



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Canadian Theses Service

Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

NOTICE

The quality of this microform is heavily dependent upon the quality of the original thesis submitted for microfilming. Every effort has been made to ensure the highest quality of reproduction possible.

If pages are missing, contact the university which granted the degree.

Some pages may have indistinct print especially if the original pages were typed with a poor typewriter ribbon or if the university sent us an inferior photocopy.

Reproduction in full or in part of this microform is governed by the Canadian Copyright Act, R.S.C. 1970, c. C-30, and subsequent amendments.

AVIS

La qualité de cette microforme dépend grandement de la qualité de la thèse soumise au microfilmage. Nous avons tout fait pour assurer une qualité supérieure de reproduction.

S'il manque des pages, veuillez communiquer avec l'université qui a conféré le grade.

La qualité d'impression de certaines pages peut laisser à désirer, surtout si les pages originales ont été dactylographiées à l'aide d'un ruban usé ou si l'université nous a fait parvenir une photocopie de qualité inférieure.

La reproduction, même partielle, de cette microforme est soumise à la Loi canadienne sur le droit d'auteur, SRC 1970, c. C-30, et ses amendements subséquents.

Dimensionnement du réservoir dans un système de pompage photovoltaïque

par

François Carrier

Une thèse réalisée sous la direction de
Eric J. Schiller *Ph. D., P. Eng.*

dans le cadre du programme de
Maîtrise en science appliquée - génie civil

Département de génie civil
Université d'Ottawa
Ottawa, Canada
K1N 6N5



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Canadian Theses Service Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-75069-3

Canada



UNIVERSITÉ D'OTTAWA
UNIVERSITY OF OTTAWA

AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier l'équipe entière du Centre d'études et de recherches en énergies renouvelables (CÉRÉR) de leur appui soutenu tout au long de mon séjour au Sénégal.

Je rends hommage à tous mes amis et amies qui ont eu à subir le spectacle quotidien de mes souffrances et nombreux délires.

Ce travail a été rendu possible grâce à une bourse de l'Agence canadienne de développement international (ACDI).

RÉSUMÉ

La taille du réservoir d'eau dans les systèmes de pompage photovoltaïques au fil du soleil est souvent grossièrement estimée dans les méthodes de conception actuelles.

Il en résulte une insatisfaction des usagers lorsque des débordements de réservoir se produisent. Ce gaspillage d'eau fait endurer à la population des privations en ce qui concerne la consommation personnelle. Des pertes de profit peuvent aussi être expérimentées quand les excédents d'eau sont habituellement vendus.

A l'opposé, lorsque le réservoir est sur-dimensionné, les villageois ont à faire face à des coûts de construction trop élevés.

L'analyse du comportement des différentes composantes d'un système de pompage solaire a permis de mettre au point des modèles informatiques qui ont ensuite été validés grâce à des données obtenues à la suite de campagnes de mesures sur le terrain.

Le logiciel CITERNE a été développé dans le but d'offrir une grande flexibilité pour la simulation de différents types d'équipement dans divers milieux d'opération. La qualité des résultats fournis par le logiciel dépend étroitement de la précision des paramètres décrivant l'équipement et des données météorologiques.

Le logiciel permet à la fois de prédire le fonctionnement de nouvelles installations et d'assurer un suivi dynamique des systèmes déjà en place.

SUMMARY

The size of the tank in solar water pumping systems is often roughly estimated in conventional design procedures. Consequently, problems such as the heavy financial burden of an over-sized tank or, on the contrary, a waste of water resources due to overtop spillage in the case of a too small cistern are, unfortunately, quite common. These problems lead to discontentment among users when they have to deal with periods of privation and/or economic losses.

The analysis of the behaviour of the different components of a solar system made possible the realization of computerized models, which have been later validated with data gathered in the field.

In order to simulate a wide range of systems, the software developed in this thesis offers the required flexibility to input the parameters of the equipment to study as well as the climatic data for the expected operational environment.

The software permits the prediction of performance of new systems and the diagnosis of existing ones.

