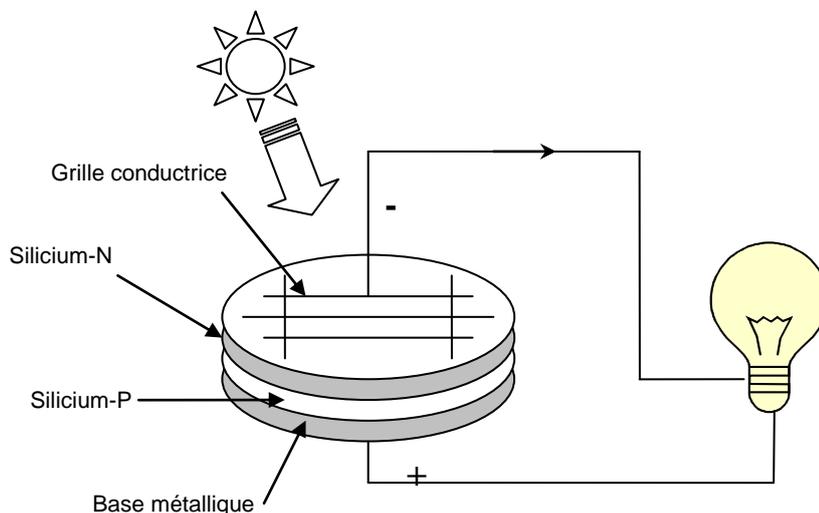
Exercice 2 : Quelle est la puissance produite par un module PV d'une surface de 1 m^2 sachant que son rendement est de 18 %, et qu'il est placé en plein soleil à midi ?

Réponse : La puissance produite serait $1000 \times 1,0 \times 18 \% = 180 \text{ W}$.

4.1.1 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des photopiles ou cellules solaires. La majorité des cellules sont fabriquées à partir de silicium, matériau semi-conducteur utilisé largement dans la fabrication de nombreux composants électroniques (ex : transistors, diodes).

On peut représenter une cellule solaire comme une diode au silicium de grande dimension sensible à la lumière. Quand un photon (particule de lumière) d'énergie suffisante heurte un atome sur la surface avant de la photopile, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire. Il crée alors une différence de potentiel entre le côté "N" et "P" du semi-conducteur.



Une cellule photovoltaïque est fabriquée de manière à ce qu'un électron libre ne puisse se recombiner avec un atome en charge positive avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur.

La quantité d'électricité (c.a.d. le nombre d'électrons en mouvement) dépend du nombre de photons, donc directement de la lumière reçue par la cellule solaire.

4.2 *Divers types de cellules solaires*

4.2.1 Cellule au silicium monocristallin

Une cellule au silicium monocristallin est fabriquée à partir d'un lingot de silicium cristallin très pur. Ce lingot est découpé en tranches très fines (0,1 à 0,3 mm d'épaisseur). La surface de cette tranche (disque) reçoit ensuite différents traitements physico-chimiques (dopage, etc.). Elle devient alors capable de créer une différence de potentiel (une différence de tension) entre la face illuminée au soleil et l'arrière. Un réseau de conducteurs métalliques fins est appliqué à l'avant de la cellule et le dos est métallisé sur toute sa surface. Finalement, un traitement anti-réfléchissant est alors appliqué à la surface avant. Le courant produit est du courant continu. Le dessus de la cellule est le négatif, alors que le dessous est positif.

Les cellules monocristallines sont généralement circulaires ou semi-circulaires (à moins qu'elles n'aient été découpées en d'autres formes). Elles sont de couleur bleu foncé uniforme, presque noire pour certaines. Les rendements de cellule varient entre 14 et 18 %.

- ▶ Une cellule de 100 cm^2 (10 cm x 10 cm) produira typiquement un maximum de 1,8 W avec une tension de 0,5 V, en plein soleil (c.-à-d. 1000 W/m^2 ou encore 100 mW/cm^2).

Les fabricants garantissent les modules fabriqués avec ce type de cellules, jusqu'à 30 ans. En général, la garantie stipule que le module produira au moins 80 à 90 % de sa puissance nominale d'origine, après 30 ans sous le soleil !

Exercice : Estimation de la puissance maximum du module

Montrer un module au silicium monocristallin de 10 Wc. Insister sur la couleur bleu-foncé uniforme et le réseau des conducteurs métalliques fins.

- Combien de cellules compte le module ?
- Comment sont connectées les cellules ? en série ou en parallèle ?
- Quelle est la surface d'une cellule ?

Réponse : la surface de chaque cellule est de 16 cm^2 . Les cellules sont toutes identiques. La puissance fournie par chaque cellule est :

$$\begin{aligned} 100 \text{ cm}^2 &>>>>>>>>> 1.8 \text{ W} \\ 16 \text{ cm}^2 &>>>>>>>> 16 / 100 \times 1,8 \text{ W} = 0,288 \text{ W} \end{aligned}$$

Le module a 36 cellules. Sa puissance maximum est de $0,288 \times 36 \text{ cellules} = 10,3 \text{ W}$. (Puissance totale du module = Puissance de chaque cellule x nombre de cellules).

Comparer les résultats de ce calcul avec ce qui est écrit au dos du module : 10 Wc !

4.2.2 Cellule au silicium polycristallin

Une cellule polycristalline est fabriquée de manière similaire à une cellule au silicium monocristallin, mais à partir d'un lingot de silicium multicristallin, obtenu par fonte ou laminage. Pour cette raison, les coûts de fabrication sont légèrement inférieurs aux cellules au silicium monocristallin.

Les cellules sont généralement de forme carrée ou rectangulaire. Les cellules sont bleues avec des motifs (reflets), semblables à ceux visibles sur une tôle d'acier galvanisé.

Le rendement des cellules au silicium polycristallin est légèrement inférieur à celui des cellules au silicium monocristallin (12 à 14 %).

- ▶ Une cellule de 100 cm^2 (10 cm x 10 cm) produira typiquement un maximum de 1,5 W avec une tension de fonctionnement de 0,5 V en plein soleil.
- ▶ Une cellule de 225 cm^2 (15 cm x 15 cm) produira typiquement un maximum de 3,6 W avec une tension de fonctionnement de 0,5 V en plein soleil

Les fabricants garantissent les modules polycristallins, jusqu'à 25 ans. En général, la garantie stipule que le module produira au moins 80 à 90 % de sa puissance nominale d'origine, après 25 ans sous le soleil !

Exercice : Identification des différences entre modules au silicium mono ou polycristallin, en montrant différents types de modules.

4.2.3 Cellule au silicium amorphe

La plupart des cellules au silicium amorphe sont fabriquées par dépôt de silicium amorphe sur une plaque de verre. La quantité de silicium requis dans le processus de fabrication est bien inférieure aux technologies des cellules au silicium mono ou polycristallin. Ceci a un impact favorable sur le prix au Wc.

Le principal inconvénient est que leur rendement est assez faible à leur sortie d'usine. De plus, il a une tendance à décroître avec le temps, pour se stabiliser entre 4 et 7 % pour la plupart des modules.

Puisque leur rendement est assez bas, la taille d'une cellule est environ deux fois plus grande que la taille des cellules au silicium monocristallin, pour une même puissance électrique délivrée.

Chaque cellule donne une tension à vide de 0,5 à 0,7 V.

Les cellules sont de couleur marron foncé, et disposées en couches séparées par des lignes très fines (procédé de fabrication entièrement automatique).

Les fabricants offrent des garanties sur la puissance fournie allant jusqu'à 10 ans.

4.2.4 Cellules au silicium amorphe multi-jonction (multicouche)

Ces cellules sont constituées de plusieurs couches superposées de silicium amorphe ; chaque couche étant réceptive à une certaine fraction du rayonnement solaire. Les rendements sont supérieurs aux cellules au silicium amorphe (mono-couche). Les prix des modules triple-jonction fabriqués, par exemple par Unisolar, sont compétitifs.

Les modules d'Unisolar sont légers et presque incassables, car le dépôt des couches de silicium est réalisé sur un support métallique souple, et non sur du verre.

Comme les modules au silicium amorphe, leur rendement est plus élevé lors des premiers mois d'exposition au soleil, puis le rendement se stabilise à des valeurs conformes aux données constructeur.

Les fabricants offrent des garanties sur la puissance fournie allant jusqu'à 20 ans.

4.3 Module photovoltaïque

4.3.1 Module au silicium cristallin (mono ou poly)

Il est constitué d'un ensemble de cellules le plus souvent reliées en série : 18 cellules pour 9 V, 36 cellules pour 18 V (tension circuit ouvert). Au stade de la fabrication, les cellules sont testées électriquement individuellement et triées par ordre de puissance. Les cellules de puissance voisine sont alors connectées en série pour former un module.

Pour obtenir un module résistant durablement aux intempéries, les cellules sont encapsulées. L'encapsulation est réalisée entre une plaque de verre trempé (épaisse de 3 à 4 mm et à faible teneur en fer) et une feuille de tedlar. L'encapsulant, de l'EVA¹ résistant aux ultra-violets, enrobe les cellules à l'intérieur et assure des conditions de fonctionnement optimales. La face arrière du module est étanche et protégée des dommages mécaniques par plusieurs feuilles de polymères (tedlar). Finalement, le module est doté d'un cadre en aluminium suffisamment rigide pour pouvoir fixer le module en toiture ou sur poteau.

Un module avec une tension en circuit ouvert de 18 V – 21 V permettra de charger des batteries de 12 V. Pour cette raison, la plupart des modules utilisés pour les systèmes domestiques sont constitués de 36 cellules.

Depuis la fin des années 90, des modules constitués de 72 cellules (2 guirlandes de 36 cellules branchées en parallèle ou alors 72 cellules connectées en série) sont apparus sur le marché. Ils ont des puissances comprises entre 110 Wc et 240 Wc. Dans les années 1980, il fallait obligatoirement 4 modules pour produire une telle puissance !

La puissance unitaire des modules les plus courants oscille entre 50 et 100 Wc.

Pour les applications nécessitant moins de 50 Wc, les modules sont fabriqués à partir de fractions de cellules.

Exercice : Mesurer la surface des cellules des modules au silicium monocristallin suivants : 10 Wc, 20 Wc et de 40 Wc ?

Quelles sont les informations indiquées au dos de chaque module ? Comparer les surfaces des modules avec leur puissance. Que peut-on conclure ?

Réponses / conclusions : La surface des cellules du module de 20 Wc est deux fois plus grande que celles du module de 10 Wc. La taille des cellules du module de 40 Wc est quatre fois plus grande que celle du module de 10 Wc. Conclusion : Pour un type donné de module, la puissance d'un module est proportionnelle à la surface de ces cellules.

Exercice : Quelle est la tension à vide de chacun des 3 modules suivants : 10 Wc, 20 Wc et 40 Wc ?

Réponse : Les tensions sont identiques à quelques dixièmes de volts près. C'est logique, puisque chacun de ces 3 modules a 36 cellules. Chaque cellule, quelque soit sa taille, produit une tension à vide d'environ 0,5 V.

Conclusion : La tension à vide (en circuit ouvert) dépend seulement du nombre de cellules.

4.3.2 Modules amorphes

¹ EVA : Ethylène vinyle acétate (composé plastique)

Les modules au silicium amorphe mono jonction ont l'avantage de pouvoir être fabriqués à la puissance désirée. Il suffit de diminuer ou d'augmenter la taille des cellules dans le sens de la longueur (une cellule faisant toujours 1 cm de large) pour avoir la puissance nécessaire et de couper selon le nombre de cellules nécessaire à la tension désirée. Toutefois, la taille maximum est limitée par des contraintes de fabrication. En conséquence, les puissances varient depuis quelques milliwatts à 50 Wc environ. Les modules multi-jonction ont des puissances variant entre 3 et 64 Wc.

Exercice : Quel type de module solaire est utilisé pour les calculatrices solaires ?

Calcul du nombre de cellules sur un module amorphe (11 Wc ou 14 Wc) et estimation de la tension à vide.

Réponse : 36 ou 38 cellules séparées chacune par un trait très fin. Toutes les cellules sont en série. La tension à vide est de : $36 \times 0,5 \text{ V} = 18 \text{ V}$.

Mesure de la tension à vide avec un multimètre.

Réponse : Le résultat de la mesure doit être d'environ 18 à 21 V selon l'ensoleillement. Conclure que, pour la plupart des modules solaires, on peut estimer la tension à vide en comptant le nombre de cellules du module.

(Attention toutefois aux modules de grande taille qui peuvent compter 72 cellules (soit les 72 cellules sont en série pour atteindre 36 V – soit il y a deux guirlandes de 36 cellules en série, raccordées en // pour un module 18 V – tension de circuit ouvert).

Exercice : Quelle est la surface du module de 10 Wc (silicium monocristallin) ? Quelle est la surface du module 11 Wc (silicium amorphe) ?

Quel est le module le plus grand en taille ?

Quel est le plus puissant en Wc (en lisant le label au dos de chaque module) ?

Pourquoi ont-ils quasiment la même puissance, mais des tailles très différentes ?

Réponse : Le module solaire de 10 Wc est presque deux fois plus petit en taille que le panneau amorphe, mais produit la même puissance ou presque. C'est logique puisque le module au silicium monocristallin a un rendement de conversion (14 %) deux fois plus élevé que le module au silicium amorphe (4 - 6 %).

4.3.3 Boîte de jonction

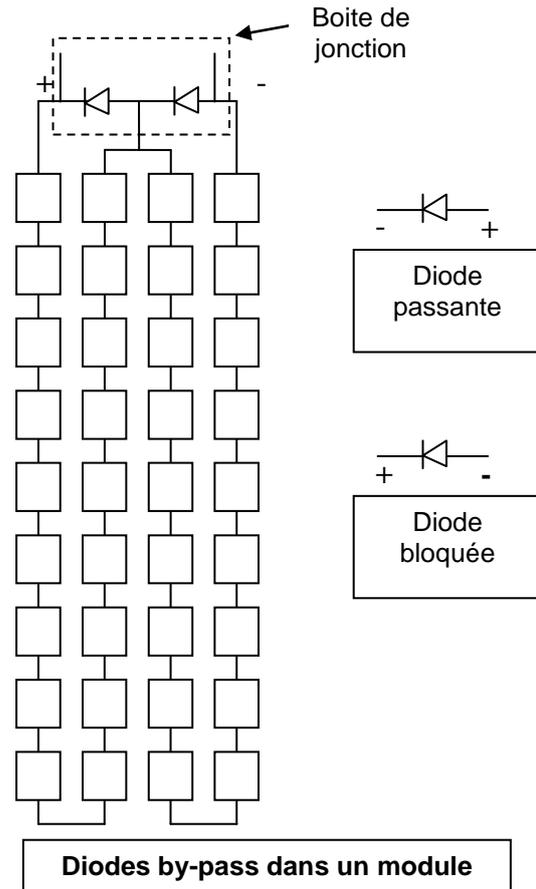
Le courant produit par un module est disponible au niveau de la boîte de jonction. Les conducteurs en provenance des *guirlandes* de cellules sont raccordés dans la boîte de jonction sur un bornier.

Dans le cas d'un système avec un seul module, le câble en provenance du régulateur est connecté simplement dans la boîte de jonction. Dans les systèmes avec plusieurs modules, les modules sont reliés entre eux en parallèle (plus rarement en série) par l'intermédiaire des boîtes de jonction (ou 'boite de connexion' ou boite de 'mise en parallèle'). Ils forment alors un panneau.

4.3.4 Les diodes Bypass

Dans certains cas, à l'intérieur de la boîte de jonction, des diodes peuvent être visibles. Ce sont des diodes by-pass, placées en parallèle sur les 2 guirlandes de 18 cellules chacune.

Elles peuvent être montées d'origine dans la boîte de jonction de certains modules solaires (comme indiqué sur le schéma ci-contre) ou bien installées dans le circuit si nécessaire (voir schéma ci-dessous). Comme leur nom l'indique, elles permettent de by-passer un module (ou une série de cellules du module) si ce dernier est défectueux (ou très ombragé). Elles sont montées de telle sorte qu'elles sont bloquées lorsque le panneau produit de l'électricité et passantes dans le cas contraire. Lorsqu'elles sont passantes, elles supportent le courant qui les traverse.



Elles sont surtout utiles pour des installations avec une tension d'au moins 24 V. Dans ce cas, il y a plusieurs modules en série et elles protègent les cellules d'un échauffement (noté 'hot spot') dû au passage du courant qui traverserait le module défectueux. Le courant traverse alors les diodes by-pass, et non le module.

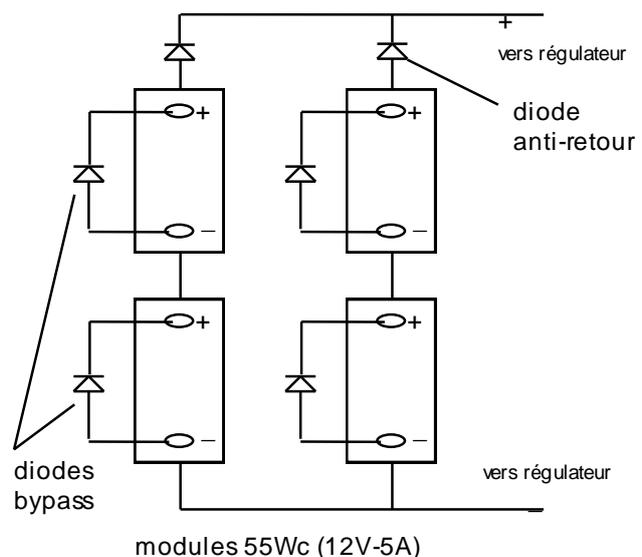
Si les diodes by-pass sont préinstallées dans la boîte de jonction par le fabricant, les laisser en place, même si l'installation est en 12 V.

Il ne faut pas confondre les diodes by-pass avec les diodes anti-retour.

4.3.5 Les diodes anti-retour

Les diodes anti-retour ont pour rôle d'empêcher un courant inverse de la batterie vers les panneaux, la nuit. Elles ne sont pas nécessaires dans les cas suivants :

- ▶ Si le régulateur est déjà équipé d'une diode anti-retour.
- ▶ Si la perte d'énergie due à la présence d'une diode anti-retour ($E = U \times I \times t$) pendant la journée est supérieure à l'énergie perdue pendant la nuit, lorsque un faible courant de la batterie traverse le ou les modules.



4.4 Principales caractéristiques d'un module PV

<ul style="list-style-type: none"> • Puissance crête (Wc) • Courant de court-circuit (A) • Tension de circuit ouvert (V) 	<p>Pc</p> <p>Icc</p> <p>Uco</p>	<p>Ex : 7, 14, 60 à 160 Wc par module</p> <p>Ex : 3,65 A pour un module de 60 Wc</p> <p>Ex : 20,7 V pour un module de 60 Wc</p>		
<ul style="list-style-type: none"> • Tension de fonctionnement 		Ex : 12 V ou 24 V		
<ul style="list-style-type: none"> • Technologies les plus communes 		Durée de vie	Garantie offerte par les fabricants	
	Silicium monocristallin	Cellules bleu-nuit uniformes	15 à 30 ans	10 à 30 ans
	Silicium polycristallin	Cellules bleues avec des motifs	15 à 30 ans	10 à 25 ans
	Silicium amorphe	Cellules de couleur marron	5 à 20 ans	5 à 10 ans

4.4.1 Puissance crête : Pc

C'est la puissance maximum en **Watts crêtes (Wc)** qu'un module peut produire dans les conditions suivantes : le rayonnement est de 1000 W/m^2 , la température des cellules du module est à 25°C et AM^2 égal à 1,5.

En pratique, le rayonnement atteint rarement 1000 W/m^2 et la température des cellules est bien plus élevée que 25°C , donc la puissance produite sera inférieure à la puissance crête (Pc).

Toutefois, en première approximation, on peut dire que, par exemple, un module de 50 Wc produira 50 W en plein soleil à midi, si bien entendu il fait face au soleil.

4.4.2 Tension de circuit ouvert : Uco

C'est la tension mesurée avec un multimètre quand le module ne produit pas de courant.

- Uco est pratiquement constante quelque soit le niveau de rayonnement.
- Uco est directement proportionnelle au nombre de cellules en série dans un module. Uco est d'environ 0,5 à 0,7 V pour chaque cellule (ex : un module avec 36 cellules en série a une tension de circuit ouvert de $36 \times 0,6 = 21,6 \text{ V}$).

Exercice : Mesure de Uco pour plusieurs modules différents et à différentes heures de la journée (chaque heure, depuis 8h00 à 18h00). Noter les résultats dans un tableau.

Réponse : En fin de journée, conclure que Uco n'a varié que de quelques volts. Uco est restée comprise entre 16 V et 21 V, (même par temps nuageux) ; Uco est toujours supérieure à 12 V, ce qui est suffisant pour charger une batterie 12 V.

² AM = (Air Mass). Ceci correspond à l'épaisseur de l'atmosphère que les rayons du soleil doivent traverser pour atteindre la surface de la terre. AM = 1, lorsque le soleil est perpendiculaire à la surface de la terre. AM = 1,5 signifie que le soleil est à 41 degré de hauteur par rapport à l'horizontal. Plus AM est élevé, plus le rayonnement solaire est atténué.

4.4.3 Courant de court-circuit : Icc

Icc est le courant produit par un module quand il est court-circuité, par exemple par un multimètre (en position mesure d'intensité).

IMPORTANT : Il n'est pas dangereux de court-circuiter un module solaire car l'intensité est limitée par la puissance du soleil. Cependant, on ne doit jamais court-circuiter un module quand il est relié à un régulateur ou à une batterie.

- Icc est directement proportionnel à la taille de cellules (par exemple un module avec des cellules de 10 cm x 10 cm aura une Icc deux fois plus élevée qu'un module avec des cellules de 10 cm x 5 cm).

Exercice : Mesure de Icc des trois modules suivants : 10 Wc, 20 Wc et 40 Wc, (l'exercice doit être réalisé avec 3 modules de même technologie : ex. silicium monocristallin).

Réponse : Les mesures doivent être réalisées en même temps pour pouvoir comparer les trois modules. Icc du module 40 Wc est 4 fois plus élevée que Icc du module 10 Wc. Icc du module de 20 Wc est deux fois plus élevée que Icc du module 10 Wc. Icc est directement proportionnelle à la taille (surface) des cellules de chaque module.

- Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement instantané (la force du soleil à l'instant t).

Exercice : Mesure de Icc, chaque heure, de 8h00 à 18h00, pour au moins 3 modules différents et mesure de Icc d'un module en jouant rapidement sur son orientation et en observant varier Icc.

Résultats : Icc varie proportionnellement avec la quantité de rayonnement instantané.

4.4.4 Variation de la puissance produite

- La puissance fournie et Icc sont quasiment proportionnelle au rayonnement reçu et à la taille des modules (Pc).

Exemple de comportement type	Rayonnement instantané (W/m ²)		Uco (V)	Icc (A)	Puissance (W)
Module de 60 Wc	100 (nuages gris à midi)		15	0,36	6
	500 (nuages blancs à midi)		19	1,8	30
	1000 (ciel clair à midi)		20	3,65	60

Exercice : Lecture de notices techniques de modules PV : la caractéristique I-V (Courant-Tension). Suggestion d'exercice : On peut aussi tracer la courbe I-V en mesurant I et U sur un module connecté sur une résistance variable, que l'on fait varier de 0 ohm à l'infini.

- La puissance fournie par un module diminue de 0,5 % par °C au-dessus d'une température de cellules de 25°C (par rapport à sa P_c)³.

Exemple : Avec une température ambiante de 25°C et à midi, en plein soleil, il est probable que les cellules du module soient à une température de 50°C⁴. Dans ce cas, la perte de puissance d'un module de 60 Wc, par exemple, sera de $60 \times 0,5/100 \times (50 - 25) = 7,5 \text{ W}$.

Il est donc important de réduire la température de fonctionnement des modules pour limiter les pertes de puissance. Pour cette raison, on ne doit jamais installer un module directement sur un toit en tôle ondulée, mais laisser un espace d'au moins 20 cm pour une bonne ventilation.

- Les modules deviennent très chauds en fonctionnement, d'autant plus chauds qu'il y a du soleil et que la température ambiante est élevée. C'est normal, puisqu'ils produisent de la chaleur au moment même où ils produisent de l'électricité. Ils convertissent seulement entre 5 et 20 % de l'énergie du soleil en électricité, le reste de l'énergie solaire est transformé en chaleur (énergie calorifique).

4.4.5 Autres variables valides pour la plupart des modules

- La plupart des modules ont une face avant en verre. Par conséquent, les modules doivent être manipulés avec précaution afin d'éviter tout dommage.

4.4.6 Tableau synthétique : technologie / prix / garantie

Type de technologie	Rendement	Prix (€/Wc)	Garantie du fabricant (en années)	Années d'expériences avec la technologie
silicium monocristallin	14 à 18 %	3 - 5	10 à 30	35
Silicium polycristallin	12 à 14 %	3 - 4	10 à 25	25
Silicium amorphe, couche mince	4 à 7 %	3	5 à 10	15
Silicium amorphe multi-jonction	8 à 10 %	3	5 à 20	> 5

(les prix indiqués sont ceux du marché mondial, pas le prix de détail' - Année 2002/2003 source Paul Maycock - éditeur PV News)

³ Ceci est la conséquence du coefficient de température en tension U_{co} de l'ordre de $-0,08 \text{ V}/^\circ\text{C}$ (module de 36 cellules) et du coefficient de température en courant I_{cc} qui est de l'ordre de $+0,065 \text{ \%/}^\circ\text{C}$.

⁴ La température de cellule dans des conditions normales d'opération est une donnée fournie par les constructeurs. Elle est notée NOCT : Température normale de fonctionnement des cellules, dans des conditions d'irradiation solaire de 800 W/m^2 , à 20°C de température ambiante, à une vitesse de vent de 1 m/s. Elle est de l'ordre de 25 à 30°C au-dessus de la température ambiante.

4.5 Association de modules en série ou en parallèle

Exercice : Branchement de deux modules de 20 Wc en parallèle (noté //), puis trois modules de 20 Wc en parallèle et mesures de Uco et Icc dans chacun des cas.

Exercice : Branchement d'un module de 20 Wc en parallèle avec un module de 40 Wc et mesures de Uco et Icc.

Règles : modules en //

L'intensité produite par le panneau est la somme des intensités produites par chaque module.

$$\mathbf{Icc_{panneau} = Icc_{module\ 1} + Icc_{module\ 2} + Icc_{module\ 3}}$$

La tension du panneau est égale à la tension de chaque module.

$$\mathbf{Uco_{panneau} = Uco_{module\ 1} = Uco_{module\ 2} = Uco_{module\ 3}}$$

La puissance du panneau est égale à la somme des puissances de chaque module.

$$\mathbf{Puissance_{panneau} = P_{module\ 1} + P_{module\ 2} + P_{module\ 3}}$$

Pour augmenter la puissance d'une installation, il suffit de rajouter des modules de même Uco (c.-à-d. 36 cellules), même s'ils ont des puissances unitaires différentes.

Exercice : Branchement de deux modules 20 Wc en série et mesures de Uco et Icc.

Règles : modules en série (de même puissance unitaire)

L'intensité est égale à l'intensité du module le plus faible.

$$\mathbf{Icc_{panneau} = Icc_{module\ 1} = Icc_{module\ 2}}$$

La tension produite par le panneau est la somme des tensions de chaque module.

$$\mathbf{Uco_{panneau} = Uco_{module\ 1} + Uco_{module\ 2}}$$

La puissance du panneau est égale à la somme des puissances de chaque module.

$$\mathbf{Puissance_{panneau} = P_{module\ 1} + P_{module\ 2}}$$

Note : En pratique, pour les petits systèmes solaires, il n'est pas nécessaire de relier des modules en série sauf si le système se compose de batteries 24 V ou 48 V.

Exercice : Branchement d'un module de 20 Wc en série avec un module de 40 Wc et mesures de Icc et Uco.

Conclusion : Le courant résultant est celui du plus petit module et les tensions s'ajoutent. Le module le plus puissant fonctionne bien en dessous de sa capacité.

Règles : modules en série (de puissance différente)

Ne **jamais connecter** en série des modules de puissance crête différente, pour les raisons suivantes :

L'intensité est celle du module le plus petit (qui impose son courant).

$$I_{cc \text{ panneau}} = I_{cc \text{ module le moins puissant}}$$

La tension produite par le panneau est la somme des tensions produites par chaque module.

$$U_{co \text{ Panneau}} = U_{co \text{ module 1}} + U_{co \text{ module 2}}$$

La puissance du panneau est égale à deux fois la puissance du module le plus petit. Il y a donc perte de puissance.

$$P_{\text{puissance Panneau}} = 2 \times P_{\text{module le plus petit}}$$

4.6 Énergie maximum produite par un module PV

L'énergie maximum produite par un module au cours d'une journée peut être calculée en multipliant sa puissance crête par l'irradiation reçue par le module au cours d'une journée.

$$\text{Energie produite par le module (Wh)} = E_j \text{ (kWh/m}^2\text{.jour)} \times P_c \text{ (Wc)}$$

où **Pc** : Pc est donnée par le fabricant (Wc)

Ej : dans le plan du module est déterminée à partir des données météorologiques

IMPORTANT : Les résultats de ces calculs sont valables dans les conditions suivantes :

- La valeur de E_j doit être celle correspondant à l'angle d'inclinaison du module. Si le module est incliné à 30° , il faut connaître E_j pour cet angle d'inclinaison.
- Dans les pays proches de l'équateur (comme l'Ouganda ou le Burkina Faso), les modules sont installés très peu inclinés (10° par rapport à l'horizontal). Dans ce cas de figure, les données d'irradiation sur un plan horizontal sont suffisantes.
- Le module doit être propre.
- Le module n'est ombragé par aucun arbre ou bâtiment voisin.

Exemple de calcul :

Si l'irradiation quotidienne est $4,5 \text{ kWh/m}^2\text{.jour}$, un module de 60 Wc produira $60 \text{ Wc} \times 4,5 \text{ kWh/m}^2\text{.jour} = 270 \text{ Wh}$.

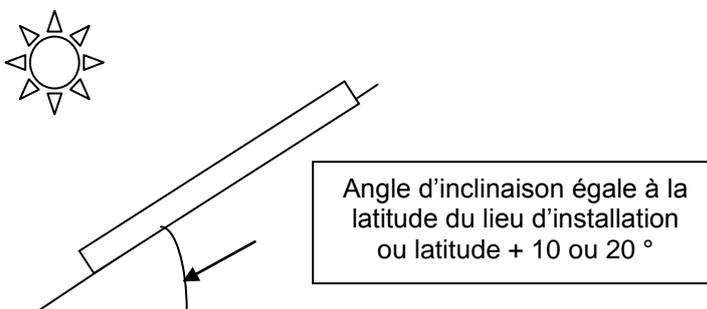
4.6.1 Orientation des modules

Afin de pouvoir recevoir le plus d'énergie solaire disponible au cours de l'année, il est conseillé d'orienter les modules plein sud dans l'hémisphère nord (ex : Mali, Cameroun, Laos) et plein nord dans l'hémisphère sud (ex : Madagascar, Polynésie française). En Ouganda et dans tous les pays à cheval sur l'équateur, il est nécessaire de vérifier si le site se trouve au sud de l'équateur, ou au nord de l'équateur.

4.6.2 Inclinaison des modules

a) Sites proches de l'équateur où la latitude est entre 0 et 10° : choisir un angle d'inclinaison de 10° pour permettre un meilleur écoulement de l'eau de pluie ;

b) Pour les pays de latitude supérieure à 10°, le panneau sera souvent incliné à un angle égal à la latitude du lieu pour recevoir un maximum de rayonnement tout au long de l'année ou un peu plus incliné (latitude + 10° ou latitude + 20°) pour recevoir un maximum de rayonnement pendant les mois les plus défavorables.



Cas des pays près de, ou à cheval sur l'équateur :

Lorsque les sites ont des latitudes comprises entre 0° et 10° (comme l'Ouganda dont la latitude varie entre 4 degrés au nord et 1,5 degrés au sud), les modules pourraient être installés pratiquement à plat, afin de recevoir le maximum d'ensoleillement au cours de l'année.

En contre partie, l'irradiation réellement captée par les modules peut être réduite, car une installation à plat des modules a l'inconvénient de favoriser les accumulations de poussières, les champignons et les mousses, et ne permet pas un bon écoulement de la pluie. Ceci a aussi pour effet de nuire à la durabilité des modules car le mauvais écoulement de l'eau de pluie, peut causer des infiltrations d'humidité à l'intérieur du module. Il est désormais d'usage d'incliner les modules entre 10° à 15°, ce qui permet un bon écoulement de la pluie et, en quelque sorte, un 'auto nettoyage'.

4.6.3 Module fixe ou module suivant le soleil ?

Pour optimiser la capture de l'énergie solaire, on peut monter le module sur une structure qui permet manuellement (ou automatiquement) de suivre le soleil depuis le lever jusqu'au coucher. On peut récupérer jusqu'à 20 % d'énergie supplémentaire. Mais attention, ceci rend le système plus complexe (à installer et à maintenir) et demande une forte participation de l'utilisateur (cas d'un système manuel). Pour ces raisons, dans la grande majorité des cas, il est préférable de prévoir une installation fixe des modules, pour des raisons de pérennité du système.

4.7 Contrôle qualité : achat de modules PV

La plupart des modules PV sont produits suivant des processus d'assurance qualité très poussés. Cependant, certains fournisseurs peuvent essayer d'embellir la réalité : exagération de la puissance crête notamment, sans information crédible à la clé.

Il faut savoir par exemple que deux modules de même dimension, même type, même marque, n'ont pas forcément la même puissance crête ; la différence peut atteindre 10 à 20 %. Ce n'est pas un problème en tant que tel, si la puissance crête est clairement marquée au dos de chaque module....ce qui n'est pas toujours le cas.

Exercice : Identification de modules de même dimension (même taille de cellules), mais de différentes puissances crêtes, par la lecture des notices techniques de fabricants de modules (en annexe pour le **module 5**).

1. Préférer les modules avec label fixé au dos (avec P_c , I_{cc} et U_{co})

Puissance crête (Wc)	53 Wc	aux conditions standard : 1000 W/m ² , température cellule : 25°C, AM 1,5	
Courant de court circuit (A)	3,27 A		Idem
Tension de circuit ouvert (V)	21,8 V		Idem
Point de Puissance maximum (Pmax) Tension à Pmax Courant à Pmax	53 W 17,4 V 3,05 A		

Les informations au dos d'un module varient selon les fabricants. Certaines sont très complètes, donnant, par exemple, la puissance fournie dans des conditions réelles et fréquentes de fonctionnement (par exemple 800 W/m², température de cellules 60°C) tandis que d'autres, ne font apparaître que la marque et le modèle du module.

- Préférez des modules conformes : à la norme internationale IEC-61215 pour les modules mono ou multi cristallins et à la norme IEC 61646 pour les modules amorphes, ou à la norme nationale utilisée dans votre pays.
- Si le module n'a pas de label, demander au moins les notices techniques du produit.
- Ne pas acheter un module solaire en se basant uniquement sur sa taille physique ! Deux modules de la même technologie, de même dimension (donc même taille de cellule), peuvent avoir des puissances crêtes très différentes (ex : 42 Wc et 52 Wc ; ou 150 Wc à 180 Wc)
- Si aucune documentation ou label n'est disponible, soyez méfiant. Eviter d'acheter le module. Il est aussi conseillé de faire des mesures comparatives de I_{cc} et U_{co} , avec d'autres modules dont les performances sont connues.

2. Calculer le prix du Watt crête (FCFA / Wc ou €/Wc)

Il suffit de diviser le prix du module par sa puissance crête. Ceci est d'autant plus facile que les informations sur la Pc sont sûres (label au dos du module).

Exercice :

Calcul de prix en €/FCFA. Un fournisseur propose un module de 20 Wc à 132 750 FCFA, 1 module de 50 Wc à 190 000 FCFA et un module de 75 Wc à 275 000 FCFA. Calcul des prix en FCFA / Wc et choix des modules si la puissance crête de l'installation doit être de 150 Wc.

Réponses : *Module 20 Wc* → $132\ 750 / 20 = 6600$ FCFA / Wc
 Module 50 Wc → $190\ 000 / 50 = 3800$ FCFA / Wc
 Module 75 Wc → $275\ 000 / 75 = 3666$ FCFA / Wc

Il faut choisir 2 modules de 75 Wc, (550 000 FCFA) plutôt que 3 modules de 50 Wc (570 000 FCFA).

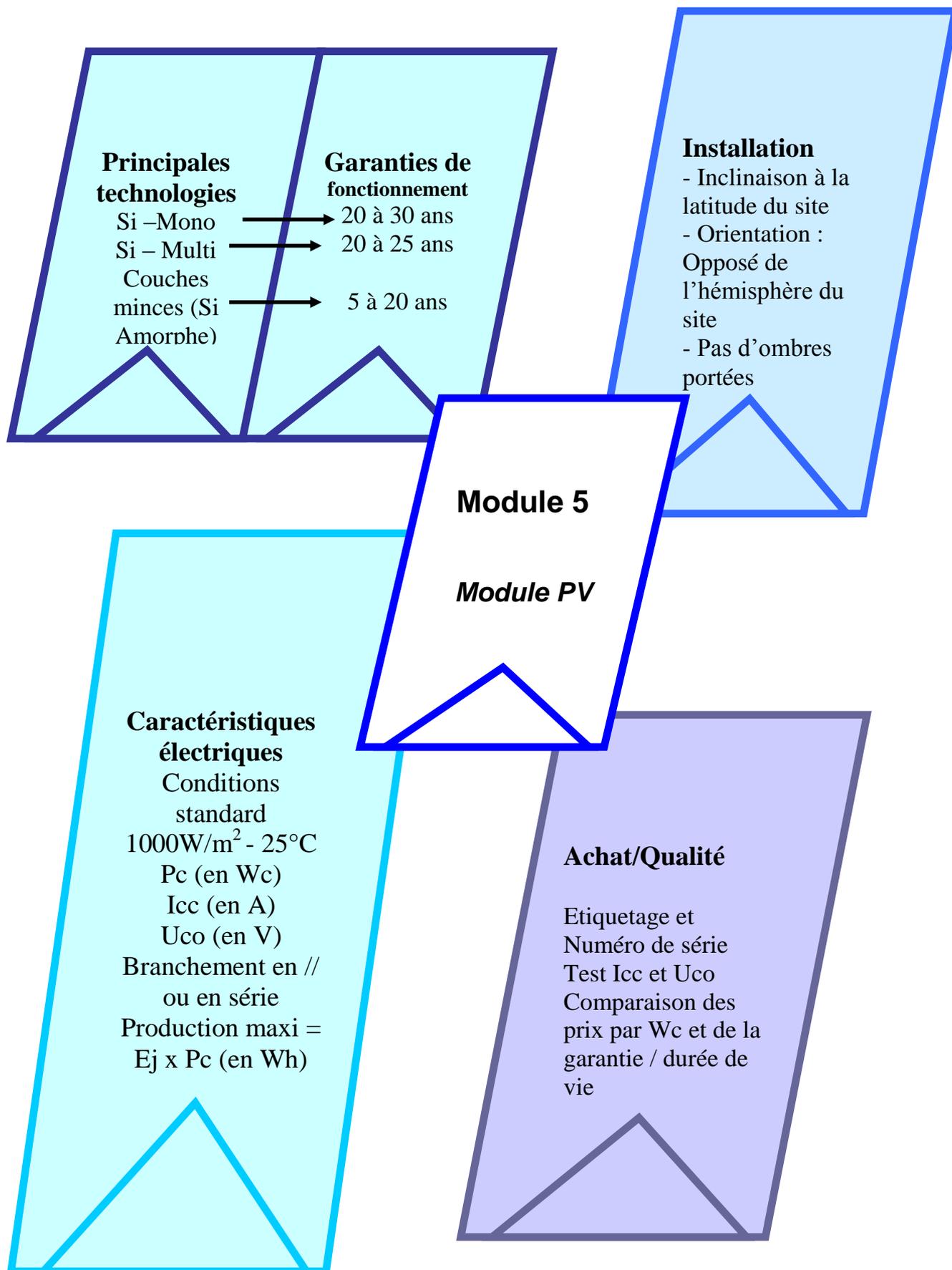
3. Comparer le prix par Wc avec les conditions de garantie (la durabilité)

Exercice :

Est-il sage d'acheter 1 module de 50 Wc à 130 000 FCFA (marque X) avec une garantie de 2 ans (durée de vie probable 3, 4 ans), plutôt qu'un module de 50 Wc à 190 000 FCFA (marque réputée) doté d'une garantie de 20 ans (durée de vie probable 30 ans) ?

