

ARMINES

60 Bd St Michel
75272 PARIS CEDEX 06
Tél. : (1) 43 29 34 77
Fax : (1) 40 51 00 94

CENTRE D'ENERGETIQUE
B. P. 207
Rue Claude Daunesse
06904 SOPHIA ANTIPOLIS CEDEX
Tél.: 04 93 95 75 75
Fax : 04 93 95 75 35

**ANALYSE DES PERFORMANCES
DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAIQUES
RECOMMANDATION SUR LE DIMENSIONNEMENT**

TRAVAIL REALISE DANS LE CADRE DE L'AIE

D. MAYER

Extrait du rapport final
Convention Ademe n° 98-05-007
Octobre 1999

Le programme sur les systèmes photovoltaïques "PVPS" (Photovoltaic Power Systems) est l'un des plus récents accords de collaboration au sein de l'Agence Internationale de l'Energie.

Il a été établi début 93 et rassemble depuis fin 95 une vingtaine de pays sur un programme de recherche, développement, d'analyse et d'échange d'informations sur les systèmes photovoltaïques en vue de leur utilisation par les compagnies d'électricité ou tout autre utilisateur privé ou non.

A l'heure actuelle, il se compose des six tâches suivantes :

- tâche I : Echange et diffusion de l'information sur les systèmes PV,
- tâche II : Analyse des performances et conception des systèmes PV,
- tâche III : Utilisation des systèmes en site isolés et insulaires,
- tâche V : Systèmes PV reliés au réseau - générateurs domestiques,
- tâche VI : Systèmes PV reliés au réseau - les systèmes multi-mégawatts,
- tâche VII : Systèmes PV intégrés au bâtiment.

ARMINES est le représentant français dans la tâche II. Les objectifs de cette tâche sont:

- de développer une banque de données rassemblant un grand nombre représentatif d'installations correspondant à chacun des types de systèmes présentés ci-dessus (sous tâche II/1).
- d'exploiter les données présentes dans cette banque afin d'en tirer des recommandations sur la conception des systèmes et notamment sur le dimensionnement (sous-tâche II/2).

Début 1997, les objectifs de la tâche II ont été partiellement réduits en insistant particulièrement sur les aspects analyse des performances à partir des données présentes dans la banque

Trois réunions d'experts ont eu lieu depuis le démarrage de la convention qui fait l'objet de ce rapport:

La première à Utrecht (NL) en Septembre 1998, la deuxième à Freiburg (DE) en février 1999 et la dernière à Ispra (IT) en mars 1999.

La réunion de Freiburg a essentiellement eu pour objectif de définir les grandes lignes du programme de travail proposé par la tâche II pour les cinq années à venir.

La réunion d'Ispra a permis de faire le point sur les résultats à produire (contenu, calendrier à tenir) et d'atteindre une position consensuelle sur le futur programme de travail de la tâche II. Celui-ci a été présenté et accepté lors de la réunion du Comité Exécutif qui s'est déroulée en mai 1999 à Lausanne.

La première partie de ce rapport présente de manière générale les outils développés dans le cadre de la tâche II ainsi que le type de données contenues dans la banque de données.

La deuxième partie du rapport est consacrée à la présentation des activités d'Armines dans le cadre de cette tâche.

Enfin la conclusion rassemble les résultats obtenus dans cette première phase du programme de la tâche II et indique les points sur lesquels insister ainsi que les objectifs à atteindre .

1 - DEROULEMENT DE LA TACHE II

1.1 Organisation

Les pays et équipes qui participent à cette tâche sont :

- Allemagne : ISFH
- Autriche : TIWAG
- France : ARMINES
- Israël : Ben Gourion University
- Italie : ENEL - ENEA
- Japon : Toyota Technical Institute - JQA
- Pays-Bas : ECN
- Suisse : TNC
- Union Européenne : DG XVII par l'intermédiaire de JRC Ispra

La tâche II exerce un rôle horizontal dans le programme PVPS, celui de fournir aux experts photovoltaïques ainsi qu'à tout autre groupe cible des informations pertinentes sur les performances opérationnelles des systèmes PV.

Quel que soit le groupe cible, l'information de base requise est la suivante :

- Données sur les performances en site (bilans d'énergie, productivités, rendements...),
- Comparaison entre systèmes au niveau comportement,
- Coûts (répartition du coût du système entre les composants, maintenance, installation...),
- Données sur la fiabilité (composants fragiles, origines des pannes, données statistiques...).

L'effort qui a été consenti lors de cette année s'est porté essentiellement sur la vérification de la pertinence des données qui ont été introduites dans la banque et sur l'élaboration d'une procédure d'analyse des performances des systèmes PV pouvant conduire à des réflexions préliminaires sur les aspects dimensionnement.

Sur cette base, un document présentant de manière synthétique quelques résultats importants, représentatifs des différentes typologies de systèmes a été élaboré. Un résumé est donné ci-après.

1.2 - Réunion d'experts et avancement

3 réunions ont eu lieu depuis le troisième trimestre 1998.

Le compte-rendu de chacune de ces trois réunions, Utrecht (NL) 10-11 septembre 1998, Freiburg (DE) 11 février 1999 et Ispra (IT) 3-4 mars 1999, présente l'avancement des travaux de la tâche II à ces dates. Ils sont disponibles sur demande.

1.2.1 Collecte des données

Chaque membre de la tâche II est responsable de la collecte de données dans son propre pays. Dans la plupart des cas, cette collecte s'est appuyée sur l'existence de programmes nationaux de démonstration. Ces programmes sont la plupart du temps très hétérogènes et le suivi est mené à différents niveaux :

- suivi global (relevé manuel ou sur une base mensuelle),
- suivi analytique (acquisition des données effectuée sur une base horaire)

En fonction du niveau de finesse du suivi, la qualité des données collectées varie significativement d'un pays à l'autre et d'une installation à l'autre. En règle générale, les systèmes raccordés au réseau présentent des données mieux exploitables que celles des systèmes en site isolé.

Un problème rencontré fréquemment dans la collecte des données concerne leur disponibilité. Dans le cas d'une implication directe dans les programmes de suivi, le transfert et l'analyse des données ont été quasi- immédiats. Dans le cas où l'accès aux données passe par des tiers non impliqués dans le programme de l'AIE, la collecte des données a été souvent longue et pénible, mais surtout, leur exploitation a souffert du manque d'informations sur le fonctionnement et la fiabilité des systèmes d'acquisitions de données.

Malgré la volonté de conclure les efforts de collecte fin 1997, cette activité a perduré jusqu'en fin 1998 pour les raisons développées plus haut.

A l'heure actuelle, la banque de données de l'AIE contient environ 290 systèmes pour une capacité installées d'environ 11 MWc. Les tableaux 1 et 2 montrent la répartition des systèmes, par pays, typologie, et gamme de puissance. La plus grande partie des systèmes se situent dans la gamme 1 à 5 kWc correspondant essentiellement aux toits PV . Les systèmes raccordés au réseau sont largement majoritaires avec 80%. Cela s'explique par la disponibilité de données enregistrées en site.

Les données incluses dans la Banque représentent une grande variété d'applications comme le montre le tableau 3. Les centrales de puissance sont les systèmes raccordés au réseau les mieux représentés (tous les pays sauf la France et l'Allemagne). Le terme " usage domestique " regroupe l'électrification rurale (France), les toits PV (Allemagne et Autriche) ainsi que l'intégration dans le bâtiment telle que les façades (Pays-bas). Le terme " application rurale " représente les systèmes de pompage (Japon, Italie), les phares et systèmes d'éclairage (EU). Les applications professionnelles concernent essentiellement les relais de télécommunication (France, Japon et EU).

Le jeu de données issu de ces 290 systèmes est suffisamment complet pour que l'analyse réalisée sur cette base puisse être considérée comme représentative. Cependant, les données sur le coût (investissement et maintenance) ne sont pas suffisantes. Seules l'Italie et la Suisse ont des données partielles sur le coût des systèmes.