TABLE DES MATIERES

Préambule	1
CHAPITRE 1 - Introduction	4
CHAPITRE 2 - Revue de la littérature	7
<u>2.1 Présentation d'un système de pompage PV</u>	<u>7</u>
<u>2.2 Description des composantes et leur fonctionnement</u>	<u>9</u>
2.2.1 Générateur photovoltaïque	9
2.2.1.1 Pratique courante	9
2.2.1.2 Principes fondamentaux	14
2.2.1.3 Caractéristiques et taux de performance	17
2.2.1.4 Modèles pour les courbes caractéristiques I-V	19
2.2.1.4.1 Approche d'Appelbaum et Bany	19
2.2.1.4.2 Approche de Weider	24
2.2.1.4.3 Approche de Braunstein et al.	25
2.2.1.4.4 Approche de Singer et al.	26
2.2.1.4.5 Approche de Rauschenbach	28
2.2.2 Onduleur	30
2.2.3 Groupe moto-pompe	32
2.2.3.1 Moteurs de surface	33
2.2.3.2 Moteurs immergés	33
2.2.3.3 Conception et taux de rendement	35
2.2.3.4 Modèles théoriques	35
2.2.3.4.1 Approche conventionnelle	35
2.2.3.4.2 Approche de Norman et al.	37
2.2.4 Système d'adduction	39
2.2.4.1 Réservoir	40
2.2.4.2 Connexions	44
2.2.4.3 Réseau de distribution	46

CHAPITRE 3 - Présentation du logiciel CITERNE	48
<u>3.1 Position du problème</u>	48
<u>3.2 Présentation de l'analyse de dimensionnement</u>	49
<u>3.3 Algorithme informatique</u>	53
CHAPITRE 4 - Modélisation de systèmes de pompage PV	55
<u>4.1 Hypothèses de travail</u>	55
4.1.1 Courbes caractéristiques I-V	55
4.1.2 Distribution statistique	57
4.1.3 Groupe moto-pompe	57
4.1.4 Réseau de distribution	59
4.1.5 Dimensionnement du réservoir	59
4.1.6 Comportement des utilisatrices	60
4.1.7 Aspect économique	60
<u>4.2 Modèles utilisés</u>	61
4.2.1 Modèle du Jet Propulsion Laboratory	61
4.2.2 Distribution normale	64
4.2.3 Simulation du GMP	66
4.2.4 Méthode de Marquardt	67
4.2.5 Méthode volumétrique	69

CHAPITRE 5 - Validation du logiciel CITERNE	70
<u>5.1 Méthodologie expérimentale</u>	70
5.1.1 Banc d'essais de pompage	70
5.1.2 Réalisation des essais	75
5.1.3 Études sur site	77
<u>5.2 Équations empiriques</u>	77
<u>5.3 Résultats et comparaisons</u>	78
5.3.1 Collecte de données au Sénégal	79
5.3.2 Paramètres du GMP du banc d'essais	82
5.3.3 Paramètres du générateur du banc d'essais	82
5.3.4 Analyse économique	83
5.3.5 Résultats du logiciel CITERNE	85
5.3.5.1 Sous-routine STAT	85
5.3.5.2 Sous-routine SCENARIO	87
5.3.5.3 Sous-routine SYSTEME	88
5.3.5.4 Sous-routine RESERVE	89
 CHAPITRE 6 - Mise en application du logiciel	93
<u>6.1 Diagnostic d'installations existantes</u>	93
<u>6.2 Prédiction de la taille du réservoir</u>	95
 CHAPITRE 7 - Conclusions et recommandations	100
 Bibliographie	103
 Annexe I - Exemple de conception	
 Annexe II - Listing informatique	
 Annexe III - Organigramme décisionnel	

LISTE DES FIGURES

Figure P.1 - Zones d'utilisation des moyens de pompage	3
Figure 2.1 - Système solaire pour l'approvisionnement en eau d'un village	8
Figure 2.2 - Connexion de modules en série et en parallèle	11
Figure 2.3 - Supports de modules photovoltaïques	14
Figure 2.4 - Coupe transversale d'une pile solaire	15
Figure 2.5 - Variations de la courbe I-V	18
Figure 2.6 - Courbes I-V et P-V superposées	20
Figure 2.7 - Comparaison de la performance de deux onduleurs	32
Figure 2.8 - Courbe caractéristique H-Q	34
Figure 2.9 - Dimensions d'un réservoir	41
Figure 2.10 - Différentes conduites reliées au réservoir	42
Figure 2.11 - Types de connection publique	45
Figure 3.1 - Algorithme du logiciel CITERNE	54
Figure 4.1 - Circuit électrique équivalent	61
Figure 5.1 - Caractéristiques de fonctionnement à 2900 tr/min	72
Figure 5.2 - Schéma du banc d'essais de pompage du CÉRÉR	74
Figure 5.3 et 5.4 - Présentation des données pour une journée typique	79-80
Figure 5.5 - Caractéristiques I-V pour différents niveau d'ensoleillement	81
Figure 5.6 - Comparaison entre la consommation villageoise et le débit typique	81
Figure 5.7 - Comparaison entre les débits	83
Figure 5.8 - Cinq scénarios d'ensoleillement et la moyenne	88
Figure 5.9 - Courbe coût-risque	92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Disponibilité de l'ensoleillement	51
Tableau 3.2 - Validation entre les puissances réelle et simulée	52
Tableau 4.1 - Méthode analytique d'estimation de la taille d'un réservoir	69
Tableau 5.1 - Fichiers de données ASCII obtenus au CÉRÉR	76
Tableau 5.2 - Paramètres du GMP du CÉRÉR	82
Tableau 5.3 - Paramètres du générateur du CÉRÉR	83
Tableau 5.4 - Moyenne et écart-type des données climatologiques	86
Tableau 5.5 - Résultats pour un scénario et la moyenne de l'ensoleillement	90
Tableau 5.6 - Débit quotidien et volume requis	91
Tableau 6.1 - Données de rayonnement	97
Tableau 6.2 - Processus décisionnel pour la conception	98