Réponses : *Le choix peut être laissé au client, en lui donnant le pour et le contre de chacune des options.*

5 Topogramme



6 Évaluation et Feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les principaux concepts et notions de ce module. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner, dans de bonnes conditions, les modules suivants.

Il est suggéré de demander aux participants (en groupe ou en session individuelle) de :

- Décrire les 3 principaux types de modules solaires.
- Enumérer les trois caractéristiques électriques principales d'un module solaire
- Décrire comment brancher 3 modules de 50 Wc (Uco 18V) pour réaliser un panneau de 150 Wc. Demander des explications.
- Expliquer pourquoi il est possible de brancher un module de 40 Wc (Uco 18V) en parallèle avec un module de 20 Wc (Uco 18 V), pour réaliser un panneau de 60 Wc.
- Calculer la quantité d'énergie maximum produite par un module de 50 Wc si E_j est de 2 kWh/m².jour, puis 4,5 kWh/m² et 6 kWh/m².
- Calculer la quantité d'énergie produite maximum par un module de 12 Wc si E_j est de 2 kWh/m².jour, puis 4,5 kWh/m² et 6 kWh/m².
- Proposer les angles d'inclinaison et d'orientation correspondant à leur habitation principale et motiver leur choix.
- Décrire ce à quoi ils doivent prêter attention lors de l'achat d'un module solaire chez un fournisseur.

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen⁵.

⁵ Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 6 : Régulateur de charge

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	Les fonctions du régulateur	3
4.1.1	<i>Fabrication et réparation des régulateurs</i>	4
4.1.2	<i>Les futurs régulateurs – limiteurs de consommation</i>	4
4.2	Caractéristiques principales	5
4.2.1	<i>Seuils de tension de régulation</i>	6
4.2.2	<i>Compensation en température du seuil de fin de charge</i>	7
4.2.3	<i>Fonction 'charge forcée' ou 'égalisation de charge'</i>	8
4.2.4	<i>Taille du régulateur : courant maximum</i>	8
4.2.5	<i>Indicateurs du régulateur</i>	9
4.3	Types de régulateurs	9
4.3.1	<i>Régulateurs 'Shunt' et 'Série'</i>	9
4.3.2	<i>Fabrication et réparation des régulateurs</i>	11
4.3.3	<i>Les futurs régulateurs – limiteurs de consommation</i>	11
4.4	Contrôle qualité : achat d'un régulateur	12
5	TOPOGRAMME	13
6	ÉVALUATION ET FEEDBACK	14

1 Objectifs

Ce module a pour objectifs de couvrir les sujets suivants :

- Rôle du régulateur,
- Caractéristiques techniques principales du régulateur,
- Choix d'un régulateur,
- Aspects de contrôle de qualité lors de l'achat d'un régulateur.

2 Durée du module

5 – 10 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Régulateur (5 A - 12 V)	1
Régulateur à relais (10 A – 12 V)	1
Régulateur statique (10 A – 12 V)	1
Régulateur (20 A 12 V / 24 V)	1
Autres régulateurs (si possible)	
Module 20 Wc	1
Lampe fluorescente 8 W, 12 V	1
Batterie étanche 7 Ah - 12 V (ou 2 batteries de 4 Ah - 6 V)	1
Multimètre	4
Ensemble de 5 m de câbles 2 x 2,5 mm ² et accessoires (ex : 10 borniers de connexion)	1

4 Contenu

4.1 Les fonctions du régulateur

Sa fonction principale est de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Grâce aux indicateurs présents sur le régulateur, il fournit également des informations sur l'état de fonctionnement du système ; c'est le tableau de bord du système.

Le régulateur est le 'cerveau' du système solaire. Il assure de multiples fonctions :

1. Permet le transfert de l'électricité produite par le module(s) PV vers l'utilisation finale (les récepteurs) si les récepteurs sont utilisés pendant la journée (exemple : écouter la radio pendant le jour)¹.
2. Permet le transfert de l'électricité produite par le module(s) PV vers la batterie à chaque fois que le courant produit est supérieur à celui consommé par les récepteurs.
3. Permet le transfert de l'électricité produite par le module(s) PV vers la batterie afin qu'elle soit chargée pour les utilisations nocturnes.
4. Permet le transfert de l'électricité de la batterie vers les récepteurs, quand la consommation des récepteurs est supérieure à la production du module(s) PV.
5. Coupe les récepteurs lorsque la batterie est trop déchargée et reconnecte les récepteurs lorsque la batterie a atteint un niveau de charge suffisant.
6. Coupe la charge en provenance du module pour éviter les surcharges de la batterie.
7. Protège l'installation contre les courts-circuits (quand ils sont équipés d'un ou plusieurs fusibles internes).
8. Indique l'état de fonctionnement du système PV et donne des informations sur l'état de charge de la batterie.

Exercice : Schéma multifilaire d'un système solaire. Explication du rôle central du régulateur.

Exercice : Câblage d'un petit système solaire (selon schéma de l'exercice ci-dessus) avec les composants suivants, sur une grande table :

- 1 régulateur (de préférence à relais de coupure en décharge et relais de coupure en surcharge)
- 1 batterie 7 Ah - 12 V (ou deux de 4 Ah - 6 V en série)
- 1 lampe de 8 W
- 1 fusible entre la batterie et le régulateur et un fusible entre la lampe et le régulateur
- 1 module de 20 à 40 Wc (placé à l'extérieur).

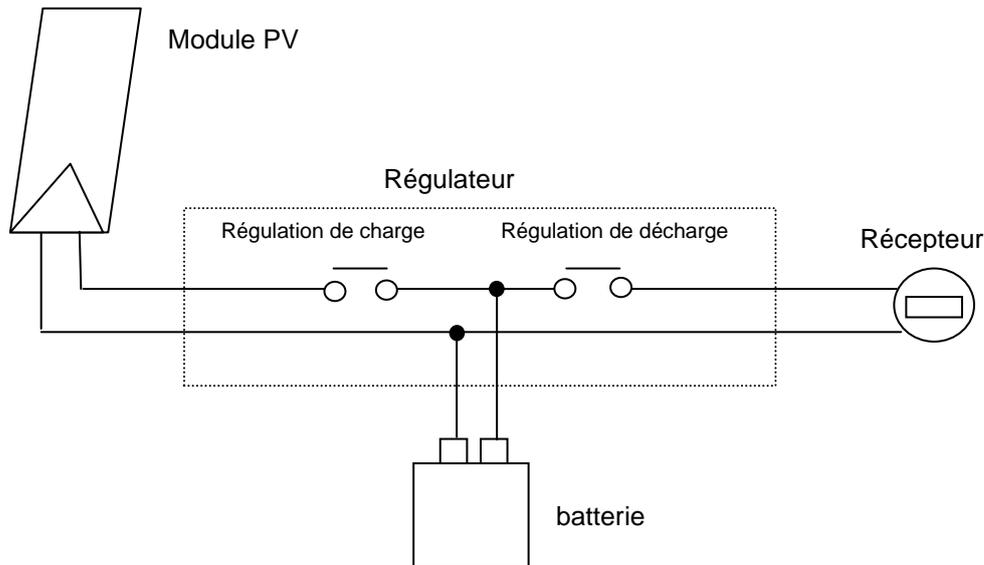
Branchement de 3 multimètres pour les mesures d'intensité :

- du courant circulant entre le régulateur et le module
- du courant circulant entre le régulateur et la batterie
- du courant circulant entre le régulateur et la lampe

Branchement d'un multimètre pour mesurer la tension aux bornes de la batterie.

Avec les participants, faire fonctionner le système pour vérifier les 8 rôles du régulateur énumérés ci-dessus. Ne pas créer un court-circuit pour la fonction 7, à moins d'avoir des fusibles de rechange.

¹ Certains régulateurs ne permettent pas cette fonction. Ils n'autorisent plus les récepteurs, dès que la lumière du jour apparaît, même si la tension de la batterie est suffisante. Ceci permet d'assurer la charge de la batterie pendant la journée et de garantir la fourniture d'énergie pendant la nuit.



4.1.1 Fabrication et réparation des régulateurs

Un régulateur peut en principe être fabriqué localement. Toutefois, la conception de ce dernier doit être sans reproche, sans point faible. En effet, le régulateur est le cerveau du système PV. De son bon fonctionnement dépend la fiabilité et la durée de vie du système, en particulier la durée de vie de la batterie. Par exemple, si le régulateur a des seuils de régulation mal ajustés ou bien qui se dérèglent avec le temps, la durée de vie de la batterie sera réduite. Ce qui est paradoxal, puisque le régulateur est censé augmenter la durée de vie de ces dernières.

Il est de plus en plus difficile de réparer les régulateurs. Dans certains cas, les composants électroniques ne sont pas accessibles car ils sont moulés dans la masse ou bien ils sont libellés volontairement de façon incorrecte. En outre, il est impossible d'obtenir les schémas des circuits électroniques des régulateurs. Les fabricants protègent ainsi leurs conceptions contre les fabrications pirates.

Quand un régulateur ne fonctionne plus correctement, il vaut mieux faire un échange standard, plutôt que d'essayer de réparer, sauf si les procédures de réparation sont disponibles et facilement applicables sur le terrain ou en atelier.

4.1.2 Les futurs régulateurs – limiteurs de consommation

La plupart des régulateurs ne protègent pas suffisamment contre la décharge profonde des batteries, car ils n'agissent que sur la tension telle que mesurée par le régulateur et non sur la quantité d'énergie effectivement fournie par la batterie.

Etant donné que les systèmes solaires sont conçus pour que la production journalière des modules compense la consommation d'énergie quotidienne, il faudrait que la consommation des récepteurs soit limitée par un système approprié 'un limiteur de consommation / compteur d'énergie consommée'. Quelques expériences sont en cours, notamment au Mali depuis 2003², où un limiteur de consommation est au stade de prototype.

² Des prototypes de régulateur – limiteur de consommation sont en cours de test au Mali par la SSD Yeelen Kura à Koutiala (2003). La SSD est une société de services décentralisées qui offre un service de base de fourniture d'électricité avec des systèmes solaires domestiques. La SSD offre ses services à plus de 1500 clients.

4.2 Caractéristiques principales

<ul style="list-style-type: none"> • Courant photovoltaïque maximum admissible (courant de charge) • Courant utilisation maximum admissible (courant de décharge) • Indicateur de tension 'batterie basse' • Indicateur de charge du panneau solaire • Seuils de tension limitant la charge Pour batterie ouverte : Pour batterie étanche : • Seuils de tension limitant la décharge Pour batterie ouverte : Pour batterie étanche : 	<p>Ex : entre 3 et 30 A</p> <p>Ex : entre 3 et 30 A</p> <p>Ex : LED, voltmètre, alarme sonore</p> <p>Ex : LED ou ampèremètre</p> <p>Ex : seuil bas 12,8 V (panneau autorisé) et seuil haut 14,5 V à 25°C (panneau coupé.)</p> <p>Ex : seuil bas 12,8 V et seuil haut 14,1 V à 25°C.</p> <p>Ex : entre 10,5 et 11,9 V</p> <p>Ex : entre 11,4 et 11,9 V</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Type de régulation • Ré enclenchement (quand la tension batterie redevient suffisamment élevée) • Compensation en température des seuils de régulation de charge (avec sonde interne ou sonde externe à placer sur la batterie) • Charge forcée ('boost charge') : charge avec une tension de fin de charge plus élevée. • Plage de tension de fonctionnement • Protection électrique • Consommation interne d'énergie (rendement énergétique) • Protection contre les inversions de polarité • Ajustement des seuils de tension • Bornier de connexion • Etanchéité du boîtier régulateur 	<p>Relais (Tout ou Rien), shunt ou série (progressive PWM : Pulse with modulation).</p> <p>Automatique (ex : à 12,6 V) ou manuel.</p> <p>Ex : -18 mV/°C pour une batterie de 12 V, base 25°C.</p> <p>Impératif pour les pays chauds et les pays avec des variations de température importantes au cours de la journée et des saisons.</p> <p>Automatique après coupure en tension basse, ou manuelle</p> <p>Ex : 9 V à 30 V</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contre les court-circuits et surcharges (fusibles)³ - Surtensions transitoires (foudre) - Surtensions lorsque la batterie est déconnectée. <p>Chute de tension aux bornes du régulateur (ex : 0,1 à 0,5 V).</p> <p>Par fusibles ou diodes anti-retour.</p> <p>Sur site, ou uniquement en usine.</p> <p>Taille maximum des câbles.</p> <p>Connexion interne ou externe au boîtier.</p>

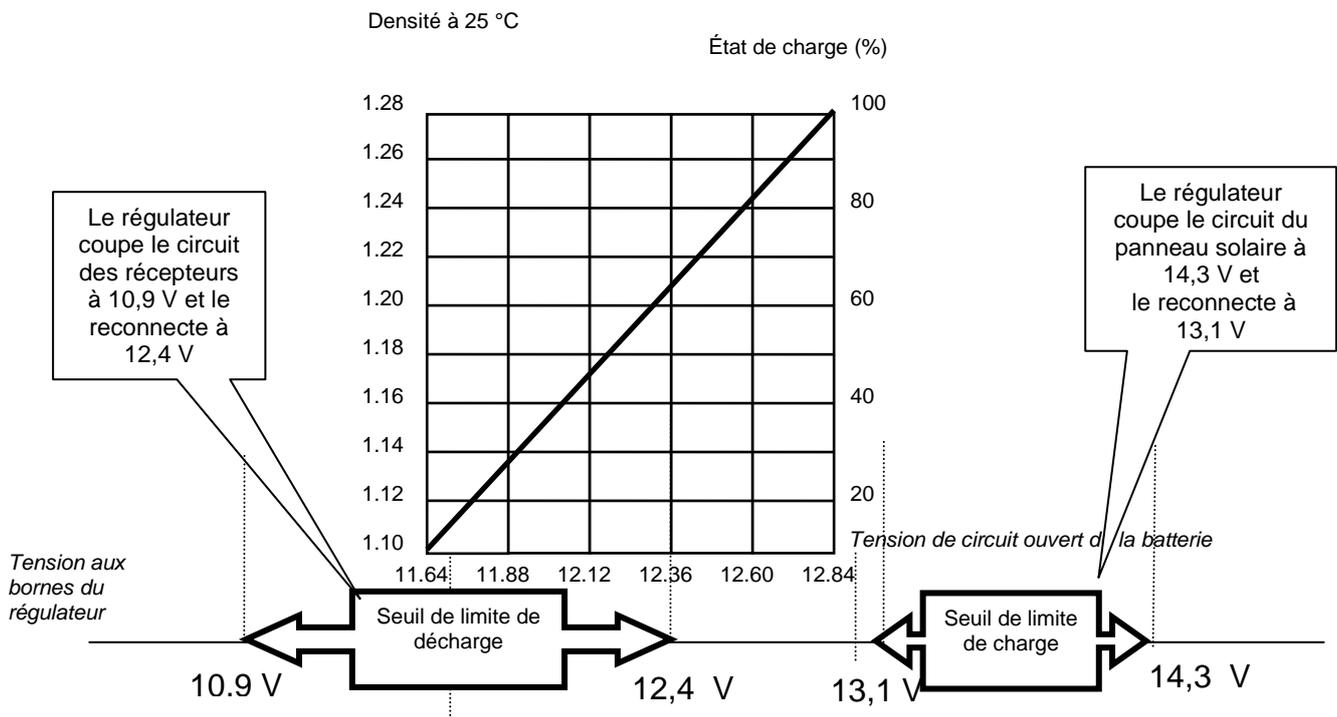
³ Certains régulateurs ont une fonction limitatrice du courant maximum admissible côté 'récepteurs'. Cette fonction coupe la sortie tant qu'il y a un défaut électrique (ex. court-circuit), ou une intensité trop importante consommée par un récepteur (supérieure au calibre du régulateur).

4.2.1 Seuils de tension de régulation

La plupart des régulateurs pour systèmes domestiques ont des seuils de tension prédéterminés même si le choix devrait dépendre idéalement des instructions du fabricant de batterie et de l'espérance de vie souhaitée des batteries.

- Les seuils de fin de charge sont donnés par le fabricant de batterie (ex : 14,1V).
- Les seuils de décharge fixent la profondeur de décharge maximale autorisée (ou degré de décharge, noté DD), avant la déconnexion des batteries du système de distribution et donc des récepteurs électriques. Plus le seuil est élevé, plus la durée de vie des batteries sera longue (ex : 11,9 V est mieux que 10,5 V).

Exemple de seuils de tension de régulateur (type à relais Tout ou Rien)



Exercice : Reproduire le diagramme ci-dessus sans mettre les valeurs de seuils de tension. En utilisant le système solaire câblé au début de ce module, exécuter les opérations suivantes :

- Eteindre la lampe et attendre que le module charge complètement la batterie. Mesurer la tension de la batterie en fin de charge. La tension devrait se stabiliser à environ 14,1 V (la valeur exacte dépendra du type de régulateur choisi). C'est la tension de seuil haut pour protéger la batterie contre la surcharge.
- 'Faire la nuit' (c'est-à-dire, couvrir le module solaire d'une épaisse couverture) et allumer la lampe de 8 W. Mesurer la tension de la batterie. Observer la diminution progressive de la tension. Laisser la lampe allumée, jusqu'à ce que le régulateur coupe l'alimentation de la lampe. Mesurer la tension à laquelle la lampe s'est éteinte. Cette valeur devrait se situer autour de 11,4 V (la valeur exacte dépendra du type de régulateur).
- 'Faire le jour' (c'est-à-dire, retirer la couverture) et observer l'augmentation de la tension de la batterie. Mesurer la tension à laquelle la lampe sera automatiquement reconnectée par le régulateur. Cette valeur devrait se situer autour de 12,7 V (la valeur exacte dépendra du type de régulateur).

Suite de l'exercice :

- Comparer les résultats de l'expérience avec les données du fabricant indiquées dans la notice technique.
- Répéter cette expérience en remplaçant le régulateur par un autre type de régulateur.

Exercice : Dessin de la courbe de régulation d'au moins un régulateur. Il s'agit d'un graphique de la tension en fonction du temps (Tension : axe vertical, Temps : axe horizontal).

4.2.2 Compensation en température du seuil de fin de charge

La tension de fin de charge d'une batterie est déterminée pour une température donnée, habituellement 25°C. Si la température de la batterie est supérieure à 25°C, ce qui est le cas dans les pays à forte fluctuation de température au cours de la journée ou selon les saisons, le régulateur doit nécessairement (pour éviter une forte consommation d'eau distillée et endommager la batterie) réduire la tension de fin de charge, en appliquant le facteur suivant : - 18 mV / °C (valeur valable pour la plupart des batteries 12 V⁴).

Pour les systèmes solaires domestiques, on considère que la batterie est à la température ambiante. Il suffit donc que le régulateur soit équipé d'une sonde de température intégrée au boîtier régulateur, mesurant la température ambiante.

Sur les installations de taille supérieure à 500 Wc environ, la température de la batterie est mesurée en continu par une sonde de température, collée sur la batterie et reliée au régulateur.

Exemple 1 :

Si la température ambiante est de 35°C (cas courant au Mali) et que la tension de fin de charge est de 14,1 V à 25°C selon les données constructeurs, alors le régulateur ajustera la tension de fin de charge à :

$$U \text{ fin de charge} = 14,1 - 0,018 \times (35 - 25) = 14,1 - 0,18 = 13,92 \text{ V}$$

Exemple 2 :

Si la température ambiante est de 45°C (cas assez fréquent au Mali), alors le régulateur ajustera la tension de fin de charge :

$$U \text{ fin de charge} = 14,1 - 0,018 \times (45 - 25) = 14,1 - 0,36 = 13,74 \text{ V}$$

Pour les sites où la température est toujours voisine de 25°C pendant la journée, cas de certaines régions d'Afrique centrale (Est de la République Démocratique du Congo, Rwanda, Ouganda), la compensation automatique en température n'est pas nécessaire. Par contre, dans les pays sahéliens, une compensation en température est fortement recommandée.

⁴ Cette valeur est une caractéristique des batteries au Plomb-acide. Elle varie de 18 mV / °C à 30 mV / °C selon le type de batteries (pour les batteries 12 V). Si la batterie est une batterie 24 V, la compensation est le double des valeurs pour une batterie 12 V.

4.2.3 Fonction 'charge forcée' ou 'égalisation de charge'

Certains régulateurs ont une fonction appelée 'charge d'égalisation' ou 'charge forcée' ('boost charge'). Cette fonction permet d'augmenter la vie des batteries en provoquant une charge avec un seuil de tension plus élevée que le seuil de fin de charge habituelle (ex : 14,6 V au lieu de 14,1 V). Cependant, la charge d'égalisation entraîne une surconsommation d'eau distillée.

La charge d'égalisation permet de minimiser la stratification⁵ de l'électrolyte, de charger uniformément chaque cellule d'une batterie et permet d'éliminer en partie la sulfatation superficielle des plaques des batteries.

La charge d'égalisation ou 'boost charge' est déclenchée de plusieurs façons, selon le type de régulateur :

- Déclenchement manuel par le technicien ou l'utilisateur, par action sur le régulateur.
- Déclenchement automatique, chaque fois que le régulateur a atteint le seuil de tension bas en décharge.
- Déclenchement automatique, une fois par mois.

Important : La fonction 'égalisation de charge' n'est pas recommandée pour les batteries étanches et les batteries fortes consommatrices d'eau distillée ou à faible réserve d'électrolyte.

4.2.4 Taille du régulateur : courant maximum

Dans le cas d'un système domestique (avec ou sans onduleur connecté au régulateur), le régulateur est traversé par les courants maximum suivants :

1. le **courant maximum de court circuit (I_{cc})** du panneau PV⁶
2. le **courant maximum consommé par les récepteurs** lorsqu'ils sont tous alimentés.

Règle de dimensionnement :

Le régulateur doit avoir :

Un courant de charge maximale	> (+ 25%)	Courant maximum de court circuit (I_{cc}) du panneau PV
Un courant de décharge maximale	> (+ 50%)	Courant maximum consommé par l'ensemble des récepteurs

Exercice : Lecture des documentations techniques sur les régulateurs, en annexe pour le **module 6**, concernant les courants maximum admissibles.

⁵ La stratification de l'électrolyte d'une batterie signifie que la densité n'est pas constante dans chaque élément d'une batterie (de bas en haut). Ce phénomène se produit au fur et à mesure que la batterie vieillit.

⁶ Le courant de charge sera souvent inférieur à I_{cc}, mais il peut arriver, de temps à autres, suite à des réflexions du soleil sur les nuages, que le courant de charge atteigne, voire dépasse I_{cc}.

4.2.5 Indicateurs du régulateur

Les régulateurs peuvent donner des informations utiles à l'utilisateur et au technicien, soit à l'aide de LED (diodes électroluminescentes), soit à l'aide de voltmètres / ampèremètres ou encore grâce à un affichage à écran liquide (LCD⁷).

Ils indiquent :

- si le module charge la batterie,
- si la batterie est pleine (100 % de charge), à moitié pleine (50 %) ou trop déchargée,
- si les charges ont été déconnectées parce que la batterie a été trop déchargée.

4.3 Types de régulateurs

La plupart des régulateurs sont fabriqués à partir de composants électroniques à semi-conducteurs (les composants statiques). Il n'y a aucune pièce mobile, par conséquent aucun bruit par rapport aux régulateurs avec relais. On peut seulement déceler seulement un certain échauffement.

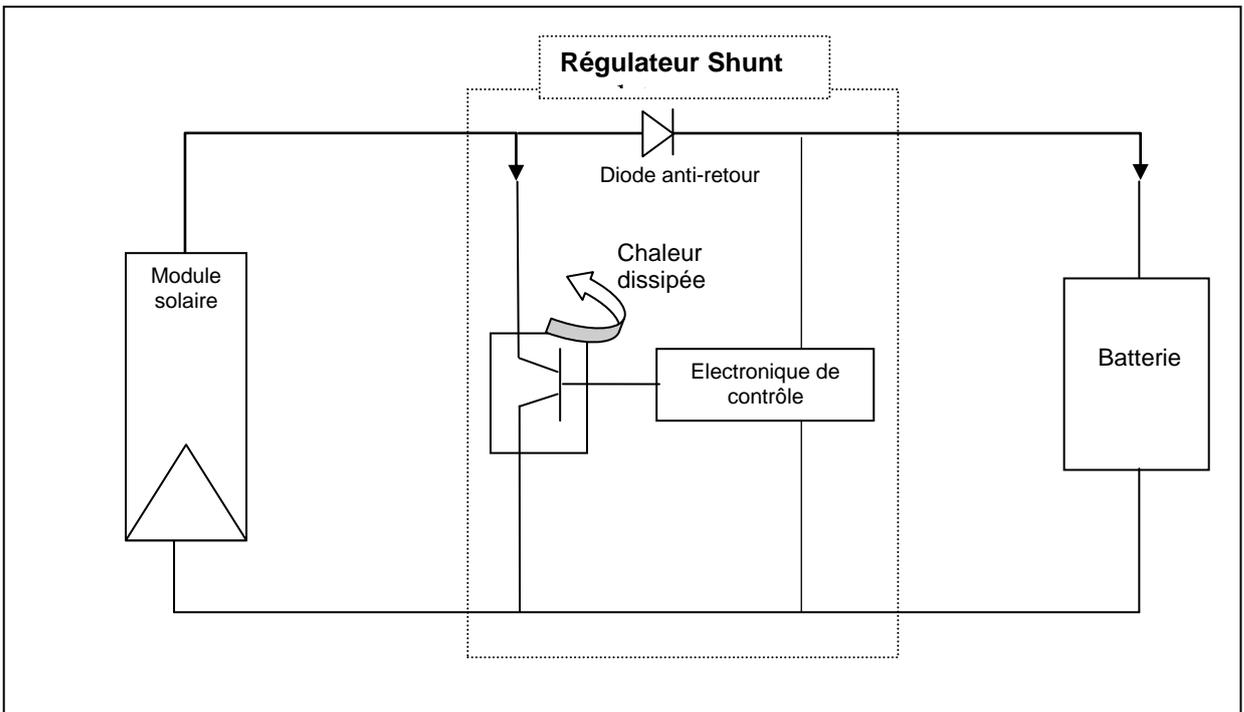
Cependant, quelques régulateurs utilisent encore des relais (c.-à-d. commutateurs électromécaniques), notamment pour les installations assez importantes (relais de puissance). Ils sont soit intégrés dans le régulateur lui-même, soit installés à proximité du régulateur qui les pilote.

Attention : Certains régulateurs, très bon marché, n'offrent pas de protection contre la décharge profonde des batteries.

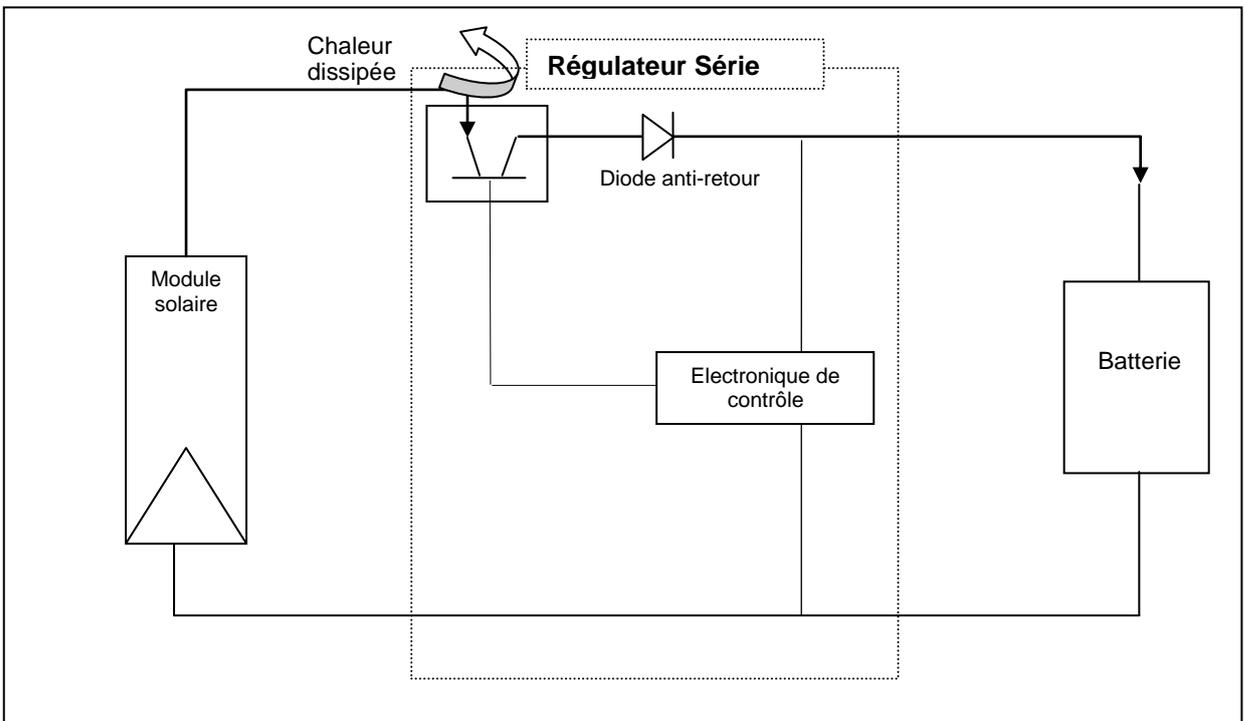
4.3.1 Régulateurs 'Shunt' et 'Série'

Il existe deux types principaux de régulateurs à semi-conducteurs : *shunt* et *série*. Les diagrammes électriques simplifiés ci-après illustrent leur principe respectif, en ce qui concerne la fonction 'protection de la surcharge'.

⁷ LCD : Liquid Cristal Display.



Régulateur Shunt : Quand la batterie approche un état de charge de 100%, le régulateur dissipe le courant produit par le panneau dans un transistor de puissance pour éviter la surcharge de la batterie. La puissance produite par le module est dissipée par le radiateur du transistor. Ce type de régulateur peut devenir très chaud si la batterie est entièrement chargée aux environs de midi et si le rayonnement solaire est maximum.



Régulateur Série : La résistance du transistor de puissance du régulateur augmente lorsque l'état de charge de la batterie approche 100%. Quand la batterie est entièrement chargée, le transistor de puissance se comporte comme un commutateur ouvert. Quand la batterie est peu chargée, le transistor de puissance agit comme un commutateur fermé.

4.3.2 Fabrication et réparation des régulateurs

Un régulateur de charge peut en principe être fabriqué localement. Toutefois, la conception de ce dernier doit être sans reproche et aucun sans point faible. En effet, le régulateur est le cerveau du système PV. De son bon fonctionnement dépend la fiabilité et la durée de vie du système, en particulier la durée de vie de la batterie. Par exemple, si le régulateur a des seuils de régulation mal ajustés ou bien qui se dérèglent avec le temps, la durée de vie de la batterie sera réduite. Ce qui est paradoxal, puisque le régulateur est censé augmenter la durée de vie de ces dernières.

Il est de plus en plus difficile de réparer les régulateurs. Dans certains cas, les composants électroniques ne sont pas accessibles car ils sont moulés dans la masse ou bien ils sont libellés volontairement de façon incorrecte. En outre, il est impossible d'obtenir les schémas des circuits électroniques des régulateurs. Les fabricants protègent ainsi leurs conceptions contre les fabrications pirates.

Quand un régulateur ne fonctionne plus correctement, il vaut mieux faire un échange standard, plutôt que d'essayer de réparer, sauf si les procédures de réparation sont disponibles et facilement applicables sur le terrain ou en atelier.

4.3.3 Les futurs régulateurs – limiteurs de consommation

La plupart des régulateurs ne protègent pas suffisamment contre la décharge profonde des batteries, car ils n'agissent que sur la tension telle que mesurée par le régulateur et non sur la quantité d'énergie effectivement fournie par la batterie.

Etant donné que les systèmes solaires sont conçus pour que la production journalière des modules compense la consommation d'énergie quotidienne, il faudrait que la consommation des récepteurs soit limitée par un système approprié 'un limiteur de consommation / compteur d'énergie consommée'. Quelques expériences sont en cours, notamment au Mali depuis 2003⁸, où un limiteur de consommation est au stade de prototype.

⁸ Des prototypes de régulateur – limiteur de consommation sont en cours de test au Mali par la SSD Yeelen Kura à Koutiala, depuis 2003. La SSD est une société de services décentralisées qui offre un service de base de fourniture d'électricité avec des systèmes solaires domestiques. La SSD offre ses services à plus de 1500 clients.

4.4 Contrôle qualité : achat d'un régulateur

1. Vérifier les caractéristiques suivantes :

<ul style="list-style-type: none"> • Courant photovoltaïque maximum admissible (courant de charge) • Courant utilisation maximum admissible (courant de décharge) • Indicateur de tension 'batterie basse' • Indicateur de charge du panneau solaire • Seuils de tension limitant la charge <ul style="list-style-type: none"> Pour une batterie de voiture : Pour une batterie étanche : • Seuils de tension limitant la décharge <ul style="list-style-type: none"> Pour une batterie de voiture : Pour une batterie étanche : • Tension de ré-enclenchement • Tension de fonctionnement • Chute de tension maximum entre Panneau et Batterie (au niveau de régulateur) • Chute de tension maximum entre Batterie et la sortie Récepteur (au niveau de régulateur) • Consommation en fonctionnement normal • Compensation de la température (intégrée) • Protections électriques 	<p>Vérifier que ce courant est supérieur à I_{cc} du panneau PV.</p> <p>Vérifier que ce courant est supérieur de 50 % au courant maximum consommé par l'ensemble des récepteurs.</p> <p>Vérifier que ce dispositif existe.</p> <p>Vérifier que ce dispositif existe.</p> <p>Vérifier leur compatibilité avec le type de batterie sélectionnée Ex : seuil bas 13,1 V et seuil haut 14,7 V Ex : seuil bas 13,1 V et seuil haut 14,1 V</p> <p>Vérifier qu'ils sont compatibles avec le type de batterie sélectionnée. Ex : entre 10,5 et 11,9 V Ex : entre 11,4 et 11,9 V</p> <p>Ex : 12,8 V</p> <p>Ex : 9 V à 30 V</p> <p>Ex : 0,1 V (cette valeur doit être aussi faible que possible).</p> <p>Ex : 0,05 V (cette valeur doit être aussi petite que possible).</p> <p>Ex : 10 mA.</p> <p>- 0,018 V/°C au-dessus de 25°C pour système 12 V.</p> <p>Vérifier s'il y a un fusible interne. Sinon, il sera nécessaire de prévoir un fusible sur le circuit 'récepteur' et un fusible entre la batterie et le régulateur.</p> <p>Protection contre les effets induits de la foudre (ex : présence de varistances).</p>
---	--

2. Vérifier si les indicateurs (voyants, LED, etc.) sont faciles à interpréter par le client, la cliente.

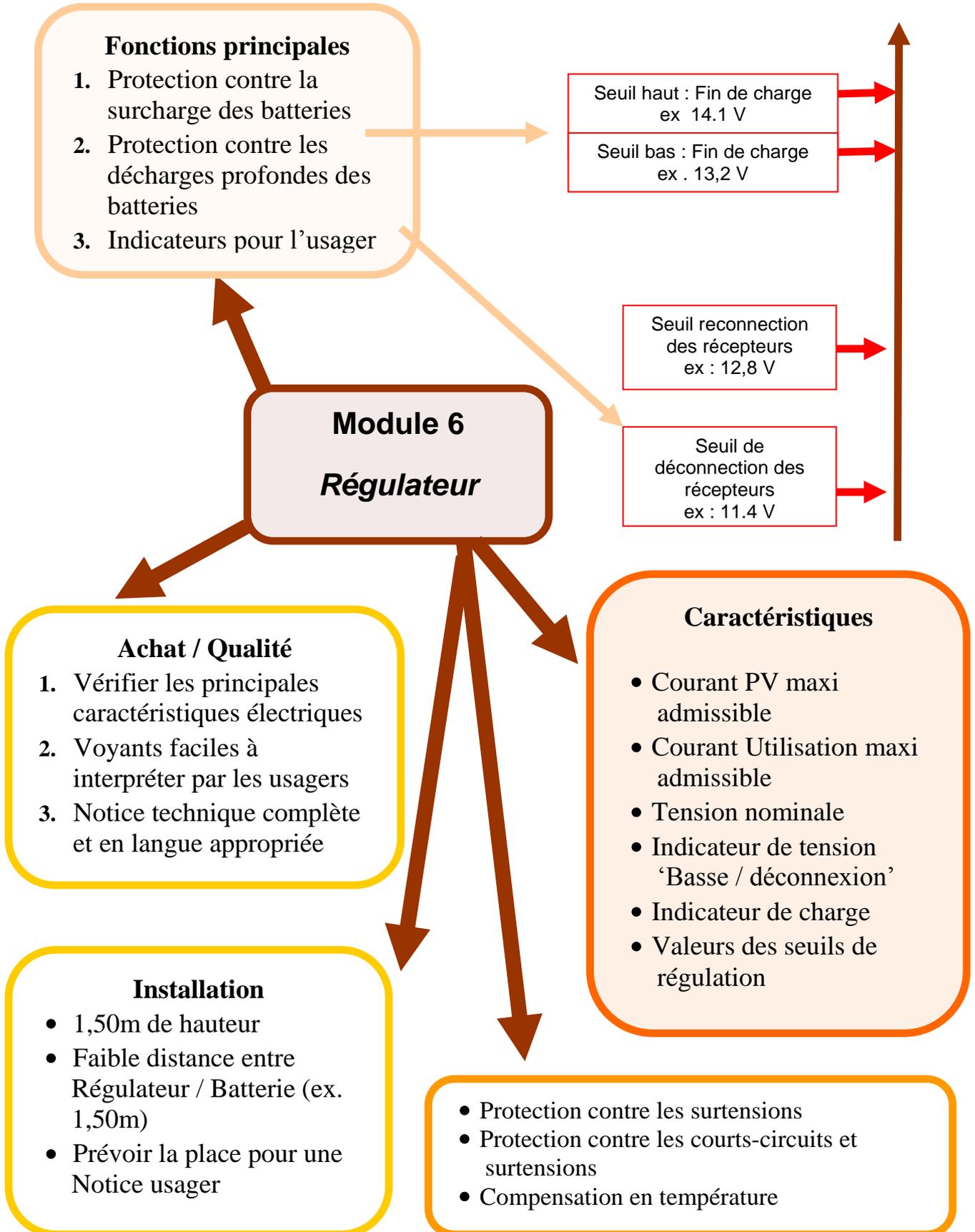
3. Demander les conditions de garantie.