Contenu de la banque de données systèmes					
Pays	Réseau	PV seul	Hybride	Nombre	Puissance (kWc)
Allemagne	X			88	1...22
Autriche	X		X	17	1...30
France		X	X	37	0.5...2.2
Israël	X	X		7	0.3...4
Italie	X	X	X	4	10...3000
Japon	X	X	X	70	2...1500
Pays-Bas	X	X		14	0.1...10
Suisse	X			41	1...560
EU	X	X	X	12	3...22

Tableau 1 : répartition par pays des systèmes inclus dans la banque de données

Répartition de la puissance nominale des 290 systèmes							
Puissance (kWc)	0...1	1...5	5...10	10...50	50...100	>100	Total
Nbre de systèmes	37	154	26	52	11	10	290
Puissance totale	20	425.5	211	1236	953.2	8 097.3	10 943
Répartition des 290 systèmes							
	Type de systèmes	Nbre	Nbre (%)	Po (kWc)	Po (%)		
	Raccordé réseau	189	65	8708	79.6		
	Autonome-PV seul	43	15	823	7.5		
	Autonome -hybride	35	12	855	7.8		
	Raccordé hybride	23	8	557	5.1		

Tableau 2 : répartition par puissance et type de systèmes

Type de projets et d'applications						
Pays	R&D	Production	Centrales	Usage domestique	Application rurale	Applications professionnelles
Allemagne		X		X		
Autriche	X		X	X		
France				X		X
Israël	X		X			
Italie	X	X	X		X	
Japon	X	X	X	X	X	X
Pays Bas	X		X	X		
Suisse	X	X	X			
EU	X		X	X	X	X

Tableau 3 : répartition par type d'applications

1.2.2 Analyse des données.

Un résumé des informations issues de l'analyse des données réalisée pays par pays est donné ci-dessous. Les résultats obtenus à partir de l'évaluation des performances des 37 systèmes français sont présentés de manière plus détaillée dans la partie traitant plus particulièrement de la contribution d'Armines à la tâche II.

Allemagne :

L'Allemagne s'est concentrée sur l'évaluation technique de systèmes raccordés au réseau en raison de l'existence de programmes de démonstration en cours et de nouvelles initiatives dans ce domaine soutenues par les compagnies d'électricité. A l'heure actuelle, la plupart des 2000 systèmes installés dans le cadre du programme " 1000 toits PV " ont fonctionné pendant 5 ans et plus, donnant la possibilité de tirer des conclusions représentatives de ce type d'application.

De l'analyse du fonctionnement des 88 systèmes implantés dans la Banque de données AIE, les grandes lignes suivantes peuvent être présentées :

- La moyenne annuelle de la productivité globale (Y_f) ne varie que très légèrement d'une année sur l'autre autour d'une valeur de 700 kWh/kWc.an.
- Cependant, il y a une dispersion importante des valeurs autour de cette moyenne d'un système à l'autre, allant de 400 à 950 kWh/kWc.an.
- Les valeurs correspondantes du coefficient de performance (PR) varient de 0,4 à 0,82 ($PR_{moy} = 0,67$).
- Il y a une différence systématique de 5 à 15 % sur la puissance crête des modules par rapport aux valeurs annoncées par les fabricants. Ceci les a conduit à améliorer ces dernières années leur propre procédure d'évaluation de la puissance crête.
- L'ombrage partiel du générateur conduit à des réductions significatives de la production allant jusqu'à 22 % dans les cas extrêmes.
- Les risques de pannes, notamment en ce qui concerne les onduleurs, ont considérablement déclinés au cours du programme.
- Le rendement moyen annuel des onduleurs atteint 88 % avec un facteur de disponibilité de l'ordre de 97 %.
- Les effets environnementaux extérieurs (foudre, ...) joue un rôle négligeable, conduisant à un niveau de sécurité très élevé.

Autriche :

En Autriche, les programmes de suivi concernent essentiellement les centrales raccordées au réseau, bien que le plus grand nombre de systèmes installés soient des systèmes autonomes (43.5 % de la puissance installée).

Les installations raccordées au réseau atteignent des PR de l'ordre de 0,7 alors que les projets de façades présentent des PR mensuels assez médiocres en été (PR = 0,35 à 0,4) et un peu meilleurs en hiver (PR = 0,55 à 0,7).

France :

La France a concentré ses efforts sur les systèmes autonomes qui peuvent être répartis en deux catégories :

- les systèmes domestiques pour l'électrification rurale
- les systèmes professionnels.

Pour la première catégorie, l'analyse des performances montre des PR annuels pouvant varier entre 20 et 65 %. Ce coefficient ne peut cependant pas être considéré comme le reflet du fonctionnement des systèmes autonomes d'un point de vue technique comme c'est le cas

des systèmes raccordés au réseau. Il est également dépendant du comportement de l'utilisateur.

L'introduction d'un nouveau facteur (Matching Factor), prenant en compte, en plus du PR, la fraction solaire pour caractériser le fonctionnement des systèmes PV permet de mieux évaluer les performances d'un système hybride par rapport à un système PV seul.

L'introduction d'un facteur traduisant le niveau d'utilisation de l'énergie solaire permet de détecter les systèmes qui présentent des problèmes techniques.

Pour la seconde catégorie, les PR rencontrés sont très faibles (PR= 0,05 à 0,25). Ceci traduit en terme de performance un surdimensionnement réalisé volontairement pour des raisons de sécurité.

Israël :

Les résultats présentés proviennent de systèmes installés dans le centre de recherche de Sde Boqer et correspondent à des études spécifiques sur différents composants.

Systèmes de suivi du soleil : L'expérience acquise sur les systèmes de suivi à un axe (horizontal) s'avère décevante en terme d'énergie produite par rapport aux attentes des concepteurs. Dans le cas des systèmes de suivi à 2 axes, les résultats sont conformes aux prévisions. Cependant ces systèmes sont plus fragiles d'un point de vue mécanique.

Onduleurs : De nombreuses pannes ont été observées durant l'hiver, dues manifestement à des transitoires violents lors de successions de périodes nuageuses et ensoleillées dans des conditions de zones désertiques.

Japon :

Les systèmes raccordés au réseau sont les plus répandus au Japon. Les 70 systèmes implantés dans la Banque de données semblent fonctionner dans de bonnes conditions et conduire aux performances attendues.

Pay Bas:

Au Pays Bas, l'effort est actuellement consenti sur les systèmes raccordés au réseau et l'intégration du PV au bâti. Cependant, sur les 12 systèmes implantés dans la banque de données 4 sont des systèmes autonomes.

Certaines contre-performances observées (perte de 30%) dans des systèmes raccordés au réseau proviennent de défaut de fonctionnement d'onduleurs en cascade et de systèmes de recherche du point de fonctionnement maximum (MPPT).

Dans le cas des systèmes isolés, il est également noté que le PR ne permet pas de juger de manière univoque le bon fonctionnement d'un système. Un système surdimensionné même s'il fonctionne correctement du point de vue technique présentera de piètres performances.

Suisse :

L'ensemble des systèmes implantés dans la Banque de données (43) sont des centrales de production pour lesquelles un suivi analytique a été réalisé.

- En moyenne annuelle, sur l'ensemble des données correspondant à plusieurs années de suivi, PR = 0,69 avec une disponibilité des systèmes de 95 % alors que Yf est de l'ordre de 2.27 kWh/kWc.j (828 kWh/kWc.an) pour une productivité de référence (Yr) de 3,32 kWh/kWc.j.
- La dispersion de PR autour de la moyenne est assez élevée, allant de 0,4 à 0,8
- En ne considérant que la meilleure année, les résultats obtenus sont Yf = 943 kWh/kWc.an et PR = 0.72 pour une disponibilité de 98%. Le rendement du générateur considérant une température de jonction de 35°C est 20% inférieur à celui obtenu dans les conditions standards de référence.