Préambule

Les systèmes photovoltaïques ont au cours des dix dernières années évolué sous plusieurs aspects. Grâce à l'expérience au Sahel et à la recherche destinée à améliorer les taux de conversion des cellules photovoltaïques (PV), les services rendus par ces systèmes ne se limitent pas au seul pompage mais aussi à la pré-électrification rurale en général, c'est-à-dire le chauffage de l'eau, les communications, l'éclairage et la réfrigération. Ces services couvrent des puissances s'échelonnant d'une dizaine de W_c (Watts crêtes) à plusieurs kW_c .

Les principales composantes des systèmes de pompage PV, le générateur et le groupe moto-pompe (GMP), ont été grandement améliorés. Les cellules au silicium monocristallin, utilisées dans les générateurs PV plus anciens, offrent de très bons taux de conversion (15 à 18%) - ratio entre l'énergie solaire reçue et l'énergie électrique produite - mais à un coût élevé. Encore en 1984, ce type de cellule représentait 75% de la production. Les cellules au silicium polycristallin offrent des rendements moindres, près de 12%, mais sont moins coûteuses car les procédés de fabrication emploient un silicium de départ moins pur. Depuis 1988, des procédés utilisent avec succès les propriétés photovoltaïques du silicium amorphe et nécessitent beaucoup moins de matériel lors de la fabrication. Ces cellules offrent des rendements de l'ordre de 5%. Aujourd'hui, la technologie des photopiles au silicium polycristallin est la plus utilisée pour les applications en pompage.

L'expérience dans certains pays africains avec des groupes moto-pompe composés d'un arbre de transmission couplant un moteur à la surface et une pompe immergée s'est avérée un échec, surtout dans les forages profonds, où il est difficile d'obtenir un forage parfaitement rectiligne. C'est à partir de 1983 qu'on retrouve des systèmes qui couplent un moteur à courant alternatif à une pompe centrifuge multicellulaire, le tout immergé. Ces GMP, qui requièrent un onduleur, offrent une

excellente fiabilité et sont couramment employés dans les systèmes de pompage sur forage. L'entretien du GMP est facilité si la conduite de refoulement est un tuyau flexible plutôt que plusieurs sections rigides de quelques mètres.

Dans le cas du pompage de surface, l'évolution a été moins nette. En 1983, on commence à mettre les GMP (la plupart du temps à courant continu) à la verticale et sur flotteurs pour éviter les problèmes d'amorçage. Depuis 1988, des essais sont en cours au Mali pour utiliser des GMP de forage à courant alternatif sur fleuve, ce qui simplifie la maintenance et offre un meilleur rendement global au long de l'année (la solution à courant alternatif est moins sensible aux variations de hauteur de relevage et d'ensoleillement).

Lorsque l'on compare les systèmes de pompage PV au fil du soleil, c'est-à-dire sans batteries, avec d'autres systèmes de pompage utilisant des sources d'énergie dites conventionnelles, le photovoltaïque se situe dans un créneau d'utilisation qui s'intercale entre le pompage employant la motricité humaine (débit de 1 à 5 m³/j) et celui qui emploie le diesel (débit de plus de 200 m³/j), dans des conditions d'opération similaires. La figure suivante illustre bien ces zones d'application.

On voit donc que le photovoltaïque peut engendrer ses propres applications et marchés grâce à ses caractéristiques particulières et originales: la simplicité, la modularité, la fiabilité, l'autonomie et l'absence de pollution.