Les régulateurs de bonne qualité peuvent bénéficier d'une garantie comprise entre 2 et 5 ans. En règle générale, la durée minimum acceptable est de un an.

4. Demander les références d'installation du type de régulateur proposé (dans le pays ou en dehors du pays d'installation).

5. Exiger les notices techniques détaillées contenant les caractéristiques techniques, les instructions d'installation, d'opération et d'entretien.

5 Topogramme



6 Évaluation et feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les principaux concepts et notions de ce module. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner, dans de bonnes conditions, les modules suivants.

Il est suggéré de demander aux participants (en groupe ou en session individuelle) de :

- Décrire brièvement les principales fonctions d'un régulateur.
- Dessiner le schéma électrique bifilaire de branchement d'un régulateur (avec les fusibles de protection).
- Détailler les principales caractéristiques électriques d'un régulateur.
- Donner les valeurs approximatives des seuils de tension pour la protection en surcharge des batteries.
- Donner les valeurs approximatives des seuils de tension pour éviter la décharge profonde d'une batterie.
- Calculer le seuil de tension de fin de charge d'un régulateur dans les conditions suivantes : température ambiante de 40°C, régulateur donné avec une tension de fin de charge de 14,3 V à 25°C, compensation de température (-18 mV/°C) pour une batterie de 12 V.
- Enumérer une liste des paramètres à vérifier lors de l'achat d'un régulateur.

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen⁹.

⁹ Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 7 : Batterie

1	OBJECTIFS	2
2	DURÉE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NÉCESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	Introduction	3
4.1.1	Principe de fonctionnement	3
4.1.2	Construction des plaques.....	3
4.2	Définitions des termes et spécifications techniques	4
4.2.1	Capacité (C) [unité : Ah].....	4
4.2.2	Capacité (C _n).....	5
4.2.3	Capacité utile (Cu) [unité : Ah].....	6
4.2.4	Degré de décharge (DD) [unité : %].....	6
4.2.5	Degré de décharge quotidienne (DDQ) [unité : %].....	7
4.2.6	Le cyclage d'une batterie.....	8
4.2.7	État de charge (EC) [unité : %]	9
4.2.8	Courant de charge d'une batterie [unité : A].....	9
4.2.9	Rendement de charge / décharge [unité : %]	10
4.2.10	Autodécharge [unité : % / mois].....	11
4.3	Généralités sur les batteries Plomb-acide	12
4.3.1	Caractéristiques générales	12
4.3.2	Conditions idéales de charge des batteries	13
4.3.3	État de charge / densité d'électrolyte / Tension U _{co}	13
4.4	Principaux types de batteries Plomb-acide	14
4.4.1	Batteries de voiture.....	14
4.4.2	Batteries solaires à plaques planes	14
4.4.3	Batteries de traction	14
4.4.4	Batteries solaires stationnaires	14
4.4.5	Batteries étanches.....	15
4.5	Tableau comparatif des types de batteries	16
4.6	Synthèse des principales caractéristiques	17
4.6.1	Exemple de courbe : Densité d'électrolyte / Tension U _{co} / Etat de charge.....	17
4.7	Association de batteries en série ou en parallèle	18
4.8	Importance du dimensionnement d'une batterie	18
4.9	Mesures de sécurité concernant les batteries	19
4.10	Contrôle qualité : achat d'une batterie	20
5	TOPOGRAMME	22
6	ÉVALUATION ET FEEDBACK	23

1 Objectifs

Ce module a pour objectif de couvrir les sujets suivants :

- Termes et définitions concernant les batteries
- Principales caractéristiques techniques des batteries.
- Différentes technologies des batteries.
- Règles d'association de batteries.
- Aspects de sécurité et d'environnement.
- Conseils pour l'achat d'une batterie (contrôle qualité).

2 Durée du module

10 – 15 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Batterie étanche 4 Ah - 6 V (neuve)	2
Batterie étanche 4 Ah - 6 V (usagée)	2
Batterie étanche 7 Ah - 12 V (neuve)	1
Batterie étanche 7 Ah - 12 V (usagée)	1
Batterie de voiture 35 à 75 Ah (neuve)	1
Batterie de voiture 35 à 75 Ah (usagée)	1
Batterie solaire stationnaire avec bac transparent 2 V ou 12 V (usagée)	1
Réglette 8 W – 12 V	2
Calculatrice solaire (1 par participant)	1
Multimètre	5
Un ensemble de câbles et d'accessoires de connexion.	1

4 Contenu

4.1 Introduction

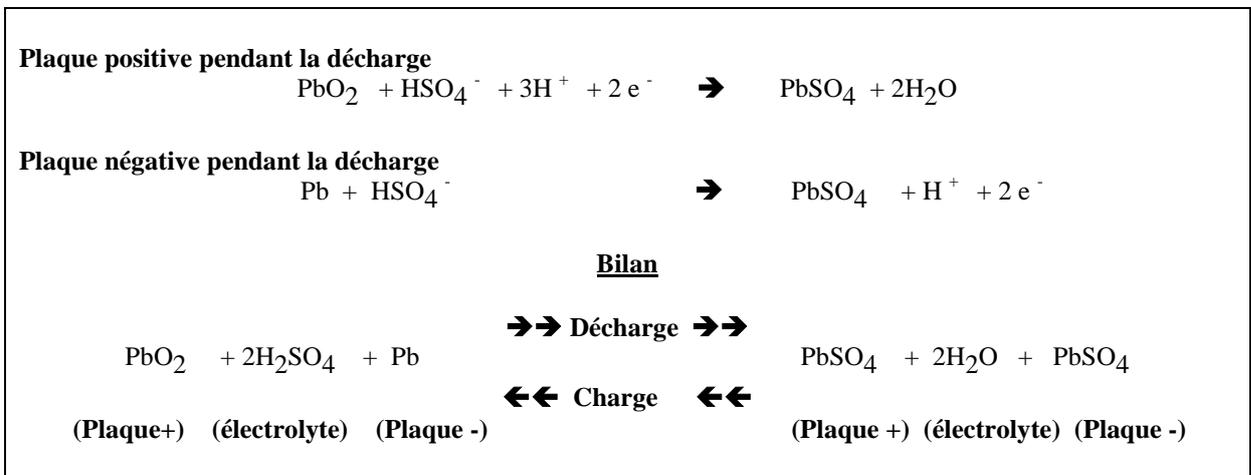
Les batteries sont les composants les moins fiables et les moins durables des systèmes solaires. Les batteries sont responsables de la plupart des pannes. Il est toutefois possible de limiter la fréquence des pannes et d'allonger la vie des batteries, si elles sont correctement dimensionnées, installées et maintenues.

Il existe plusieurs types de batteries (Plomb-acide sulfurique, nickel-cadmium, etc.). Les plus utilisées pour les systèmes solaires sont les batteries Plomb – acide sulfurique. Dans cette catégorie de batteries, on trouve de nombreuses variantes : batteries de voiture, batterie solaire monobloc, batterie solaire stationnaire. L'ensemble de ces batteries peuvent être, soit ouvertes, soit étanches (sans entretien).

4.1.1 Principe de fonctionnement

Une batterie *Plomb-acide* se compose de plaques de Plomb (électrode négative, Pb) et de plaque d'oxydes de plomb (électrode positive, PbO₂) qui interagissent avec de l'électrolyte (acide sulfurique diluée) dans un processus électrochimique *réversible*.

Cette réaction a pour conséquence un écoulement d'électrons : un courant électrique vers la batterie pendant la charge, et vers les récepteurs pendant la décharge. **L'électrolyte** est une solution d'acide sulfurique dans l'eau (un liquide fortement corrosif).



- ▶ Pendant la charge, il y a formation d'acide sulfurique (2H₂SO₄), de plomb sur les plaques négatives et d'oxyde de plomb (PbO₂) sur les plaques positives. Il y a dégagement de gaz (hydrogène, oxygène), et donc consommation d'eau.
- ▶ Pendant la décharge, l'électrolyte devient de moins en moins concentré. Par conséquent, une batterie entièrement déchargée a une solution faible d'électrolyte.

4.1.2 Construction des plaques

Les plaques négatives sont constituées de poudre de plomb fixée sur un support conducteur. Les plaques positives sont constituées de pâtes d'oxyde de plomb séchées sur un autre

support. Les plaques positives et négatives sont isolées électriquement par un séparateur. Diverses substances, telles que l'antimoine, du calcium sont ajoutées pour créer des alliages qui permettront d'augmenter la durée de vie d'une batterie.

La présence d'antimoine augmente d'une part, *le nombre de cycles (la durée de vie)*, mais d'autre part, augmente la consommation d'eau distillée et l'auto-décharge.

La présence du calcium permet généralement une consommation inférieure d'eau distillée, permettant la fabrication de batterie sans ou à faible entretien, mais réduit la durée de vie des batteries (nombre de cycles avec cyclage profond).

La durée de vie est généralement augmentée grâce à l'épaisseur des plaques positives (plane ou tubulaire). L'épaisseur des plaques positives peut varier de 1,5 mm à plus de 6 mm selon le type de batterie.

Exercice : Montrer l'intérieur d'une batterie usagée, préalablement découpée ou bien une batterie solaire stationnaire dont le bac est transparent.

4.2 Définitions des termes et spécifications techniques

Il est nécessaire de connaître les *termes techniques* permettant de comprendre le comportement des batteries. D'une part, les notices techniques des fabricants utilisent ces termes pour promouvoir la qualité de leurs produits. D'autre part, la connaissance de ces termes est indispensable pour choisir et dimensionner une batterie destinée à un système solaire.

4.2.1 Capacité (C) [unité : Ah]

La capacité (C) est la mesure de la quantité maximum d'énergie électrique qu'une batterie peut stocker et qu'elle est en mesure de fournir avant d'être complètement déchargée.

Une batterie constitue une réserve d'électricité, tout comme un jerrycan constitue une réserve d'eau. Une batterie peut seulement stocker une quantité fixe d'énergie électrique, qui dépend de sa taille (elle-même directement proportionnelle à son poids en Plomb).

La capacité d'une batterie est mesurée en ampères-heures (Ah).

La capacité nominale sur une batterie n'est qu'indicative. En effet, la capacité varie avec :

Intensité de décharge	C diminue quand l'intensité de décharge augmente.
Années de service	C diminue avec l'âge même si la batterie est toujours bien chargée.
Entretien / usage	C diminue avec un mauvais usage ou un mauvais entretien.
Température	C augmente avec la température jusqu'à 45°C environ (au-delà elle diminue à nouveau).

La **capacité nominale d'une batterie (C)** est la capacité initiale de la batterie, mesurée pour un courant de décharge standard, une tension d'arrêt fixée et à la température de 25°C. Elle est souvent donnée pour un temps de décharge de 10, 20 ou 100 heures avec une tension d'arrêt de 10,8 V (1,8 V par cellule x 6 = 10,8 V).

Exemple : Batterie de 75 Ah à C₁₀₀, 25°C et une tension d'arrêt de 10,8 V.

4.2.2 Capacité (C_n)

La capacité (C_n) d'une batterie est la quantité d'électricité fournie par une batterie produisant un courant I_n pendant n heures :

$$C_n = I_n \times n$$

Par exemple, une batterie 120 Ah à C₁₀ signifie que la batterie est capable de produire 120 Ah en 10 heures, avec un courant I₁₀ de 12 A.

$$C_n = I_n \times n \rightarrow C_{10} = I_{10} \times 10 \text{ heures} \rightarrow 120 \text{ Ah} = 12 \text{ A} \times 10 \text{ heures}$$

Exemple (selon document constructeur)

Batterie Solar Bloc S	C ₁₂	C ₁₀₀	C ₁₂₀
Capacité nominale C _n	61 Ah	70 Ah	71 Ah
Courant de décharge I _n	$I_{12} = C_{12} / 12 = 5,08 \text{ A}$	$I_{100} = C_{100} / 100 = 0,7 \text{ A}$	$I_{120} = C_{120} / 120 = 0,59 \text{ A}$
Temps de décharge n	$61 / 5,08 \text{ A} = 12 \text{ heures}$	$70 / 0,7 = 100 \text{ heures}$	$71 / 0,59 = 120 \text{ heures}$

La même batterie a des capacités différentes selon le régime de décharge.

Exercice :

Calcul de l'intensité de décharge d'une batterie de 100 Ah C₂₀ pour espérer produire 100 Ah.

Réponse : C₂₀ = I₂₀ x 20 ; I₂₀ = C₂₀ / 20 = 100 / 20 = 5 A (la batterie produira 5 A pendant 20 heures).

Exercice :

Mesure de la capacité d'une batterie de 7 Ah, avec un faible taux de décharge (ex : 0,66 A), puis avec un taux élevé de décharge (2 A). Pour chaque taux de décharge, procéder ainsi :

Etape 1 : charge de la batterie à 100 %. Etape 2 : mesure de l'intensité au cours du temps jusqu'à une tension de coupure de 10,5 V.

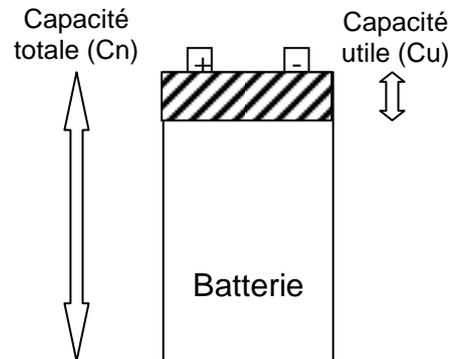
Comparer les capacités mesurées à la capacité libellée sur la batterie et discuter les résultats.

4.2.3 Capacité utile (Cu) [unité : Ah]

La capacité utile (Cu) est égale au besoin quotidien d'électricité (Bj) des clients pour un système solaire, exprimé en Ah.

$$Cu = Bj$$

La *capacité utile* est la fraction de la capacité d'une batterie à C_n qui est 'utilisée' pour chaque *cycle*. Ces cycles quotidiens sont habituellement peu profonds, pour accorder une durée de vie suffisamment longue.



Exercice : Calcul de la capacité utile d'une batterie si les besoins énergétiques quotidiens d'un système PV sont de 360 Wh.

Réponse : $360 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 30 \text{ Ah minimum}$.

4.2.4 Degré de décharge (DD) [unité : %]

C'est le degré de décharge maximum autorisé. Il s'agit du ratio de la capacité utile multipliée par l'autonomie et divisée par la capacité de la batterie.

$$DD (\%) = \frac{\text{Besoins quotidiens (Ah)} \times \text{Autonomie (jours)}}{\text{Capacité de la batterie (Ah)}}$$

$$\text{Capacité de la batterie (Ah)} = \frac{\text{Besoins quotidiens (Ah)} \times \text{Autonomie (jours)}}{DD (\%)}$$

Autonomie :

Nombre de jours que peut fonctionner un système solaire en fournissant B_j , sans atteindre le degré de décharge maximum et sans que la batterie ne reçoive de charge du panneau solaire (ex : 3 jours de très mauvais temps).

DD et Cycles

Un cycle correspond à une décharge, suivi d'une charge. La durée de vie d'une batterie est mesurée en nombre de cycles.

- Quand le DD est de 50 % ou plus, la batterie est soumise à un *cyclage profond*

- Quand le DD est inférieur à 30 %, la batterie est soumise à un *cyclage léger*, la batterie est utilisée en *floating*.

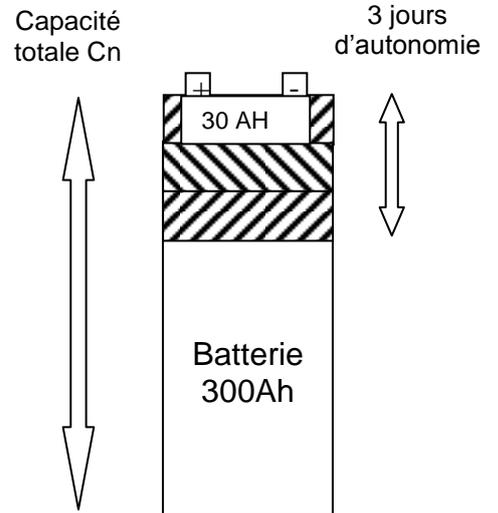
Le *cyclage léger* des batteries est toujours préférable car il prolonge la durée de vie des batteries. En d'autres termes, plus le DD est faible, plus la durée de vie est longue.

Exemple de dimensionnement de batterie :

Un usager a besoin de 4 lampes de 9 W pendant 10 heures chaque nuit. Ces besoins énergétiques sont de 9 W x 4 x 10 heures = 360 Wh. La capacité utile nécessaire est de 360 Wh / 12 V = 30 Ah.

Si le DD choisi est de 30 % et l'autonomie est de 3 jours, la capacité minimum requise est de :

$$C_n = (30 \text{ Ah} \times 3 \text{ jours}) / 30 \% = 300 \text{ Ah.}$$



4.2.5 Degré de décharge quotidienne (DDQ) [unité : %]

Il s'agit du ratio, de la capacité utile (Cu) sur la capacité de la batterie (Cn).

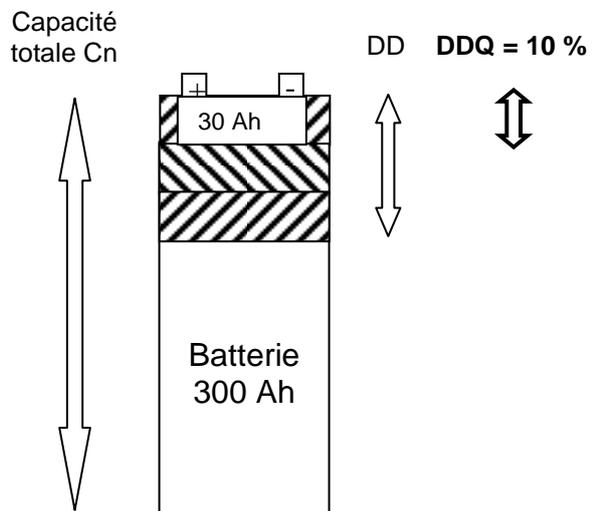
$$DDQ (\%) = \frac{C_u}{C_n} = \frac{\text{Besoins quotidiens (Ah)}}{\text{Capacité de la batterie (Ah)}}$$

Ce ratio est très pertinent, car il quantifie la valeur du cyclage quotidien de la batterie.

Exemple :

Dans le cas d'une batterie de 300 Ah C₁₀₀ installée sur un système solaire où les usagers consomment quotidiennement 360 Wh, soit en Ah, 360 Wh / 12 V = 30 Ah, le DDQ est égal à :

$$DDQ = 30 \text{ Ah} / 300 \text{ Ah} = 10 \%.$$



Remarque : Dans le cas d'un système solaire avec un DD de 30 % et une autonomie de 3 jours, le cyclage journalier est de 10 %. La batterie pourra atteindre une valeur de cyclage de 30 % dans les cas suivants :

- Très peu d'ensoleillement pendant 3 jours (nombre de jours d'autonomie).
- Si le client consomme plus que Bj chaque jour.

Relation entre DDQ et DD

$$\text{DDQ} = \frac{\text{DD}}{\text{Autonomie}}$$

4.2.6 Le cyclage d'une batterie

Il caractérise la durée de vie d'une batterie.

C'est le nombre de fois (c.-à-d. cycles) qu'une batterie peut être chargée et déchargée avant qu'elle perde de manière permanente plus de 20 % de sa capacité originale.

Exemple 1 :

Dans le cas d'un système PV, la batterie est chargée chaque *jour* par le panneau solaire et est déchargée chaque nuit pour alimenter les récepteurs, ainsi la durée du cycle est de 24 heures (cycle charge – décharge). Si après deux ans (730 jours ou cycles), la capacité de la batterie est moins de 80 % de sa capacité originale, sa durée de vie sera de 730 cycles.

Exemple 2 :

Dans le cas d'une batterie rechargée en ville une fois par semaine, la durée du cycle charge-décharge est d'une semaine. Si après un an, la capacité de la batterie est moins de 80 % de la valeur originale, sa durée de vie sera de 52 cycles (52 semaines par an).

La durée de vie (le nombre de cycles) dépend principalement des paramètres suivants :

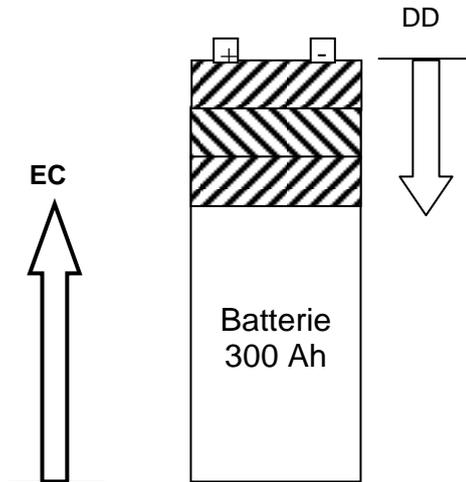
Type de batterie	Selon qu'il s'agisse d'une batterie de voiture ou d'une batterie solaire.
Degré de décharge quotidien (DDQ)	Plus il est élevé, plus la durée de vie sera raccourcie.
Etat de charge avant cyclage	Si la batterie n'est jamais bien chargée, avant d'être déchargée, la durée de vie sera raccourcie.
Température	Si la température est souvent au-dessus de 35°C, la durée de vie sera raccourcie.

La durée de vie d'une batterie est toujours indiquée en spécifiant : degré de décharge (DD), courant de décharge (I_n) ou (C_n) et la température. Par exemple, une batterie aura une durée de vie de 1000 cycles à 80 % DD, C_{10} et 25 °C.

4.2.7 État de charge (EC) [unité : %]

EC est la quantité de charge restante d'une batterie, exprimée en % de la pleine charge.

L'état de charge s'exprime en pourcentage de la pleine charge (de la pleine capacité).
(C.-à-d. 100 % est la pleine charge, 50 % est la demi-charge).



Exemples :

Si une batterie de 100 Ah C_{100} a un EC de 50 %, alors elle est chargée à 50 % et est capable de fournir 50 Ah avec un courant de 1 A.

Si une batterie de 100 Ah C_{100} a un EC de 75 %, alors elle est chargée à 75 % et est capable de fournir 75 Ah avec un courant de 1 A.

4.2.8 Courant de charge d'une batterie [unité : A]

Le courant de charge est l'intensité du courant électrique fourni lors de la charge d'une batterie. Plus il sera élevé, plus la batterie sera chargée rapidement. Une batterie se remplit un peu comme on remplit un réservoir d'eau ; plus le débit d'eau est élevé, plus le réservoir se remplit vite.

$$C_n = I_n \times n \quad (n = \text{temps}) \rightarrow C_{100} = I_{100} \times 100 \text{ heures}$$

Le temps requis pour charger complètement une batterie dépend de :

Intensité de la charge	Plus l'intensité est élevée, plus le temps est court ¹ .
Capacité de la batterie	Plus la capacité est grande, plus le temps est long.
Etat de charge initiale	Si la batterie est moitié chargée, le temps sera d'autant plus court.

¹ Attention : Charger une batterie à un taux trop élevé peut endommager irrémédiablement la batterie.

Règle :

Il faut respecter les données des constructeurs concernant les intensités maximum de charge. En général, la plupart des batteries peuvent sans risque être chargées avec un courant égal à un dixième de leur capacité.

Exemple :

Une batterie de 120 Ah pourra être chargée avec un courant initial de $120 / 10 = 12$ A ; une batterie de 75 Ah avec un courant de 7,5 A.

Exercice : Risque-t-on d'abîmer une batterie de 7 Ah / 12 V avec un module PV de 10 Wc ? L'intensité de charge sera-t-elle trop forte ?

Réponse : *I_{cc} du module de 10 Wc est de 0,62 A, par conséquent l'intensité de charge de la batterie ne dépassera pas 0,62 A. Le taux de charge maximum sera de $7 \text{ Ah} / 0,62 \text{ A} = 11$. C'est juste au-dessus de 10, il n'y a pas de risque d'endommager la batterie.*

4.2.9 Rendement de charge / décharge [unité : %]

Le rendement de charge / décharge est le rapport entre l'énergie délivrée par une batterie (Décharge : Sortie) sur l'énergie fournie à la batterie (Charge = Entrée).

Le rendement de charge / décharge est le rapport (exprimé en pourcentage) de la quantité d'énergie employée par les récepteurs (énergie que doit fournir la batterie la nuit) sur la quantité d'énergie requise pour recharger la batterie entièrement (le jour).

$$\text{rendement 'batterie' (\%)} = \frac{\text{Besoins quotidiens (Ah)}}{\text{Energie pour recharger la batterie (Ah)}}$$

Exemple :

Si une batterie a fourni 30 Ah pendant la nuit, le panneau solaire devra la recharger avec 40 Ah durant la journée. Dans ce cas, le rendement de charge/décharge est égale à $30 \text{ Ah} / 40 \text{ Ah} = 75 \%$.

4.2.10 Autodécharge [unité : % / mois]

L'autodécharge est la charge perdue exprimée comme un pourcentage de l'état initial de charge quand la batterie n'est pas utilisée pendant un mois.

Ce ratio quantifie la perte de charge d'une batterie, laissée au repos, sans qu'aucun récepteur ne soit connecté.

Le taux d'autodécharge dépend de :

Type de batterie	De 3 % / mois à 30 % / mois selon le type de batterie.
Température	Plus la température est élevée, plus le taux d'autodécharge est élevé.
Qualité de l'entretien	L'autodécharge augmente avec l'ajout d'eau non distillée ou d'acide.
Années de service	Plus la batterie est ancienne, plus le taux d'autodécharge est élevé.

Pourcentage de perte de capacité en fonction de la température et de la durée de stockage (cas des batteries stationnaires tubulaires remplies d'électrolyte)

Durée de stockage	Température ambiante					
	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
1 mois	2,5	3	4,5	7	10	14
2 mois	4,5	6	9	13	19	28
3 mois	6,5	8,5	13	19	28	41
4 mois	8	11	17	25	36	53
5 mois	10	14	20	30	45	65
6 mois	12	16	24	36	53	77

Source : Total Energie

Effet néfaste de l'autodécharge :

Quand une batterie plomb-acide, remplie d'électrolyte, est laissée pendant de longues périodes sans recharges régulières (c.-à-d. plusieurs mois), elle perd irrémédiablement une partie de sa capacité à stocker et donc à fournir du courant. **Il faut donc toujours maintenir une batterie en bon état de charge.**

Note : Pour illustrer le concept de l'autodécharge, on peut comparer une batterie à un être humain. Si une personne dort plusieurs jours d'affilée, sans travailler, elle voudra néanmoins boire et manger. Si on l'empêche de boire et manger, la personne tombera malade, puis éventuellement sera tellement faible qu'elle mourra. Pour une batterie, la situation est similaire, la batterie a besoin d'être rechargée régulièrement car chaque jour elle autoconsomme un peu de son électricité.

4.3 Généralités sur les batteries Plomb-acide

Elles sont les plus utilisées dans les systèmes solaires.

4.3.1 Caractéristiques générales

- ▶ La tension nominale est de 2 V par élément ; une batterie de 12 V a 6 éléments en série.
- ▶ Les conceptions traditionnelles des batteries Plomb-acide (c.-à-d. *batterie ouverte*) ont besoin **de remplissage occasionnel avec de l'eau distillée** pour maintenir une concentration d'électrolyte convenable. En effet, en fonctionnement normal, une certaine quantité d'eau sera perdue (sous forme d'hydrogène et d'oxygène).
- ▶ Les batteries Plomb-acide *étanches* ont un électrolyte sous forme de gel. Elles sont sans entretien, toutefois elles consomment également de l'eau, mais en quantité plus réduite, et possèdent une grande réserve d'électrolyte.
- ▶ La durée de vie augmente si la décharge quotidienne (DDQ) représente un faible pourcentage de sa capacité (ex : pour une batterie automobile, si le DDQ est de 50 %, sa durée de vie peut être de 6 mois – 182 cycles, mais si le DDQ est de 30 %, sa durée de vie peut excéder les 2 ans – 730 cycles).
- ▶ Le rendement de charge / décharge se situe entre 65 % et 90 %. Il est raisonnable de prendre une valeur moyenne de 75 %.
- ▶ La densité de l'électrolyte est souvent de 1,28 pour les batteries de voiture et de 1,24 pour les batteries solaires (densité de l'électrolyte lors du remplissage initial ou lorsque la batterie est chargée à 100 %).
- ▶ La durée de vie (prise à 25°C) diminue considérablement avec l'augmentation de la température. Par conséquent, une batterie devrait être installée dans une salle si possible maintenue autour de 25°C.
- ▶ La capacité varie avec la température. Elle est typiquement réduite de 1 % par °C en dessous de 25°C, et augmente environ de 0,5 % par °C au-dessus de 25°C jusqu'à 40°C.

Exemple de variation de la capacité avec la température

Température	-10°C	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C	40°C
Facteur de correction à appliquer pour C ₁₂₀	0,72	0,83	0,91	0,98	1,00	1,02	1,05

Source : Total Energie (batterie solaire stationnaire tubulaire)

4.3.2 Conditions idéales de charge des batteries

Afin d'augmenter la durée de vie des batteries, il faut respecter des règles pour la charge des batteries². La plupart des régulateurs solaires permettent une charge correcte, bien que moins optimisée qu'un chargeur de batterie de bonne qualité alimentée par le réseau électrique.

- Courant de charge : Il doit être assez élevé en début de charge de la batterie (ex : un courant I_{10} avec une tension de charge de 14,3 V à 30°C) et être réduit par la suite vers la fin de la charge. Par exemple, une batterie 100 Ah à C₁₀, peut être chargée avec un courant initial de 10 A, puis 5 A et finalement 1 A pour terminer la charge.
- Surcharger ou charger avec un courant trop fort cause un dégazage important, pouvant endommager la structure des plaques.
- Influence de la température sur la tension de fin de charge : La tension de fin de charge diminue linéairement avec la température de la batterie (typiquement 15,1 V à 0°C et – 0,018 V/°C au-dessus de 0°C, c.-à-d. 14,56 V à 30°C).
- Charge d'égalisation : Les batteries peuvent bénéficier d'une charge prolongée avec des courants assez faibles (*égalisation* ou *boost charge*) pour égaliser les tensions de toutes les cellules (et donc la charge de chaque cellule). C'est parce que, une ou deux cellules d'une batterie, peuvent ne pas accepter leurs charges au même taux que les autres. Dans ces conditions, elles peuvent rester en permanence dans un état non chargé à 100%. Leur durée de vie sera plus courte.
- Formatage des plaques : A la première mise en service des batteries ouvertes (c.a.-d au moment du remplissage de l'électrolyte), il faut recharger la batterie à 100 % pour assurer le 'formage' des plaques. Ceci garantira une meilleure longévité de la batterie.

4.3.3 État de charge / densité d'électrolyte / Tension Uco

L'état de charge (EC) d'une batterie peut être évalué de 2 façons :

- En mesurant la tension de circuit ouvert de la batterie (Uco).
- En mesurant la densité de l'électrolyte.

Un exemple de courbe '*Etat de charge / Uco et densité d'électrolyte*' est donnée au chapitre 4.6 : **Synthèse des principales caractéristiques.**

Attention : *Pour que les mesures de tension Uco soient représentatives de sa charge, déconnecter la batterie de tout appareil électrique (récepteurs et régulateur de charge) au minimum 30 minutes avant d'effectuer la mesure.*

Note :

L'état de charge d'une batterie peut également être mesuré en déchargeant la batterie sur des récepteurs, et en comparant la capacité fournie par la batterie à la capacité nominale de la batterie. Cette méthode n'est réalisable qu'en atelier.

² Il est recommandé de suivre les instructions des fabricants de batteries.

4.4 Principaux types de batteries Plomb-acide

Les batteries Plomb-acide peuvent être classées en plusieurs catégories :

1. Batteries de véhicules (voiture ou camion).
2. Batteries solaires (à plaques planes)
3. Batteries de traction.
4. Batteries solaires stationnaires (à plaques tubulaires).
5. Batteries étanches.

4.4.1 Batteries de voiture

Les batteries de véhicules sont conçues pour démarrer les moteurs de voitures ou de camions.

La conception des éléments est optimisée pour fournir des courants forts pendant un temps très court (alimentation du démarreur d'un véhicule : 50 à 100 A pendant quelques secondes). Fabriquées à partir de nombreuses plaques minces, elles ne sont pas conçues pour fournir un faible courant pendant plusieurs heures, comme c'est le cas pour les systèmes solaires.

Elles sont pourtant souvent utilisées car elles sont bon marché pour les systèmes nécessitant des capacités comprises entre 35 et 200 Ah.

Elles sont assez souvent produites localement, disponibles et dans une certaine mesure, réparables (c.-à-d. un ou plusieurs éléments endommagés peuvent être remplacés dans les ateliers locaux ou à l'usine locale, à condition seulement que la batterie soit récente).

4.4.2 Batteries solaires à plaques planes

Il s'agit essentiellement de batteries de voiture 'améliorées'. Elles ont les mêmes formes extérieures que les batteries de voitures, mais dissimulent des plaques épaisses (pour améliorer le cyclage) composées d'alliages à très faible taux d'antimoine pour limiter la consommation d'eau distillée, la corrosion interne et l'auto-décharge. Elles pêchent souvent par manque d'une grande réserve d'électrolyte.

4.4.3 Batteries de traction

Elles sont conçues pour les véhicules électriques. Elles supportent bien les décharges profondes, mais doivent être rechargées le plus rapidement possible. Elles ont une forte consommation d'eau distillée. Elles sont utilisées sur certains systèmes solaires car leur rapport qualité prix peut s'avérer excellent.

4.4.4 Batteries solaires stationnaires

Elles sont bien adaptées aux systèmes photovoltaïques. La consommation d'eau distillée est basse. En outre, elles peuvent être équipées de bouchons à recombinaison des gaz, pour réduire encore la consommation. Habituellement, ces batteries ont un bac transparent et une grande réserve d'électrolyte, ce qui facilite l'entretien et réduit sa fréquence.

Ces batteries sont assez onéreuses et disponibles seulement auprès des fournisseurs de matériel photovoltaïque (les 'ensembliers' ou 'systémiers').

4.4.5 Batteries étanches

Les batteries étanches sont remplies d'électrolyte et scellées en usine. Elles ne fuient pas et sont facilement transportables. Elles n'exigent pas de remise à niveau de l'électrolyte.

L'électrolyte est, soit, un liquide absorbé sur 'une natte de fibre de verre ' (type AGM : absorbed glass mat), soit un 'gel' d'électrolyte (ce qui donne de meilleures performances). Dans les deux cas, le procédé de fabrication permet une recombinaison des gaz, mais il n'est pas efficace à 100 %. Les gaz sont évacués par une soupape de sûreté, mais la batterie contient une large réserve d'électrolyte.

Les batteries étanches (AGM ou 'gel') existent avec plaques planes ou avec plaques tubulaires. Elles ont des performances en cyclage selon le type de fabrication.

Leur avantage principal est l'absence totale d'entretien, mis à part la vérification des connections aux bornes de la batterie. Les inconvénients principaux sont :

- L'auto décharge (dès qu'elle sort d'usine), même si elle est faible, impose que l'on surveille l'état de charge avant l'installation. Si stockées, il est conseillé de les recharger tous les 6 mois.
- Leurs performances diminuent fortement pour des températures au-dessus de 25°C.
- Elles peuvent être très onéreuses à l'achat.

4.5 Tableau comparatif des types de batteries

BATTERIE OUVERTE (à 20°C)				
	Batterie de voiture ou de camion	Batterie solaire	Batterie de traction	Batterie stationnaire solaire
Type de plaques	Plane mince	Plane épaisse	Tubulaire	Tubulaire
Densité de l'électrolyte	1,28	1,24 à 1,28	1,26 à 28	1,24
Nombre de cycles				
Cyclage 20%	800	2250	3000	3500
Cyclage 30%	700	1900	2000	2250
Cyclage 50%	200	750	1200	1350
Cyclage 80%	60	150	900	750
Consommation d'eau distillée	Moyenne	Moyenne à faible	Elevée	Faible
Auto-décharge	Faible	Faible	Elevée	Faible
Réserve d'électrolyte	Faible	Faible	Faible à moyenne	Elevée

Valeurs indicatives basées sur des documents constructeurs.

BATTERIE ETANCHE (à 20°C)			
	Batterie (AGM)	Batterie (gel)	Batterie solaire (gel)
Type de plaque	Plane épaisse	Plane épaisse	tubulaire
Type d'électrolyte	AGM	Gel	Gel
Nombre de cycles			
Cyclage 20%	1900	4500	5000
Cyclage 30%	1600	3000	3500
Cyclage 50%	700	1500	2500
Cyclage 80%	375	900	1300
Consommation d'eau distillée	Moyenne à faible	Très faible	Très faible
Auto-décharge	Faible	Très faible	Très faible
Réserve d'électrolyte	Faible	Electrolyte sous forme de gel et recombinaison interne de l'oxygène	Electrolyte sous forme de gel et recombinaison interne de l'oxygène

Tableau avec valeurs indicatives basées sur documents constructeurs.

Attention : Consulter les documents constructeurs pour tenir compte des conditions de température du site. Une augmentation de 10°C peut faire chuter les performances jusqu'à 50 % pour les batteries étanches, par exemple.

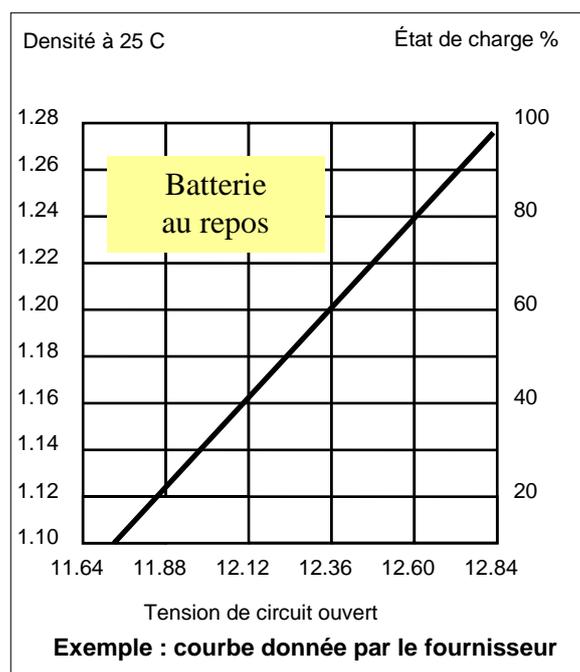
Exercice : Lecture de documentation technique fournie en annexe pour le **module 7**.

4.6 Synthèse des principales caractéristiques

Chacune des caractéristiques suivantes a été discutée dans les sections précédentes.