1.3 - Conclusion et perspectives

Le programme de travail proposé dans le cadre de la tâche II arrive à une phase finale dans laquelle il est important de s'interroger sur la diffusion des produits, documents ou logiciels.

D'autre part le contenu du programme pour les 5 années à venir a été présenté au comité Exécutif lors de la réunion de Lausanne qui a eu lieu en mai 1999. Ce programme, un peu amendé pour prendre en compte la contribution réelle de chaque partenaire est présenté ci-dessous. Son contenu sera discuté en détail lors de la prochaine réunion d'expert aura lieu du 13 au 15 septembre en Suède.

1.3.1 - Diffusion des produits

La question s'est posée essentiellement pour la banque de données à savoir les outils logiciel ainsi que les données expérimentales traitées et vérifiées. La diffusion du Handbook, issu de la sous-tâche II/3, et des analyses synthétiques ne posent que le problème d'obtention du label AIE ou non.

Il convient donc de discerner deux produits :

- *Un outil logiciel* qui permet de stocker des données en provenance de systèmes PV et d'en analyser les performances.

Cet outil doit pouvoir être mis à disposition des professionnels au coût marginal du développement commercial (CD + les manuels).

Son utilisation permettra de réaliser des rapports sur les performances des systèmes selon un format standard reconnu dans les milieux scientifiques mais qui a du mal à diffuser chez les industriels du domaine.

Cela rendra également possible la comparaison de performances d'un système à l'autre, d'un ensemble à l'autre.

- *Un jeu de données expérimentales* représentatif des différents systèmes rencontrés sur le terrain.

Ce jeu sera remis à l'ensemble des experts du programme PVPS de l'AIE. En revanche seul un sous-ensemble de systèmes pourra être distribué avec les outils logiciels. Ce sous-ensemble devra garantir la même représentativité que la banque complète.

Il constituera cependant une sélection des meilleurs exemples auxquels tout utilisateur pourra confronter ses résultats.

Il est nécessaire de prévoir dans chacun des pays impliqués dans ce projet une réunion de présentation des outils. Cette réunion s'adresse aux utilisateurs potentiels que sont dans un premier temps l'ensemble des acteurs qui manipulent des données (ensembliers, responsable de programmes, de suivi de programmes...).

1.3.2 - Perspectives

La tâche II telle que son programme de travail a été défini il y a cinq ans s'est terminée en juin 1999.

Durant cette période un groupe d'experts s'est mis en place qui a développé des outils et des méthodes de travail.

Toutes les activités prévues dans le programme, même si jugées fondamentales, n'ont pu être lancées proprement, la plupart du temps par manque de moyens humains.

Une activité de support aux autres tâches a toujours raison d'être dans le programme PVPS. De plus, en s'appuyant sur un groupe déjà opérationnel on évitera les divers attermoissements auxquels nous avons pu assister lors du démarrage de la tâche II.

Un nouveau programme de travail pourrait s'appuyer d'une part sur la poursuite d'activités existantes qu'il est important de maintenir même de manière plus marginale et d'autre part sur des activités nouvelles capables d'accompagner l'émergence de nouveaux types de systèmes tels que les systèmes multi-énergies ou hybrides.

Le contenu de la tâche II tel que présenté à Lausanne excepté pour la sous-tâche 4 qui a été un peu allégé pour s'adapter aux moyens humains disponibles est présenté en Annexe 2. Un résumé est donné ci-dessous.

-> Sous-tâche II/1 : Banque de données internationale

L'activité concernera essentiellement la maintenance de la banque de données et son accessibilité de l'ensemble des outils sur Internet.

- * Un effort particulier doit être consenti pour intégrer plus de systèmes autonomes. Les systèmes nouvellement installés comportent le plus souvent des systèmes d'acquisition de données ce qui permettra d'avoir accès à un grand nombre de systèmes. Il est également important de pouvoir accéder à plusieurs années de données pour un même système afin de suivre l'évolution de grandeurs telle que la demande.
- * Il faut également inclure dans la banque des exemples significatifs de nouveaux programmes de démonstration de systèmes raccordés au réseau (NL, JPN, IT...).

-> Sous-tâche II/2 : Evaluation des systèmes PV

L'évaluation des systèmes PV incluant les systèmes hybrides comprend l'analyse des performances, le dimensionnement, les aspects coûts et fiabilité. Les résultats de cette évaluation seront publiés dans des rapports synthétiques.

Sous-tâche II/3 : Suivi et maintenance

Il s'agit de rassembler des informations sur le suivi et la maintenance des systèmes ainsi que sur les aspects qualité. Les résultats du suivi et les schémas de maintenance seront utilisés pour déterminer si la conduite des systèmes est satisfaisante et couvre l'attente de l'utilisateur i.e. pour juger de la qualité du projet.

Une nouvelle version du Handbook sera publiée rassemblant notamment des recommandations sur la maintenance. Une étude sur les standards nationaux et internationaux viendra compléter ce travail.

Sous-tâche II/4 : Amélioration des performances des systèmes PV

Il s'agit d'une part d'identifier des outils capables de réaliser une évaluation des performances de systèmes PV et hybrides et d'autre part d'appliquer ces outils sur des cas types sélectionnés en accord avec la tâche III. Ces systèmes seront inclus dans la Banque de données.

En ce qui concerne les systèmes hybrides, les stratégies de gestion retenues seront analysées (énergie et coût). Des alternatives seront évaluées et comparées. Des améliorations recommandées.

2 - CONTRIBUTION D'ARMINES DANS LA TACHE II

Les activités d'Armines dans la tâche II se sont situées à plusieurs niveaux :

- collecte de données sur les systèmes autonomes, vérification de la pertinence de ces données,
- analyse comparative des performances des systèmes autonomes,

Le contenu des activités liées à la collecte et à l'analyse des données est détaillé ci-dessous.

2.1 - Collecte de données et analyse de la pertinence

Dans le cadre de cette sous-tâche, ARMINES se concentre uniquement sur les systèmes de type isolé.

2.1.1 - Collecte des données

Le travail consiste à collecter des données issues de programmes de démonstration menés sur le territoire national.

Les experts de la tâche II avaient décidé de fixer une date limite au 30/06/98. Le travail a donc consisté à se focaliser sur la pertinence des données des systèmes concernés par ces programmes de démonstration et de compléter la Banque par des années supplémentaires sur des systèmes sélectionnés. ARMINES aura rassemblé à cette date des données sur 37 systèmes issus de divers programmes d'électrification.

- 9 sites dans le département de l'Aude, en collaboration avec le bureau d'études Aude Energies Renouvelables,
- 7 sites dans le département des Alpes-Maritimes, en collaboration avec Transenergie,
- 21 sites dans les départements d'Outre Mer, en collaboration avec Transenergie.

Des détails sur ces installations sont regroupés en Annexe 3. (taille générateur, batterie - date de relevé des données).

2.1.2 - Analyse de la pertinence des données

Les données recueillies dans le cadre de ces trois programmes d'électrification le sont à travers un composant du système développé par Transenergie, le SUNPAC.

Les grandeurs que l'on utilise pour renseigner la banque de données sont le productible, l'énergie produite par le générateur PV et l'énergie consommée. Ces valeurs sont données sur une base journalière et des moyennes sont réalisées sur le mois.

Les valeurs de la tension système et température ambiante sont également utilisées.

Dès lors que les données sont à terme intégrées dans la banque et utilisées comme référence par les futurs utilisateurs il faut en assurer la cohérence d'une part et la fiabilité d'autre part.

La cohérence est évaluée à l'aide d'un utilitaire du programme *PV base 2.8* qui est à même de détecter des anomalies grossières (rendement > 1, valeurs négatives...).

En ce qui concerne la fiabilité, la tâche est plus ardue puisqu'elle met en œuvre des connaissances d'expert pour analyser si telle ou telle valeur est anormalement faible ou élevée tout en restant dans un intervalle de cohérence.