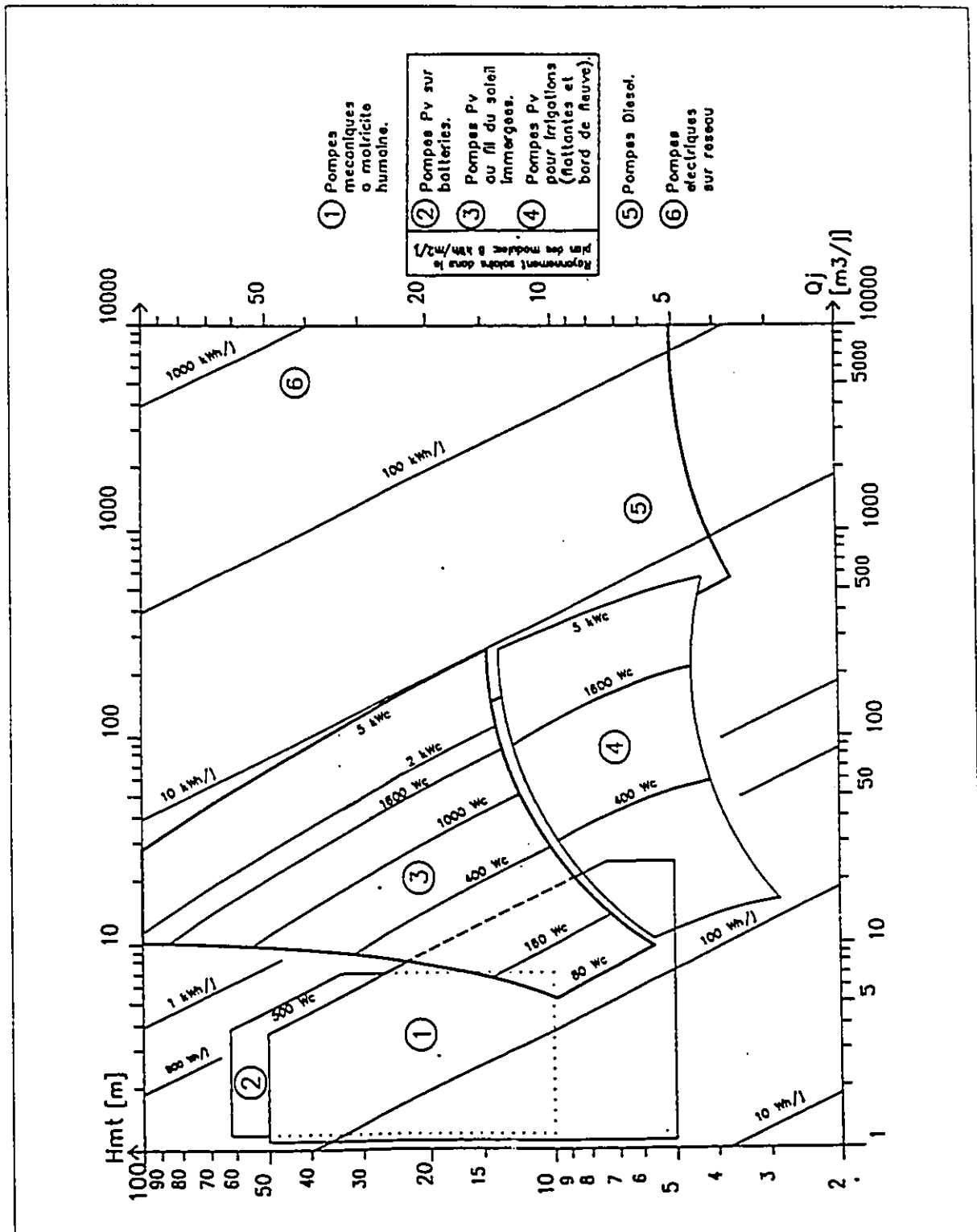


Figure P.1 - Zones d'utilisation des moyens de pompage [1]

1

Introduction

Les systèmes de pompage photovoltaïque ont connu au cours de la dernière décennie un développement rapide, principalement en ce qui touche les générateurs et les groupes moto-pompe.

Cependant, en ce qui concerne l'aspect génie civil (réservoir d'eau et système de distribution), l'effort est beaucoup moins appuyé. Sachant que cet aspect représente très souvent plus de 25% du capital initial à investir, et qu'on trouve encore des réservoirs sur-dimensionnés ou, à l'inverse, qui débordent, chercher à optimiser la taille de ces derniers est un exercice qui s'avère nécessaire.

Il reste encore un grand nombre d'incertitudes au niveau du dimensionnement, de la gestion et du fonctionnement réel de ces systèmes. Pour éclaircir ces zones troubles, on peut mettre en oeuvre une longue et coûteuse opération d'expérimentations en milieu réel d'opération. Cette voie ne permettra pas nécessairement de généraliser les résultats obtenus. La simulation informatique permet l'application universelle de modèles (scientifiques et économiques), donc de traiter de nombreux cas en variant certains paramètres. Le comportement aléatoire de l'ensoleillement pourra aussi être étudié. Une procédure de validation avec seulement quelques paramètres facilement mesurables permettra d'accréditer les résultats théoriques obtenus.