<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de stockage (Ah) • Tension nominale (V) • Durée de vie en fonction du degré de décharge quotidien (DDQ) • Densité d'électrolyte / tension de circuit ouvert / état de charge 	<p>Ex : 100 Ah à C₁₀₀ et 20°C</p> <p>Ex : 6 V ou 12 V</p> <p>Ex : 2 à 5 ans (730 à 1825 cycles) selon DDQ.</p> <p>Ex : 1,24 à 20°C, tension de circuit ouvert 12,5 V et batterie chargée à 80 %.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Type de technologie 	<p>Batterie ouverte Ex : batterie de voiture ou 'solaire' avec remise à niveau régulière de l'électrolyte</p> <p>Batterie étanche Ex : batterie 'gel' solaire sans entretien</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Auto décharge (% / mois) 	<p>Ex : 5 à 30 % pour une batterie de voiture</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Tension de seuil de charge / décharge 	<p>Ex : 14,5 / 11,4 V</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Courant de charge / décharge (idéal) 	<p>Ex : 5 A pour batterie de 100 Ah C₂₀</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Rendement énergétique (pendant la charge et la décharge) 	<p>Ex : 70 à 75 % pour une batterie de voiture</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Consommation en eau distillée (litres/mois) et lisibilité du niveau d'électrolyte 	<p>Ex : 1 litre tous les 3 mois pour une batterie de 100 Ah / bac transparent ou translucide.</p>

4.6.1 Exemple de courbe : Densité d'électrolyte / Tension Uco / Etat de charge



4.7 Association de batteries en série ou en parallèle

Exercice : Branchement de deux, puis trois batteries de 12 V en parallèle et alimentation d'une lampe de 8 W. Mesures de la tension aux bornes de chaque batterie et de l'intensité produite par chaque batterie. Mesures de la tension aux bornes de la lampe et de l'intensité qui la traverse. Conclusion.

Règle : Batteries en parallèle

L'intensité consommée par la lampe est la somme des intensités fournies par chaque batterie.

$$I = I_{\text{batterie 1}} + I_{\text{batterie 2}} + I_{\text{batterie 3}}$$

La tension aux bornes de la lampe est égale à la tension de chaque batterie

$$U = U_{\text{batterie 1}} = U_{\text{batterie 2}} = U_{\text{batterie 3}}$$

$$\text{Capacité totale} = C_1 + C_2 + C_3$$

Exercice : Branchement de deux batteries de 6 V en série (de même capacité) et alimentation d'une lampe de 8 W – 12 V. Mesures de la tension aux bornes de chaque batterie et de l'intensité qui la traverse. Mesures de la tension aux bornes de la lampe et de l'intensité traversée par la lampe. Conclusion

Règle : Batteries en série

L'intensité est la même dans l'ensemble du circuit.

$$I = I_{\text{batterie 1}} = I_{\text{batterie 2}}$$

La tension aux bornes de la lampe est la somme des tensions des deux batteries.

$$U = U_{\text{batterie 1}} + U_{\text{batterie 2}}$$

$$\text{Capacité totale} = C_1 = C_2$$

4.8 Importance du dimensionnement d'une batterie

Le dimensionnement de la batterie dépend des besoins journaliers, de l'autonomie (durée pendant laquelle le système fonctionnera sans que le panneau solaire ne produise d'électricité, en absence d'ensoleillement - l'énergie sera alors entièrement issue des batteries) et du DDQ.

- ▶ Une batterie sous-dimensionnée sera moins onéreuse à l'achat, mais sera exposée à des cycles plus profonds et donc aura une durée de vie plus courte.
- ▶ Une batterie surdimensionnée sera plus onéreuse et sera rarement complètement chargée, elle sera davantage exposée à la sulfatation et aura par conséquent une durée de vie plus courte.

Le dimensionnement d'une batterie consiste à trouver un juste milieu (voir **module 9**).

4.9 Mesures de sécurité concernant les batteries

▲ Protéger les bornes positives et négatives, de tout contact avec des objets métalliques.

Un court-circuit entre les bornes négatives et positives causera des étincelles et il y a risque d'explosion. Si le court-circuit n'est pas supprimé, la batterie et les pièces métalliques (ex. clé à molettes tombée sur les 2 bornes) traversées par un courant très important, deviendront brûlantes. Il y a risque de brûlures et d'explosion de la batterie.

Pendant les travaux à proximité directe des bornes³ des batteries, placer un chiffon de protection sur les bornes des batteries (pour créer une isolation électrique en cas de chutes d'objets métalliques).

▲ Eviter tout contact avec l'électrolyte (lors du remplissage initial ou lors de la mise à niveau de l'électrolyte).

Les batteries contiennent de l'acide sulfurique dilué avec de l'eau (l'électrolyte), qui est corrosif pour la peau et les yeux. Il est préférable de porter des lunettes et des gants plastiques de protection. En cas d'éclaboussures d'électrolyte dans les yeux (très souvent les lunettes ne sont pas disponibles), rincer abondamment et consulter un médecin immédiatement.

Si de l'électrolyte a été en contact avec la peau, les vêtements, rincer abondamment. Laver vos mains (et vos outils : entonnoir, hydromètre, etc.) après avoir manipulé des batteries.

▲ Transporter la(les) batterie(s) avec précaution

La chute d'une batterie lors de son transport peut provoquer des blessures graves (écrasement des orteils, brûlures dues à l'électrolyte, etc.). De plus, la chute d'une batterie peut provoquer des court-circuits internes, qui peuvent faire éclater la batterie. Transporter la batterie sans précipitation, et maintenir la batterie droite pour éviter les débordements d'électrolyte.

Dans le cas où la batterie a été remplie d'électrolyte avant son installation sur site, le transport peut provoquer des fuites, si les bouchons de la batterie n'ont pas été bien fermés et si la batterie n'est pas maintenue en position horizontale.

▲ Ne pas causer d'étincelles et ne pas faire du feu à proximité des batteries.

Les batteries dégagent de l'hydrogène et de l'oxygène, ces gaz peuvent former un mélange inflammable. Par conséquent, ne pas fumer et ne pas provoquer d'étincelles (court-circuits, soudure) à proximité des batteries.

▲ Installer les batteries dans un coffre et percé d'ouïes d'aération.

Éviter de placer directement les batteries sur le sol.

³ Certains fabricants de batteries fournissent des capuchons isolants à placer sur les bornes.

4.10 Contrôle qualité : achat d'une batterie

1. Comparer et vérifier les dimensionnements

Si la batterie est achetée chez un fournisseur de matériel PV, il est fortement conseillé de lui demander de faire un contrôle du dimensionnement. Demander des explications si la différence entre le dimensionnement de la batterie C_n par le fournisseur et celui du technicien solaire est importante. Il arrive parfois que le fournisseur propose des batteries de plus faible capacité, pour être plus compétitif. Dans ce cas, le DDQ sera plus élevé et la durée de vie de la batterie sera réduite.

2. Vérifier les paramètres suivants avec le fournisseur de batterie

<ul style="list-style-type: none"> • Capacité en C_{10} (Ah) • Tension nominale (V) • Type de technologie • Durée de vie (le nombre de cycles) en fonction de la DDQ • Densité d'électrolyte / tension à vide / état de charge • Date de fabrication des batteries / Date de la dernière recharge pour les batteries étanches • Seuils de tensions de fin de charge / décharge • Consommation d'eau distillée (litres/mois) et lisibilité du niveau • Autodécharge (%/mois) • Intensité maximum de charge (A) • Rendement énergétique (charge / décharge) (%) 	<p>Demander dans quelles conditions, la valeur de la capacité est valide : C_{10}, C_{20}, C_{100}.</p> <p>Ex : 2 V, 6 V ou 12 V</p> <p>Ex : ouverte ou étanche (AGM ou gel)</p> <p>Ex : type de batteries : batterie solaire, stationnaire.</p> <p>Demander le nombre de cycles en fonction de la DDQ et de la température (demander un diagramme)</p> <p>Exiger d'obtenir la courbe caractéristique entre la densité et l'état de la charge (EC).⁴</p> <p>Pour choisir un régulateur adapté</p> <p>Dans les conditions d'utilisation du système solaire.</p> <p>Important pour la fréquence de recharge des batteries remplies d'électrolyte et stockées en magasin.</p> <p>(Courant de charge idéal – méthode idéale de première mise en charge : Formatage)</p> <p>Habituellement difficile à obtenir.</p>
---	--

⁴ Pour les batteries de voiture, ces informations sont presque impossibles à obtenir. Par contre, elles sont disponibles pour les batteries solaires.

3. Calculer le prix de la batterie par unité de capacité C_n (ex : € / Ah) et comparer avec les autres fournisseurs potentiels.

Attention, il est essentiel de comparer les valeurs de capacité dans les mêmes conditions, c'est-à-dire le même nombre d'heures de décharge : C_{10} ou C_{100} .

En général, le prix en Ah / € diminue avec la capacité unitaire des batteries. Il est recommandé d'acheter une seule et grande batterie plutôt que plusieurs petites à mettre en parallèle pour obtenir une même capacité (par exemple : une batterie 200 Ah / 12 V est préférable à 2 batteries de 100 Ah / 12 V). De plus, les batteries de camions (à partir de 150 Ah) sont plus durables que les batteries de voiture car leurs plaques sont plus épaisses et résistent mieux au cyclage. Finalement, le câblage est plus simple (pas besoin de connexion parallèle), ainsi que la maintenance (une seule batterie à maintenir).

4. Insister pour obtenir une garantie du fournisseur et prendre connaissance des conditions d'applications.

Les conditions peuvent indiquer :

- Obligation de remplissage de l'électrolyte et de première mise en charge chez le fournisseur.
- Obligation d'utiliser l'électrolyte fourni par le fournisseur de batteries ou recommandé dans la notice technique de mise en service des batteries.

5. Demander les notices techniques complètes : instructions d'installation et de maintenance / entretien.

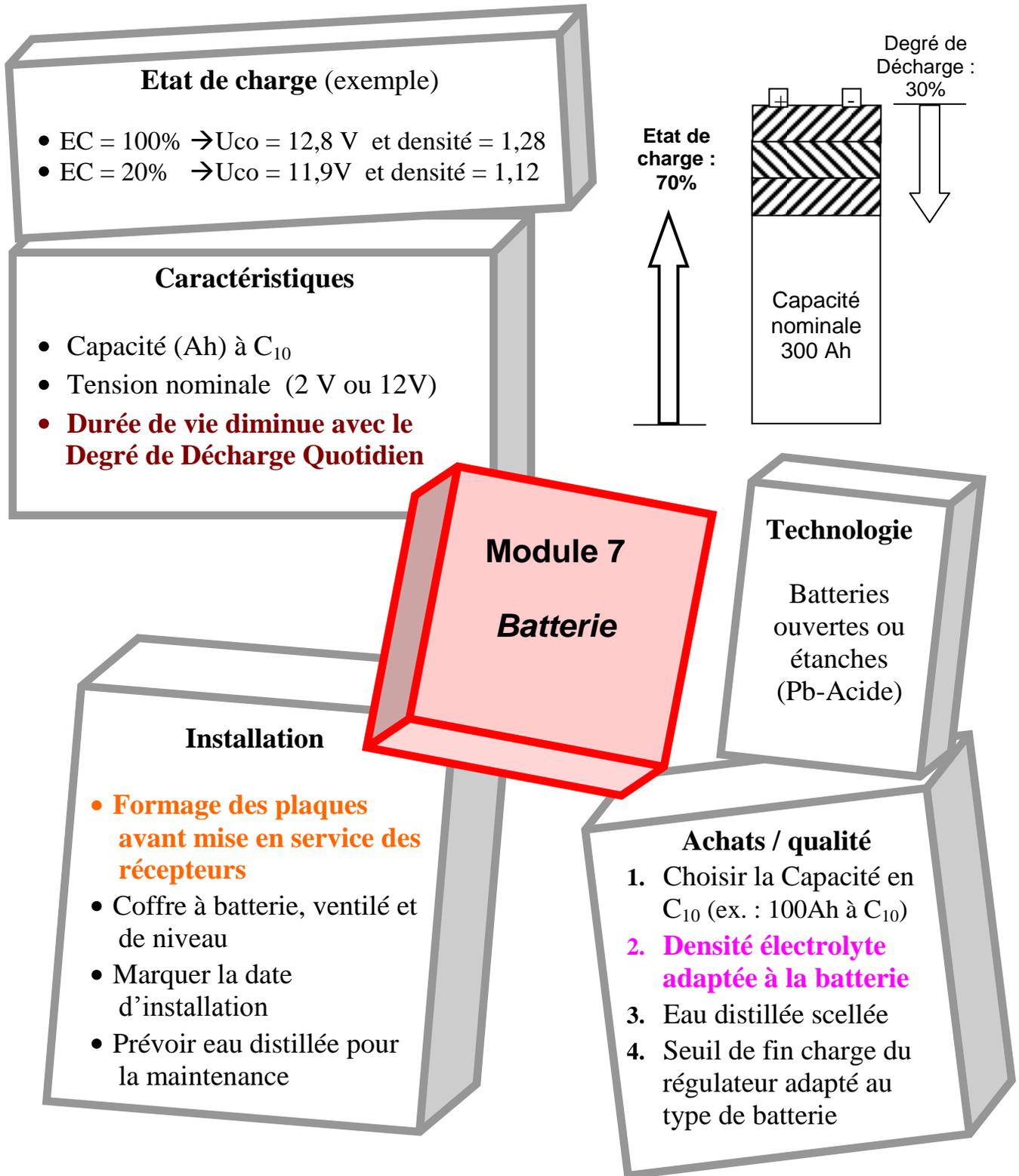
6. Acheter de l'électrolyte de qualité et en quantité suffisante.

Il est conseillé de se fournir en électrolyte chez le fournisseur de batteries, plutôt que d'essayer de faire quelques économies court terme, en achetant l'électrolyte chez un autre fournisseur. En cas de problèmes avec une batterie, le fournisseur de batteries vous fera remarquer que sa batterie est défectueuse à cause de la mauvaise qualité de l'électrolyte. Il rejettera toutes responsabilités.

7. Ne pas oublier d'acheter l'eau distillée pour l'entretien (pour un an minimum).

8. Enfin et dans certains cas seulement (voir point 4.), faire remplir et charger la batterie au magasin du fournisseur de batterie. Ceci a le double avantage de pouvoir constater sur place si la batterie fonctionne et d'obtenir plus facilement une garantie. Cependant, il faudra ensuite transporter cette batterie jusqu'au site d'installation, sans pertes d'électrolyte et dans les meilleurs délais (pour éviter l'autodécharge et pour compléter la charge de la batterie avec le panneau PV).

5 Topogramme



$$\text{Capacité de la batterie} = B_j \times \text{AUT} / (U \times \text{DD})$$

6 Évaluation et feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les concepts et notions de ce module. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner les modules suivants, dans de bonnes conditions.

Il est suggéré de demander aux participants de :

- Lister les principales caractéristiques d'une batterie : Capacité C_n , état de charge, degré de décharge DD, durée de vie en nombre de cycles.
- Commenter sur l'influence de DD sur la durée de vie d'une batterie.
- Commenter sur l'impact de l'intensité de décharge sur la capacité d'une batterie.
- Dessiner un graphe approximatif avec l'état de charge, la densité de l'électrolyte et la tension de circuit ouvert.
- Décrire deux manières de mesurer l'état de charge d'une batterie.
- Enumérer les caractéristiques idéales d'une batterie pour un système solaire.
- Enumérer les mesures de précaution à suivre lors de l'installation et l'entretien d'une batterie.
- Décrire l'ensemble des aspects techniques qu'il faut vérifier lors de l'achat d'une batterie.

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen⁵.

⁵ Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 8 : Récepteurs, onduleurs, câbles

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
	4.1. Récepteurs (ou appareils électriques)	3
	4.1.1. Tension d'alimentation	3
	4.1.2. Puissance électrique	3
	4.1.3. Cas des lampes : choix du type	4
	4.1.4. Cas des appareils audiovisuels et réfrigérateurs	4
	4.2 Câblage	5
	4.2.1. Chutes de tension (ΔU)	5
	4.2.2. Chutes de tension = Pertes de puissance !	6
	4.2.3. Chute de tension maximum autorisée dans un petit système PV	7
	4.2.4. Choix des tensions nominales de systèmes solaires : 12, 24 ou 48 V	7
	4.3 Protection électrique et protection contre la foudre	9
	4.3.1. Fusible	9
	4.3.2. Choix du calibre d'un fusible (Intensité nominale en Ampère)	9
	4.3.3. Alternative au fusible	9
	4.3.4. Protection contre les effets induits de la foudre	11
	4.4 Convertisseur CC-CC	12
	4.4.1. Convertisseur abaisseur de tension	12
	4.4.2. Convertisseur – rehausseur de tension	12
	4.5 Onduleur (CC-CA)	13
	4.5.1. Avantages	13
	4.5.2. Inconvénients	13
	4.5.3. Principales caractéristiques des onduleurs	13
	4.5.4. Choix de la puissance d'un onduleur	14
	4.5.5. Protections électriques	16
	4.5.6. Qualité des onduleurs disponibles sur le marché	16
	4.6 Contrôle Qualité : Achat des récepteurs, onduleurs, câbles	17
5	ÉVALUATION ET FEEDBACK	18

1 Objectifs

Ce module couvre les sujets suivants :

- Choix des récepteurs électriques
- Choix et dimensionnement des câbles,
- Protection électrique des circuits par fusibles ou disjoncteurs,
- Principales caractéristiques des convertisseurs (CC-CC),
- Caractéristiques principales des onduleurs (CC-CA),
- Conseils pour l'achat des câbles et accessoires (contrôle qualité)

2 Durée du module

5 - 10 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Lampe 8 W - 12 V	1
Lampe 13 W - 12 V	1
Câble 2 x 2,5 mm ² (en mètre)	10
Fusible et porte-fusible (de divers calibres)	5
Batterie 7 Ah – 12 V	1
Batterie 50 à 100 Ah - 12 V	1
Convertisseur 12 V CC-CC	2
Onduleur 12 V CC – 230 V CA – 100 à 500 VA	1
Radio ou radiocassette (alimenté par 4 à 6 piles 1,5 V)	1
Téléviseur et magnétoscope (appareils fonctionnant en CA)	1
Lampe 50 à 100 W – 230 V CA	
Multimètre	4
Un ensemble de câbles et d'accessoires (dominos, etc.)	1

4 Contenu

4.1. Récepteurs (ou appareils électriques)

Les clients utilisent les *récepteurs* (ou encore les *appareils électriques*) pour leurs besoins quotidiens. Ils sont à l'origine des besoins énergétiques du client.

4.1.1. Tension d'alimentation

Les récepteurs peuvent être des appareils tels que les lampes, les radios, les radiocassettes et les téléviseurs (voir aussi dans le **module 4**, la **section 4.4.2**). Il est généralement préférable que les récepteurs aient une tension d'alimentation de 12 V ou 24 V CC, car le système solaire fonctionne en 12 V ou 24 V CC.

Si les récepteurs ne peuvent pas fonctionner sous 12 ou 24 V CC, il faut compléter l'installation avec soit, un onduleur pour des appareils 230 V CA, soit un convertisseur CC-CC pour quelques appareils CC. Dans certains cas, il peut être plus économique d'acheter un récepteur 12 V, plutôt qu'un onduleur ou un convertisseur...pour alimenter l'ancien récepteur inadapté à la tension nominale du système solaire.

4.1.2. Puissance électrique

La puissance des appareils doit être connue avant de dimensionner et installer un système solaire. Elle est souvent marquée au dos des appareils, sur la plaque signalétique. S'il n'y a pas d'informations disponibles sur la puissance ou sur le courant consommé, il est essentiel de l'estimer, mieux de la mesurer (c.-à-d. en mesurant l'intensité avec un ampèremètre et en multipliant le résultat par la tension¹ ; voir des exemples de mesures et de calculs dans le **module 4**).

Se rappeler toujours qu'afin de réduire la taille et le coût d'un système, il est fondamental de :

Règle générale :

- **Choisir des récepteurs avec la plus basse puissance électrique possible, pour un service similaire**
- **Choisir des appareils fonctionnant en 12 ou 24 V CC.**
- **Dans la mesure du possible, choisir l'emplacement des appareils pour réduire les longueurs de câble.**

¹ Si le récepteur est en CA, il faut tenir compte du facteur de puissance.

4.1.3. Cas des lampes : choix du type

En général, il faut opter pour des lampes à tubes fluorescents (réglette avec tube ou lampe fluo-compacte). Toutefois, si une lampe est allumée seulement quelques minutes par jour, par exemple, dans une salle de bains ou un couloir, alors une lampe incandescente de 5 ou de 10 W, peut être choisie plutôt qu'une lampe fluorescente. Une ampoule incandescente est souvent moins coûteuse à l'achat et comme la durée d'utilisation quotidienne est courte, ce choix n'aura pas d'impact sur la taille du système.

Pour la plupart des besoins d'éclairage domestiques, il est judicieux de choisir une lampe avec tube fluorescent de 8 W pour toutes pièces d'une surface comprise entre 4 et 16 m². Ce type de lampe est largement disponible et donc les tubes 8 W de remplacement également.

Le tableau suivant propose d'autres exemples de solutions d'éclairage pour des besoins domestiques.

Pièce à éclairer	Surface de la pièce (m ²)	D (m)	Exemples de solutions
Salle à manger	12	1,8	1 x lampe fluorescente de 11 W
Salon	12	1,8	1 x lampe fluorescente de 8 W
Chambre	10	1,8	1 x lampe fluorescente de 8 W
Cuisine	8	1	1 x lampe fluorescente de 8 W
Salle de bains	2	1	1 x lampe fluorescente de 8 W
Toilette	2	2	1 x lampe incandescente de 3 W
Bureau (ambiance)	10	1,8	1 x lampe fluorescente de 8 W
Table de travail	2	0,7	1 x lampe fluo. de 8 W avec réflecteur ou 1 x spot halogène 10 ou 20 W
Coin lecture	1	1,8	1 x lampe fluo de 8 W avec réflecteur ou 1 spot halogène 10 W ou 20 W
Eclairage extérieur	-	-	1 x lampe fluorescente de 8 W

D : distance maximum entre la source lumineuse et la surface à éclairer (ex : table à manger, table de bureau). Il est nécessaire que les murs et plafonds soient de couleur claire.

Remarque : les niveaux d'éclairement obtenus dans les exemples ci-dessus sont faibles par comparaison avec les niveaux d'éclairement rencontrés dans les pays industrialisés, mais ils sont bien plus élevés que ceux obtenus avec des lampes à pétrole ou des bougies.

4.1.4. Cas des appareils audiovisuels et réfrigérateurs

Note au formateur : vous trouverez dans le *Guide Pratique du Solaire Photovoltaïque, version septembre 2005*, des compléments d'informations utiles sur les appareils audiovisuels et les réfrigérateurs (Chapitre 8, section 8.2 et 8.3)

4.2 Câblage

4.2.1. Chutes de tension (ΔU)

Les câbles sont nécessaires pour connecter ensemble les composants d'un système PV, afin que tous soient alimentés avec une tension correcte, proche de la tension nominale des appareils. Par exemple, une lampe 12 V CC doit être alimentée avec une tension voisine de 12 V, mais pas avec une tension de 10,5 V. Cette basse tension risque d'endommager la lampe et de réduire sa durée de vie.

Un câble provoque une chute de tension (ΔU) lorsqu'il est traversé par un courant. Concrètement, cela signifie que dans le cas où un câble alimente une lampe depuis une batterie, la tension aux bornes de la lampe sera plus faible que la tension aux bornes de la batterie. Dans l'exemple ci-dessus, ΔU est de $12 \text{ V} - 10,5 \text{ V} = 1,5 \text{ V}$.

La chute de tension dépend essentiellement des facteurs suivants :

- **la longueur du câble** (en mètres), câble avec deux conducteurs
- **la résistance électrique du câble, R_c** (en ohm / mètre de câble), inversement proportionnelle à sa section.
- **l'intensité I** , (en ampère), parcourant le câble.

$$\text{Chute de tension } (\Delta U) = \text{longueur de câble} \times R_c \times I$$

Section du câble (mm ²)	1	1,5	2,5	4	6	10	16
R_c = Résistance du câble (ohm/mètre)	0,040	0,0274	0,01642	0,01018	0,00678	0,0039	0,00248

***Important** : un câble comprend toujours 2 fils conducteurs principaux, la formule est valide avec la longueur de câble, pas la longueur de fils électriques.

Exemple pratique de calcul :

Si une lampe de 13 W, 12 V CC ($I = 13 \text{ W} / 12 \text{ V} = 1,08 \text{ A}$) est connectée à une batterie 12 V par l'intermédiaire de 30 mètres de câble de faible section (c.-à-d. $2 \times 1 \text{ mm}^2$; semblable à un câble de haut-parleur), la chute de tension sera :

$$\Delta U \text{ (V)} = 30 \text{ m} \times 0,040 \text{ ohm/m} \times 1,08 \text{ A} = 1,29 \text{ V}$$

Si la batterie a une tension en charge de 12 V, la lampe sera alimentée avec $12 \text{ V} - 1,29 \text{ V} = 10,71 \text{ V}$! Ceci est néfaste pour la lampe : elle ne s'allumera pas correctement (faible éclairage) et son tube noircira rapidement. Dans certains cas, la lampe risque de ne pas s'allumer du tout.

Exercice : Calcul de la chute de tension avec un câble de section : c.-à-d. $2,5 \text{ mm}^2$, puis 4 mm^2 .

Réponses :

Câble $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$: $\Delta U = 30 \times 0,01642 \times 1,08 = 0,53 \text{ V}$. La chute de tension est beaucoup plus petite qu'avec le câble de $2 \times 1 \text{ mm}^2$.

Câble $2 \times 4 \text{ mm}^2$: $\Delta U = 30 \times 0,01018 \times 1,08 = 0,33 \text{ V}$. La chute de tension est encore plus petite.

Conclusion, plus le câble est de section forte, plus la chute de tension est petite.

Exercice : Calcul de ΔU si la longueur de câble est deux fois plus courte.

Conclusion : plus le câble est court, plus la chute de tension est faible.

Exercice : Calcul de ΔU si la lampe a une puissance de 8 W au lieu de 13 W ($I = 8 \text{ W} / 12 \text{ V} = 0,66 \text{ A}$)

Conclusion : plus le courant est faible, plus la chute de tension est petite.

Il est fondamental de valider ces calculs théoriques ($\Delta U = \text{longueur de câble} \times R \times I$), par des mesures pratiques sur des installations.

Exercice : Branchement d'une lampe de 13 W à un câble de 10 m, de $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ de section alimentée par une batterie (ne pas oublier d'insérer un fusible).

1 - Mesure du courant consommé par la lampe avec un multimètre (placé en série) et mesure de la chute de tension avec un autre multimètre, (c.-à-d. la tension aux bornes de la batterie, moins la tension aux bornes de la lampe). On peut également mesurer la chute de tension le long du câble, tous les mètres (en mettant à nu le câble tous les mètres).

2 – Calcul de la chute de tension.

Réponse :

L'intensité consommée par la lampe est : $I = P / U = 13 \text{ W} / 12 \text{ V} = 1,08 \text{ A}$. $\Delta U = 10 \times 0,01642 \times 1,08 = 0,17 \text{ V}$. Les mesures avec le multimètre doivent donner des résultats semblables. Faire cet exercice à plusieurs reprises jusqu'à ce que les participants comprennent sans ambiguïté ce qu'est une chute de tension et comment ils peuvent l'estimer par le calcul.

4.2.2. Chutes de tension = Pertes de puissance !

Une chute de tension se traduit par une perte de puissance, et donc une perte d'énergie au cours du temps : $P = \Delta U \times I \times \text{Temps}$.

Exemple :

Si $\Delta U = 2 \text{ V}$ au long d'un câble de 10 m de long traversé par une intensité de 5 A, alors la puissance perdue est de : $P = U \times I = 2 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 10 \text{ W}$. Cette puissance est fournie à perte par la batterie et elle devra être produite à perte par le panneau solaire !

4.2.3. Chute de tension maximum autorisée dans un petit système PV

Les chutes de tension sont néfastes (c.-à-d. perte de puissance, donc d'énergie et risque de dommages aux équipements quand la tension est trop basse). Pour ces raisons, les câbles doivent être dimensionnés pour limiter les valeurs de chutes de tension aux valeurs ci-dessus :

	Installation 12 V	Installation en 24 V
Entre Module PV et Régulateur	0,3 V Maximum	0,6 V Maximum
Entre Régulateur et Batterie	0,15 V Maximum	0,3 V Maximum
Entre Régulateur et Lampes ou autres récepteurs	0,3 V Maximum	0,6 V Maximum

Note 1 : Viennent s'ajouter aux chutes de tension dans les câbles, d'autres chutes de tension : celles des fusibles, les diodes anti-retour et également les chutes de tension aux bornes des régulateurs (voir **module 6**, Régulateur).

Note 2 : Les valeurs de chutes de tension maximum à ne pas dépasser entre batterie et récepteurs sont quelques fois exprimées en % de la tension nominale (souvent inférieure à 3 %). Ex : pour un système en 24 V, cela donne : $24 \text{ V} \times 3 \% = 0,72 \text{ V}$.

Afin de limiter les chutes de tension, il faut :

Règles à respecter

- 1- Réduire les longueurs de câble autant que possible,**
- 2- Sélectionner des câbles de forte section : au moins 2,5 mm²,**
- 3- Ne pas dépasser les valeurs indiquées de chutes de tensions (Calculer les chutes de tension pour choisir la bonne section de câble).**

4.2.4. Choix des tensions nominales des systèmes solaires : 12, 24 ou 48 V

Pour une puissance électrique donnée, plus la tension est basse, plus l'intensité du courant est élevée. Par voie de conséquence, les courants sont souvent plus forts dans les petits systèmes 12 V ou 24 V que dans les installations en 230 V.

Exemple : Imaginons une lampe incandescente de 8 W, fonctionnant en 12 V, puis en 230V :

$$P = U \times I \rightarrow 12 \text{ V} \times 0,66 \text{ A} = 230 \text{ V} \times 0,035 \text{ A} = 8 \text{ W}$$

Pour une même puissance, l'intensité (sous 12 V) est 18 fois plus grande que l'intensité consommée sous 230 V. Ceci explique pourquoi, les installations solaires en 12 V ont, en règle générale, des sections de câbles plus fortes que les systèmes fonctionnant en 230V.

Exercice : Calcul de l'intensité consommée par une TV de 70 W, dans le cas où la TV est une TV 12 V CC, 24 V CC ou encore 230 V CA.

Réponse est :
 - TV 12 V CC, $I = P / U = 70 \text{ W} / 12 \text{ V} = 5,83 \text{ A}$;
 - TV 24 V CC, $I = P / U = 70 \text{ W} / 24 \text{ V} = 2,91 \text{ A}$;
 - TV 230 V CA, $I = P / U = 70 \text{ W} / 230 \text{ V} = 0,30 \text{ A}$.

Le calcul de l'intensité consommée en CA est approximatif ci-dessus. En effet, la formule correcte à employer, dans ce cas devrait être : $P = U \times I \times 0,7$ pour une TV en CA (0,7 est le facteur de puissance). L'intensité est en fait légèrement plus élevée : 0,45 A (au lieu de 0,32 A).

Dans le cas des petits systèmes solaires (moins de 200 Wc), la tension de fonctionnement est communément de 12 V pour des raisons technico-économiques.

Si le système dépasse 200 Wc, il faut étudier s'il n'est pas préférable de choisir une tension de générateur solaire de 24 V CC, et ensuite une distribution en 230 V CA. Dans le cas d'un système en 24 V, on pourra choisir des câbles de section plus faible, mais attention, il faudra alors installer un régulateur et une batterie 24 V et tous les récepteurs devront être capables de fonctionner en 24 V. Ces derniers ne sont pas aussi répandus que les appareils en 12 V CC ou en 230 V CA. Attention, la maintenance sera plus difficile (pièces de rechanges).

De plus en plus souvent, au-delà de 200 Wc et jusqu'à 1000 Wc environ, il est souhaitable d'installer un onduleur pour faire fonctionner tous les récepteurs (lampes, TV, radiocassette, etc.). L'installation de production d'énergie (panneau, régulateur, batterie) est alors réalisée en 24 V CC (plus rarement en 12 V CC). A partir de la batterie 24 V (ou du régulateur), le courant est ensuite transformé en 230 V pour les récepteurs, par l'intermédiaire de l'onduleur.

Pour des systèmes au-delà de 1000 Wc, l'installation PV sera en 48 V et la distribution en 230 V par l'intermédiaire d'un onduleur 48 V CC / 230 V CA.

Régime de tension / configuration typique

Taille du système	Tension du générateur solaire (panneau / régulateur / batterie)	Tension d'alimentation des récepteurs
0 à 200 Wc	12 V CC	12 V CC
200 à 1000 Wc	24 V CC	24 V CC ou 230 V CA
Au-delà de 1000 Wc	48 VCC	230 V CA

Attention : ce tableau donne les configurations typiques. Le dimensionnement doit se faire au cas par cas, en fonction des distances entre les éléments du générateur (modules PV, régulateur, batteries) et les récepteurs, et en fonction des tensions d'alimentation des récepteurs.

4.3 Protection électrique et protection contre la foudre

4.3.1. Fusible

Afin de protéger l'installation et les usagers, contre les court-circuits, il est indispensable d'installer des protections électriques. La protection la plus simple et la plus souvent utilisée est le *fusible*. Il sera placé entre **le régulateur et la batterie (fusible en ligne sur la borne positive)**.

Sur certaines installations², il est conseillé de rajouter un fusible entre **le régulateur et les récepteurs**, ou bien entre la batterie et un onduleur. Dans ces deux cas, si les récepteurs ou l'onduleur sont déjà équipés d'un fusible interne, ne pas rajouter de fusible. En effet, rajouter un fusible en ligne ne protège pas forcément mieux l'installation, et a des conséquences néfastes sur l'installation : chute de tension supplémentaire et risque de faux contact.

4.3.2. Choix du calibre d'un fusible (Intensité nominale en Ampère)

Le calibre d'un fusible doit toujours être supérieur au courant maximum qui le traversera en fonctionnement normal (+25 à +50 %).

Le fusible (entre batterie et régulateur) sera d'une part traversé par le courant de charge du panneau ($I_{\text{maximum}} = I_{\text{cc}}$) ou bien par le courant consommé par les récepteurs (la somme des courants de chaque récepteur). Le calibre (intensité nominale) du fusible devra être supérieur au plus grand de ces deux courants.

4.3.3. Alternative au fusible

Dans certains systèmes, les fusibles sont remplacés par des disjoncteurs (de même calibre ou de calibre légèrement inférieur). Les disjoncteurs ont l'avantage de ne pas avoir de cartouches à remplacer, mais sont un peu plus coûteux à l'achat.

Règle :

- 1- Remplacer TOUJOURS un fusible grillé par un fusible de même calibre.**
- 2- Ne jamais remplacer un fusible par des fils en cuivre.**
- 3- Vérifier régulièrement la chute de tension d'un fusible.**

Exemple pratique 1 : dimensionnement d'un fusible entre le régulateur et la batterie.

Cas d'une installation avec 2 modules de 50 Wc et avec les récepteurs suivants : 3 lampes de 8 W / 12 V et une radio de 5 W / 12 V.

Courant maxi entre Batterie et Panneau (I_{panneau}) :

Le courant I_{cc} de chaque module est de 3,3 A (voir la documentation technique dans les **annexes** pour le **module 5**). Par conséquent, le courant maximum entre le panneau et la batterie sera de : $I_{\text{panneau}} = 3,3 \text{ A} \times 2 = 6,6 \text{ A}$.

² En général, sur les installations importantes (plus de 500 Wc).

Courant maxi consommé par les Récepteurs ($I_{récepteur}$) :

La puissance de l'ensemble des récepteurs est de 29 W (c.-à-d. 3 lampes de 8 W / 12 V et une radio de 5 W / 12 V). Le courant maximum traversé par le régulateur vers les récepteurs sera : $I_{récepteur} = P / U = 29 \text{ W} / 12 \text{ V} = 2,42 \text{ A}$.

$$I_{panneau} > I_{récepteur} \\ 6,6 \text{ A} > 2,42 \text{ A}, \quad \text{dans ce cas on choisira un fusible d'un calibre de 10 A.}$$

Exemple pratique 2 : dimensionnement d'un fusible entre le régulateur et la batterie

Cas d'une installation avec 1 module de 32 Wc et avec les récepteurs suivants : 3 lampes de 8 W / 12 V et une radio de 5 W / 12 V.

Courant maxi entre Batterie et Panneau ($I_{panneau}$) :

Avec un panneau PV de 32 Wc, le courant I_{cc} est de 1,9 A (voir les **annexes** pour le **module 5**). Par conséquent, le courant maximum entre le panneau et la batterie sera : $I_{panneau} = 1,9 \text{ A}$.

Courant maxi consommé par les récepteurs ($I_{récepteur}$) :

La puissance de l'ensemble des récepteurs est de 29 W (c.-à-d. 3 lampes de 8 W / 12 V et une radio de 5 W / 12 V), le courant maximum traversé par le régulateur vers les récepteurs sera de $I_{récepteur} = P / U = 29 \text{ W} / 12 \text{ V} = 2,42 \text{ A}$.

$$I_{récepteur} > I_{panneau}, \\ 2,42 \text{ A} > 1,9 \text{ A}, \quad \text{dans ce cas, on choisira un fusible d'un calibre de 5 A.}$$

Exercice : Dimensionnement du calibre d'un fusible à placer entre le régulateur et la batterie, dans le cas d'un système 12 V avec 6 lampes de 13 W et un radiocassette de 10 W.

Réponse :

La puissance totale est : $6 \times 13 \text{ W} + 1 \times 10 \text{ W} = 88 \text{ W}$. Le courant maximum sera : $I = P / U = 88 / 12 = 7,33 \text{ A}$. Le calibre du fusible sera de 10 A.

Même exercice, mais dans ce cas-ci, le système PV est un système en 24 V.

Réponse :

La puissance totale est : $6 \times 13 \text{ W} + 1 \times 10 \text{ W} = 88 \text{ W}$. Le courant maximum sera : $I = P / U = 88 / 24 = 3,66 \text{ A}$. Le calibre du fusible sera de 5 A.

Exercice : Dimensionnement d'un fusible à placer entre la batterie et le régulateur sur un système PV 12 V avec 10 lampes de 13 W et un radiocassette de 10 W, doté de 3 modules PV de 50 Wc.

Réponse :

Avec un module de 50 Wc, I_{cc} est de l'ordre de 3,3 A (voir documentation technique). I_{cc} des 3 modules sera de 9,9 A.

La puissance totale des récepteurs est : $10 \times 13 \text{ W} + 1 \times 10 \text{ W} = 140 \text{ W}$. Le courant maximum consommé par les récepteurs sera : $I = P / U = 140 / 12 = 11,66 \text{ A}$.

La plus forte des intensités est 11,66 A. Le calibre du fusible doit être de 15 A.

4.3.4. Protection contre les effets induits de la foudre

La plupart des composants des systèmes PV sont vulnérables aux effets induits de la foudre. Ils y sont plus ou moins résistants selon leurs spécifications techniques. Dans certaines régions, la foudre est rare et il n'y a aucune précaution à prendre.

Dans les régions réputées pour leurs orages fréquents et dévastateurs, et pour minimiser les risques liés à la foudre, il faut :

1. Dans la mesure du possible, installer le module le plus bas possible sur une toiture, tout en évaluant les ombres portées (risques d'ombrage).
2. Mettre à la terre le module et sa structure. Dans ce cas, choisir une section de fil d'au moins 10 mm² (16 mm² est préférable) qui doit être reliée d'une part, à l'armature d'aluminium de module et d'autre part, à un piquet de terre (ex : un piquet de 1,5 m de profondeur).
3. Alternativement (ou par mesure additionnelle de protection), installer un interrupteur bipolaire entre le module et le régulateur. Quand les orages sont annoncés ou menacent, l'utilisateur devra ouvrir l'interrupteur. Par voie de conséquence, le régulateur, la batterie et les récepteurs seront complètement hors-circuit par rapport au module. Cette solution est très efficace à condition que l'utilisateur ait été formé (à l'ouverture et à la fermeture de l'interrupteur).
4. Conseiller à l'usager, de déconnecter tous les appareils branchés sur des prises, pendant les orages violents. Si présence d'une antenne TV, déconnecter la prise d'antenne de la télévision.
5. Une autre mesure additionnelle et dans le cas de l'utilisation d'un onduleur, consiste à ouvrir le circuit 'départ onduleur' vers les récepteurs (pendant les orages).