Dans ce sens les valeurs journalières doivent être analysées de manière croisée sur plusieurs systèmes installés sur des sites proches afin d'écartier des jours suspects et ne pas trop entacher la moyenne mensuelle.

La valeur de l'ensoleillement est nécessaire pour le calcul des rendements de l'installation et notamment du coefficient de performance (performance ratio).

Cette valeur n'étant pas mesurée, on la calcule à partir du productible. Cela nécessite certaines approximations qu'il est impératif de valider de manière expérimentale.

Le type de calcul effectué est présenté en Annexe 4.

2.2 - Analyse comparative des systèmes

2.2.1 - Grandeurs utilisées

Les résultats vont être présentés en terme de productivité.

Y_a : productivité du générateur	$= E_A/P_o$	(kWh/kWc.j)
Y_r : productivité de référence	$= G/G_{ref}$	(kWh/k Wc.j)
Y_f : productivité globale	$= E_{use}/P_o$	(kWh/k Wc.j)

$$E_{use} = \frac{E_A \cdot E_L}{E_{in}} \quad E_{in} = E_A + E_B + E_{FS}$$

avec :

E_A énergie produite par le générateur	(kWh/j)
E_L énergie consommée	(kWh/j)
E_B énergie fournie par l'auxiliaire	(kWh/j)
E_{FS} bilan du stockage	(kWh/j)

en l'absence d'auxiliaire $E_{use} = E_L$

$$\text{en présence d'un auxiliaire } E_{use} = \frac{E_L}{\left(1 + \frac{E_B}{E_A}\right)}$$

F : fraction solaire	$= 1 / (1 + E_B/E_A)$
L_c : perte de captage	$= Y_r - Y_a$ (kWh/kWc.j)
L_s : pertes système	$= Y_a - Y_f$ (kWh/kWc.j)
PR : coefficient de performance	$= Y_f/Y_r$ (%)
μ_a : rendement de captage	$= E_A/G.A$ (%)

$$\mu_t : \text{rendement global} = E_{\text{use}}/G.A \quad (\%)$$

avec : G : ensoleillement dans le plan des modules (kWh/m².j)

A : surface de captage (m²)

$Y_f + L_c + L_s = Y_r$ qui représente l'ensoleillement sur le plan des modules

2.2.2 - Le coefficient de performance PR

Le coefficient de performance a été introduit au niveau européen pour caractériser le fonctionnement des systèmes PV quelles que soient les applications envisagées.

Il caractérise l'utilisation de l'énergie potentielle d'un système PV. L'énergie potentielle étant définie dans les conditions de référence.

Plus sa valeur est élevée, plus le système utilise son potentiel. Dans le cas contraire, il y a une perte de production due soit à un problème technique, soit à un problème d'adéquation entre la consommation et la production, c'est à dire un problème de dimensionnement.

Ce coefficient semble tout à fait adapté à caractériser les performances d'un système qui est à même de valoriser toute sa production. C'est le cas des systèmes raccordés au réseau.

Les systèmes autonomes purement PV (i.e. sans système de production auxiliaire) s'écartent de ce cas de figure, car leur fonctionnement ainsi que les performances correspondantes sont très dépendants du profil de consommation.

Un surdimensionnement conduira à des déconnexions fréquentes, affectant la production du système. Un tel fonctionnement se répercute de manière négative sur la valeur de PR (fig. 3)

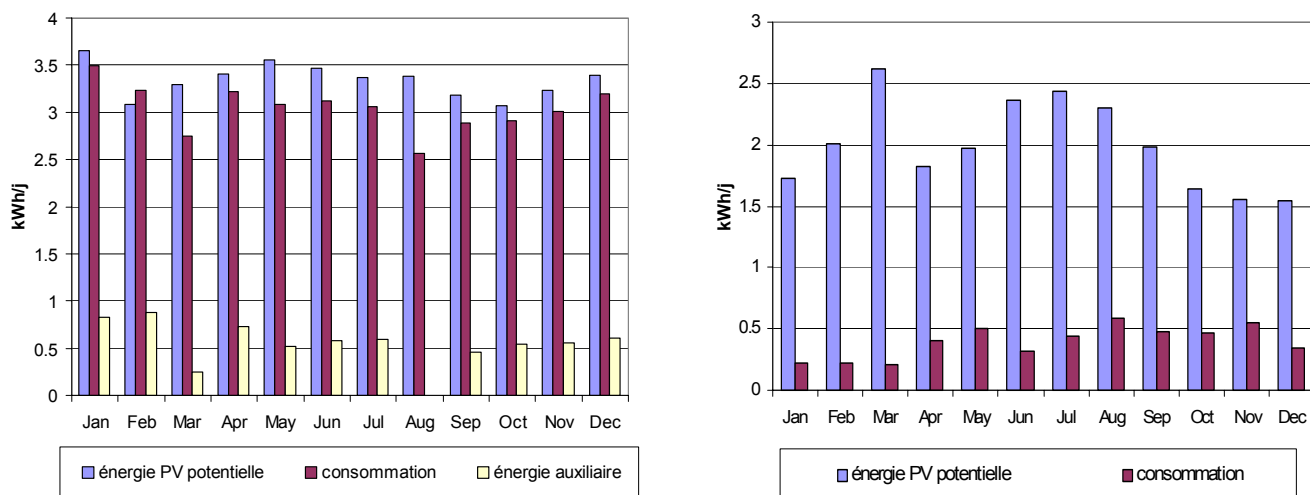


fig. 3 : Productivité et consommation mesurées dans 2 sites différents (PR= 65% et PR = 20%)

Un sous-dimensionnement affectera de fait la qualité de fourniture du système et aura plutôt tendance à maximiser le PR. Les systèmes hybrides sont dans ce cas de figure car ils se caractérisent par une partie solaire sous-dimensionnée et un générateur auxiliaire qui assure l'appoint en cas de pénurie (fig. 3).

Un système de ce type non pourvu d'un générateur auxiliaire peut toutefois atteindre un PR élevé tout en présentant des dysfonctionnements, notamment en périodes de pénurie lorsque la batterie est déchargée.

2.2.3 - La fraction solaire F

Ce coefficient permet d'exprimer le rapport entre l'énergie solaire produite et l'énergie utilisée.

Dans le cas de centrales raccordées au réseau et de systèmes autonomes purement photovoltaïques, ce facteur est égal à 1.

Lorsque le système nécessite l'apport d'une source auxiliaire, comme c'est le cas des systèmes hybrides et des systèmes domestiques raccordés au réseau, ce coefficient prend une valeur inférieure à 1 et s'exprime de la manière suivante :

$$F = 1 / (1 + E_B / E_A)$$

En considérant le fait que l'occurrence d'une période de pénurie peut être assimilée à un dysfonctionnement, si elle n'a pas été souhaitée dans le dimensionnement, un coefficient de satisfaction pourrait se substituer à la fraction solaire qui serait donc inférieure à l'unité.

Cependant ce facteur ne permet pas à lui seul de caractériser les performances d'un système PV car ne prend pas en compte le potentiel du système.

Conjugué au coefficient de performance il offre la possibilité de pénaliser d'une certaine façon le recours à une source auxiliaire et par extension l'apparition de périodes de pénurie.

2.2.4 - Matching Factor MF

Ce facteur est obtenu en faisant le produit du coefficient de performance et de la fraction solaire calculés pour un système donné :

$$MF = F * PR$$

Dans le cas de centrales raccordées au réseau et de systèmes autonomes bien dimensionnés ainsi que surdimensionnés ce facteur est égal au coefficient de performance.

Dans le cas de systèmes autonomes et domestiques raccordés au réseau dont la partie solaire seule est incapable d'assurer les besoins de l'utilisateur, ce facteur se substituera au coefficient de performance.