La protection des systèmes contre la foudre n'est pas souvent simple à concevoir. Avant d'installer telle ou telle protection (ou de décider de ne pas en installer), il est recommandé de demander conseil aux fabricants / fournisseurs de matériel ayant de l'expérience dans la région concernée.

Finalement, la protection des systèmes contre les effets induits de la foudre, ne protège pas contre les effets directs : c'est à dire si la foudre tombe directement sur le module ou la batterie. Dans de tels cas, le système est en général détruit : module brisé, régulateur grillé, etc. Ces cas sont toutefois rares.

4.4 Convertisseur CC-CC

4.4.1. Convertisseur abaisseur de tension

Ils sont indispensables dans le cas où les récepteurs fonctionnent avec des tensions plus basses que 12 V CC³ (ex : petite radio, téléphone portable). Les convertisseurs sont des appareils électroniques de conception relativement simple.

Certains peuvent être ajustés à la tension appropriée (ex : une radio avec 4 piles de 1,5 V a besoin de 6 V ; le convertisseur doit être réglé sur 6 V). La plupart des convertisseurs sont réglables dans les plages suivantes : 1,5 V - 3 V - 4,5 V - 6 V - 7,5 V - 9 V et 12 V.

Les convertisseurs sont disponibles en diverses puissances. Il faut sélectionner un convertisseur dont la puissance est supérieure aux appareils à alimenter.

Les petits convertisseurs 'premier prix' sont souvent de mauvaise qualité (5 à 10 €). Ils ont une faible durée de vie et ont souvent un mauvais rendement énergétique. Les petits convertisseurs de meilleure qualité sont un peu plus onéreux (15 à 25 € et plus), mais sont plus fiables, possèdent un meilleur rendement et disposent habituellement d'une protection interne (fusible à fil ou fusible thermique électronique).

Les chargeurs de téléphone 12 V CC sont des convertisseurs CC-CC.

Exercice : Choix de la valeur de la tension à régler sur un convertisseur dans les cas suivants : une radio avec 2 piles rondes, 4 piles rondes, 6 piles rondes, 8 piles rondes, et 10 piles rondes.

Réponse :

*pour 2 piles : 3 V,
pour 4 piles : 6 V,
pour 6 piles : 9 V,
pour 8 piles : aucun besoin de convertisseur,
pour 10 piles : aucun besoin de convertisseur.*

10 piles donnent une tension de 15 V ; la plupart des radios '10 piles' fonctionnent bien si alimentées par une prise 12 V CC (batterie de 12 V).

Exercice : Calcul du rendement d'un convertisseur : Branchement d'un convertisseur à une batterie de 12 V pour alimenter une radio de 4 V ou de 6 V. Mesure du courant et de la tension à l'entrée et à la sortie du convertisseur (avec 4 multimètres).

Calcul de la puissance d'entrée (côté 12 V) et de la puissance de sortie (côté 4 ou 6 V).
Conclusion sur le rendement du convertisseur et son impact sur le dimensionnement d'un petit système solaire.

4.4.2. Convertisseur – rehausseur de tension

Un rehausseur de tension est un appareil capable de faire fonctionner un appareil de 24 V CC sur un système solaire en 12 V CC. Le rehausseur de tension est rarement nécessaire dans le cas des petits systèmes solaires domestiques.

³ Si l'installation est en 24 V CC, il peut être nécessaire d'utiliser un convertisseur 24 V CC / 12 V CC.

4.5 Onduleur (CC-CA)

Ce sont des appareils électroniques de puissance capables de transformer le courant continu (CC) en courant alternatif (CA), semblable à celui du réseau électrique. Les onduleurs sont de plus en plus fiables ; les progrès sont notoires depuis ces cinq dernières années.

4.5.1. Avantages

- Ils permettent l'utilisation de tous les récepteurs CA à partir d'une source de courant continu (ex : batterie 12 V, 24 ou 48 V CC). Il faut tout de même choisir des appareils en CA, économes en électricité.
- Ils permettent de réduire les sections des câbles (à puissance égale, les intensités sont bien inférieures à celles que l'on observe en CC, basse tension).

4.5.2. Inconvénients

- Ils consomment de l'énergie du fait de leur rendement énergétique, et donc, ceci a pour effet d'augmenter la taille du panneau PV et de la batterie.
- La qualité du signal de sortie est variable selon le type et le prix de l'onduleur.
- Ils ont pour la plupart une consommation de stand-by non négligeable (c'est-à-dire, que même si la puissance de sortie est nulle, la puissance d'entrée peut représenter quelques watts jusqu'à plusieurs dizaines de watts, selon les modèles).
- Si ils sont connectés en direct sur la batterie, ceci a pour conséquence le manque de protection de la batterie contre les décharges profondes (les onduleurs ont eux-mêmes une protection tension basse, mais avec un seuil de tension très faible, ex : 10,5 V).
- Ils rendent un système solaire plus complexe à concevoir, à installer et à utiliser.
- Ils sont extrêmement difficiles à réparer, particulièrement la nouvelle génération, conçus essentiellement à partir de composants électroniques de puissance.

4.5.3. Principales caractéristiques des onduleurs

<ul style="list-style-type: none"> • Puissance nominale (W) ou (VA) • Plage de tension de sortie (V) • Plage de tension d'entrée (V) • Forme du signal de sortie • Rendement (%) • Capacité de surcharge (%) 	<p>Ex : 200 W ou 200 VA (Puissance nominale de sortie en fonctionnement continu)</p> <p>Ex : 230 V CA \pm 5 %, 50 Hz \pm 5 %. Des fluctuations plus importantes risquent d'endommager les récepteurs électriques.</p> <p>Régulation du signal de sortie : les tensions crêtes maximales doivent être comprises entre 300 V et 320 V.</p> <p>Ex. : entre 10,5 V et 15 V. Hors de ces limites, l'onduleur doit être capable de se couper de son alimentation, sans être endommagé.</p> <p>Pure sinusoïde ou sinusoïde modifiée</p> <p>Au moins 75 % de rendement sur une plage de puissance allant de 20 à 80 %.</p> <p>Exemple de capacité de surcharge : <u>souhaitée</u> : 250 % de la puissance nominale pendant 15 secondes. <u>impérative</u> : 125 % de la puissance nominale pendant 60 secondes.</p>
Consommation de veille	Ex : 0,5 à 15 W
Détection automatique de récepteurs	Pour les onduleurs de haute qualité (ex : 4 à 10 W)
Protection électrique	Protection interne contre les court-circuits sur circuit CA Protection contre les inversions de polarité

4.5.4. Choix de la puissance d'un onduleur

La puissance nominale d'un onduleur (VA) est la puissance maximale CA pouvant être délivrée en fonctionnement continu, lorsque toutes les caractéristiques de régulation se maintiennent dans les tolérances indiquées, à une température ambiante comprise entre 0°C à 40°C.

La puissance est exprimée en VA, plutôt qu'en W pour tenir compte du facteur de puissance des récepteurs. Voir les explications ci-après :

Cas d'un moteur de 200 W – 230 V avec un facteur de puissance de 0,7 :

$P = U \times I \times \cos \varphi^4 = V \times A \times \cos \varphi \rightarrow VA = P / \cos \varphi \rightarrow VA = 200 / 0,7 = 285 \text{ VA}$.
L'onduleur devra être au moins un modèle 300 VA. Cet onduleur aura un courant de sortie de 1,24 A (c.a.d : 285 VA / 230 V).

Cas de récepteur de 200 W - 230 V avec un facteur de puissance égal à 1 :

$P = U \times I \times \cos \varphi = V \times A \times \cos \varphi \rightarrow VA = P / \cos \varphi \rightarrow VA = 200 / 1 = 200 \text{ VA}$.
L'onduleur devra être au moins un modèle de 200 VA. Cet onduleur produira un courant de sortie de courant de sortie de 0,87 A (c.a.d : 200 VA / 230 V).

Conclusion : il faut préférer des récepteurs avec des facteurs de puissance voisins de 1 car cela permet de choisir un onduleur de plus petite taille.

En règle générale, un onduleur doit avoir une puissance nominale (validée en fonctionnement continu) environ 2 à 3 fois supérieure à la puissance totale des récepteurs à alimenter. Ceci lui permettra d'absorber les différentes valeurs de facteur de puissance, ainsi que les pics de courants de démarrage de certains appareils (par exemple, certains téléviseurs ou moteurs électriques).

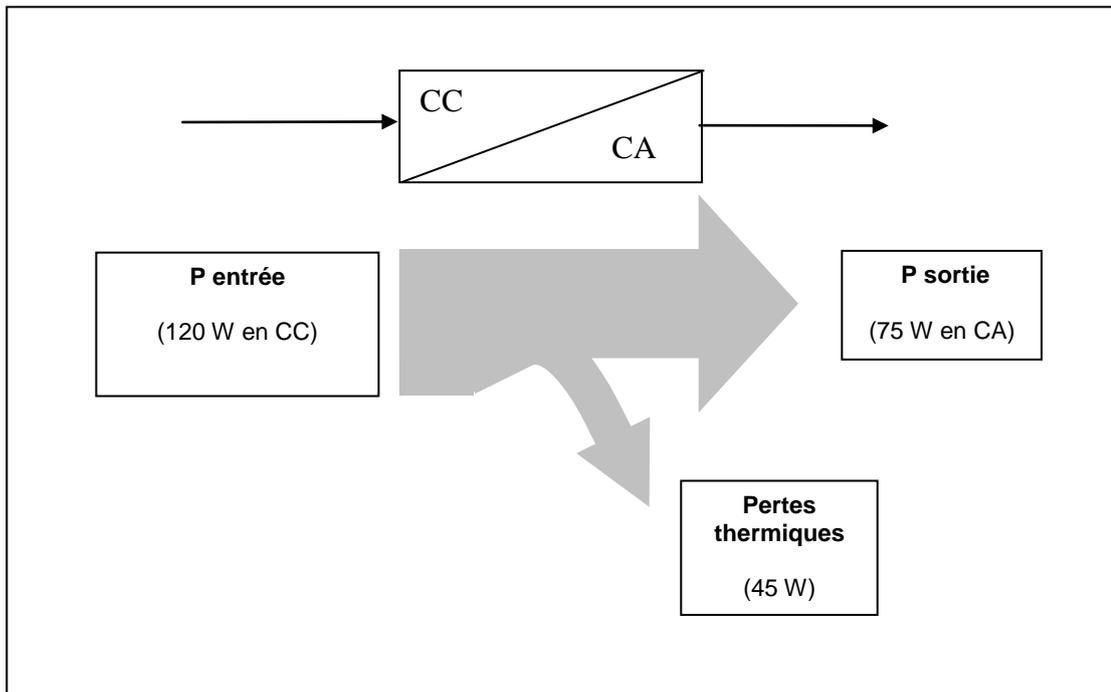
Rendement

Comme précédemment vu dans le **module 2**, la formule du *rendement énergétique* est :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance en sortie (W)}}{\text{Puissance en entrée (W)}}$$

Pour un onduleur, la puissance en entrée est la puissance fournie par la batterie, (à l'entrée de l'onduleur). La puissance en sortie est la puissance fournie en CA par l'onduleur (puissance consommée par le ou les récepteurs).

⁴ Voir Module 2, relation en U et I en CA



Exercice :

Branchement d'un onduleur à une batterie 12 V pour alimenter une TV (40 à 70 W – 230 V CA) et un magnétoscope (20 W – 230 V CA) ou une lampe incandescente (50 à 100 W). Mesure du courant et de la tension à l'entrée et à la sortie de l'onduleur (avec 4 multimètres).

Calcul de la puissance d'entrée (côté 12 V CC) et de la puissance de sortie (côté 230 V CA), en prenant soin de choisir correctement les formules de puissance (CC et CA). Attention au facteur de puissance.

Conclusion sur le rendement de l'onduleur et sur l'impact sur le dimensionnement d'un système solaire.

Détection automatique de récepteurs

La détection automatique de récepteurs permet de réduire la consommation d'énergie en veille lorsqu'aucun récepteur n'est connecté. Le système doit être capable de détecter aussi bien les charges résistives (lampes incandescentes) que les charges inductives telles que certains luminaires fluorescents. Le niveau de détection, à partir duquel l'onduleur alimente un récepteur, peut être réglable sur certains modèles d'onduleurs.

Il est souhaitable que la détection automatique de récepteurs démarre entre 4 et 10 W, avec un effet d'hystérésis ; l'onduleur doit détecter et démarrer à partir d'un récepteur de 10 W, mais arrête l'onduleur seulement lorsque la puissance tombe à 4 W.

Si l'onduleur n'a pas de système de détection de récepteurs (cas le plus fréquent sur les petits onduleurs), il est impératif de placer un interrupteur sur le circuit d'entrée de l'onduleur, pour isoler totalement l'onduleur de la batterie. On évite ainsi de consommer inutilement de l'énergie, lorsqu'aucun récepteur n'est requis.

4.5.5. Protections électriques

1. **L'entrée CC** doit être protégée par un fusible (ou un disjoncteur) au moins au niveau de l'entrée positive. Une protection contre les inversions de polarité est toujours recommandée
2. **La sortie CA** de l'onduleur (et le circuit de distribution) doivent être protégés contre les courts-circuits ou surcharges, au moyen de disjoncteurs externes. Une protection unique par fusible n'est pas recommandée.

Note importante : en cas de court-circuit sur la sortie CA, les disjoncteurs ou fusibles externes réagiront souvent trop tard et l'onduleur sera 'grillé' (sauf il a sa propre protection interne contre les court-circuits)

En effet, le transformateur et les éléments de commutation de l'onduleur doivent être protégés en interne contre les surintensités, les surchauffes et les court-circuits ; les dispositifs de protection correspondants doivent être ré-initialisables automatiquement ou manuellement une fois que le défaut a été supprimé.

3. Si l'onduleur alimente des récepteurs accessibles au public (onduleur d'assez forte puissance), il faut respecter les règles de la mise à terre. En général, on relie le Neutre (sortie onduleur) à la barrette de terre. Il faut également placer des disjoncteurs à différentiels (ex : 30 mA). Il faut respecter la réglementation en vigueur pour les installations électriques 230 V CA du pays concerné et la notice technique de l'onduleur.

4.5.6. Qualité des onduleurs disponibles sur le marché

Les *onduleurs premiers prix* produisent un signal de sortie 'carré'. Leur rendement énergétique est faible (seulement 50 à 70 %), même à pleine puissance nominale. A faible puissance, leur rendement peut être de seulement 25 %. Ces onduleurs sont facilement reconnaissables car ils sont souvent encombrants et très lourds ou alors très légers par rapport aux appareils de haute qualité.

Les onduleurs de meilleure qualité, et donc plus cher, produisent des signaux de sortie très proches de celui du réseau électrique (pure sinusoïde) avec des rendements qui peuvent être excellents (85 % de rendement sur une large plage de puissance allant de 20 à 80 %). Ces onduleurs comportent de très bonnes protections électriques (contre les court-circuits, les surcharges, les inversions de polarités).

4.6 Contrôle Qualité : Achat des récepteurs, onduleurs, câbles

Lors de l'achat des équipements, il est conseillé de :

- Vérifier les plaques signalétiques des appareils (ex : tension nominale et puissance nominale, etc.)
- Obtenir la documentation technique des appareils. L'absence de plaque signalétique ou de documentation n'est pas un signe encourageant quant à la qualité du matériel.
- Vérifier la consommation électrique des appareils. Ne pas se fier toujours aux informations données. Certaines réglettes équipées d'un tube 8 W fluorescent peuvent consommer jusqu'à 15 W !
- Fusibles : Choisir des fusibles ayant de faibles chutes de tension, et une bonne résistance à la corrosion, en particulier si le fusible doit être installé dans une boîte à batterie.
- Onduleurs : demander au fournisseur / vendeur, de faire une démonstration du bon fonctionnement de l'onduleur (avec divers types de récepteurs). Vérifier que l'onduleur possède une protection interne contre les court-circuits en sortie CA. Vérifier les valeurs de rendement sur l'ensemble de la plage de puissance.
- Câbles : Vérifier la section des câbles chez le fournisseur. Certains câbles⁵ vendus avec une étiquette précisant 2 x 2,5 mm² sont en fait des câbles 2 x 1,0 mm² ! Si les câbles doivent être installés à l'extérieur, choisir des câbles résistants aux ultraviolets ou prévoir des gaines résistantes aux UV et aux intempéries en général.
- Obtenir des garanties les plus intéressantes possibles sur les équipements achetés
- Vérifier la disponibilité des pièces détachées pour faciliter les travaux de maintenance et de dépannages.

⁵ Selon des expériences de terrain en Ouganda et Kenya.

5 Évaluation et Feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les principaux concepts et notions du module. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner, dans de bonnes conditions, les modules suivants.

Il est suggéré de demander aux participants (seul ou en équipe) de :

- Enumérer les récepteurs et composants appropriés pour un petit système solaire (type de lampes, type de câbles, etc.).
- Indiquer les 3 paramètres influençant les chutes de tension.
- Calculer la chute de tension le long d'un câble $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ de 20 m, traversé par un courant de 2,5 A, de 5 A et de 10 A, sachant que la résistance électrique du câble est de 0,01642 ohm/mètre.
- Énoncer les valeurs de chute de tension maximum autorisée entre le module PV et le régulateur, entre le régulateur et la batterie, et finalement entre le régulateur et les récepteurs (pour un système 12 V).
- Choisir le calibre d'un fusible pour protéger une installation où les récepteurs ont une puissance totale de 250 W sous 12 V CC.
- Décrire 2 méthodes de protection contre les effets induits de la foudre.
- Donner les avantages et les inconvénients d'un onduleur.
- Décrire les principales caractéristiques techniques d'un onduleur.
- Expliquer pourquoi un onduleur doit avoir une protection interne contre les court-circuits.
- Décrire les aspects importants à vérifier lors de l'achat de : lampes, câbles, onduleur.

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen⁶.

⁶ Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 9 : Dimensionnement et devis

1	OBJECTIFS	2
2	DURÉE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NÉCESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	Préliminaire et limitations	3
4.1.1	<i>La méthode proposée.....</i>	<i>3</i>
4.2	Évaluation des besoins énergétiques du client	4
4.2.1	<i>Besoins énergétiques du client.....</i>	<i>4</i>
4.2.2	<i>Cas de l'utilisation d'un onduleur.....</i>	<i>5</i>
4.2.	Dimensionnement du panneau solaire	6
4.3	Dimensionnement de la batterie.....	7
4.3.1	<i>Ratios de vérification du dimensionnement.....</i>	<i>8</i>
4.4	Choix de la taille du régulateur.....	9
4.4.1	<i>Système avec l'ensemble des récepteurs connectés au régulateur.....</i>	<i>9</i>
4.4.2	<i>Système avec onduleur connecté directement à la batterie.....</i>	<i>9</i>
4.5	Choix du calibre d'un fusible	10
4.5.1	<i>Cas standard.....</i>	<i>10</i>
4.5.2	<i>Cas d'un onduleur placé en direct sur les batteries.....</i>	<i>10</i>
4.6	Dimensionnement des câbles.....	11
4.6.1	<i>Exemple pratique.....</i>	<i>11</i>
4.6.2	<i>Section A à B : Câble entre le panneau PV et le régulateur.....</i>	<i>12</i>
4.6.3	<i>Section C à D : Câble entre le régulateur et la batterie.....</i>	<i>12</i>
4.6.4	<i>Section E à F : Câble entre le régulateur et la boîte de jonction.....</i>	<i>12</i>
4.6.5	<i>Section F à G : Câble entre la boîte de jonction et une lampe.....</i>	<i>12</i>
4.6.6	<i>Entre E et G : Chute de tension totale entre le régulateur et une lampe.....</i>	<i>12</i>
4.6.7	<i>Résultats.....</i>	<i>13</i>
4.7	Elaboration d'une offre de prix : le devis.....	14
4.7.1	<i>Check-list : le formulaire.....</i>	<i>14</i>
4.7.2	<i>Cas particulier des 'tout-petits' systèmes (10 à 30 Wc).....</i>	<i>14</i>
4.7.3	<i>Coûts des systèmes solaires (€/Wc).....</i>	<i>15</i>
4.7.4	<i>Fourchette des prix de divers systèmes solaires.....</i>	<i>15</i>
4.7.5	<i>Fourchette des prix de quelques composants solaires.....</i>	<i>16</i>
5	ÉVALUATION ET FEEDBACK	18

1 Objectifs

Ce module traite des sujets suivants :

- Comment dimensionner chaque composant d'un petit système solaire pour pouvoir installer un système complet, fonctionnel et au meilleur rapport qualité / prix :
 - Module,
 - Batterie,
 - Régulateur,
 - Fusibles, et
 - Câbles.

- Comment élaborer un devis pour un système PV complet.
 - Prix du matériel,
 - Coût d'installation, etc.

2 Durée du module

5 - 15 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Formulaires de dimensionnement (<i>selon le Guide Pratique du Photovoltaïque, Dimensionnement, Installation et Maintenance, version septembre 2005</i>).	3 par participant
Formulaires d'estimation de prix (selon même source)	3 par participant
Calculatrice solaire	1 par participant
Catalogue de fabricants ou de fournisseurs avec liste de prix	1

4 Contenu

4.1 Préliminaire et limitations

Règle

**Du dimensionnement d'un système solaire vont dépendre son prix, sa qualité intrinsèque, et sa longévité.
Par conséquent, le dimensionnement est une étape cruciale, avant toute installation.**

Le dimensionnement d'un système domestique est assez simple. La présence d'un onduleur complique légèrement le dimensionnement. Finalement, lorsque la taille du système PV dépasse 400 Wc, le dimensionnement devient un peu plus complexe.

Quelque soit les méthodes de dimensionnement, elles ont leurs limites. En effet, en raison des incertitudes sur les valeurs de l'irradiation solaire et sur les besoins du client, et de la qualité de certains composants (en particulier la batterie), les résultats ne sont pas fiables à 100 %.

L'irradiation solaire fluctue d'année en année (on estime que les variations peuvent atteindre 20 % en plus ou en moins). La consommation d'électricité du client est susceptible de varier également. Par conséquent, même lorsque la taille des composants d'un système est calculée soigneusement, il est possible qu'il y ait de courtes périodes de coupure de la fourniture d'électricité. En contrepartie, il y aura aussi des périodes d'abondance (énergie supplémentaire disponible). Dans le dernier cas, les clients ne se plaindront jamais !

4.1.1 La méthode proposée

- Ce module décrit une méthode simplifiée de dimensionnement, suffisamment précise pour les petits systèmes PV.
- Cette méthode, grâce à un formulaire, permet le dimensionnement des composants principaux sur une seule feuille de calcul (mis à part le détail de calcul des chutes de tension, qui est expliqué aussi dans ce module).
- Un exemplaire de ce formulaire se trouve dans les **annexes** du Guide Pratique *Formulaire de dimensionnement simplifié*. Il comprend 5 sections principales pour permettre le dimensionnement par étape, et dans l'ordre suivant :

Étapes à respecter :

1. **Évaluation des besoins énergétiques du client, de la cliente**
2. **Dimensionnement du panneau solaire**
3. **Dimensionnement de la batterie**
4. **Choix de régulateur**
5. **Dimensionnement des câbles**

La méthode proposée, peut toujours, et d'ailleurs c'est conseillé, être validée par les résultats de dimensionnement fournis par le ou les fournisseurs de matériel solaire.

4.2 Évaluation des besoins énergétiques du client

L'évaluation des besoins énergétiques du client a été expliquée en détail dans le **module 4**. Le tableau ci-dessous est extrait du **module 4**.

4.2.1 Besoins énergétiques du client

Récepteurs électriques (marque, type, tension)	CC ou CA	Localisation	Qté		P * (W)		Durée d'utilisation (h)		Rendement		Energie (Wh/j)	Intensité nominale ** (A)
Lampe fluorescente, 12V	CC	Cuisine	1	X	8	X	4	/	1	=	32	0,67
Lampe fluorescente, 12V	CC	Pièce principale	1	X	13	X	5	/	1	=	65	1,08
Lampe fluorescente, 12V	CC	Chambre	1	X	8	X	3	/	1	=	24	0,67
Radiocassette et son convertisseur	CC	Pièce principale	1	X	17	X	4	/	1	=	68	1,42
TV couleur 50 W / 230 V	CA	Pièce principale	1	X	50	X	4	/	0,7		286	5,95
Magnétoscope 20 W / 230 V	CA	Pièce principale	1	x	20	X	2	/	0,7		57,1	2,38
Besoins totaux											532 Wh	12,17

* La puissance est la puissance consommée par un appareil. Habituellement, la puissance et la tension nominale sont marquées au dos des appareils. S'il n'y a pas d'indication de puissance électrique, ni de courant électrique consommé indiqués, mesurer le courant consommé par l'appareil et sa tension d'alimentation, avec un multimètre et en déduire la puissance ($P = U \times I$). Attention, cette méthode est valable pour les récepteurs alimentés en CC. S'il s'agit de mesurer la puissance d'un appareil fonctionnant en CA, il faut évaluer le *facteur de puissance* du récepteur et utiliser la formule suivante : $P = U \times I \times \text{facteur de puissance}$.

**L'intensité nominale peut être déterminée à partir de la plaque signalétique (ex : si l'étiquette indique 8 W – 12V, alors en utilisant la formule : $P = U \times I$, $I = P/U = 8 / 12 = 0,67$ A. Cette formule est valide pour des appareils CC.

Ainsi les besoins totaux sont de **532 Wh**.

Dans ce tableau, on tient compte des pertes énergétiques causées par l'utilisation d'un onduleur pour les appareils en CA, en indiquant une valeur de rendement moyen de l'onduleur prévu (ex : 70 %).

4.2.2 Cas de l'utilisation d'un onduleur

Si les appareils sont des récepteurs fonctionnant en CA, un onduleur est indispensable.

Rendement d'onduleur et puissance CA connus :

Le rendement de l'onduleur est connu, par exemple 70 %, ainsi que la puissance de l'appareil à brancher (ex : 50 W). Dans ce cas, l'appareil de 50 W consomme en réalité $50 / 0,7 = 71,4$ W. Si l'appareil fonctionne 4 heures par jour, l'énergie consommée est égale à : $71,4 \text{ W} \times 4 \text{ heures} = 286 \text{ Wh}$.

Rendement d'onduleur et puissance des appareils inconnus :

Dans le cas d'appareils en CA, il peut être difficile de connaître l'énergie réellement demandée à la batterie, car le rendement de l'onduleur n'est pas toujours connu avec précision, ni la puissance consommée en CA par le ou les récepteurs. Il est possible d'estimer ces valeurs par expérience, ou bien, il est suggéré de procéder ainsi (et ceci dans le cas où les appareils sont disponibles) :

1. Brancher l'appareil ou les appareils CA sur l'onduleur.
2. Mesurer l'intensité du courant (CC) et la tension (CC) en amont de l'onduleur.
3. Calculer alors la puissance consommée en CC.
4. Vérifier que votre résultat est cohérent : la puissance en entrée doit être supérieure à la puissance en sortie de l'onduleur.
5. Utiliser cette valeur de puissance et multiplier par la durée d'utilisation de l'appareil pour connaître la consommation énergétique (Wh / jour) et la reporter dans le tableau en section 4.2.1.

Exemple

Si on branche un téléviseur sur un onduleur et que l'on mesure un courant de 8 A sous 12 V, alors la puissance consommée par le téléviseur est de $P = 8 \text{ A} \times 12 \text{ V} = 96 \text{ W}$. L'appareil consomme peut-être 70 W en alternatif (voir sa plaque signalétique), mais l'onduleur consomme 96 W pendant toute la durée d'utilisation (ex : 5 h).

$$\begin{aligned} \text{Energie consommée par le téléviseur : } & 70 \text{ W} \times 5 \text{ h} = 350 \text{ Wh} \\ \text{Energie consommée par l'onduleur : } & B_j = 96 \text{ W} \times 5 \text{ h} = 480 \text{ Wh} \end{aligned}$$

Le système solaire (les modules PV) devra produire 480 Wh / jour, et pas seulement 350 Wh !

4.2. Dimensionnement du panneau solaire

Le panneau solaire doit être dimensionné pour :

1. Produire assez d'énergie pour couvrir quotidiennement les besoins énergétiques du client (B_j = consommation des récepteurs et pertes dues aux éventuels onduleurs ou convertisseurs),
2. Produire un surplus d'énergie pour compenser les pertes énergétiques de conversion dans la batterie (c.-à-d. la batterie a un rendement de charge et décharge – voir le **module 7**). Le *Rendement de charge et de décharge* (R_b) caractérise ces pertes.
3. Produire un surplus d'énergie pour compenser diverses autres pertes d'énergie dans l'installation (c.-à-d. les pertes dans les câbles dues aux chutes de tension, pertes dans le régulateur, pertes dues à un fonctionnement non-optimal du panneau solaire, etc.). Le *Rendement énergétique d'installation* (R_i) caractérise ces pertes.

En conséquence, la taille du panneau **Pc** (en Wc) est calculée avec la formule ci-dessous :

$$P_c = B_j / (E_j \times R_b \times R_i) \quad \text{car} \quad B_j = P_c \times E_j \times R_b \times R_i$$

où **B_j** : Total des besoins énergétiques réels totaux (Wh).

R_i : Rendement d'installation, habituellement pris à 85 %.

R_b : Rendement de charge et décharge de la batterie, habituellement pris à 70 %.

E_j : Irradiation quotidienne moyenne du mois le plus défavorable, dans le plan du module (kWh/m².jour).

B_j = Besoins totaux (Wh)		R_b		R_i		E_j		Puissance crête (Wc)	Quantité de modules (Nm)
532	/	0,70	/	0,85	/	4,5	=	198,60	1

Il est nécessaire de choisir un module PV d'une puissance crête supérieure ou égale à 198,60 Wc. Le choix du module dépendra également des garanties apportées et des prix des modules disponibles localement (ex : 4 modules de 50 Wc ou bien 3 modules de 75 Wc).

Exercice : Dimensionnement des modules PV pour les besoins suivants : 12 Wh, 150 Wh, 1200 Wh avec $E_j = 4,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{jour}$.

Réponses :

12 Wh : le panneau aura une Pc minimum de : 3,9 Wc >>>> 1 module de 5 Wc

150 Wh : le panneau aura une Pc minimum de : 49 Wc >>>> 1 module de 50 Wc

1200 Wh: le panneau aura une Pc minimum de : 394 Wc >>>> 8 modules de 50 Wc.

4.3 Dimensionnement de la batterie

La capacité (la taille) de la batterie doit être :

1. Suffisante pour fournir les besoins quotidiens en énergie électrique (cette énergie ayant été produite par le panneau PV pendant le jour). C'est la **capacité utile**.
2. Suffisante pour fournir les besoins quotidiens en énergie, même s'il a plu pendant un ou plusieurs jours consécutifs. Ce stockage d'énergie permet d'obtenir une certaine **autonomie**, notée **AUT**, en nombre de jours.
3. Suffisante pour s'assurer que les cycles quotidiens de charge / décharge soient peu profonds : faible **DDQ** (voir module 7). Ceci implique de choisir une valeur de **DD** (**degré de décharge maxi autorisé**) pour garantir une durée de vie optimum de la batterie.

Afin de répondre à ces exigences, la capacité nominale est calculée en utilisant cette formule :

$$\text{Capacité de la Batterie} = (\text{Bj} \times \text{AUT}) / (\text{DD} \times \text{U}) \quad (\text{en Ah})$$

AUT : Autonomie en jours ; 1 à 5 jours selon l'autonomie exigée par le client et selon le nombre de jours consécutifs sans soleil (ex : 3 jours pour les petits systèmes d'éclairage – 5 jours pour les réfrigérateurs en climat avec faible fluctuations saisonnières, type africain). L'AUT peut atteindre 8 à 15 jours pour les climats avec de longues périodes dans ensoleillement (Ex : Europe).

DD : Le degré de décharge autorisée. DD peut être choisie autour de 50 % et jusqu'à 70 % pour les batteries stationnaires solaires, mais seulement 30 % pour les batteries de voiture.

U : La tension nominale de la batterie (ex : 12 V).

Bj = Besoins totaux (Wh)		AUT (jours)		DD		U (V)		Capacité minimale (Ah)	Batterie choisie (Ah)
532	X	3	/	0,5	/	12,0	=	265,9	270

Règle

La capacité C_n choisie de la batterie doit être égale ou supérieure à la capacité minimum déterminée **dans les conditions d'utilisation du système**. C'est-à-dire que le courant moyen consommé par les récepteurs doit être inférieur ou égal au courant de décharge I_n .

En règle générale, il est prudent de choisir des capacités en dix heures (C_{10}). Ex : 270 A C_{10}

Note : Si le client est disposé à acheter une batterie solaire, il est possible de choisir un DD plus élevé. Si DD est de 70 %, la capacité minimum de la batterie sera : $(532 \text{ Wh} \times 3 \text{ j}) / (0,7 / 12 \text{ V}) = 190 \text{ Ah}$. La capacité de la batterie est plus petite, mais cela ne signifie pas que cette batterie sera moins chère à l'achat, compte tenu du prix élevé des batteries solaires.

4.3.1 Ratios de vérification du dimensionnement

Lorsque la taille de la batterie et du panneau ont été calculées, on a vu qu'il faut choisir des tailles égales ou supérieures, selon les équipements disponibles en stock. Ceci a des conséquences sur le fonctionnement du système, qu'il convient d'évaluer avec les ratios suivants :

Impact sur la production d'énergie

Ratio module = $(P_{cu} \times N_m \times E_j \times R_i \times R_b) / B_j$ → il doit toujours être > 1

P_{cu} : Puissance unitaire du module.

N_m : Nombre de modules.

E_j, R_i, R_b, B_j : (comme précédemment indiqué).

Ce ratio est le rapport de la production d'énergie (en tenant compte des pertes) sur les besoins (B_j). Il permet de vérifier si le choix de la puissance crête du panneau est correct et indique s'il y existe une marge de sécurité.

Exemple :

Dans l'exemple précédent, la formule indiquait une puissance crête de 198,6 Wc et les modules disponibles sont des 75 Wc ; il en faut donc 3 (75 x 3 = 225 Wc).

$$\text{Ratio Module} = (75 \text{ Wc} \times 3 \times 4,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j} \times 0,70 \times 0,85) / 532 \text{ Wh} = 1,13$$

La puissance crête installée (225 Wc) est supérieure de 13 % à celle calculée. C'est confortable.

Si l'on choisit 4 modules de 50 Wc, le ratio devient : $(50 \text{ Wc} \times 4 \times 4,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j} \times 0,70 \times 0,85) / 532 \text{ Wh} = 1,006$. La puissance crête installée est juste au-dessus de celle calculée.

Impact sur la durée de vie de la batterie

Il est conseillé de calculer le DDQ (degré de décharge journalier). Il doit toujours être égal ou inférieur à DD/AUT.

DDQ = $B_j / (\text{Capacité choisie} \times U)$ → DDQ doit toujours être < DD / AUT

Exercice : Calcul de la capacité utile d'une batterie quand les besoins énergétiques B_j sont de 532 Wh et calcul de DDQ quand la batterie choisie a une capacité de 270 Ah avec DD = 50 % (modèle au-dessus de la capacité calculée de 265,90 Ah).

Réponse : La capacité utile est $532 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 44,30 \text{ Ah}$. La DDQ = $532 \text{ Wh} / (270 \text{ Ah} \times 12 \text{ V}) = 0,16$ soit 16%. DD / AUT = 50% / 3 = 16,6 %. La batterie utilisera 16,6 % de sa capacité nominale quotidiennement (cycle de 16 %). C'est une faible valeur de décharge quotidienne qui aura un impact favorable sur la durée de vie de la batterie.

4.4 Choix de la taille du régulateur

4.4.1 Système avec l'ensemble des récepteurs connectés au régulateur

Le régulateur est traversé par les courants maximum suivants :

1. le **courant maximum de court circuit (Icc)** du panneau PV
2. le **courant maximum consommé par les récepteurs** lorsqu'ils sont en fonctionnement.

Règle de dimensionnement :

Le régulateur doit avoir :

- Un courant maximum de charge	> (+ 25 %)	courant maximum de court circuit (Icc) du panneau PV
- Un courant maximum de décharge	> (+ 50 %)	courant maximum consommé par l'ensemble des récepteurs

Dans l'exemple de dimensionnement, nous avons les courants suivants :

1. le courant Icc du panneau de 200 Wc est de 12,2 A.
2. Le courant maximum consommé par les récepteurs est la somme des courants consommés par chaque appareil (voir tableau 4.2.1, on tient compte du rendement de l'onduleur) : 12,17 A

- Le courant maximum Icc du panneau (Icc x nombre de modules) :	12,2 A
- Le courant maximum consommé par tous les récepteurs (appareils) :	12,17 A

Le régulateur doit avoir un courant de charge maximale $> 12,2 \text{ A} \times (1 + 25 \%) = 12,2 \times 1,25 = 15,25 \text{ A}$ et un courant de décharge maximale $> 12,17 \times (1 + 50 \%) = 12,17 \times 1,50 = 18,25 \text{ A}$. Un régulateur 20 A sera nécessaire.

Exercice : Lecture de documents constructeurs concernant des régulateurs de diverses puissances, et choix d'un régulateur approprié à ce système.

4.4.2 Système avec onduleur connecté directement à la batterie

Le régulateur n'est plus traversé par les courants consommés par les appareils CA, puisque l'onduleur est connecté directement sur la batterie. Dans ces conditions, le régulateur doit être capable de supporter au moins l'intensité de court-circuit du panneau (125 % de Icc panneau). Le régulateur peut être de taille plus réduite dans la plupart des cas. Attention, dans ce cas de figure, il faut rappeler que les batteries ne sont plus protégées contre les décharges profondes, sauf si l'onduleur est piloté par le régulateur par un circuit de télécommande.

4.5 Choix du calibre d'un fusible

Règle

Le calibre d'un fusible (intensité nominale) doit toujours être supérieur au courant maximum qui le traversera en fonctionnement normal (+ 50 %).

4.5.1 Cas standard

Le fusible (entre Batterie et Régulateur) sera, d'une part, traversé par le courant de charge du panneau ($I_{\text{maximum}} = I_{\text{cc}}$) et d'autre part, traversé par le courant consommé par les récepteurs (la somme des courants des récepteurs en tenant compte de la présence éventuelle d'un onduleur). Le calibre du fusible devra être supérieur au plus grand de ces deux courants.

Courant maxi entre Batterie et Panneau (I_{panneau}) :

Avec un panneau PV de 200 Wc, le courant I_{cc} est de 12,2 A. Par conséquent, le courant maximum entre le panneau et la batterie sera de : $I_{\text{panneau}} = 12,2 \text{ A}$.

Courant maxi consommé par les Récepteurs ($I_{\text{récepteur}}$) :

L'intensité maximum consommée par les récepteurs est de $I_{\text{récepteur}} = 12,17 \text{ A}$.

$$\begin{array}{l} I_{\text{panneau}} > I_{\text{récepteur}} \\ 12,2 \text{ A} > 12,17 \text{ A} \end{array}$$

Dans ce cas, on choisira un fusible d'un calibre : $12,2 \times (1 + 50 \%) = 12,2 \times 1,5 = 18,3 \text{ A}$, soit un fusible de 20 A.

Cas où un fusible est placé entre le régulateur et les récepteurs

Il est peut être souhaitable sur les systèmes au-delà de 200 Wc, de protéger les lignes de distribution vers les récepteurs, par des fusibles additionnels en prenant soin d'éviter des chutes de tension supplémentaires.

4.5.2 Cas d'un onduleur placé en direct sur les batteries

Fusible côté CC

L'onduleur est connecté directement sur la batterie (et non sur la sortie *Utilisation* du régulateur). A moins que l'onduleur soit déjà équipé d'un fusible sur son alimentation CC, il est nécessaire de placer un fusible entre la batterie et l'entrée de ce dernier. Il devra être capable de supporter l'intensité maximum et les intensités de démarrage (surcharge).

Ex : Un onduleur a une puissance de 300 VA. Le courant maximum en entrée sera de : $I = P / (\text{rendement onduleur} \times 12 \text{ V}) = 300 / (0,7 \times 12 \text{ V}) = 35 \text{ A}$. Le calibre choisi doit être de $35 \text{ A} \times 1,5 = 52,5 \text{ A}$. Sa taille peut éventuellement être supérieure dans le cas où les intensités de démarrage dépassent l'intensité calculée ci-dessus.

Fusible côté CA

Il est souhaitable de placer un fusible sur le réseau 230 V en sortie d'onduleur. Son calibre sera plus faible que celui placé en entrée de l'onduleur, compte tenu de la tension plus élevée (230 V CA).

4.6 Dimensionnement des câbles

Principe : Les câbles ne doivent pas provoquer des chutes de tension pénalisantes pour le système. Les chutes de tension sont calculées le long de chaque circuit en prenant le courant **maximum** traversant chaque câble.

Valeurs à ne pas dépasser pour un système en 12 V CC

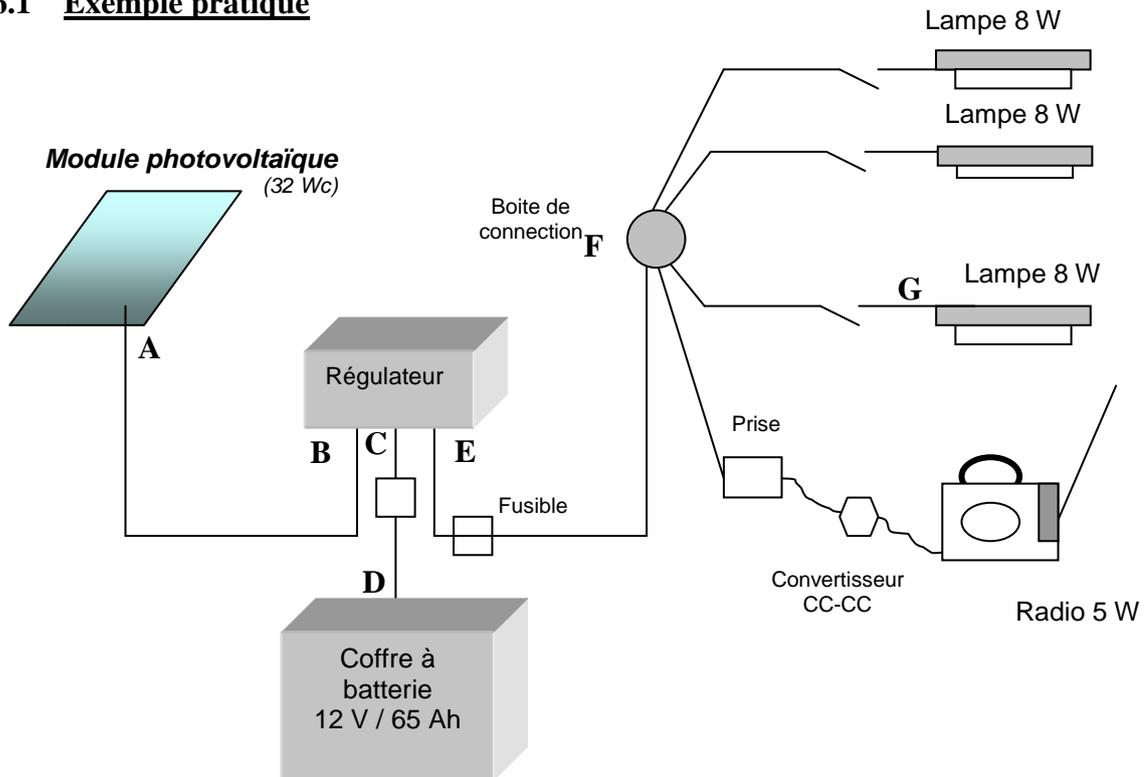
Entre le panneau PV et le régulateur	0,3 V Maximum
Entre le régulateur et la batterie	0,15 V Maximum
Entre le régulateur et les lampes ou tous appareils	0,3 V Maximum

Les chutes de tension sont calculées avec la formule et les valeurs de la résistance de câble ci-dessous :

$$\text{Chute de tension} = \Delta U = \text{longueur de câble} \times R \times I$$

Section de câble (mm ²)	1	1,5	2,5	4	6	10	16
R = Résistance de câble (ohm/mètre)	0,040	0,0274	0,01642	0,01018	0,00678	0,0039	0,00248

4.6.1 Exemple pratique



Détails de l'installation

Section	Distance (m)	I maximum (A)
Section A-B	7	1,9
Section C-D	1,5	2,42
Section E-F	3	2,42
Section F-G	10	0,66

4.6.2 Section A à B : Câble entre le panneau PV et le régulateur

La section du câble est de 2,5 mm² et la distance (A-B) entre le module et le régulateur est de 7 m. Le courant maximum traversé par le câble est l'I_{cc} du module PV de 32 W_c (soit 1,9 A).

$$\Delta U_{AB} = \text{longueur de câble} \times R \times I = 7 \times 0,01642 \times 1,9 = 0,21 \text{ V}$$

C'est acceptable puisque ΔU_{AB} est inférieure à 0,3 V.

4.6.3 Section C à D : Câble entre le régulateur et la batterie

La section de câble est de 2,5 mm² et la distance (C-D) entre le régulateur et la batterie est de 1,5 m. Le courant maximum traversé par le câble est de 2,42 A.

$$\text{Chute de tension} = \text{longueur de câble} \times R \times I = 1,5 \times 0,01642 \times 2,42 = 0,059 \text{ V}$$

On doit y ajouter la chute de tension provoquée par le fusible, estimée à 0,05 V

$$\Delta U_{CD} = 0,059 \text{ V} + 0,05 \text{ V} = 0,109 \text{ V}$$

C'est acceptable puisque ΔU_{CD} est inférieure à 0,15 V.

4.6.4 Section E à F : Câble entre le régulateur et la boîte de jonction

La section de câble est de 2,5 mm² et la distance (E-F) entre le régulateur et la boîte de jonction est de 3 m. Le courant maximum traversé par le câble est de 2,42 A.

$$\text{Chute de tension} = \text{longueur de câble} \times R \times I = 3 \times 0,01642 \times 2,42 = 0,12 \text{ V}$$

On doit y ajouter la chute de tension provoquée par le fusible, estimée à 0,05 V

$$\Delta U_{EF} = 0,12 \text{ V} + 0,05 \text{ V} = 0,17 \text{ V}$$

4.6.5 Section F à G : Câble entre la boîte de jonction et une lampe

La section de câble est de 2,5 mm² et la distance (F-G) entre la boîte de jonction et la lampe est de 10 m. Le courant maximum traversé par ce câble est 8 W / 12 V = 0,66 A.

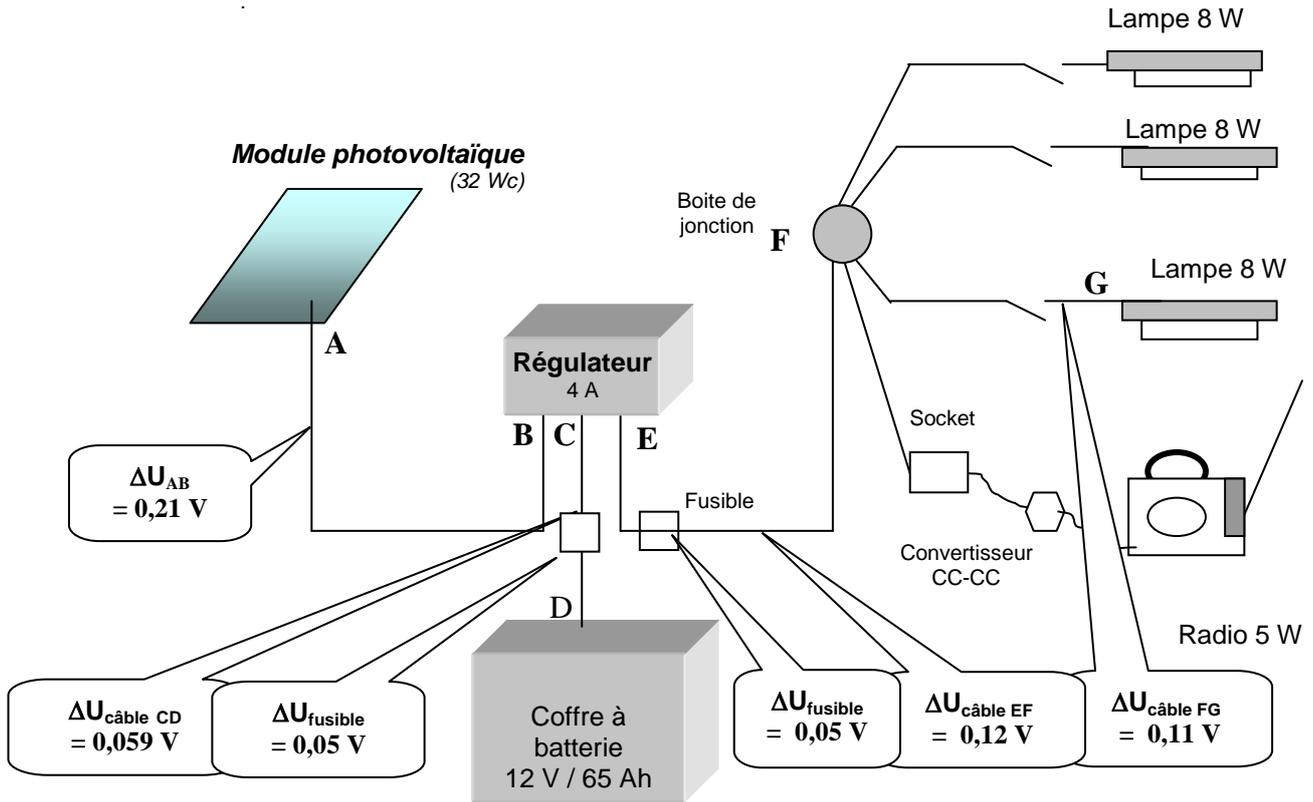
$$\Delta U_{FG} = \text{longueur de câble} \times R \times I = 10 \times 0,01642 \times 0,66 = 0,11 \text{ V.}$$

4.6.6 Entre E et G : Chute de tension totale entre le régulateur et une lampe

$$\Delta U_{EFG} = \Delta U_{EF} + \Delta U_{FG} = 0,17 \text{ V} + 0,11 \text{ V} = 0,28 \text{ V.}$$

C'est acceptable puisque ΔU_{EFG} est inférieure à 0,3 V.

4.6.7 Résultats



Pour plus de clarté, les calculs peuvent être présentés dans un tableau :

Section	Section	Longueur de câble (m)	R du câble (ohm/m)	I maximum (A)	Chute de tension (V)
Chute de tension entre le module et le régulateur (ab)	A-B	7	0,01642	1,9 A	0,21 V
				ΔU_{AB}	0,21 V
Chute de tension entre la batterie et le régulateur (C-D)	C-D	1,5	0,01642	2,42 A	0,059 V
	Fusible	-	-	2,42 A	0,05 V
				ΔU_{CD}	0,109 V
Chute de tension entre le régulateur et la lampe (E-G)	E-F	3	0,01642	2,42 A	0,12 V
	Fusible	-	-	2,42 A	0,05 V
	F-G	10	0,01642	0,66 A	0,11 V
				ΔU_{EFG}	0,28 V

Les mêmes calculs peuvent être effectués pour les autres lampes et la radio.

4.7 **Elaboration d'une offre de prix : le devis**

4.7.1 **Check-list : le formulaire**

L'élaboration d'une offre de prix est simple, si on s'attache à comptabiliser l'ensemble des composants et paramètres depuis les composants principaux, les frais d'installation, jusqu'aux frais de transport. Il faut tout comptabiliser et ne faire aucun oubli. Bien entendu, on ne peut pas calculer le prix d'un système si le dimensionnement de l'installation n'a pas été réalisé.

Méthode :

L'estimation de prix comporte les 4 étapes consécutives suivantes :

- 1. Elaboration de la liste des composants et évaluation de leurs coûts d'achat**
- 2. Evaluation des coûts d'installation**
- 3. Evaluation du prix de revient du système (le coût de revient)**
- 4. Evaluation du prix de vente qui intègre la marge commerciale**

Pour faciliter l'élaboration rapide et méthodique d'un devis, un formulaire a été développé : *Formulaire d'estimation de prix de petites installations photovoltaïques*. Un exemplaire vierge et un exemplaire complété se trouvent dans les **annexes** du Guide pratique.

Le formulaire rempli est un exemple concret, basé sur l'exemple de dimensionnement de ce module et avec des prix réalistes. Les prix unitaires des composants utilisés sont les prix du marché à Dakar (Sénégal) en 2005 (convertis en euros).

Exercice :

Elaboration d'une offre de prix à partir des prix rencontrés dans la région, le pays des participants, et avec l'exemple du système dimensionné dans ce module. Observe-t-on des différences notables d'une région à l'autre (ou d'un pays à l'autre) ?

Règle :

L'élaboration d'une offre doit être basée sur les coûts d'achat des équipements disponibles localement (ou à importer). Ils doivent être obtenus en contactant les fournisseurs ou en consultant de précédentes offres de prix, à condition qu'elles ne soient pas trop anciennes.

4.7.2 **Cas particulier des 'tout-petits' systèmes (10 à 30 Wc)**

Voir Guide Pratique du Photovoltaïque (version septembre 2005), chapitre 4, section 4.3.

4.7.3 Coûts des systèmes solaires (€/Wc)

Les prix des **modules PV** sont souvent donnés en euros par watt crête (€/Wc).

Les prix des **systèmes complets** peuvent également être donnés en : €/Wc système. Pour calculer ce ratio, le prix du système complet doit être divisé par la puissance crête du panneau.

Exemple :

Une lampe portable solaire et son module de 10 Wc coûtent 250 €. Le prix du système en €/Wc système est de : $250 \text{ €} / 10 \text{ Wc} = 25 \text{ €/Wc système}$.

Exercice :

Calcul du prix en FCFA/Wc dans le cas d'un système estimé à 1 000 000 FCFA et composé d'un module de 50 Wc.

Réponse : Le prix en FCFA/Wc est de $1\,000\,000 / 50 = 20\,000 \text{ FCFA/Wc système}$.

4.7.4 Fourchette des prix de divers systèmes solaires

Les prix donnés dans la table ci-dessous sont des prix indicatifs concernant divers systèmes vendus en Afrique occidentale ou orientale. Les prix varient d'un pays à l'autre, d'un fournisseur à l'autre, pour des raisons diverses : qualité des équipements, fabrication locale ou importation, droits de douane, coût de la main d'œuvre, quantité de systèmes vendus, etc.

Exemple de prix indicatif des systèmes complets

Système	Puissance (Wc)	Fourchette de prix (€)
Radio solaire (module solaire intégré)	1	30 – 70
Lanterne portable solaire	4 à 10	100 - 250
Système d'éclairage solaire domestique (20 Wc, 2 lampes)	20	200 - 450
Système d'éclairage solaire domestique (50 Wc, 4 lampes)	50	500 - 1000
Clôture électrique solaire	30	500 - 1000
Réfrigérateur à vaccin solaire	200	2000 – 5000
Pompe solaire	800	4000 – 6000

(Source : Power Guide, IT Publications ; Alliance Soleil, 1995 - 2005)

4.7.5 Fourchette des prix de quelques composants solaires

Module PV

Le prix moyen des modules PV (mono ou poly-cristallin, silicium amorphe ou autres) varie entre 3 et 10 €/Wc, selon les quantités commandées.

Les modules de puissance crête assez élevée (c.-à-d. > à 40 Wc) sont toujours meilleur marché par Watt crête que les petits modules. Par exemple, au prix de détail, un module de 20 Wc peut coûter 200 € (i.e. 10 €/Wc), tandis qu'un module de 40 Wc coûtera 350 € (8,75 €/Wc). Par conséquent, pour un système solaire nécessitant un module de 40 Wc, il est souvent préférable d'acheter 1 module de 40 Wc, plutôt que 2 modules de 20 Wc. Dans le même esprit et pour un système nécessitant 80 Wc, 1 module de 80 Wc sera souvent moins onéreux que deux modules de 40 Wc.

Régulateur de charge

Le prix d'un régulateur varie d'abord en fonction de sa taille : courant de charge maxi et courant de décharge maxi. Puis, dans une moindre mesure, son prix varie en fonction des autres caractéristiques techniques : présence ou non d'indicateurs lumineux, ou écran à cristaux liquides, présence de fusibles ou non, boîtiers étanches ou non, avec ou sans compensation de température, etc.

Les petits régulateurs (5 - 25 A) ont des prix variant entre 5 à 10 €/A. Par exemple, un régulateur de 10 A peut coûter entre 50 et 100 €.

Batterie

Prix indicatif des batteries

Type de batterie	Prix (€/Ah)	Commentaires
Batterie de voiture	0,3 à 0,7 €/Ah	Durée de vie de 2 à 3 ans si DDQ est inférieur à 30%.
Batterie solaire ouverte (à plaques planes)	1,0 à 2,0 €/Ah	Durée de vie de 3 à 4 ans si DDQ est inférieur à 50%.
Batterie solaire ouverte (à plaques tubulaires)	1,1 à 4,0 €/Ah	Durée de vie de 4 à 6 ans si DDQ est inférieur à 60%.
Batterie solaire étanche	1,3 à 4,0 €/Ah	Durée de vie de 3 à 6 ans si DDQ est inférieur à 60%.

Note : Pour un même type de batterie, le prix en €/Ah diminue avec la taille de la batterie.

Onduleur

Le prix d'un onduleur varie d'abord en fonction de sa puissance nominale, puis de la qualité du signal de sortie et enfin de son rendement. Le prix d'un onduleur est de l'ordre de 1 €/W. Par exemple, un onduleur de 200 W coûtera 200 €. Le prix des onduleurs baisse d'année en année. Il est assez courant de pouvoir se procurer des onduleurs (pure sinusoïde) pour un peu moins de 0,5 €/W. Toutefois, il faut faire attention aux onduleurs vendus entre 0,1 et 0,2 €/W, leur qualité est souvent médiocre (signal de sortie carrée ou sinusoïde modifiée), leur durée de vie est souvent réduite.

Coûts d'installation

Le coût d'installation peut varier très sensiblement d'un site à un autre. Il dépend des éléments suivants :

- Frais de transport (distance, état des routes, type de véhicule nécessaire : moto, voiture, transport collectif),
- Coûts de la main-d'œuvre,
- Frais de logement et nourriture (hôtel ou gratuité chez le client),
- Type d'outillage nécessaire (échelle, équipement spécial, etc.).

La méthode d'élaboration des prix (*Formulaire d'estimation de prix de petites installations photovoltaïques*) permet de n'oublier aucun des éléments cités ci-dessus.

Exercice :

Conception d'un système solaire idéal pour la maison du participant ou la maison de ses parents. Dimensionnement et élaboration d'une offre de prix réaliste pour ce système, à l'aide des formulaires vierges fournis dans les **annexes** du Guide Pratique.

5 Évaluation et feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les principaux concepts et notions du module.

Il est suggéré de demander aux participants (seul ou en équipe) de :

- Lister les cinq étapes nécessaires au dimensionnement d'un système.
- Calculer les besoins énergétiques d'un client qui souhaite avoir 5 lampes de 8 W pendant 3 heures par jour, 1 lampe de 20 W pendant 2 heures par jour et finalement un TV (17 W / 12 V) pendant 3 heures par jour.
- Dessiner le schéma électrique de l'installation.
- Dimensionner le panneau solaire pour une irradiation minimum de 4,0 kWh/m².jour.
- Dimensionner la batterie, avec une DD de 30 % et une autonomie de 3 jours.
- Choisir la taille du régulateur.
- Déterminer le calibre des fusibles (entre le régulateur et la batterie, et entre le régulateur et les récepteurs).
- Déterminer les sections de câble minimum sachant que le module sera installé à 12 m du régulateur, que la batterie sera installée à 2 m du régulateur et que toutes les lampes seront installées 12 m du régulateur, à partir d'une boîte de jonction placée à 3 m du régulateur. La TV sera installée à 5 m du régulateur (directement connectée au régulateur).

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen. L'exercice proposé ci-dessus est tout à fait adapté.

MODULE 10 : Installation

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	<i>Définition d'une installation correcte</i>	3
4.1.1	<i>Les critères principaux d'une installation correcte.....</i>	3
4.2	<i>Préparation et organisation du travail.....</i>	4
4.3	<i>Procédure d'installation des modules solaires.....</i>	5
4.4	<i>Procédure d'installation de la batterie</i>	6
4.5	<i>Procédure d'installation du régulateur.....</i>	7
4.6	<i>Procédures d'installation des récepteurs et des câbles.....</i>	8
4.6.1	<i>"Astuces" pour les lampes</i>	8
4.6.2	<i>"Astuces" pour les prises de courant.....</i>	8
4.6.3	<i>"Astuces" pour les interrupteurs.....</i>	8
4.6.4	<i>"Astuces" pour le câblage.....</i>	9
4.7	<i>Les dernières touches d'une installation.....</i>	10
4.8	<i>Sessions Vidéo.....</i>	11
4.9	<i>Outillage nécessaire pour les travaux d'installation.....</i>	11
4.10	<i>Exemple de notice d'utilisation de système</i>	12
5	ÉVALUATION ET FEED-BACK	13

1 Objectifs

Ce module couvre les sujets suivants :

Les procédures d'installation des composants d'un système solaire :

- Module(s),
- Batterie,
- Régulateur,
- Récepteurs,
- Câbles, et finalement
- Utilisateurs : leur formation.

2 Durée du module

5 - 20 heures (selon le degré de mise en pratique : installation d'un système solaire sur un panneau de démonstration ou bien installation d'un 'véritable' système solaire chez un particulier).

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Un kit complet d'éclairage PV avec prise radio ou TV (12 V CC ou 230 V CA)	1
Calculatrice solaire (une par participant)	1
Multimètre	2
Un ensemble d'outillage d'installation	1
Une vidéo de formation : <i>Installation de Systèmes Solaires Domestiques</i>	1
TV et magnétoscope (ou vidéoprojecteur)	1
Visionner au début et à la fin de ce module	

4 Contenu

4.1 Définition d'une installation correcte

Organiser une visite sur le terrain : systèmes solaires domestiques (chez des particuliers) et systèmes solaires installés pour des institutions (écoles, cliniques, etc.). Pour compléter la visite, ou bien si une visite n'est pas possible, montrer des photos d'installations solaires de diverses qualités d'exécution.

Noter les observations des participants concernant les techniques d'installation, l'esthétique, etc.

Demander ensuite aux participants de définir ce qu'est, selon eux, une installation correcte, de qualité professionnelle. On doit arriver aux conclusions suivantes :

4.1.1 Les critères principaux d'une installation correcte

1. Être respectueux des souhaits du client, de la cliente.
2. Pas de surcoût par rapport au devis remis au client, à la cliente.
3. Les composants ont été installés selon le dimensionnement (puissance des appareils, du panneau, longueur de câbles, etc.).
4. L'installation des composants semble durable, et non provisoire.
5. L'installation donne une impression de netteté et de propreté (ex : les câbles sont fixés horizontalement ou verticalement).
6. L'installation ne présente pas de risque électrique pour les usagers (ex : la batterie est dans un coffre, à l'abri des enfants).
7. L'installation a été réalisée pour éviter les chutes lors du nettoyage des panneaux.
8. L'installation comporte des instructions pour l'utilisateur (ex : un poster près du régulateur).
9. L'installation est identifiée : la date de mise en service est mentionnée sur les composants principaux.
10. Le client, la cliente ont été formé à l'usage du système.
11. Les codes d'installation nationaux ont été respectés (lorsqu'ils existent).

Les étapes conseillées pour réaliser une installation avec les qualités ci-dessus sont les suivantes :

Phase 1	Préparez et organisez votre travail	Comme expliqué en section 4.2
Phase 2	Installez les composants principaux (modules PV, régulateur, batteries) Mettez la batterie en charge	Comme expliqué dans les procédures d'installation dans les sections 4.3 à 4.5
Phase 3	Installez les récepteurs et leur câblage	Comme expliqué dans la section 4.6
Phase 4	Effectuez les finitions (test de bon fonctionnement et formation de l'utilisateur)	Comme expliqué dans la section 4.7

4.2 Préparation et organisation du travail

Exercice :

Organiser un jeu de rôles : Demander à deux participants de jouer une équipe de techniciens solaires et à deux autres, de jouer un couple de clients. Choisir une maison voisine (ou plusieurs salles de cours) et imaginer qu'un système solaire domestique doit y être installé. Dans ce contexte :

Demander aux techniciens comment ils envisagent de procéder à l'installation. Les aider à classer par ordre chronologique les travaux proposés.

Pour finaliser les étapes de préparation, projeter la section 'Préparation pour l'installation, une étape cruciale' de la vidéo 'Installation de Systèmes solaires domestiques'. Cette section a une durée de 4 minutes.

Projeter cette section plusieurs fois pour s'assurer que les participants ont bien noté toutes les étapes et aspects importants, décrits ci-dessous :

Avant d'installer les composants, suivez les étapes ci-dessous :

En atelier

1. Lisez les notices techniques fournies avec les équipements. Appliquez les recommandations concernant l'installation. Les conseils donnés dans ce module seront à adapter en conséquence. Tester le matériel en cas de doute ;
2. Assurez-vous que tous les outils et les composants du système solaire sont disponibles pour l'installation sur le site, depuis le module PV jusqu'à la vis à bois. Servez-vous de votre formulaire d'estimation comme 'check-list'.

Sur site

3. ECOUTEZ le client et discutez avec lui, de l'emplacement souhaité des différents composants (récepteurs, régulateur, module, etc.). Expliquez simplement les différentes contraintes d'installation des composants et trouvez un compromis satisfaisant le client. C'est seulement lorsqu'il ou elle a assimilé les facteurs influençant le fonctionnement des composants et leur localisation, que vous pouvez finaliser l'emplacement de chaque composant du système.
On cherchera, par exemple, à placer le régulateur et la batterie en position centrale, pour réduire les longueurs de câbles ;
4. Marquez à la craie l'endroit où les composants doivent être installés et dessinez des lignes verticales et horizontales pour le cheminement des câbles. Ceci facilitera le montage et assurera la propreté de votre installation ;
5. Préparez des supports rigides (ex : tableau en bois) pour les régulateurs, les lampes, les interrupteurs et même les câbles si les murs ne semblent pas suffisamment solides (ex : un vieux mur en torchis). Fixez-les solidement. Il sera ainsi plus aisé d'y fixer durablement les composants du système.

Règle : *Suivez toutes procédures ou guides d'installation nationaux, lorsqu'ils existent.*

4.3 Procédure d'installation des modules solaires

Demander aux participants de proposer une procédure d'installation.

Projeter la section '*Installation du module solaire*' de la vidéo '*Installation de Systèmes solaires domestiques*'. Cette section a une durée de 2 minutes. Projeter cette section plusieurs fois pour s'assurer que les participants notent toutes les étapes et les aspects importants, décrits ci-dessous :

1. Définissez l'emplacement exact du panneau qui permettra :
 - d'éviter toute ombre portée par des obstacles avoisinants ;
 - de limiter la distance entre le panneau et la batterie ;
 - d'éviter les dépôts de poussières trop importants (comme au bord d'une route)
 - d'assurer un accès facile et sécurisé pour son nettoyage et sa maintenance ;
 - de limiter le vol et le vandalisme.
2. Concevez une structure solide, durable et fixe, qui permettra :
 - Une **orientation** vers le sud¹ dans l'hémisphère nord (ex : Europe, Maroc, Mali, Laos, Soudan) et vers le nord dans l'hémisphère sud (ex : Madagascar, Polynésie française, Zimbabwe) ;
 - Une **inclinaison** égale à :
 - a) Sites proches de l'équateur où la latitude est entre 0 et 10° : angle de 10° pour permettre un meilleur écoulement de l'eau de pluie ;
 - b) Pour les pays de latitude supérieure à 10°, le panneau sera souvent incliné à un angle égal à la latitude du lieu pour recevoir un maximum de rayonnement tout au long de l'année ou un peu plus incliné (latitude + 10° ou latitude + 20°) pour recevoir un maximum de rayonnement pendant les mois les plus défavorables.
 - Un positionnement à 10 cm minimum au-dessus de la toiture pour permettre une ventilation naturelle suffisante.
3. Installez la structure support (soyez prudent afin d'éviter les chutes).
4. Vérifiez la tension et la polarité à l'intérieur de la boîte de jonction du module solaire.
5. Branchez les câbles en vous assurant que toute infiltration d'eau est impossible à l'intérieur de la boîte de jonction (ex : passage des câbles par presse-étoupe, joint entre la boîte et son couvercle, câble en goutte d'eau).
6. Montez le ou les modules sur la structure en vous assurant que la boîte de jonction est située en partie haute.
7. Protégez le câble du soleil, à moins qu'il ne soit résistant aux intempéries et aux ultraviolets.
8. Tirez le câble depuis le panneau solaire jusqu'à l'emplacement du régulateur, **mais ne le branchez pas encore au régulateur.**

Exercice : Demander aux participants de faire des schémas de structure support de modules : pour toiture terrasse, pour toiture en tôle ondulée, sur poteau.

¹ Le nord déterminé avec une boussole est le nord magnétique. En théorie, il faudrait tenir compte du nord géographique, mais dans la plupart des régions, la différence n'est au plus que de 15 degrés, ce qui n'a que peu d'impact sur la production électrique des panneaux solaires.

4.4 Procédure d'installation de la batterie

Demander aux participants de proposer une procédure d'installation. Progressivement, il faut les amener à la procédure suivante :

(Cette procédure s'applique dans le cas d'une batterie ouverte neuve, non encore remplie d'électrolyte, ce dernier devant être disponible dans un bidon en plastique).

Attention : lorsque vous préparez une batterie, travaillez dans une pièce propre et ventilée.

1. Mesurez la tension aux bornes de la batterie, elle doit être égale à zéro.
2. Mesurez la densité de l'électrolyte stockée dans le bidon. Elle doit être la même que celle indiquée sur la documentation de la batterie (ex : 1,24 à 1,28).
3. Nettoyez le dessus de la batterie avec un chiffon propre et sec.
4. Enlevez les bouchons des orifices de remplissage de l'électrolyte.
5. Remplissez la batterie avec l'électrolyte, élément par élément, en utilisant un entonnoir jusqu'au niveau minimal indiqué sur la batterie. Laissez l'électrolyte se reposer pendant 30 minutes (la batterie chauffera un petit peu).
6. Mesurez à nouveau la tension de la batterie. Elle doit être supérieure à 12 V.
7. Complétez avec l'électrolyte chaque compartiment jusqu'au niveau maximal.
8. Remplacez les bouchons et nettoyez le dessus de la batterie avec un chiffon doux et sec.
9. Ne placez pas la batterie directement sur le sol, mais dans un coffre à batterie, ou sur un support en bois dur.
10. Dénudez le câble pour le branchement aux cosses de la batterie, mais **attention, sans connecter les cosses aux bornes + et – de la batterie.**

Le coffre à batterie idéal a les caractéristiques suivantes :

- Conçu en matière plastique pour contenir l'électrolyte en cas de fuites de ce dernier (bac de rétention) ;
- Suffisamment grand pour le stockage d'au moins une bouteille d'eau distillée ;
- Muni d'orifices permettant une ventilation naturelle ;
- Couvercle permettant la vérification du niveau d'électrolyte sans avoir à sortir la batterie de son coffre ;
- Fermeture à clé ;
- Couvercle incliné afin d'éviter que les personnes l'utilisent comme une chaise ou une étagère.
- A défaut de coffre plastique, des coffres en bois peuvent être fabriqués sur site avec la plupart des caractéristiques ci-dessus. Dans les bâtiments publics, les batteries doivent être accessibles uniquement au personnel autorisé.

4.5 Procédure d'installation du régulateur

Demander aux participants de proposer une procédure d'installation. Progressivement, il faut les amener à la procédure suivante :

1. Choisissez un emplacement facile d'accès pour l'utilisateur, souvent dans la même pièce que celle accueillant la batterie, et où sera fixée la notice d'utilisation du système.
2. Vérifiez que le régulateur est ajusté pour le type de batteries utilisées : batterie 'ouverte' ou 'étanche'. Il s'agit souvent de déplacer un petit pontage (consulter la notice du régulateur).
3. Installez le régulateur à une hauteur de 1,5 m (hauteur des yeux), idéalement sur une platine support ou un tableau en bois dur et aligné à la verticale de la batterie.
4. Branchez les câbles au régulateur dans l'ordre spécifié par le constructeur (habituellement selon la séquence suivante : 1, régulateur vers la batterie, 2, panneau vers régulateur). Puis insérez le fusible entre la batterie et le régulateur.
5. Enduire les bornes et cosses batteries avec de la vaseline.

A ce stade de l'installation, le panneau commence à charger la batterie. Ceci permet de vérifier la bonne charge de la batterie pendant que l'on procède au reste des travaux (Installation des câbles, interrupteurs, prises, formation des usagers).

Attention : Ne pas brancher le circuit Récepteurs !

6. Vérifiez que les indications du régulateur indiquent un fonctionnement normal.
7. Vérifiez que la tension de la batterie augmente régulièrement.

Pour les sites réputés pour leurs orages fréquents et dévastateurs, il est possible de protéger les petits systèmes en installant près du régulateur un interrupteur bi-polaire qui isolera le câble du panneau solaire du reste de l'installation. Il est alors primordial de bien former le client ou la cliente pour qu'il ou elle ouvre l'interrupteur avant un risque d'orage et le referme après.

4.6 Procédures d'installation des récepteurs et des câbles

Projeter la section 'Astuces d'installation des récepteurs et des câbles' de la vidéo 'Installation de Systèmes solaires domestiques'. Cette section a une durée de 4 minutes.

Projeter cette section plusieurs fois pour s'assurer que les participants ont bien noté toutes les étapes et les aspects importants, décrits ci-dessous :

4.6.1 "Astuces" pour les lampes

- Fixez les lampes aussi près que possible des besoins en lumière (ex : centrée au-dessus d'une table pour une salle à manger, au-dessus de la tête de lit pour une chambre).
- N'installez pas une lampe à plus de 2,5 m de haut. Si cela s'avère nécessaire, utilisez des chaînettes ou un support en bois pour abaisser la source de lumière.
- Conseillez à l'usager de peindre les murs et le plafond en blanc, ou au moins l'entourage de la source lumineuse, pour une meilleure diffusion de la lumière.
- Si la lampe est à l'extérieur, fabriquez un déflecteur qui la protégera de la pluie (ex : utilisez de la tôle ondulée).

Exercice : demander aux participants pourquoi il est bon de peindre le plafond et les murs avec des couleurs claires (blanc, bleu clair, jaune clair) plutôt qu'avec une couleur foncée ?

Réponse : Les couleurs claires réfléchissent la lumière produite par une lampe, alors que les couleurs foncées absorbent la lumière.

4.6.2 "Astuces" pour les prises de courant

- Fixez-les à au moins 20 cm du sol.
- Fixez-les solidement pour qu'elles ne prennent pas de jeu avec le temps.
- Expliquez aux participants de ne pas tirer sur le câble de la fiche mâle, mais plutôt de tirer sur la fiche mâle.
- Branchez les prises détrompées CC, de la manière suivante : connecter le fil Positif aux deux pôles Phase et Neutre (faire un pont à l'intérieur de la prise), et le fil négatif sur le pôle Terre. Ceci évite tout court-circuit en cas de branchement d'un appareil en CA.

4.6.3 "Astuces" pour les interrupteurs

- Fixez-les solidement à 1,20 m du sol, à l'intérieur de la pièce à éclairer et du côté de la poignée de la porte.
- Indiquez les positions **I** (allumé) et **0** (éteint) avec un feutre indélébile, si ce n'est pas clairement visible sur l'interrupteur.
- Evitez d'installer des interrupteurs de mauvaise qualité, car ils sont souvent plus difficiles à fixer solidement et de plus, ils peuvent se briser le jour même de l'installation.

4.6.4 "Astuces" pour le câblage

- Respectez les longueurs et sections de câbles définies dans le dimensionnement et l'estimation de prix initiale.
- Ne câblez jamais en biais, respectez verticalité et horizontalité.
- Disposez un attache-câble par exemple tous les 25 cm (jusqu'à 40 cm selon que les câbles sont verticaux ou horizontaux).
- Évitez de laisser pendre des câbles, ils seront vite endommagés.
- Assurez-vous que les câbles sont droits sans être toutefois tendus.
- Laissez du mou dans les câbles au niveau du coffre à batteries, du régulateur et des modules (ex : une boucle d'aisance' d'une quinzaine de cm de diamètre). Cela facilitera les travaux d'entretien et de remplacement des composants.
- Respectez les codes de couleur (ex : rouge pour le positif, noir pour le négatif).
- Identifiez chaque câble avec une étiquette (ex. : "module PV +" pour le conducteur positif, "module PV -" pour le négatif).
- Faites toutes les connections entre câbles à l'intérieur de boîtes de dérivation et en utilisant des borniers à vis (ex : dominos). Evitez les épissures coûte que coûte.
- Vérifiez les polarités à plusieurs reprises.
- N'utilisez jamais des câbles de section inférieure à 2,5 mm².
- N'utilisez pas des câbles existants, sauf si vous avez vérifié que leur longueur et leur section respectent le nouveau dimensionnement.

Installez tous les composants de même type (ex : interrupteur) de la même façon (hauteur, disposition) pour que l'installation électrique soit propre.

Protection des câbles contre les intempéries :

Dans une installation PV, le câble entre le module et le régulateur est susceptible d'être en partie en dehors du bâtiment. Il est idéal d'installer un type de câble résistant aux ultraviolets et aux intempéries (ex : type H07-RN-F). Cependant, ce type de câble est très onéreux comparé aux câbles ordinaires utilisés pour les installations électriques intérieures. Il est acceptable d'utiliser du câble ordinaire si il est protégé du soleil par l'ombre du panneau ou bien par une gaine plastique résistante aux UV ou une gaine métallique.

4.7 Les dernières touches d'une installation

Demander aux participants, si l'installation est terminée. Que reste-il à accomplir ?

1. Mesurez la tension de la batterie en circuit ouvert pour contrôler que la batterie a été rechargée depuis la section 4.3.
2. Branchez le câble des récepteurs au régulateur et insérez ou fermez les fusibles du circuit récepteur.
3. Allumez chacun des récepteurs et assurez-vous qu'ils fonctionnent tous correctement.
4. Vérifiez que les voyants du régulateur indiquent un fonctionnement normal et mesurez les tensions aux bornes du régulateur (panneau, batterie, récepteur).

Le système fonctionne, c'est bien, mais l'installation n'est pas terminée ! Poursuivez votre travail !