L'utilisation d'un tel facteur dans le cas de systèmes autonomes purement PV peut permettre de déterminer, à l'analyse d'un grand nombre de systèmes, un intervalle de variation dans lequel un système peut être considéré comme bien dimensionné.

Ce facteur s'applique également au cas des systèmes hybrides. Il sera intéressant de vérifier s'il peut servir de base à une étape de dimensionnement. L'utilisation du groupe auxiliaire aura pour effet de diminuer le Matching Factor à travers la fraction solaire F. Un bon dimensionnement côté solaire pourrait compenser cette diminution par un très bon coefficient de performance PR.

2.2.5 - Coefficient d'utilisation UF

Comme cela a été dit ultérieurement, le coefficient de performance comme le Matching Factor ne peuvent à eux seuls qualifier le bon fonctionnement d'un système autonome. Des performances globales assez faibles peuvent être le résultat d'une mauvaise adéquation de l'offre et de la demande.

Afin de pouvoir extraire de ces systèmes ceux qui peuvent présenter des dysfonctionnements techniques, le coefficient d'utilisation de l'énergie productible (UF) a été introduit. Il est calculé de la manière suivante :

$$UF = \text{énergie fournie par le générateur} / \text{productible}$$

Pour un système ne présentant pas d'anomalie de fonctionnement, ce coefficient est lié de manière linéaire au coefficient de performance (PR). Mieux le système utilise son productible, meilleures sont ses performances.

Tout système qui utilise correctement son productible et présente des performances médiocres peut être considéré comme déficient. La représentation de UF en fonction de PR doit permettre d'isoler de tels cas.

2.2.6 - Exemples

Un exemple d'analyse de performances réalisé sur la base des quatre grandeurs présentées précédemment, est effectué sur les neuf installations du programme Aude Energie, sur une base annuelle. Le descriptif des installations est donné en Annexe 3.

Pour l'exemple on considèrera l'installation Luttermann en 2 cas de figures :

- Lutter-PV : purement PV avec période de pénuries,
- Lutter-AUX : avec système auxiliaire tel qu'installé.

La distinction entre ces deux cas de figure permet de souligner que si l'on traite une installation solaire pure qui présente des périodes de pénurie comme une installation pouvant faire appel à un générateur auxiliaire pour prendre le relais durant ces périodes, les PR et MF sont tout autre, comme présenté en Fig. 3, 4 et 5.

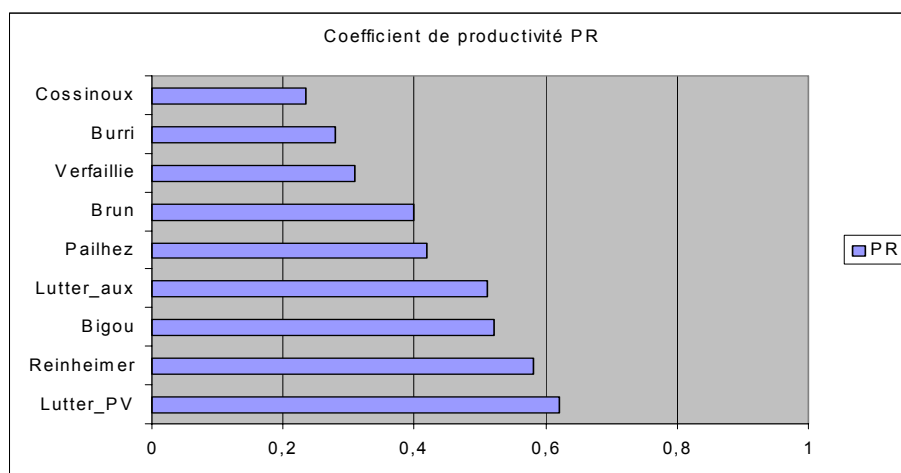


Fig. 3 : Performances des systèmes autonomes - coefficient de performance (PR)

L'introduction du matching factor permet d'établir un classement plus complet au niveau des huit systèmes considérés que s'il était uniquement réalisé à travers PR. Il ne faut cependant considérer ceci que comme un premier pas à affiner sur un plus grand nombre de données et peut être d'un type d'application à un autre.

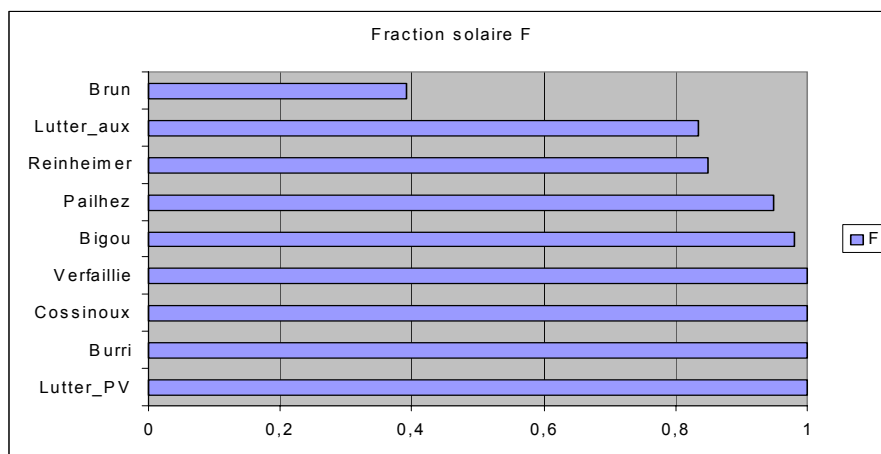


Fig. 4 : systèmes autonomes - fraction solaire

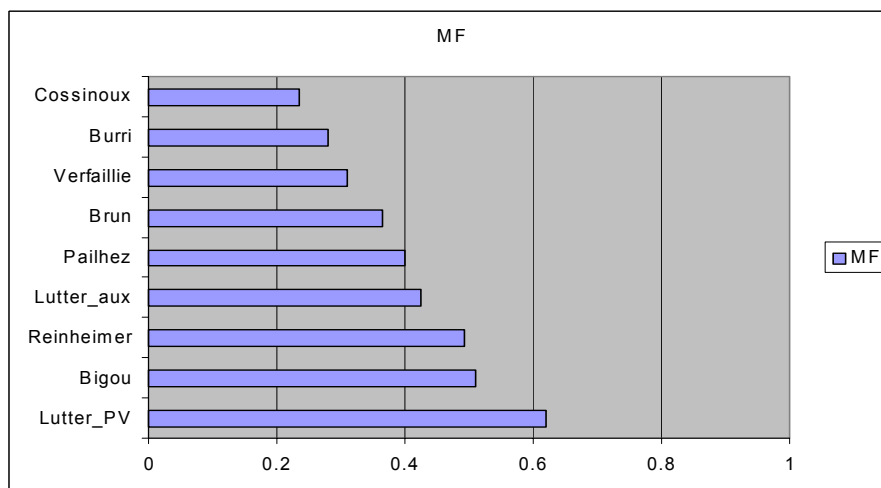


Fig. 5 : performances des systèmes autonomes - Matching Factor (MF)

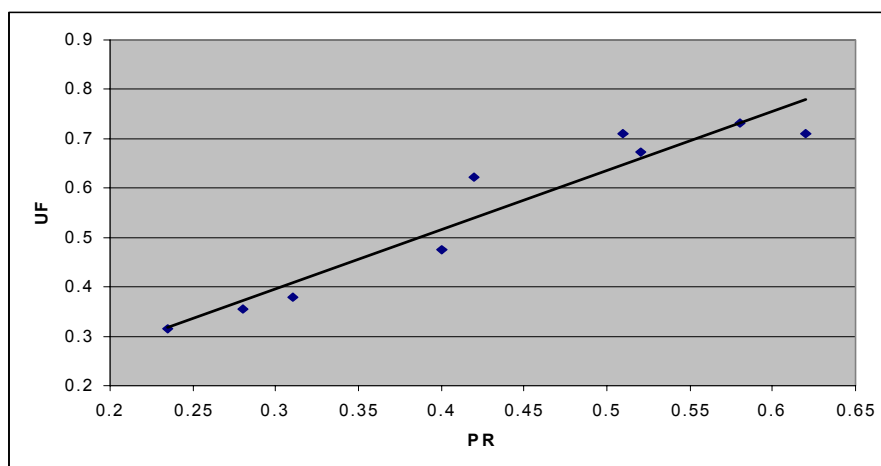


Fig. 6 : relation facteur d'utilisation - coefficient de performance

3 - Analyse comparative et résultats

Armines a concentré ses efforts sur la collecte de données concernant uniquement les sites isolés. De l'ensemble des systèmes traités, 37 systèmes ont été retenus représentant environ 55 jeux de données annuelles. Ces systèmes ont été répartis en deux catégories :

- les systèmes domestiques pour l'électrification rurale
- les systèmes professionnels.

Pour chacune d'entre elles, une analyse de performance a été menée et les résultats obtenus sont présentés dans cette partie de manière synthétique.

En conclusion, on insistera sur les points sur lesquels il faut se concentrer afin de déboucher sur des recommandations étayées, notamment en terme de dimensionnement.

2.3.1 - les systèmes domestiques pour l'électrification rurale

Les résultats présentés ci-dessous concernent 27 systèmes rassemblant eux-mêmes 43 jeux de données annuelles.

La puissance crête de ces installations varie de 450 Wc à 1500 Wc comme le montre la fig 7.

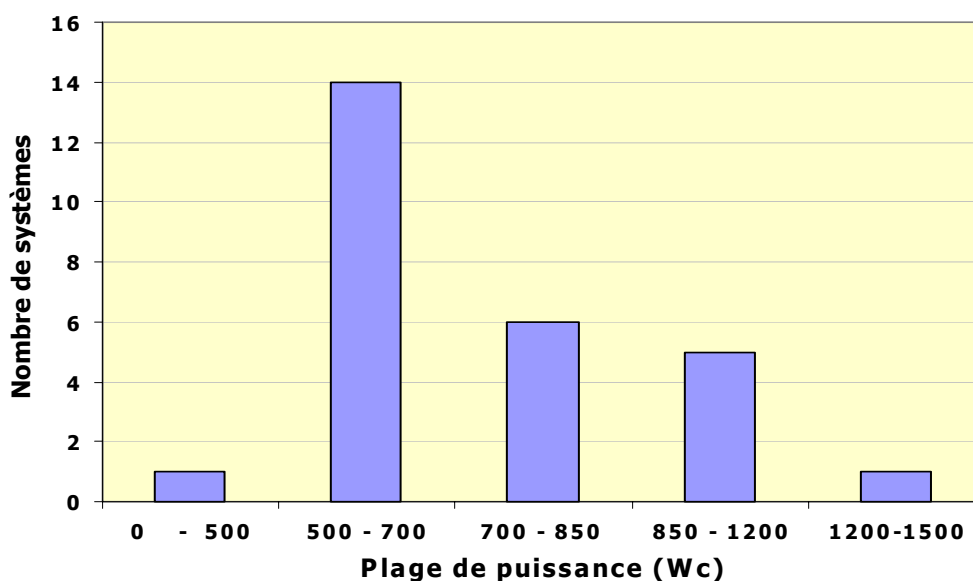


Fig. 7 : plage de puissance présentée par les systèmes sélectionnés

Le coefficient de performance (PR) a été introduit pour caractériser le fonctionnement du système quelque soit l'application considérée. Il permet de quantifier l'utilisation du productible établi dans les conditions de référence.

Plus PR est élevé mieux le système utilise son potentiel. Une valeur faible de PR indique l'existence de pertes de production induites par des problèmes techniques ou de dimensionnement, voire de conception.

Dans le cas de systèmes autonomes, sans générateur auxiliaire, une valeur élevée de PR ne signifie pas obligatoirement que le système fonctionne dans les meilleures conditions. Si le système est sous dimensionné, il présentera de très bonne valeur de PR tout en pouvant être confronté à des périodes de pénurie.

En présence d'un générateur auxiliaire, un PR élevé est synonyme de bon fonctionnement.

De même, un système surdimensionné aura à faire face à de fréquentes déconnexions affectant directement le PR.

Les 27 systèmes considérés possèdent un générateur auxiliaire qui dans la plupart des cas était déjà sur le site avant l'électrification photovoltaïque. Ces systèmes n'ont donc jamais été dimensionné comme des systèmes hybrides. Le générateur n'est là que pour seconder le système PV en cas de déficit d'énergie solaire. Le terme « PV only » mentionné en fig.8 s'applique aux installations qui n'ont pas fait appel à la source auxiliaire.

L'analyse des performances en terme de PR (fig. 8) montre que les systèmes autonomes présentent une large plage de variation de PR qui ne reflète guère le fonctionnement du système d'un point de vue technique (problèmes de connectique, de composants). Comme c'est le cas dans les systèmes raccordés au réseau.

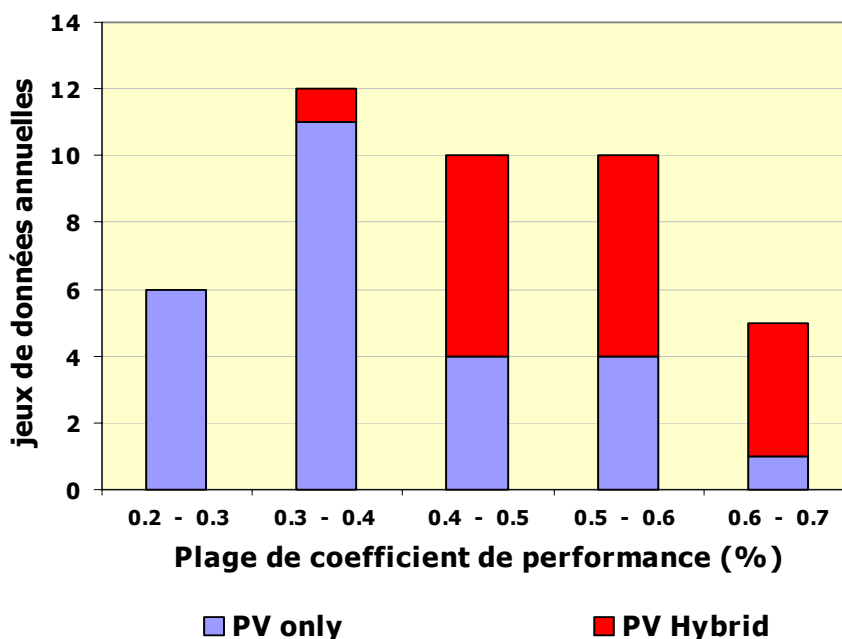


Fig. 8 : Variation annuelle type du coefficient de performance pour des applications domestiques

La valeur de PR est dépendante de la consommation.(fig.3) Si le niveau de consommation n'est pas corrélé au potentiel du générateur, PR peut présenter des valeurs inférieures à 20% sur une base mensuelle. Ceci est du à d'importantes pertes de captage.

Il convient cependant de noter qu'un système PV sans source auxiliaire peut atteindre, s'il est bien dimensionné, un PR annuel de 60% avec des pointes mensuelles supérieures à 70%. Cela confirme la valeur prise par défaut dans les formules classiques de dimensionnement dans lesquelles la puissance crête est calculée comme suit :

$$P = E_L / G.PR$$

Ce calcul est effectué pour le mois le plus défavorable, c'est à dire le mois pour lequel le système présentera ses meilleures performances. La règle de l'art conseille une valeur de PR de l'ordre de 0.55 - 0.6. Les résultats présentés ci-dessus montre que cette valeur par défaut peut être considéré comme une valeur minimale.