5. Indiquez la date de la mise en route avec un feutre indélébile sur le régulateur, la batterie et les lampes. Indiquez vos coordonnées sur le coffre à batterie, ainsi que des instructions '*Danger électrique / Risque d'explosion / Défense de fumer*'.
6. Relevez les références de tous les composants pour faciliter leur éventuel remplacement (numéros de série des modules PV, du régulateur, valeurs des chutes de tension entre le régulateur et chacun des récepteurs). Ces données constituent, avec les valeurs du dimensionnement initial, la carte d'identité du système.
7. Remettez un carnet de bord dans lequel l'utilisateur ou le technicien(e) pourra noter les différents événements et interventions relatifs au système (ex : rajout d'eau distillée, changement de lampes, etc.).
- 8 Fixez, près du régulateur, la notice d'utilisation (fiche avec les informations clés mentionnant les indications pour l'entretien de base) – voir un exemple à la fin de ce Module.

9. Formez l'utilisateur :

- à l'utilisation du système (indiquez les durées d'utilisation et les appareils qu'il est possible de brancher et ceux qu'il faut à tout prix éviter).
 - au petit entretien. Après quelques explications, **faites-lui pratiquer** les gestes nécessaires. Ex : mise en place d'une échelle pour accéder aux modules et nettoyage (d'une façon sécurisée pour lui-même et le matériel), vérification du niveau d'électrolyte et rajout de l'eau distillée.
 - aux petits dépannages : changement d'un tube fluorescent...ou simplement attente de quelques jours afin que la batterie déchargée se recharge !
10. Informez l'utilisateur de vos coordonnées ou de celles du réparateur à contacter en cas de problème. Un jour une panne surviendra, et il aura alors besoin de l'intervention d'un technicien(e) qualifié(e).

Encore deux conseils importants :

- ▶ *Expliquez à l'utilisateur qu'il vaut mieux attendre deux à trois jours avant d'utiliser pleinement son système. Ceci afin de s'assurer que la batterie soit complètement chargée avant son utilisation. Sa batterie durera plus longtemps (formatage des plaques).*
- ▶ *Fournissez au moins un litre d'eau distillée que vous placerez avec l'utilisateur dans le coffre à batterie (ex : 1 litre d'eau par batterie de 100 Ah 12 V).*

4.8 Sessions Vidéo

Exercice :

Après avoir passé en revue les différentes étapes pour réaliser une installation, projeter en continu la vidéo '*Installation de Systèmes solaires domestiques*'.
Faire observer les différences entre les étapes décrites dans le *Guide Pratique Photovoltaïque, Dimensionnement, Installation et Maintenance*, (version septembre 2005) et les étapes décrites dans la vidéo (réalisée en 2003) :

La différence majeure est décrite ci-dessous :

Vidéo 'Installation de Systèmes solaires domestiques' (réalisée en 2003)	Manuel du Formateur et Guide (version mise à jour en 2005)
<p>L'ensemble des composants du système PV (y compris les récepteurs) sont installés avant de mettre en charge la batterie, dans la dernière étape : <i>Touches de finition</i>.</p> <p>Ceci ne permet pas la recharge de la batterie avant mise sous tension de l'ensemble du système PV.</p>	<p>Le générateur PV est câblé (panneau, batterie et régulateur), puis la batterie est mise en charge (au niveau de l'étape 3 : régulateur), avant de fixer et câbler les récepteurs.</p> <p>Ceci permet de mettre en charge la batterie au moins quelques heures ou un jour avant de mettre l'installation en service (car il reste à effectuer les travaux d'installation des récepteurs).</p>

4.9 Outillage nécessaire pour les travaux d'installation.

Demander aux participants d'énumérer la liste de tous les outils nécessaires pour réaliser correctement une installation. Vérifier cette liste avec celle proposée dans le **module 12**.

Réaliser un poster avec la liste des outils ; liste qui sera complétée lors de l'enseignement du module suivant sur la maintenance et l'entretien (**module 11**).

4.10 Exemple de notice d'utilisation de système

NOTICE D'UTILISATION DU SYSTÈME SOLAIRE		
Ce système permet d'alimenter les récepteurs électriques suivants pendant une durée limitée :		
Type	Localisation	Durée d'utilisation maximale dans la journée (heure)
<i>Lampe 8 W – 12 V</i>	<i>Cuisine</i>	<i>3 heures</i>
<i>Lampe 8 W – 12 V</i>	<i>Chambre</i>	<i>2 heures</i>
<i>Lampe 8 W – 12 V</i>	<i>Pièce principale</i>	<i>4 heures</i>
<i>Radiocassette</i>	<i>Pièce principale</i>	<i>5 heures</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Respectez la durée maximale d'utilisation des récepteurs indiquée ci-dessus • Eteignez les récepteurs (lampes, radios, etc.) dès que vous ne les utilisez pas <ul style="list-style-type: none"> • Soyez toujours attentif aux indications fournies par le régulateur 		
<u>Maintenance mensuelle</u>		
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Contrôlez le niveau d'électrolyte dans la batterie, ajoutez de L'EAU DISTILLÉE si nécessaire, NE JAMAIS AJOUTER DE L'EAU ORDINAIRE OU DE L'ACIDE ▶ Assurez-vous que les cosses des batteries sont bien connectées et que les connexions sont propres ▶ Nettoyez les modules solaires avec de l'eau propre et un chiffon doux ▶ Ne rien poser sur la surface des modules 		
ATTENTION !		
<p>Gardez votre système propre et N'ajoutez pas de nouveau récepteur électrique sans en avoir parlé avec votre technicien solaire</p>		
En cas de problème, contactez votre technicien solaire à l'adresse ci-dessous :		
Date d'installation	Adresse de l'installateur	
.....	
Nom du technicien- installateur	
.....	

5 Évaluation et feed-back

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les concepts et notions de ce module. Cette section est une étape cruciale pour pouvoir enseigner le module suivant, dans de bonnes conditions.

Pour conclure sur ce module, il est suggéré d'organiser des équipes de 2 à 3 techniciens qui devront installer un système solaire de A à Z. (cet exercice peut également être un exercice individuel) :

- Les participants devront faire la liste du matériel et de l'outillage nécessaire et procéder aux travaux d'installation en suivant strictement les étapes telles que décrites dans ce module.
- La supervision pendant les installations devra être très stricte afin de s'assurer que les procédures sont respectées : La méthode de travail est aussi importante que l'aspect du travail fini.
- Les installations pourront être réalisées sur 'site réel' ou bien sur des grands panneaux de particules (2 m x 1 m).

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen².

² Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 11 : Maintenance

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	<i>Définition de la maintenance</i>	3
4.2	<i>Préparez et organisez le travail</i>	4
4.3	<i>Procédure de maintenance des modules solaires PV</i>	5
4.4	<i>Procédure de maintenance de la batterie</i>	7
4.4.1	<i>Méthode pour estimer la capacité restante d'une batterie.....</i>	8
4.4.2	<i>Mesures de densité de l'électrolyte / correction de la température.....</i>	9
4.5	<i>Procédure de maintenance du régulateur</i>	10
4.6	<i>Procédure de maintenance des récepteurs et câbles.....</i>	11
4.6.1	<i>Recommandations pour les récepteurs</i>	11
4.6.2	<i>Recommandations pour les câbles.....</i>	12
4.7	<i>Une dernière touche à la maintenance.....</i>	12
4.8	<i>Problèmes courants et solutions.....</i>	13
4.8.1	<i>Méthode de dépannage proposée</i>	13
4.8.2	<i>Module solaire.....</i>	14
4.8.3	<i>Régulateur</i>	15
4.8.4	<i>Batterie</i>	16
4.8.5	<i>'Astuces' pour la restauration d'une batterie ouverte sulfatée</i>	18
4.8.6	<i>Pannes sur récepteurs et câblage.....</i>	19
4.8.7	<i>Accéder à de l'eau distillée de bonne qualité.....</i>	20
4.9	<i>Exercices de dépannage</i>	21
5	ÉVALUATION ET FEEDBACK	22

1 Objectifs

Ce module couvre les sujets suivants :

- Les procédures de maintenance d'un système solaire comprenant :
 - Module(s),
 - Batterie(s),
 - Régulateur,
 - Récepteurs,
 - Câbles et, finalement
 - L'utilisateur ou le client.

- Les pannes courantes et leurs solutions.

2 Durée du module

8 - 16 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Quantité (minimum)
Un kit PV complet d'éclairage avec prise et récepteurs	1
Lot de modules PV de différentes puissances	1
Lot de composants usagés de systèmes solaires domestiques, particulièrement : vieilles batteries, régulateurs en panne, etc.	1
Calculatrice solaire (une par participant)	1
Multimètre	5
Ensemble d'outillage pour la maintenance et le dépannage	1
Si disponible, visionner une vidéo de formation sur la maintenance des systèmes solaires. Ex : une vidéo francophone similaire à la vidéo anglophone ' <i>Servicing and Maintenance of Small Solar Systems</i> ', ETC, JPL, avril, 1999.	

4 Contenu

4.1 Définition de la maintenance

Demander aux participants de définir ce qu'est, selon eux, la *maintenance* des systèmes solaires.

Réponse :

*La maintenance comprend toutes les actions **préventives** permettant d'assurer un fonctionnement le plus fiable et le plus durable des systèmes. La fréquence et le nombre de pannes sont alors réduits.*

Il y a deux niveaux de maintenance :

- Le premier concerne le **petit entretien**. Il doit être effectué régulièrement par l'utilisateur. Il s'agit de nettoyer les modules, vérifier l'absence d'ombres portées sur les modules, si besoin élaguer, vérifier le niveau d'électrolyte et éventuellement rajouter de l'eau distillée ou remplacer un tube fluorescent. Le technicien doit s'assurer que ces tâches sont à la portée de l'utilisateur et qu'elles sont effectuées correctement et régulièrement.
- Le second concerne la **maintenance plus poussée**, qui doit être effectuée par un technicien qualifié et équipé d'outils appropriés. Il s'agit de vérifier en détail les principaux composants du système, selon des procédures telles que décrites dans ce module. Cette maintenance doit être effectuée tous les 6 mois dans la plupart des cas.

Le petit entretien et la maintenance sont des mesures préventives qui permettent d'assurer fiabilité et continuité du service de l'électricité.

Les étapes conseillées pour la maintenance sont les suivantes :

Phase 1	Préparez votre travail (et ayez votre trousse à outils prête !)	Comme expliqué en section 4.2
Phase 2	Contrôlez modules PV, régulateur, batterie, les récepteurs et le câblage.	Comme expliqué dans les sections 4.3 à 4.6
Phase 3	Effectuez les finitions (ex : formation de l'utilisateur)	Comme expliqué en section 4.7

4.2 Préparez et organisez le travail

Attention : Suivez systématiquement étape par étape les procédures de maintenance proposées ci-après pour chacun des composants.

Utilisez également toutes procédures ou guides de maintenance de fabricants de matériel, lorsqu'ils sont disponibles.

Pour réaliser un travail de qualité, la phase de préparation est cruciale :

- 1. Discutez avec l'utilisateur**, avant de commencer tous travaux d'entretien. Il ou elle est votre source principale d'informations. Demandez quels aspects du système satisfont correctement ses besoins et ceux qui lui posent problème. Les réponses à ces questions vous permettront de faire sans aucun doute un meilleur travail.
- 2. Consultez le carnet de bord du système et vos éventuelles notes.**
- 3. Vérifiez si des nouveaux récepteurs ont été rajoutés**, par rapport à ce qui était prévu lors de l'installation d'origine.
- 4. Vérifiez qu'aucun des composants n'a été "bricolé" ou mal utilisé.**
- 5. Nettoyez chacun des composants avec l'aide du client ou de la cliente.** Cela vous permettra de vous faire une idée de la façon dont il ou elle entretient son système.

4.3 Procédure de maintenance des modules solaires PV

Demander aux participants de proposer une procédure de maintenance : Que faut-il faire ? Quand ? Comment ?

Réponses : voir procédures ci-dessous.

1. Nettoyez les modules avec de l'eau et un chiffon propre, tôt le matin ou tard le soir (évitiez savon ou détergents).
2. Vérifiez si le panneau est toujours fixé, orienté et incliné correctement.
3. Vérifiez d'éventuelles décolorations de cellules, bris de vitres ou corrosion des connexions entre cellules.
4. Vérifiez l'absence d'ombre portée (ex : nouveau bâtiment, arbre ayant grandi, antenne TV).
5. Vérifiez si l'arrière du module n'est pas encombré de nids d'oiseaux ou d'insectes. Enlevez-les dans tous les cas.
6. Vérifiez si la ou les boîtes de jonction sont bien étanches (ou correctement ventilées pour laisser échapper la condensation).
7. Dans le cas où le support du module est relié à la terre, vérifiez sa continuité depuis le module jusqu'à la prise de terre.

8. Attention : Si vous soupçonnez que le panneau ne recharge pas convenablement la batterie, suivez la procédure spéciale 8 décrite plus loin, sinon, passez directement à l'étape 9.

9. Resserrez toutes les connexions.

10. Aux bornes du régulateur, comparez la tension du panneau à celle de la batterie. Durant la journée, la tension du panneau doit être légèrement supérieure à celle de la batterie (de 0,2 à 1 V). Plage de valeurs à vérifier avec les spécifications techniques du régulateur.

Procédure spéciale 8

(à suivre si vous soupçonnez que le panneau ne recharge pas convenablement la batterie)

- 8.1** Déconnectez le panneau solaire au niveau des bornes du régulateur (par précaution, couvrir le panneau d'une couverture ou de feuillages).
- 8.2** Test de comparaison de la tension Uco : mesurez la tension du circuit ouvert du panneau solaire. Immédiatement après, effectuez la même mesure sur un panneau voisin ou sur un module de référence¹ (par exemple un module de 5 Wc). Assurez-vous que le panneau voisin ou le module de référence est propre et positionné avec la même inclinaison et orientation que le panneau à contrôler. Reportez au fur et à mesure les valeurs mesurées dans un tableau similaire à celui de l'exemple qui suit.
- 8.3** Test de comparaison du courant Icc : Mesurez Icc du panneau solaire, et aussitôt après, mesurez Icc du module de référence en suivant la même procédure (même orientation, même inclinaison). Reportez les valeurs mesurées dans le tableau.
- 8.4** Calculez les ratios de vérification des valeurs de Icc et Uco mesurées et théoriques comme dans l'exemple qui suit (les valeurs théoriques Icc et Uco sont données par le constructeur et inscrites au dos des modules). Si les ratios Icc et Uco "mesurées" présentent par rapport aux ratios "théoriques" une variation de plus ou moins 20%, alors le panneau solaire contrôlé fonctionne correctement.
- 8.5** Si ce n'est pas le cas, déconnectez les modules du panneau et répétez les tests de comparaison pour chaque module du panneau afin d'identifier celui ou ceux qui seraient défectueux. En cas de module défectueux, reportez-vous au chapitre **4.8.1**.
- 8.6** Retour à l'étape 9 (de la section 4.3)

Exemple de tests de Uco et de Icc :

	Conditions météo : ensoleillé				Heure du test : 11h30				Date : 10 mai 2005	
	Panneau testé				Panneau de référence				Comparaison	
	Puissance crête (Wc)	Nbr. de modules	Icc	Uco	Puissance crête (Wc)	Nbr. de modules	Icc	Uco	Ratio Icc	Ratio Uco
Valeurs Théoriques	110	2	7	21,7	10	1	0,64	21,2	7/0,64 = 10,9	21,7/21,2 = 1,02
Valeurs Mesurées	-	-	5	18	-	-	0,44	16	5/0,44 = 11,3	18/16 = 1,12
									11,3/10,9 = 1,04	1,12/1,02 = 1,1
									<1,2 OK	<1,2 OK

Les tests Uco et Icc doivent être effectués par ensoleillement maximum (pas un jour de pluie, ni très tôt le matin et ni tard dans la soirée).

Exercice : Demander aux participants de faire plusieurs tests de comparaison de modules en utilisant la table ci-dessus (avec des modules de diverses puissances crêtes).

¹ Le module voisin ou de référence doit être de même technologie (ex. silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe) que le module à tester. Il peut comporter un nombre différent de cellules. Dans ce cas, le rapport des Uco doit être voisin du rapport des nombres de cellules.

4.4 Procédure de maintenance de la batterie

Demander aux participants pourquoi le technicien doit entretenir une batterie, et en quoi consiste cette maintenance.

Réponses : voir procédures ci-dessous.

1. Commencez toujours par demander à l'utilisateur :
 - s'il a de l'eau distillée en stock, et en quelle quantité ?
 - si de l'eau distillée a été rajoutée, quelle quantité et dans quelles cellules de la batterie ?
 - si le niveau d'électrolyte est au-dessus des plaques ?
 - d'où provient l'eau distillée ?
 - dans quel récipient était-elle stockée ?
 - s'il pense que la batterie est "fatiguée", et pourquoi ?
2. Arrêtez la charge de la batterie (ex : déconnectez le câble du panneau solaire au niveau du régulateur) et éteignez tous les récepteurs ; attendez environ 30 minutes avant toute mesure.
3. Profitez de ce temps pour effectuer un contrôle visuel afin de détecter d'éventuelles fuites d'électrolyte. Nettoyez et séchez le dessus des batteries.
4. Enlevez les bouchons et vérifiez qu'aucune poussière ou corps étranger ne soit tombé dans les cellules. S'il y en a, essayez de les enlever sans utiliser d'outil métallique.
5. Mesurez et notez la tension de circuit ouvert.
6. Mesurez la valeur de la densité et la température de l'électrolyte :
 - Dans chaque cellule de la batterie, pompez une fois, rejetez le contenu pompé dans la même cellule. Pompez une seconde fois et lisez la valeur de la densité (notez la valeur, par exemple : 1,150 ; 1,260...).
 - Rejetez l'électrolyte dans la cellule où vous l'avez pompé (surtout ne pas mélanger l'électrolyte avec celui d'une autre cellule).
7. Si la batterie est en bon état (vérifiez avec les données du fournisseur), reconnectez-la au panneau. La tension doit être supérieure à celle donnée à l'étape 5. En cas de problème avec la batterie, consultez la **section 4.8**.
8. Vérifiez le niveau d'électrolyte.
9. Si nécessaire, ajoutez de l'eau distillée avec un entonnoir en plastique (ne touchez pas les plaques avec l'entonnoir sous peine de les endommager). Ne remplissez JAMAIS une batterie avec de l'eau distillée si elle est déchargée. Rechargez-la d'abord.
10. Remettez chaque bouchon de cellule en vous assurant que le trou de ventilation n'est pas obstrué.
11. Nettoyez les bornes avec du papier de verre ou une brosse métallique si nécessaire.

12. Graissez avec de la vaseline les bornes de la batterie (afin d'éviter la corrosion) et reconnectez les câbles.
13. Mesurez la tension aux bornes de la batterie avec une charge standard, puis laissez la batterie se recharger.

A propos de l'étape 13, il est utile de mesurer la chute de tension de la batterie lorsqu'elle est connectée à une charge standard (ex : un récepteur de 50 W pour une batterie de 100 Ah). Si cette information est collectée dans le carnet de bord quand la batterie est neuve et ensuite régulièrement, il est possible de détecter une baisse de capacité (la chute de tension augmentera avec le temps et jusqu'à une valeur inacceptable. Il sera alors possible de changer la batterie avant qu'elle ne s'arrête de fonctionner, inopinément).

4.4.1 Méthode pour estimer la capacité restante d'une batterie

Si une batterie montre des signes de faiblesse, il peut être intéressant d'estimer sa capacité restante.

Exercice : Demander aux participants de formuler une méthode simple pour mesurer la capacité d'une batterie.

Réponse :

1. Chargez la batterie à 100 %. Elle sera entièrement chargée quand la tension ouverte (après un repos de 30 minutes) sera comprise entre 12,7 et 12,9 V et que la densité de l'électrolyte sera autour de 1,24 à 1,28 (selon le type de batteries). La recharge peut être réalisée sur site ou en atelier.
2. Déchargez la batterie avec une intensité de décharge voisine de l'intensité consommée par le client (ex : 4 lampes de 8 W, soit une intensité de 2,66 A) ou alors une intensité de décharge pour laquelle vous connaissez la capacité en C_n correspondante (ex. 5 A pour une batterie de 100Ah C_{20}).
3. Mesurez et notez l'intensité et la tension (en décharge) toutes les heures.
4. Arrêtez la décharge lorsque la tension (en décharge) est de 10,5 V.
5. Attendez 30 mn, puis mesurez la tension ouverte. Si Uco est autour de 11,8 V ou 12 V, la batterie est probablement complètement déchargée. Mesurez la densité d'électrolyte ; elle doit être autour de 1,12.
6. Calculez la capacité en multipliant le courant moyen par le temps de décharge ($C = I \times t$).
7. N'oubliez pas de recharger la batterie aussitôt après le test !

Exercice : Mesures de capacités de diverses batteries (de 4 Ah à 100 Ah) avec la méthode proposée.

Note importante : La mesure précise de la capacité d'une batterie est une opération plus complexe que la méthode proposée. Toutefois, cette méthode est suffisante pour faire un diagnostic fiable sur l'état de santé de la batterie.

4.4.2 Mesures de densité de l'électrolyte / correction de la température

La densité de l'électrolyte d'une batterie varie avec l'état de charge d'une batterie, mais aussi avec sa température.

Le densimètre a été calibré pour une certaine température (souvent à 20°C). Si la température de l'électrolyte est nettement au-dessus ou au-dessous de cette valeur, il est nécessaire de faire une correction de la température pour avoir une valeur précise de la densité et tirer des conclusions sur l'état de charge d'une batterie.

Le facteur de correction est de 0,0007 pour chaque °C.

Si la température de l'électrolyte > température de calibration	→	Ajouter 0,0007 pour chaque °C
Si la température de l'électrolyte < température de calibration	→	Soustraire 0,0007 pour chaque °C

Exemple

Si le densimètre a été calibré à 20°C et que l'on mesure 1,22 avec un électrolyte à 45°C, la densité à 20°C est alors de $1,22 + (0,0007 \times 25) = 1,237$. Cette valeur peut alors être utilisée pour connaître l'état de charge avec la *courbe EC / densité / Uco*.

Si le densimètre a été calibré à 20°C et que l'on mesure 1,22 avec un électrolyte à 10°C, la densité à 20°C est alors de $1,22 - (0,0007 \times 10) = 1,213$. Cette valeur peut alors être utilisée pour connaître l'état de charge avec la *courbe EC / densité / Uco*.

4.5 Procédure de maintenance du régulateur

Demander aux participants de proposer une procédure de maintenance : Que faut-il faire ?

Il peut être intéressant de revoir rapidement toutes les fonctions du régulateur pour que les participants deviennent plus facilement ce qu'il est important de vérifier (voir le **module 6**).

Réponses : voir procédures ci-dessous.

1. Nettoyez le coffret du régulateur avec un chiffon propre et sec. La poussière et les nids d'insectes peuvent réduire le refroidissement du régulateur.
2. Assurez-vous que le boîtier est bien fixé.
3. Enlevez le couvercle. Cela peut s'avérer impossible sur certains régulateurs.
4. Vérifiez qu'aucune chaleur excessive n'est émise par un composant, une connexion ou un fusible. Vérifiez qu'aucun câble n'ait été ajouté. Vérifiez et resserrez chacune des connexions.
5. Vérifiez que les indicateurs et voyants donnent des informations cohérentes (en particulier en fonction de la tension de la batterie).
6. Vérifiez que les valeurs de seuil de coupure et de reconnexion des utilisations sont conformes avec les valeurs indiquées sur la notice du constructeur.
7. Vérifiez que les valeurs des seuils de tension en fin de charge sont en conformité avec les valeurs indiquées sur la notice du constructeur.

Une astuce consiste à avoir une batterie étanche de faible capacité (ex : 7 Ah - 12 V) dans sa boîte à outils. Il suffit de la connecter en lieu et place de la batterie du client(e) et de faire les tests (seuils limitant la décharge et seuils de fin de charge).

Une autre astuce (et c'est l'idéal) est de posséder une alimentation stabilisée qui permet de faire varier artificiellement la tension à l'entrée du régulateur.

Il est souhaitable de réaliser la maintenance par temps ensoleillé et à environ deux heures de l'après-midi solaire (ex : 14h00). Il est alors probable que la batterie sera en fin de charge. Mesurez alors cette tension aux bornes de la batterie. La mesure doit être comparée avec la valeur de la notice technique en tenant compte de la compensation en température.

8. Allumez quelques récepteurs. Puis, aux bornes du régulateur, comparez la tension du panneau à celle de la batterie au cours de la charge. La tension du panneau doit être supérieure à celle de la batterie (de 0,1 à 1 V maximum).
9. Aux bornes du régulateur, comparez la tension de la batterie à celle du circuit des récepteurs, avec au moins un récepteur en fonctionnement. La tension de la batterie doit être supérieure à celle du circuit des récepteurs (de 0,1 à 0,5 V).
10. Vérifiez et resserrez une dernière fois les connexions.

ATTENTION : Soyez prudent et évitez tout court-circuit. Ceux-ci sont toujours susceptibles de provoquer des dommages importants.

Les régulateurs comportent de nombreux composants électroniques délicats. Quand vous vérifiez un régulateur, prenez votre temps.

4.6 Procédure de maintenance des récepteurs et câbles

Demander aux participants en quoi consiste la maintenance des récepteurs et des câbles.

Réponses : voir procédures ci-dessous et principaux éléments de réponse.

4.6.1 Recommandations pour les récepteurs

Chaque type de récepteur a des besoins spécifiques d'entretien. Il n'est pas possible de détailler chacun d'entre eux dans ce manuel, toutefois, d'une manière générale :

- Vérifiez si de nouveaux récepteurs ont été connectés, en plus de ceux initialement prévus ;
- Nettoyez et dépoussiérez les différents récepteurs (ex : les lampes) avec l'utilisateur. Resserrez toutes les connexions ;
- Mesurez la consommation des récepteurs si le client se plaint que sa batterie est toujours déchargée. Tout risque de surconsommation entraîne la réduction de la durée de vie de la batterie. Avec un multimètre, mesurez le courant consommé par l'appareil et sa tension d'alimentation, et en déduire la puissance ($P = U \times I$). La comparer avec les indications présentes sur les appareils. Mesurez les chutes de tension dans les câbles ;
- Remplacez les tubes fluorescents noircis, seulement à la demande de l'utilisateur. Après leur remplacement, estimez leur durée de vie. Elle doit être normalement de 3 000 à 5 000 heures (un tube qui tombe en panne après 3 ans en ayant fonctionné 4 heures par jour aura, au total fonctionné $3 \times 365 \text{ jours} \times 4 \text{ heures}$, soit 4 380 heures). Si le tube a noirci prématurément, vérifiez la tension d'alimentation aux bornes de la lampe en position allumée, elle est probablement trop basse (ex : 11 V) : augmentez la section du câble ;
- Pour les réfrigérateurs solaires : mesurez l'intensité consommée et les temps d'arrêt et de fonctionnement du compresseur pendant quelques heures, pour évaluer sa consommation électrique quotidienne. Mesurez la température de consigne et finalement, dégivrez le réfrigérateur en cas de besoin.
- Vérifiez et éliminez les consommations de veille (convertisseurs CC/CC, onduleurs CC/CA, TV) par l'installation d'une prise avec interrupteur.
- Vérifiez tous les fusibles et assurez-vous qu'ils n'ont pas été « bricolés » (remplacés par des fils de cuivre). Dans ce cas, enlevez les fils de cuivre et remplacez-les par des fusibles.
- Pour les onduleurs, mesurez la tension CA du signal de sortie ;

Exercice : Calcul du nombre d'heures de fonctionnement annuel d'une lampe fluorescente qui fonctionne 2 heures par jour et 5 jours par semaine. Si cette lampe ne fonctionne plus au bout de 2 ans, est-ce logique sachant que la durée de vie des lampes fluorescente est d'environ 5000 heures ?

Réponse :

Le temps de fonctionnement est : $2 \times 5 \times 52 \times 1 = 520$ heures. Si la lampe est tombée en panne après seulement $2 \times 520 \text{ heures} = 1040$ heures, c'est une situation anormale car sa durée de vie aurait dû être de 4 à 5000 heures. Peut-être que l'utilisateur ne respecte pas les temps d'utilisation !

4.6.2 Recommandations pour les câbles

- Assurez-vous que les câbles sont tous bien fixés et améliorez, si nécessaire, leurs fixations. N'attendez pas que les câbles deviennent lâches pour servir de porte-serviette. Ils font désordre et les enfants peuvent tirer dessus.
- Assurez-vous qu'il n'y ait pas de câbles à nu visibles (ou cachés d'ailleurs) susceptibles de pouvoir donner lieu à des connexions pirates...

4.7 Une dernière touche à la maintenance

Demander aux participants si le travail de maintenance est fini, après avoir fait la maintenance sur le module, le régulateur, la batterie et les récepteurs ?

Réponses : voir ci-dessous

1. Marquez, sur les composants remplacés, la date d'installation avec un marqueur indélébile.
2. Écrivez les mesures et les résultats des contrôles sur le carnet de bord du système, pour pouvoir s'y référer ultérieurement.
3. Invitez l'utilisateur ou l'utilisatrice à effectuer, avec vous, le tour du système en faisant fonctionner chacun des récepteurs.
4. Expliquez bien au client(e), les actions menées durant la maintenance et montrez-lui les composants qui ont été, éventuellement, remplacés.

5. Prenez le temps de former l'utilisateur :

- à l'utilisation du système (indiquez les durées d'utilisation et les appareils qu'il est possible de brancher et ceux qu'il faut à tout prix éviter).
- au petit entretien qu'il ou elle doit effectuer régulièrement. **Faites pratiquer** par l'utilisateur les gestes nécessaires, plutôt que de montrer ce qu'il faut faire. Ex : nettoyage des modules, vérification du niveau d'électrolyte et rajout de l'eau distillée lorsque c'est nécessaire.
- aux petits dépannages : changement d'un tube fluorescent...ou simplement attente de quelques jours afin que la batterie déchargée se recharge !

- 6 Suggérez aux clients de réduire au strict minimum l'utilisation du système pendant 7 jours, ce qui assurera, dans la plupart des cas, une recharge complète de la batterie.
7. Donnez à l'utilisateur vos coordonnées ou celles d'un technicien(e) solaire de votre choix. Un jour une panne surviendra, et il aura alors besoin de votre intervention.

4.8 Problèmes courants et solutions

Demander aux participants pourquoi il est important de réparer, très rapidement, un défaut sur un système.

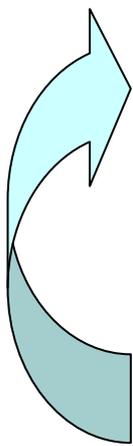
Réponse :

1. Pour satisfaire le client.
2. Pour éviter la panne prématurée de la batterie. En effet, même lorsque le composant défectueux n'est pas la batterie elle-même, la plupart des autres défauts mèneront à sa détérioration prématurée. Il faut donc réparer toutes pannes de composants dès que possible.

Des solutions aux problèmes courants sont proposées dans le *Guide Pratique du Photovoltaïque, Dimensionnement, Installation et Maintenance*, version septembre 2005. Toutefois, ils ne seront vraiment utiles aux techniciens que s'ils adoptent l'état d'esprit du dépanneur "idéal" : calme, concentré, consciencieux, humble, honnête ... et bien équipé (outillage et documents).

Il est également indispensable d'adopter une méthode simple et fiable lors des dépannages et ceci quelque soit le problème rencontré.

4.8.1 Méthode de dépannage proposée



1. Observez et analysez le problème
2. Consultez les tableaux ci-après (par composant)
3. Choisissez une seule action à entreprendre
4. Agissez
5. Observez le résultat et enregistrez/notez
6. Analysez et concluez
7. Posez-vous cette question : *Le problème est-il vraiment résolu ou dois-je recommencer la même action (étape 1) ?*

En règle générale, commencez par les défauts les plus simples : continuité des câbles, fusible grillé, etc.

Exercices :

Pour chacun des problèmes décrits dans les sections suivantes (pour chaque composant principal : module, batterie et régulateur), lire la colonne '*Problème*' et cacher les colonnes '*Causes*' et '*Solutions*' et amener les participants à proposer les '*Causes*' et '*Solutions*'.

4.8.2 Module solaire

Problèmes	Causes	Solutions
Courant de sortie faible	Trop de poussière	Nettoyez. Modifiez l'implantation du panneau si le nettoyage en est impossible
	De l'ombre sur tout ou partie du module	Supprimez la cause de l'ombre
	Module mal orienté ou incliné	Modifiez l'orientation ou l'inclinaison
	Mauvaise aération du panneau	Nettoyez l'arrière du panneau et modifiez l'installation si nécessaire
Courant de sortie très faible	Une (ou plusieurs) cellule est masquée par une feuille, une fiente d'oiseau	Nettoyez et/ou coupez les branches les plus proches
Aucun courant de sortie	Les connexions, au niveau de la boîte de jonction, sont desserrées ou corrodées	Nettoyez et resserrez. Percez un petit trou (1 mm) en bas de la boîte de jonction pour que l'eau de condensation puisse s'évacuer
	Diodes by-pass claquées passantes (court-circuit)	Changez les diodes by-pass ou enlevez-les simplement faute de diodes de rechange (cas des systèmes 12 ou 24 V)
	Connexion coupée au niveau de la sortie du module ou entre cellules	Si possible, grattez l'arrière du module et ressoudez les connexions. Refaire l'étanchéité avec du silicone
La tension de circuit ouvert est basse (inférieure à 12 V même à midi)	Une diode by-pass est grillée passante (dû vraisemblablement à la foudre)	Changez la diode by-pass ou enlevez-la simplement faute de diode de rechange disponible
Plaque de verre cassée	Vandalisme, Module frappé par la foudre ou défaut de fabrication	Le module peut fonctionner encore quelques années, jusqu'à ce que l'humidité corrode les contacts entre cellules. Changez le module, si les valeurs Icc et Uco sont incorrectes Vérifiez si le support module ne provoque pas de contraintes mécaniques sur le module Contactez le fournisseur si la période de garantie n'est pas dépassée

4.8.3 Régulateur

Problèmes	Causes	Solutions
Dégagement de chaleur inhabituel	Les connexions des câbles arrivant aux bornes du régulateur sont lâches	Resserrez toutes les connexions (une faible dissipation de chaleur est normale)
Aucun récepteur ne fonctionne	Batterie déchargée	Vérifiez la tension de la batterie
	Fusible du régulateur, du circuit batterie ou du circuit des récepteurs grillé	Changez le fusible
Seuils de tension incorrects	Composant défaillant Régulateur bricolé	Ajustez les seuils de régulation ou remplacez le régulateur avant que ce problème ne détériore la batterie
Régulateur court-circuité ou "ponté"	Habituellement effectué par l'utilisateur pour obtenir plus d'énergie de la batterie	Enlevez le pont et expliquez à l'utilisateur la fonction du régulateur
Indicateurs fournissant des informations erronées	Diverses	Ajustez ou remplacez les indicateurs (ou le régulateur)
Régulateur coupant les récepteurs trop rapidement	Régulateur endommagé ou batterie en fin de durée de vie (batterie sulfatée)	Vérifiez les seuils de tension de régulation. S'ils sont normaux, la batterie est probablement sulfatée (section 4.11)
Régulateur coupant les récepteurs alors que la batterie semble être correctement chargée	Le courant appelé par les récepteurs est trop fort, induisant une chute de tension importante et la coupure du circuit	Remplacez la batterie par une batterie de capacité supérieure (ceci limitera la chute de tension)
	Batterie sulfatée ou endommagée	Voir section 4.11, 'Solution S' .

4.8.4 Batterie

La plupart des pannes résultent de sa baisse de capacité, causée principalement par le nombre et la profondeur des cycles subis par la batterie, et le fonctionnement prolongé en état de charge extrême (surcharge, sous-charge ou décharge profonde).

Attention : Les solutions aux problèmes peuvent dépendre du type de batterie : ouverte ou étanche. Les tableaux ci-dessous comportent quelques sections spécifiques.