Le Matching Factor peut être également utilisé pour illustrer les performances des systèmes autonomes. Il ne touche que les systèmes qui ont fait appel à une source extérieure. Les résultats présentés en fig. 9 donne une meilleure idée des performances des systèmes hybrides.

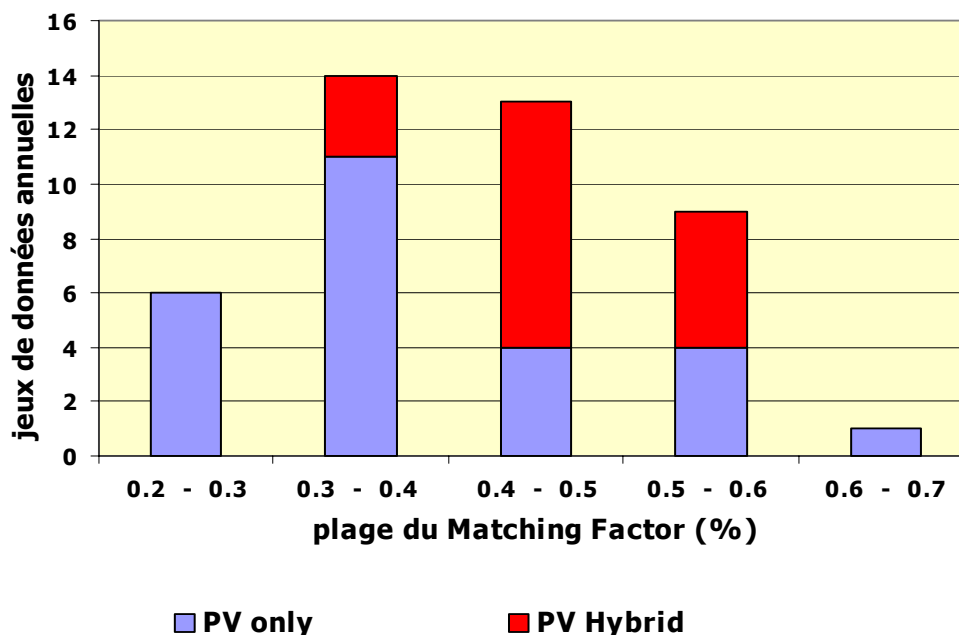


fig. 9 : Variation annuelle type du matching factor pour des applications domestiques

Les faibles valeurs de MF atteintes par certains systèmes mettent en valeur le fait qu'ils n'ont pas été conçus comme un système hybride mais comme une juxtaposition de deux sources indépendantes.

L'optimisation d'un coefficient comme MF faisant intervenir le taux de pénétration du générateur auxiliaire peut être une base de travail dans la voie du dimensionnement de systèmes hybrides.

Un système PV qui ne fonctionne pas de manière correcte présente un PR faible. Comme cela a été démontré dans le cas des systèmes autonomes, la réciproque n'est pas vraie. Afin d'essayer de détecter des systèmes présentant des anomalies de fonctionnement, (mauvaise utilisation du productible), le coefficient d'utilisation de l'énergie productible a été tracé en fig. 10 en fonction de PR.

Ces résultats permettent de confirmer que pour des systèmes sans problèmes techniques, UF et PR sont linéairement liés (cf. §2.2.5). Cette représentation permet de plus d'isoler quelques systèmes qui se démarquent de cette tendance linéaire. Une analyse plus détaillée de leurs caractéristiques de fonctionnement montre des pertes système anormalement élevées.

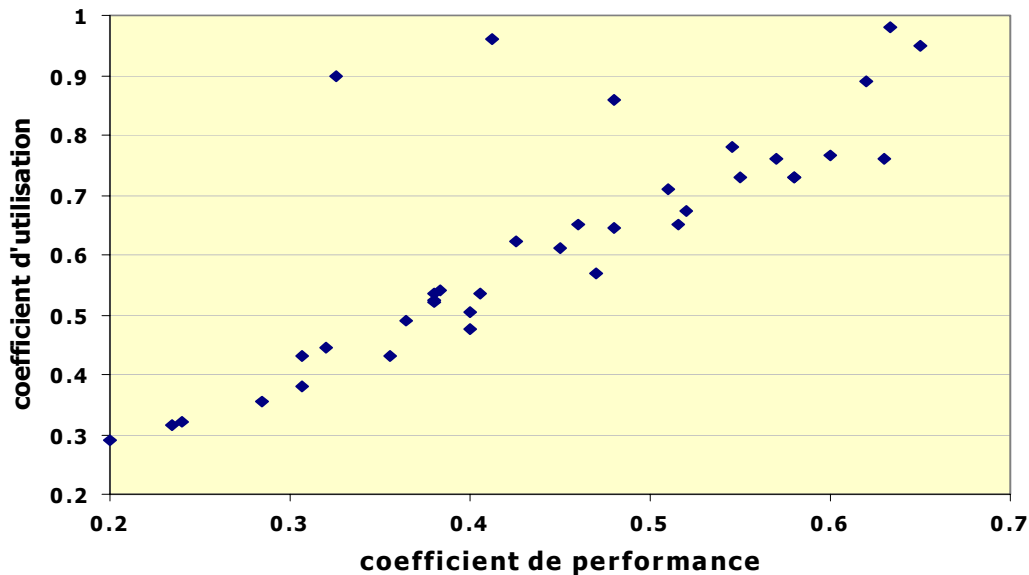


Fig 10 : coefficient d'utilisation fonction du coefficient de performance

Les indices de performances en terme de productivité globale et de pertes de captage et système sont illustrés en fig. 11 pour deux systèmes présentant le même PR, mais un UF très différent (UF= 0.45 et UF = 0.9). Cette figure met en évidence les différences de comportement des deux systèmes et confirme ce que les résultats présentés en fig.10 avaient présagé.

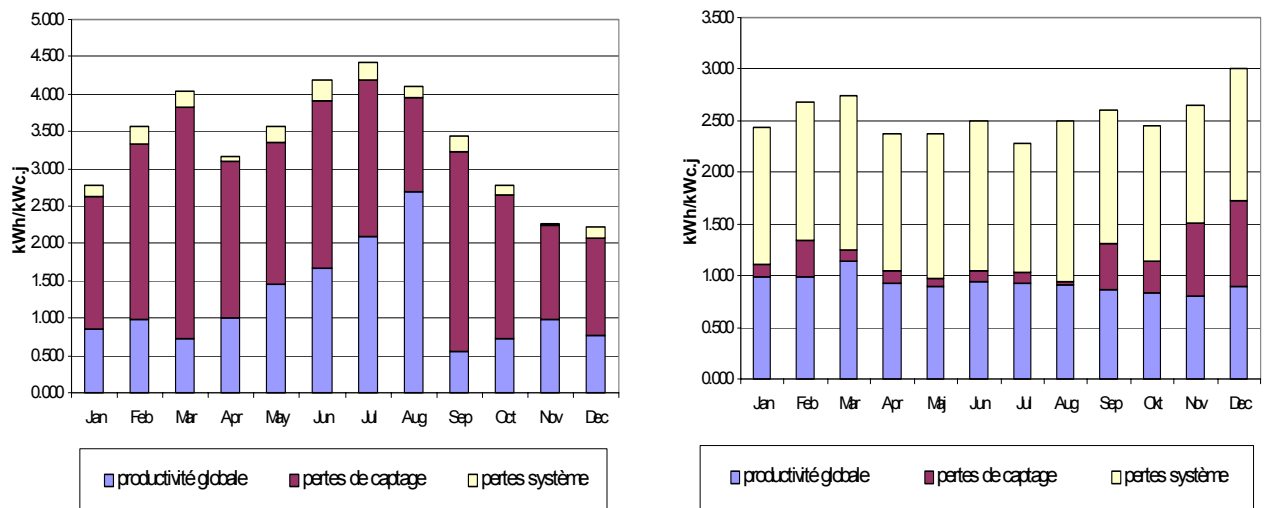


Fig. 11 : indices de performance pour deux systèmes à PR=0.3 (UF = 0.45 – UF =0.9)

2.3.2 – les systèmes professionnels

Les résultats présentés ci-dessous sont issus d'une analyse menée sur 10 systèmes représentant 19 jeux de données annuelles.