Batteries ouvertes et étanches 12 V		
Problèmes	Causes	Solutions
Faible état de charge permanent et réduction rapide de la capacité	Système de production inadapté aux besoins (nombre de modules insuffisant, régulateur défaillant) ou sur-utilisation.	Redimensionnez l'ensemble de l'installation PV, avant la sulfatation irréversible de la batterie
Température de la batterie augmente beaucoup durant la charge, bouillonnement et dégazage	Le courant de charge est trop élevé	Réduisez le courant de charge (vérifiez le dimensionnement)
	Le seuil haut de régulation est trop élevé	Vérifiez le régulateur
Taux d'autodécharge important	Présence de dépôts conducteurs et d'humidité sur le couvercle de la batterie Ventilation du local insuffisante	Nettoyez et séchez le haut de la batterie. La batterie doit être installée dans un local frais et bien ventilé
	Batterie en fin de vie (corrosion des plaques)	Changez la batterie
Tension de circuit ouvert inférieure à 9 V	La batterie est certainement endommagée	Remplacez la batterie
Forte odeur dans local ou coffre à batterie	Ventilation insuffisante	Créez des ventilations en bas et en haut du coffre et du local batterie.
Batteries en parallèles abîmées prématurément	Mise en parallèle de batteries de capacité, d'âge ou de fabrications différentes	Ne jamais mettre plus de 3 batteries en parallèle Remplacez les batteries en parallèle par une batterie monobloc
	Différences de longueur des câbles de mise en parallèle (une batterie est mieux chargée que l'autre)	Les longueurs de câbles doivent être rigoureusement identiques et de forte section (minimum 4 mm ²)
Bornes de batterie corrodées	Débordement d'électrolyte hors des cellules – manque de maintenance.	Nettoyez la batterie avec un chiffon sec, graissez les bornes avec de la vaseline et reconnectez les câbles
Tension de circuit ouvert d'environ 10,5 V quand la batterie est chargée et la batterie a toujours une bonne capacité	Une cellule de la batterie est détruite et en court-circuit	Changez la batterie (ou tentez de faire remplacer la cellule si la batterie en question a été mise en service depuis moins de 6 mois)

Batteries ouvertes et étanches 12 V		
Problèmes	Causes	Solutions
<p>Tension augmentant très vite dès que le régulateur connecte les modules PV</p> <p><i>'la batterie refuse la charge'</i></p>	<p>Mauvais serrage des connexions créant des résistances qui affectent la tension lue par le régulateur</p>	<p>Nettoyez et resserrez les connexions</p>
	<p>La batterie est sulfatée. Phénomène apparaissant sur les vieilles batteries et celles laissées en sous-charge pendant plusieurs semaines. La batterie a désormais une forte résistance interne et dès qu'un courant est appliqué à la batterie, sa tension monte rapidement pour franchir le seuil haut de régulation alors que peu de courant a été stocké</p>	<p style="text-align: center;">Solution 'S' :</p> <p><i>Recharge 'douce' de la batterie pendant 7 jours, pour s'assurer que la batterie a reçu suffisamment d'Ah (1,3 à 1,5 fois sa capacité) dans les conditions suivantes :</i></p> <p><u>Cas des batteries ouvertes :</u> <i>Charger la batterie sans régulateur. La tension dépassera 15 V à la fin de la charge</i></p> <p><i>Si cette charge échoue, tentez un traitement 'curatif' (voir section 4.11).</i></p> <p><i>En cas d'échec, changez la batterie</i></p> <p><u>Cas des batteries étanches :</u> <i>Charger la batterie avec régulateur. La tension ne doit pas dépasser le seuil haut de régulation (14,1 V). En cas d'échec, changez la batterie</i></p>
<p>Tension baissant très vite dès que des récepteurs sont branchés. Le régulateur coupe les récepteurs.</p>	<p>Batterie sulfatée : la résistance interne de la batterie fait chuter la tension, le régulateur coupe les récepteurs</p>	<p>voir solution 'S'</p>
	<p>Récepteur consommant trop de courant par rapport à la capacité de la batterie (ex : 10 A sur une batterie de 40 Ah)</p>	<p>Modifiez l'installation (ex : augmentez la capacité de la batterie)</p>
	<p>Batterie déchargée</p>	<p>Rechargez la batterie</p>
Batteries ouvertes 12 V		
<p>Densité de l'électrolyte inférieure à 1,24 même après une recharge complète</p>	<p>La batterie est sulfatée</p>	<p>voir solution 'S'</p>
<p>Densité de l'électrolyte inférieure à 1,100</p>	<p>La batterie (ou au moins une des cellules) est à priori détruite</p> <p>La batterie est très vieille</p>	<p>voir solution 'S'</p>
<p>Consommation d'eau distillée variant beaucoup selon les cellules</p>	<p>Batterie en fin de vie : cellules sulfatées. La cellule avec le niveau le plus bas est celle qui est sulfatée</p>	<p>voir solution 'S'</p>

Problèmes	Causes	Solutions
Densité de l'électrolyte faible et tension faible	Batterie avec recharge insuffisante pendant plusieurs jours ou semaines	Recharge de la batterie avec le panneau solaire pendant au moins 10 jours en coupant tous les récepteurs (avec seuil de fin de charge = 14,7 V) ou bien recharge en ville par un chargeur sur le secteur pendant 3 jours (seuil de fin de charge 14,7 V). Il faut observer des bulles de gaz sortir de la batterie
	Stratification de l'électrolyte (la densité est forte en bas du bac de la batterie et faible sur le dessus)	
Forte consommation d'eau distillée (pour toutes les cellules)	Local de stockage des batteries trop chaud	Améliorez la ventilation et le refroidissement du local
	Seuil de charge trop élevé	Abaissez le seuil de charge
	Courant de charge trop élevé	Vérifiez le dimensionnement du système
	Cycles de décharges profondes trop fréquents / Batterie en fin de vie	Changez la batterie
Niveau insuffisant d'électrolyte	Manque de maintenance	Faites le niveau d'électrolyte, sans dépasser le niveau maxi
Plaques à l'air libre	Manque de maintenance (manque d'électrolyte)	Remplacez la batterie (les plaques sont probablement détériorées irréversiblement)
Odeur particulière de l'électrolyte	Présence de corps étrangers dans les cellules	Otez ces corps étrangers
	Eau distillée : mauvaise qualité	Vérifiez la qualité de l'eau distillée

4.8.5 'Astuces' pour la restauration d'une batterie ouverte sulfatée

Chaque 'réparateur' de batteries a ses 'astuces' pour prolonger la vie d'une batterie 'sulfatée'. Elles permettent de récupérer une partie de la capacité originelle et d'allonger la vie de la batterie de quelques semaines à quelques mois. Voici une de leurs astuces, étape par étape :

1. Videz l'électrolyte de la batterie (ne pas verser l'électrolyte sur le sol) ;
2. Remplissez la batterie d'eau distillée ;
3. Chargez la batterie avec un courant de charge d'environ 10 % de la capacité de la batterie (ex : 10 A pour une batterie de 100 Ah) pendant 24 heures ;
4. Mesurez la densité : si elle est de l'ordre de 1,150, renouveler les opérations (vider la batterie et remplir à nouveau avec de l'eau distillée) ;
5. Mesurez la densité : si elle est comprise entre 1,050 et 1,100, vider la batterie ;
6. Remplissez d'électrolyte (1,24 ou 1,28 selon le type de batterie). Ne pas réutiliser l'électrolyte ancien ;
7. Rechargez la batterie pendant 15 heures (avec un courant de charge de 10 % de la capacité) ;
8. Mesurez la capacité de la batterie (avec un courant de décharge correspondant aux récepteurs utilisés par le client) ;

Cette méthode implique l'achat de plusieurs litres d'eau distillée et d'électrolyte. Elle a un coût non négligeable. Dans bien des cas, il est plus rentable d'installer une batterie neuve.

Remarque : Il est impossible de tenter cette opération sur les batteries étanches.

4.8.6 Pannes sur récepteurs et câblage

Problèmes	Causes	Solutions
Récepteur ne fonctionnant pas	Connexion desserrée ou coupée Câble mangé par des rongeurs Inversion des polarités	Vérifiez toutes les connexions et les polarités
	Chutes de tension trop importantes	Serrez les connexions Vérifiez le dimensionnement des câbles
	Problème interne au récepteur	Réparez ou remplacez
Noircissement prématuré des tubes fluorescents	Réglettes alimentées avec des tensions trop basses (9 à 10 V) ou trop hautes (15 V)	Vérifiez les chutes de tension dans les circuits de distribution Vérifiez les seuils de charge / décharge du régulateur
Lampe fluorescente ne s'allumant pas	Tube ou ballast 'grillé'	Mesurez la continuité des électrodes de chaque côté du tube. S'il n'y a pas continuité, changez le tube. Si il y a continuité, démontez la réglette et recherchez les composants 'grillés'.
Fusible 'grillé' ou disjoncteur 'sauté'	Calibre trop petit ou récepteur trop puissant Court-circuit dans un câble	Calculez le courant maximum quand tous les récepteurs sont allumés. Choisir un calibre légèrement supérieur
Câbles de section insuffisante	Bricolage par l'utilisateur Extension pirate de l'installation	Modifiez le câblage
Onduleur 'alarme tension basse'	Batterie déchargée ou câblage d'alimentation de section insuffisante	Réduisez fortement les utilisations et attendre la recharge complète des batteries – changez le câble
Onduleur 'alarme température'	Mauvaise ventilation (ou ventilateur grillé) Onduleur en surcharge	Assurez une bonne ventilation (dépoussiérage, positionnement) Vérifiez le dimensionnement de l'onduleur
Batteries déchargées sur système avec réfrigérateur	Surcharge de produits. Absence de dégivrage. Ouverture fréquente de la porte	Formation de l'utilisateur
	Système installé dans un local trop chaud. Mauvaise étanchéité de la porte et ventilation insuffisante derrière le condenseur	Modifiez l'installation Vérifiez le courant consommé par le compresseur et la durée des cycles Marche et Arrêt
	Thermostat mal réglé (trop froid)	Réglez le thermostat
	Fuite de fluide frigorigène	Faites appel à un frigoriste
Réfrigérateur solaire ne produisant pas de froid	Fuite de fluide frigorigène Thermostat mal réglé, etc. Carte électronique défectueuse	Faites appel à un frigoriste. Veillez à mesurer la consommation électrique après réparation.

4.8.7 Accéder à de l'eau distillée de bonne qualité

Il n'est pas toujours facile d'obtenir de l'eau distillée de bonne qualité, pourtant cette dernière conditionne une meilleure durée de vie de la batterie.

Au cours de la vie d'une batterie, le volume d'eau distillée rajoutée peut être beaucoup plus important que le volume d'eau originale mélangée avec l'acide : le volume d'électrolyte. Dans ces conditions, le niveau des impuretés contenu dans l'eau distillée doit être très bas puisque les impuretés s'accumuleront et se concentreront dans la batterie. La plupart des impuretés augmentent le taux d'autodécharge.

Il est fortement conseillé de se fournir en eau distillée chez les fabricants ou revendeurs de batteries. Les bouteilles doivent être libellées et scellées correctement. Si il est impossible de se fournir en eau distillée provenant du commerce, il est possible d'en 'produire' de deux façons :

1. L'eau de pluie est de l'eau distillée de bonne qualité, mais seulement dans certaines conditions.
 - Commencez à récupérer la pluie, seulement après que les premières pluies auront nettoyé le ciel.
 - Récupérez la pluie directement dans une bassine plastique propre. Surtout ne pas collecter l'eau de pluie s'écoulant depuis un toit.
 - Stockez l'eau dans une bouteille propre en plastique ou en verre et fermée par un bouchon. Ne jamais stocker l'eau dans un récipient métallique.

2. L'eau distillée peut également être obtenue par distillation 'artisanale' :
 - Faites bouillir de l'eau.
 - Récupérez la vapeur au moyen d'un collecteur en verre ou en plastique.
 - Attention de ne pas contaminer l'eau avec des impuretés.
 - Stockez l'eau dans une bouteille propre en plastique ou en verre et fermée par un bouchon. Ne jamais stocker l'eau dans un récipient métallique.

On peut aussi se fournir en eau distillée fabriquée par les laboratoires dans certains hôpitaux.

4.9 Exercices de dépannage

Jeu de dépannage

Demander aux participants de câbler un système solaire (ou plusieurs systèmes) sur des panneaux muraux).

Demander à un groupe de participants (le groupe A) de créer une panne (une seule à la fois) sur un système PV et laisser l'autre groupe (groupe B) rechercher le défaut et expliquer la méthode suivie. A chaque fois qu'une panne est identifiée, puis réparée (si possible), le groupe en question gagne un point.

Faire tourner les groupes. Ensuite, compliquer le jeu en créant plusieurs pannes à la fois sur un système.

Ce jeu est souvent très motivant pour les participants !

Note au formateur

Habituellement, les participants ont beaucoup d'imagination pour créer des défauts ou des pannes. Toutefois, les pannes doivent être 'réalistes'. Dans tous les cas, il faut faire des exercices avec les pannes suivantes :

1. Module sale (faible courant de charge).
2. Module avec ombre portée
3. Module avec une diode by-pass claquée
4. Module avec deux diodes by-pass claquées.
5. Mauvaise orientation du module PV.
6. Mauvaise inclinaison du module PV.
7. Placer une batterie complètement déchargée (le régulateur doit délester les récepteurs).
8. Remplacer une bonne batterie par diverses batteries usagées (batterie sulfatée, batterie avec un élément court-circuité).
9. Couper un fil à l'intérieur d'un câble.
10. Enlever un fusible dans le porte-fusible.
11. Remplacer un bon fusible par un fusible claqué.
12. Placer un fusible bricolé au lieu d'un fusible original.
13. Visser un câble dans un bornier en vissant sur l'isolant.
14. Placer un tube fluorescent en panne.
15. Placer une ampoule incandescente en panne.
16. Placer un régulateur en panne dans un système.
17. Placer un câble de section très insuffisante.
18. Augmenter exagérément la longueur d'un câble vers un récepteur (en cachant ce câble)
19. Etc.

5 Évaluation et feedback

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les concepts et notions de ce module.

Pour conclure sur ce module, il est suggéré d'organiser des équipes de 2 à 3 techniciens qui devront réaliser la maintenance sur un système solaire, et également réaliser une série de dépannages (ces exercices peuvent également être individuels) :

- Les participants devront faire la liste du matériel et de l'outillage nécessaire et procéder aux travaux de maintenance en suivant strictement les étapes telles que décrites dans ce module.
- Les participants devront énumérer les pannes les plus courantes sur chaque composant d'un système solaire.
- Les participants seront soumis à un exercice de recherche de pannes (au moins 5 pannes par participant).

La supervision de la part du formateur, pendant les travaux de maintenance ou de recherche de pannes, devra être très stricte afin de s'assurer que les procédures sont respectées.

Les travaux de maintenance et les exercices de dépannage pourront être réalisés sur 'site réel' ou sur des grands panneaux de particules (2 m x 1 m)

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants et donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen².

² Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.

MODULE 12 : Service Après-vente

1	OBJECTIFS	2
2	DUREE DU MODULE	2
3	ÉQUIPEMENT NECESSAIRE	2
4	CONTENU	3
4.1	Liste d'outillage.....	3
4.1.1	<i>Fabrication d'un gabarit : vérification d'inclinaison.....</i>	<i>4</i>
4.2	Pièces de rechange et consommables	5
4.2.1	<i>Définition : Pièces de rechange.....</i>	<i>5</i>
4.2.2	<i>Définition : Consommables</i>	<i>5</i>
4.2.3	<i>Choix / contrôle qualité des pièces de rechange et des consommables.....</i>	<i>5</i>
4.2.4	<i>Tableau indicatif des pièces de rechange et consommables nécessaires</i>	<i>6</i>
4.2.5	<i>Tableau d'aide à la gestion des pièces de rechange et consommables</i>	<i>6</i>
4.3	Service Après-Vente	7
4.3.1	<i>Définitions</i>	<i>7</i>
4.3.2	<i>Les activités de SAV.....</i>	<i>8</i>
4.3.3	<i>Partage des tâches du SAV.....</i>	<i>9</i>
4.3.4	<i>Contrat SAV.....</i>	<i>10</i>
4.3.5	<i>Contenu d'un contrat SAV.....</i>	<i>11</i>
4.3.6	<i>Estimation des coûts d'un service SAV.....</i>	<i>12</i>
4.3.7	<i>Evaluation d'un SAV</i>	<i>13</i>
4.3.8	<i>Exemple de Fiche de visite de système sous SAV</i>	<i>14</i>
5	EVALUATION ET FEED-BACK.....	15

1 Objectifs

Ce module couvre les sujets suivants :

- L'équipement nécessaire pour installer et maintenir les petits systèmes PV.
- Pièces de rechange et consommables : choix, gestion.
- Les aspects principaux du service après-vente :
 - Définition,
 - Les acteurs,
 - Les activités,
 - Organisation, promotion.

2 Durée du module

3 – 6 heures

3 Équipement nécessaire

Description	Qté (minimum)
Jeu d'outillage complet pour l'installation et la maintenance (tel que décrit dans la section 4.1 de ce module)	1
Vidéo de formation : Installation de Systèmes Solaires Domestiques	1
Matériel de projection (téléviseur magnétoscope, ordinateur et vidéoprojecteur)	1

4 Contenu

4.1 Liste d'outillage

Dans le module 10, les participants ont été invités à élaborer une liste d'outils nécessaires à l'installation.

Exercice : Demander aux participants de compléter cette liste avec les outils complémentaires nécessaires à la maintenance et aux réparations.
 Projeter la vidéo 'Installation de Systèmes Solaires Domestiques', section *Préparation pour l'installation*, afin de vérifier si l'outillage est complet.

La liste complète doit être similaire à celle ci-dessous. Demander ensuite aux participants de classer les outils selon qu'ils servent aux travaux d'installation, aux travaux de maintenance ou aux deux (sous forme de tableau à trois colonnes : désignation de l'outil, installation, maintenance).

L'essentiel, une boîte à outils ou un sac contenant :

<ul style="list-style-type: none"> - Boussole - Multimètre courant continu avec mesure jusqu'à 10 A - Densimètre - Pince universelle - Jeu de tournevis (2 plats et 2 cruciformes) - Clé à molette - Niveau à bulles - Mètre à ruban (2 à 3 m) - <i>Calculatrice (solaire !)</i> - <i>Documents techniques sur les produits PV, formulaires vierges de dimensionnement et de devis, et, bien sûr, le Guide pratique du Solaire Photovoltaïque !</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - Marteau - Couteau - Marqueur indélébile - Entonnoir en plastique - Jauge graduée en bois - Ruban isolant (chatterton) - Filtre pour l'électrolyte (ex : bas en nylon) - Chiffons - Craie - <i>Bloc-notes, crayons, taille-crayon et gomme</i>
---	--

Utile, mais pas indispensable :

<ul style="list-style-type: none"> - Inclinomètre / ou gabarit d'angle - Ciseaux à bois - Perceuse manuelle / jeu de forets - Fer à souder 30 W / 12V 	<ul style="list-style-type: none"> - Pince coupante - Pince à dénuder - Équerre - Petit module solaire cristallin (5 à 10 Wc)
---	---

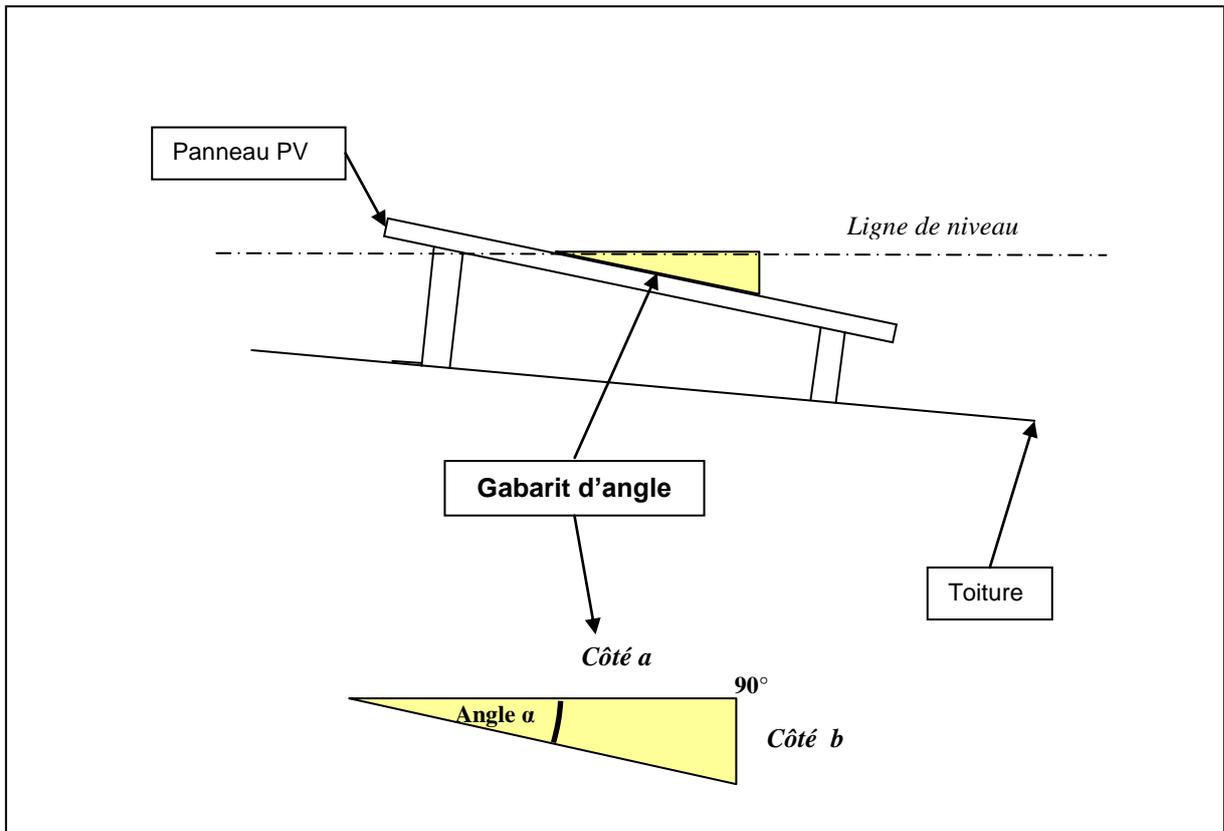
Pratique, mais pas toujours nécessaire :

<ul style="list-style-type: none"> - Outils de charpentier bois (scie égoïne, rabot) - Échelle (l'utilisateur doit en mettre une à disposition pour le nettoyage des modules) 	<ul style="list-style-type: none"> - Gobelet et bassine en plastique - Gants et paire de lunettes de protection - Bicarbonate de soude (pour nettoyer les traces d'acide)
---	--

Selon le type de systèmes solaires rencontrés, des équipements supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires : pince ampèremétrique CC-CA, thermomètre, perceuse électrique, etc.).

4.1.1 Fabrication d'un gabarit : vérification d'inclinaison

A l'aide d'un niveau à bulles et d'un *gabarit d'angle*, et à défaut d'avoir un inclinomètre, il est possible de vérifier l'angle fixe d'inclinaison d'un panneau solaire.



Fabrication : Les proportions du triangle du gabarit se calculent avec la formule trigonométrique suivante :

$$\text{Tangente } \alpha = \text{Côté } b / \text{Côté } a \rightarrow \text{Côté } a = \text{Côté } b / \text{Tangente } \alpha$$

Par exemple, cas d'un module qui doit être incliné de 10° par rapport à l'horizontale

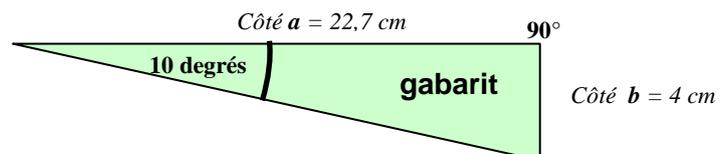
D'après les tables trigonométriques (extrait ci-dessous), tangente 10° = 0,1763.

Angle	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
tangente	0,0875	0,1763	0,2679	0,3639	0,4663	0,5773	0,700	0,8390	1,0

Si le *Côté b* mesure 4 cm, alors le *Côté a* = Côté b / Tangente 10° = 4 / 0,1763 = 22,7 cm.

Principe d'utilisation :

Il suffit de fabriquer ce triangle avec une planche de bois, puis de placer le gabarit et le niveau à bulles sur le module. Si le module est bien incliné, le niveau à bulles indique l'horizontalité.



4.2 Pièces de rechange et consommables

4.2.1 Définition : Pièces de rechange

Les pièces de rechange sont les composants de remplacement dans le cas d'usure normale (ex : tube noirci après 4 ans de fonctionnement, batterie en fin de vie), ou bien dans le cas de pannes soudaines (lampe hors service suite à un défaut constructeur, régulateur grillé suite à une mauvaise utilisation du système par l'utilisateur, etc.). Les pièces de rechange s'avèrent également indispensables lors de l'extension ou la réhabilitation d'une installation (par exemple : ajout d'une lampe supplémentaire).

4.2.2 Définition : Consommables

Les consommables sont des pièces, des petits composants ou matériel dont le technicien a besoin dans tous les cas pour faire les installations ou la maintenance. Il s'agit, en particulier, de l'eau distillée, de la vaseline, des chiffons, du ruban isolant, etc.

4.2.3 Choix / contrôle qualité des pièces de rechange et des consommables

Les pièces de rechange ou les consommables doivent être :

- de même qualité que l'équipement remplacé (si une qualité inférieure ou supérieure est disponible, il est nécessaire d'en informer le client).
- de même puissance, même calibre que les appareils ou composants d'origine (ex : lampe, régulateur, interrupteur, fusible, ou tout appareil électrique).
- accessibles (en atelier, sur le terrain).
- disponibles auprès des fournisseurs dans des délais raisonnables.
- recyclables ou jetables avec le minimum d'impact sur l'environnement.

Le type et la quantité exacte de pièces de rechange et des consommables qui doivent être à la disposition du technicien de maintenance dépendent de plusieurs facteurs.

Exercice :

- 1- Enumération des pièces de rechange et des consommables nécessaires pour les travaux de maintenance et pour la plupart des réparations.
- 2- Classement, selon qu'elles sont nécessaires sur site ou en atelier.

Résultat : voir tableaux ci-après.

4.2.4 Tableau indicatif des pièces de rechange et consommables nécessaires

Les quantités de pièces de rechange et de consommables à prévoir dépendent des facteurs suivants :

Facteurs d'influence	Commentaires
▶ Exigence du client	Veut-il être dépanné immédiatement, ou est-il prêt à attendre quelques jours ?
▶ Type de systèmes	Systèmes d'éclairage, réfrigérateur, audio-visuel
▶ Age des systèmes	Plus les systèmes sont anciens, plus les pièces de rechange deviennent nécessaires.
▶ Nombre de systèmes	La quantité à prévoir augmente avec le nombre de systèmes à maintenir.
▶ Nombre et type de pannes les plus probables et les plus fréquentes	Ex : tube fluorescent.
▶ Distance entre l'atelier principal et les systèmes	Plus les distances sont grandes, plus le nombre de pièces de rechange à prévoir sur le terrain est important (pour éviter d'avoir à revenir plusieurs fois).
▶ Moyens logistiques / financiers du technicien	Le technicien est plus ou moins limité selon qu'il dispose d'un vélo, d'une mobylette ou bien d'une voiture.

4.2.5 Tableau d'aide à la gestion des pièces de rechange et consommables

Ce tableau doit être adapté au cas par cas, en fonction des spécificités du programme dont est chargé le technicien. Exemple ci-dessous d'un programme avec systèmes d'éclairage :

Désignation	Pièces de rechange		Consommables	
	Atelier	Visite sur le terrain	Atelier	Visite sur le terrain
Module PV	✓			
Batterie	✓			
Régulateur	✓	✓		
Réglette	✓	✓		
Tubes de rechange	✓	✓		
Lampe halogène	✓	✓		
Douille pour lampe	✓	✓		
Interrupteur	✓	✓		
Prise mâle / femelle	✓	✓		
Câbles 2 x 2,5 mm ²	✓	✓		
Visseries	✓	✓		
Barrette de connexion	✓	✓		
Boite de dérivation	✓	✓		
Fusible (cartouches)	✓	✓		
Varistance	✓	✓		
Cadenas et porte-cadenas	✓	✓		
Eau distillée			✓	✓
Chiffons			✓	✓
Vaseline			✓	✓
Ruban isolant			✓	✓
Plâtre / ciment				✓
Peinture, lessive				✓
Manuel utilisateur				✓

Les signes '✓' peuvent être remplacés par les 'quantités' à prévoir.

4.3 Service Après-Vente

L'électrification rurale par systèmes PV progresse de plus en plus rapidement dans l'ensemble des pays en voie de développement, en particulier partout où le réseau électrique national n'a aucune chance d'être étendu dans les 10 ou 20 années à venir. Avec un nombre toujours croissant de systèmes sur le terrain, les techniciens solaires doivent proposer des prestations de *service après-vente*. Bien qu'actuellement difficiles à mettre en place, car peu rémunératrices, elles constituent un métier d'avenir.

L'offre de service après-vente (SAV) par un technicien est un 'plus', un *atout commercial*, qui le différencie parmi la plupart des techniciens sur le marché : ceux-ci n'assurent que les installations et éventuellement, les dépannages.

4.3.1 Définitions

Exercice : Quelle est la définition d'un service après-vente ?

Le service après-vente (SAV) est l'ensemble des services fournis au client après que le produit a été vendu, installé et livré.

Une autre définition du SAV :

Le SAV, c'est garder disponible à une distance proche, dans un délai et à un prix acceptable par le client, une main d'œuvre qualifiée et des pièces détachées.

Source ; Apex BP Solar France, 2003.

Il est important de définir les acteurs concernés et impliqués par un SAV :

Désignation	Commentaires
Client	C'est la personne clé. Sans client, il n'y a pas de produits vendus, donc pas de SAV.
Technicien	Personne qualifiée avec un certain niveau de connaissances techniques sur l'installation et l'entretien des systèmes solaires PV, et dotée de qualités d'entrepreneur.
Fournisseur	Fournisseur national ou régional. Il vend les systèmes solaires PV (et les pièces de rechange) au client : en direct, s'il dispose des capacités d'installations, ou par l'intermédiaire d'un technicien installateur.
Grossiste	Il achète les équipements en gros. Il s'agit souvent d'un importateur, puisque la plupart des composants solaires sont fabriqués en Europe, Etats-Unis, Japon, Afrique du Sud, Inde et Chine.
Fabricant	Il fabrique les composants des systèmes solaires. La plupart sont des sociétés d'envergure internationale, exportant dans le monde entier. Il existe cependant de bons produits fabriqués localement. Il est essentiel de les identifier car leur SAV est souvent plus facile à assurer.

4.3.2 Les activités de SAV

Le service après-vente comprend les tâches suivantes :

1. **Support de la garantie**
2. **Maintenance de routine**
3. **Dépannages / Réparations**
4. **Suivi et évaluation**
5. **Marketing**

1. **Support de la garantie**

Le fournisseur s'engage à honorer les conditions d'application des garanties offertes par le fabricant, dont il est le représentant officiel. Dans de rares cas, il peut aller au-delà de la garantie. Selon les conditions de garanties, les équipements sont remplacés sans frais. Cependant les coûts de dépose, de transport et d'installation sur site, sont rarement couverts par la garantie.



2. **Maintenance de routine**

A intervalles réguliers (ex : tous les mois ou tous les 6 mois), le technicien doit vérifier en détail le bon fonctionnement et les performances des principaux composants des systèmes (conformément à la conception de l'installation, aux exigences d'entretien, et aux spécifications techniques des produits).

3. **Dépannages et réparations**

Il s'agit des déplacements sur site pour réparer telle ou telle panne à la demande du client. Le technicien peut effectuer des réparations en atelier, si l'utilisateur est capable de ramener par exemple, une réglette qui ne s'éclaire plus, même après le changement du tube.

4. **Suivi et évaluation / feedback du client**

Afin d'améliorer le SAV, il est conseillé au technicien d'évaluer régulièrement la qualité de son service, et les coûts occasionnés, pour assurer la rentabilité et donc la pérennité du SAV.

5. **Marketing**

Les prestations de SAV permettent au technicien d'être en contact à intervalles réguliers avec le client.

Il doit être à son écoute et déceler tous besoins supplémentaires. Il doit y répondre et proposer ses services pour améliorer le service rendu par le système solaire.



4.3.3 Partage des tâches du SAV

Désignation	Tâches du Technicien	Tâches du fournisseur
1. Garantie	<ul style="list-style-type: none"> – Liaison entre le client et le fournisseur. – Démontage, test des équipements défectueux et installation des équipements remplacés au titre de la garantie. 	<ul style="list-style-type: none"> – Fournir les informations sur les conditions et limites de la garantie proposée. – Honorer la garantie (en liaison avec le fabricant). – Utiliser les services d'un technicien pour les travaux de main d'œuvre.
2. Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> – Effectuer les prestations sur le terrain selon les règles de l'art. – Former les usagers à la bonne utilisation des systèmes. 	<ul style="list-style-type: none"> – Informer et communiquer clairement sur la nécessité de l'entretien de routine et de la maintenance. – Participer à la création d'un réseau de compétence (pour assurer la disponibilité de techniciens ruraux qualifiés).
3. Dépannages	<ul style="list-style-type: none"> – Effectuer les réparations sur site ou en atelier dans les meilleurs délais. 	<ul style="list-style-type: none"> – Participer à la création d'un réseau de compétence (disponibilité de techniciens ruraux qualifiés). – Assurer la disponibilité des pièces de rechange.
4. Suivi et évaluation	<ul style="list-style-type: none"> – Interagir avec le client et ne pas seulement s'intéresser aux aspects techniques des systèmes. – Récolter les informations clés (fréquence et type de pannes). – Communiquer les informations au fournisseur. 	<ul style="list-style-type: none"> – Fournir des outils de suivi (appareils de mesure, carnet de suivi, etc.). – Informer régulièrement les techniciens des performances des produits (et des problèmes anticipés). – Evaluer et former les techniciens.
5. Marketing	<ul style="list-style-type: none"> – Créer de bonnes relations avec le client. – Vendre de nouvelles prestations et autres produits. 	<ul style="list-style-type: none"> – Informer les techniciens des nouveaux produits à venir sur le marché.

4.3.4 Contrat SAV

Les activités de SAV, telles que la maintenance biannuelle ou les dépannages, peuvent être effectuées avec ou sans contrat SAV :

- Pour quelques systèmes solaires implantés ici et là dans une petite ville rurale où est basé un technicien compétent, il existe un contrat moral implicite après l'installation d'un système. Le SAV se développe de bouche à oreille. Le technicien solaire est le '*garagiste solaire du coin*' (Une panne, on l'appelle). Pour la maintenance, le technicien se déplace à intervalles réguliers, selon son planning de travail.
- Dans le cas de la maintenance de plusieurs centaines de systèmes, répartis ou concentrés sur une zone géographique, il est nécessaire de formaliser le SAV. Concrètement, il s'agit d'élaborer des contrats écrits ; ex : contrat entre le client et le technicien, contrat entre le fournisseur et le technicien et dans certains cas, entre le client et le fournisseur. De nombreux montages organisationnels sont possibles.

4.3.5 Contenu d'un contrat SAV

Un contrat SAV doit être précis, pour couvrir les intérêts des parties signataires : client, technicien. Le contenu non exhaustif d'un contrat SAV est proposé ci-après :

Contenu d'un exemple contrat SAV type

- Nom et adresse des parties signataires : Client / Technicien / Fournisseur
- Description sommaire des prestations offertes (au choix) :

	Type de SAV	Inclus	Exclus
1	Maintenance du système solaire pour un montant forfaitaire annuel	Visites biannuelles gratuites (maintenance des modules, régulateur, réglettes, batteries)	coûts de remplacement des composants défectueux
2	Dépannage pour un montant forfaitaire annuel	4 dépannages gratuits annuels (main d'œuvre et déplacement), sauf en cas d'abus du système par l'utilisateur. Le dépannage doit être réalisé dans les 5 jours à réception de la demande de dépannage	coûts de remplacement des composants défectueux

- Obligations additionnelles du prestataire :
 - Qualité des composants remplacés, similaire aux équipements d'origine.
 - Respect des conditions d'application de la garantie sur les matériels (le cas échéant : gratuité des composants encore sous garantie).
- Obligations du client :
 - Responsable du petit entretien (nettoyage du panneau, niveau d'électrolyte, etc.).
 - Respect des conditions d'utilisation (durée d'utilisation, pas de connections pirates).
 - Appel / Information vers le SAV dans les 3 jours suivant une panne.
- Conditions générales :
 - Durée : 2 ans à compter de la signature du contrat.
- Clauses limitatives et de rupture du contrat :
 - Facturation des visites de dépannages en cas d'abus de la part de l'utilisateur.
 - Annulation du contrat en cas de démontage du système par l'utilisateur sur un autre site.
- Conditions de paiement du contrat :
 - Paiement à chaque visite biannuelle.
- Description du système concerné par le SAV :
 - Localisation / adresse complète.
 - Détails techniques des équipements (numéros de série, etc.).
 - Date d'installation du système et état des lieux du système / propriété du système.

Signatures des parties impliquées, et date de signature de chacun des signataires

Fin de contrat SAV

4.3.6 Estimation des coûts d'un service SAV

Le SAV des systèmes solaires en zones rurales est encore peu développé, sauf dans le cas de sociétés de service décentralisées (cas de la SSD Yeleen Kura, Koutiala au Mali ou d'autres compagnies notamment en Afrique du Sud : Nuon-Raps Utility et Kwazulu Energy Services Company EDF/Total Energie et Solar Vision) et de certains programmes menés, il y a quelques années, par des organisations non gouvernementales ou par des bailleurs de fonds institutionnels :

- ▶ Programme Energie Solaire Santé – République Démocratique du Congo (Union Européenne).
- ▶ Programme PRS, pompage solaire dans les pays du Sahel (Union Européenne).
- ▶ Programme Energie Solidarité Sénégal pour les centres de santé (Fondation Energies pour le Monde).
- ▶ Programme ASRAMES / REMSES / BIOSOL (Réhabilitation et Maintenance des Systèmes Solaires) – République Démocratique du Congo, Nord-Kivu.

L'ensemble de ces programmes, comprenant un SAV, ont rencontré de nombreuses difficultés, la plus importante étant la capacité de paiement des populations bénéficiaires.

Dans le cas des zones rurales ne bénéficiant pas de tels programmes, c'est-à-dire la grande majorité, les techniciens solaires ruraux ont la lourde tâche d'assurer le SAV par leurs propres moyens. Dans ces zones, les coûts du SAV sont également vite prohibitifs, si on ne tente pas de les limiter au minimum.

Les coûts de SAV comprennent, en particulier :

- ▶ Les coûts de main d'œuvre (sur le terrain et l'administration du SAV).
- ▶ Les frais de transport et éventuellement d'accommodation (logement et nourriture).
- ▶ Les coûts des pièces de rechange et consommables.
- ▶ La quote-part d'usure de l'outillage.

Limiter les coûts, c'est tout d'abord les estimer et ensuite étudier les possibilités d'économies.

Les réductions de coût les plus importantes sont obtenues par :

1. La concentration maximum de clients dans une région bien ciblée.
2. La réduction des coûts de transport, grâce à une bonne organisation du travail.
3. La formation des usagers.
4. L'installation de matériel fiable.
5. La qualité d'exécution des installations.

Promotion du SAV

L'obtention d'une masse critique de clients sur une région donnée est fondamentale. Il ne faut rater aucune opportunité pour augmenter le nombre de clients (la taille du marché) :

- ▶ Lors de l'installation d'un système ou lors d'un dépannage, proposer le SAV.
- ▶ Publicité (Installation d'un panneau publicitaire, indiquant les possibilités de SAV).
- ▶ Visite des propriétaires d'anciens systèmes solaires pour proposer le service SAV.
- ▶ Communication / interaction fréquente avec les fournisseurs de matériel.

4.3.7 Evaluation d'un SAV

Il est important d'évaluer le SAV. Cette évaluation peut être réalisée par le technicien ou par le fournisseur de matériel PV.

L'évaluation peut comprendre les aspects suivants :

- Evaluation des visites sur le terrain
 - Combien de temps s'écoule-t-il entre le premier jour de la panne et la visite sur site ?
 - Quels sont les coûts des réparations ? Comment se décomposent ces coûts ?
- Evaluation des performances du système
 - Quelles sont les pièces que l'on change souvent ?
 - Les performances sont-elles à la hauteur des spécifications techniques pour chacun des composants ?
- Evaluation de la formation des usagers
 - Les usagers ont-ils suffisamment de connaissances pour utiliser et maintenir correctement le système ?
- Evaluation des problèmes de paiement du SAV
 - Identification des retards de paiement. Pourquoi ?
- Etude de marché
 - Demande des clients : nouvelles attentes (ex : recharge de téléphone cellulaire)
 - Réactions des clients concernant les nouveaux produits disponibles sur le marché
 - Capacité à payer des populations (nouveaux systèmes, agrandissement de systèmes, etc.).

4.3.8 Exemple de Fiche de visite de système sous SAV

Fiche de visite pour un système solaire (à remplir par le technicien)

Nom du client :	
Adresse :	
Téléphone :	
Type de Système :	
But de la visite :	Maintenance / Dépannage / visite d'évaluation

En cas de panne	
Date de réception d'information de la panne :	Date de la panne :
Description de la panne par le client :	
Description de la panne par le technicien :	

Description de l'intervention (dépannage et/ou maintenance)
Durée de la visite :

Commentaires de l'utilisateur	Commentaires du technicien

Coûts à la charge du client (sauf indications contraires dans le contrat SAV) :

Pièce remplacée	Prix unitaire	Qté	Prix total	Main d'œuvre (b)
				Frais de transport (c)
				Frais outillage (d)
				Autres coûts (e)
Total pièces de rechange (a)				

Coût total	(a + b + c + d + e)
-------------------	----------------------------

Montant payé par le client :

Date et signature du technicien	Date et signature du client

5 Evaluation et Feed-back

Cette section est fondamentale, car elle permet aux formateurs de s'assurer que les participants ont compris et assimilé les concepts et notions de ce module.

Pour conclure sur ce module, Il est suggéré de demander aux participants (en équipe ou en session individuelle) de :

- Définir ce qu'est un SAV.
- Enumérer les 5 principales activités d'un SAV.
- Faire la liste des acteurs, et définir leur rôle et responsabilités.
- Proposer un schéma d'organisation de SAV dans le cas particulier de chaque participant, et rédiger les grandes lignes d'un contrat de SAV correspondant.

Remarque importante dans le cas où il est prévu, à la fin de la formation (après l'ensemble ou la majorité des modules), un examen pour évaluer la compétence des participants, donnant lieu à la remise d'un diplôme qualifiant :

Donner aux participants un exercice similaire à celui qui sera soumis le jour de l'examen. Ceci a l'avantage de préparer concrètement les participants pour l'examen¹.

¹ Un examen, un test devant toujours être conçu pour la réussite, non pour conduire à l'échec.