La puissance crête des installations considérées varie de 300 Wc à 1600 Wc pour les bergeries et refuges et va jusqu'à 2200 Wc pour les relais de télécommunication.

L'analyse en terme de PR (fig. 12) montre clairement que les systèmes autonomes dimensionnés pour des applications professionnelles présentent des valeurs de PR assez faibles qui ne reflètent en rien le bon fonctionnement du système d'un point de vue technique, mais qui est la conséquence d'un surdimensionnement intentionnel pour cause de sécurité d'approvisionnement.

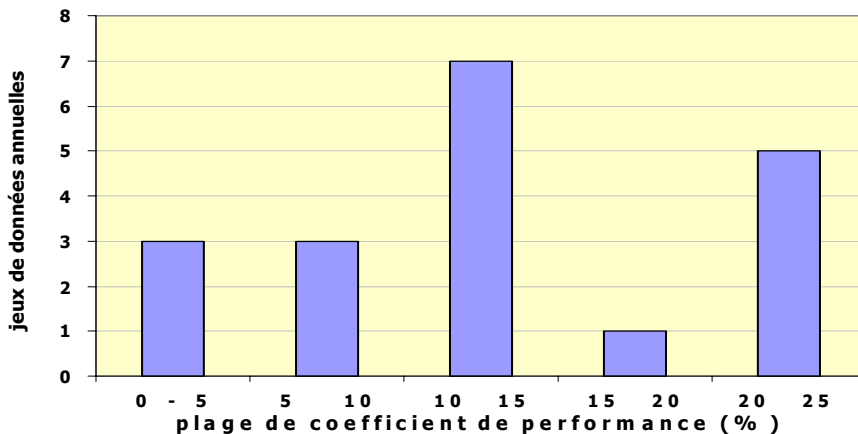


Fig 12 : plage de puissance présentée par les systèmes sélectionnés

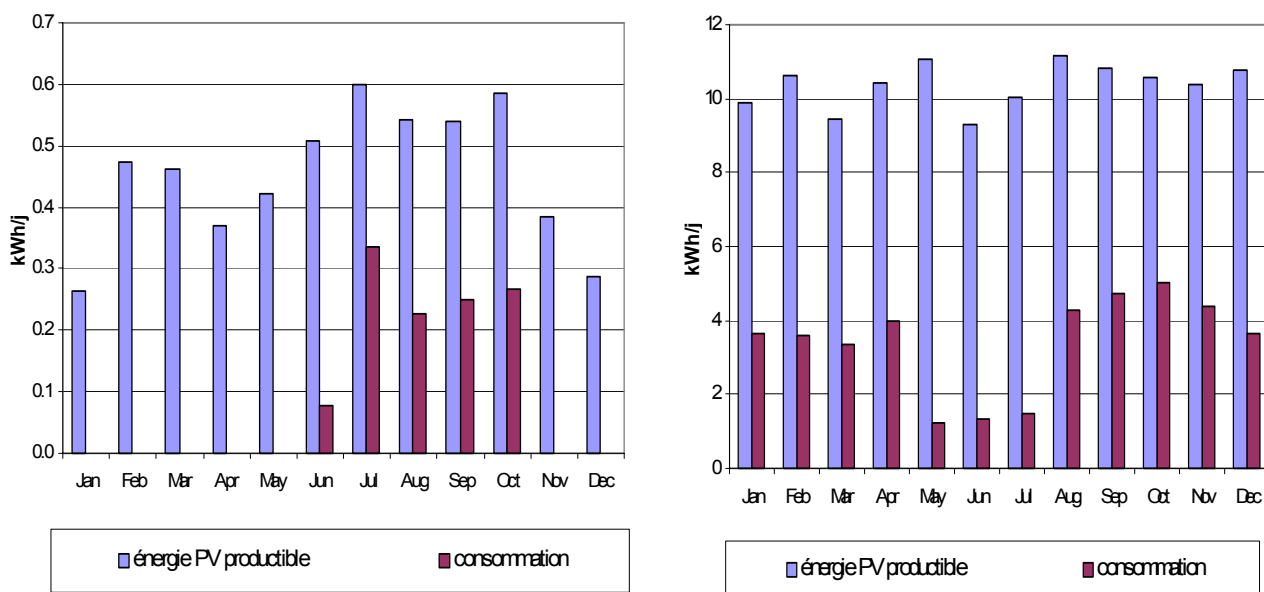


Fig. 13 : productible et consommation dans deux applications différentes
Bergerie (gauche - PR=0.14) - relais de télécommunication (droite - PR=0.28)

La fig. 13 illustre comment de faibles valeurs de PR peuvent être obtenues dans deux applications différentes. Le système de gauche est dimensionné pour quelques mois de l'année. Durant cette période la valeur de PR est de l'ordre de 35 à 40 %. Le système de droite est surdimensionné pour des raisons de sécurité d'approvisionnement.

Dans le cas des systèmes professionnels les spécifications sont différentes d'une application à l'autre rendant la comparaison entre systèmes peu pertinente surtout devant le faible nombre de systèmes considérés jusqu'à présent.

3 - CONCLUSIONS

La première phase du programme de la tâche II a permis :

- de rassembler un grand nombre de systèmes montrant différentes applications du photovoltaïque, qu'il soit utilisé pour des sites raccordés au réseau ou pour des sites isolés,
- de réaliser un Handbook sur les méthodes de mesures, de suivi et d'évaluation du fonctionnement des systèmes,
- de mener une phase d'analyse des performances des systèmes et de définir les bases qui vont permettre d'établir des recommandations sur le dimensionnement, voire la conception de ces systèmes.

A l'heure actuelle, la banque de données de l'AIE contient environ 290 systèmes pour une capacité installées d'environ 11 MWc. La plus grande partie des systèmes se situent dans la gamme 1 à 5 kWc correspondant essentiellement aux toits PV . Les systèmes raccordés au réseau sont largement majoritaires avec 80%. Cela s'explique par la disponibilité de données enregistrées en site.

Le contenu de cette banque de données ainsi que les outils nécessaires au renseignement de la banque et à la visualisation des performances des systèmes qui s'y trouvent sont disponibles sur CD Rom.

En ce qui concerne l'analyse des données issues de mesures sur site, les résultats obtenus sur les systèmes autonomes sont intéressants à plus d'un point :

- Ils ont mis l'accent sur l'importance de l'adéquation production / consommation en terme de performance.
- Ils ont confirmé que le PR ne peut seul statuer sur le comportement du système du point de vue technique.
- Ils ont permis de définir d'autres facteurs qui permettent d'une part d'identifier les systèmes présentant des problèmes techniques et qui seront utiles d'autre part pour établir des recommandations sur le dimensionnement de tels systèmes.

Approfondir l'ensemble de ces points va nécessiter :

- des mesures en site plus nombreuses, plus détaillées et plus fiables. Ceci doit être possible même pour des sites très isolés avec la mise en place quasi systématique de centrales d'acquisition intégrées.
- Plusieurs années de mesures afin de mieux apprécier le comportement de l'utilisateur et d'émettre un jugement sur le fonctionnement d'un système dans le temps.
- D'utiliser des outils de simulation pour évaluer l'influence d'une modification dans la configuration d'un système voire de nouvelles stratégies de gestion afin d'accroître les performances du système.

Les objectifs sont :

- d'identifier, voire de confirmer le choix, des facteurs pertinents permettant une évaluation rapide des performances et si possible une procédure de classement pour les systèmes autonomes.
- D'aboutir à des recommandations, voire des directives sur le dimensionnement des systèmes PV autonomes, hybrides inclus.