Le but de cette thèse est d'élaborer une méthode d'analyse pour déterminer la taille du réservoir d'eau que l'on retrouve dans un système de pompage photovoltaïque. Le logiciel développé dans ce travail permettra la prédiction du fonctionnement lors de l'exercice de conception de nouveaux systèmes de même que le diagnostic d'installations déjà existantes.

On pourra avec les résultats du logiciel améliorer les installations et les rendre plus économiques de même que, le cas échéant, corriger simplement la gestion de l'eau que pratiquent les villageois.

Il est à noter dès le départ que notre propos n'est pas d'offrir une méthode radicalement nouvelle de conception pour les générateurs et les groupes moto-pompe. Les méthodes de conception pour ces deux composantes existent déjà et, dans la plupart des cas, donnent entière satisfaction. Par contre, une fois ces deux composantes définies, le logiciel permet de poursuivre l'exercice de conception plus loin en optimisant la taille du réservoir nécessaire à l'installation. Une fois la communauté villageoise décidée quant aux investissements qu'elle est prête à faire pour le réservoir, le logiciel suggère ensuite des corrections à apporter à la taille du générateur et du groupe moto-pompe du système. Les paramètres économiques sont les principaux résultats du logiciel et ont pour but d'offrir au concepteur une méthodologie sur laquelle baser ses décisions.

La thèse est structurée de la façon suivante:

La littérature disponible sur le sujet est sommairement présentée au chapitre 2. Ce qui nous amènera à décrire les diverses composantes d'un système de pompage PV ainsi que leurs comportements. L'emphase sera mise sur les pratiques courantes de construction, les équipements utilisés ainsi que les considérations reliées à l'opération et la maintenance.

La problématique et l'analyse que nous proposons pour le dimensionnement du réservoir sont élaborées au chapitre 3. L'algorithme pour parvenir aux résultats recherchés est mis au point et montre les interactions entre les différentes routines.

Nous introduirons ensuite les hypothèses de travail ainsi que les modèles mathématiques qui seront utilisés lors de l'élaboration du logiciel de simulation (chapitre 4).

Une cueillette de données horaires ayant eu lieu au Centre d'études et de recherches sur les énergies renouvelables (CÉRÉR) de Dakar, au Sénégal, permettra de valider les résultats obtenus avec les modèles (chapitre 5).

Enfin, deux types d'application du logiciel seront développés au chapitre 6, le dimensionnement du réservoir dans les nouveaux systèmes et le diagnostic pour les installations déjà existantes.

En conclusion, nous ferons un bref rappel des principaux résultats obtenus dans ce travail et nous soulignerons des points qui mériteraient d'être plus étudiés.

2

Revue de la littérature

Cette revue de la littérature a pour but de présenter les systèmes de pompage photovoltaïques. En plus de mettre en évidence les pratiques courantes de conception dans le domaine, les modèles théoriques qui décrivent le fonctionnement des différentes composantes sont aussi présentés.

2.1 Présentation d'un système de pompage PV

Les pompes photovoltaïques sont utilisées principalement dans deux types d'application: l'approvisionnement en eau villageois (250 à 2000 habitants) et l'irrigation de petits périmètres (un deux hectares). La majorité des systèmes installés jusqu'à maintenant tombent dans la première catégorie, quoiqu'actuellement, une nette tendance est maintenant perceptible vers l'implantation de systèmes appartenant à la seconde catégorie [2].

Une installation typique est schématisée à la figure 2.1. Un arrangement similaire peut être accompli pour un système d'irrigation, qui pourrait comprendre plusieurs bassins de reprise. Ces derniers sont des réservoirs de petits volumes (2 à 4 m³) situés près des champs et qui permettent l'application de l'eau (par gravité ou manuellement) au moment voulu.

Certains systèmes de pompage PV fonctionnent avantageusement avec batteries lorsque le débit journalier est faible (moins de 10 m³/j) et que la demande en eau est importante à des heures où l'ensoleillement ne permet pas le fonctionnement de la pompe. Cette solution offre un découplage temporel du pompage; ceci peut être utile dans les cas où un stockage de l'eau s'avère impossible

ou trop onéreux. En dehors de ces cas, et compte tenu des problèmes qui peuvent se poser pour la maintenance des batteries et leur remplacement, l'expérience démontre que la solution au fil du soleil avec stockage de l'eau est préférable [5].

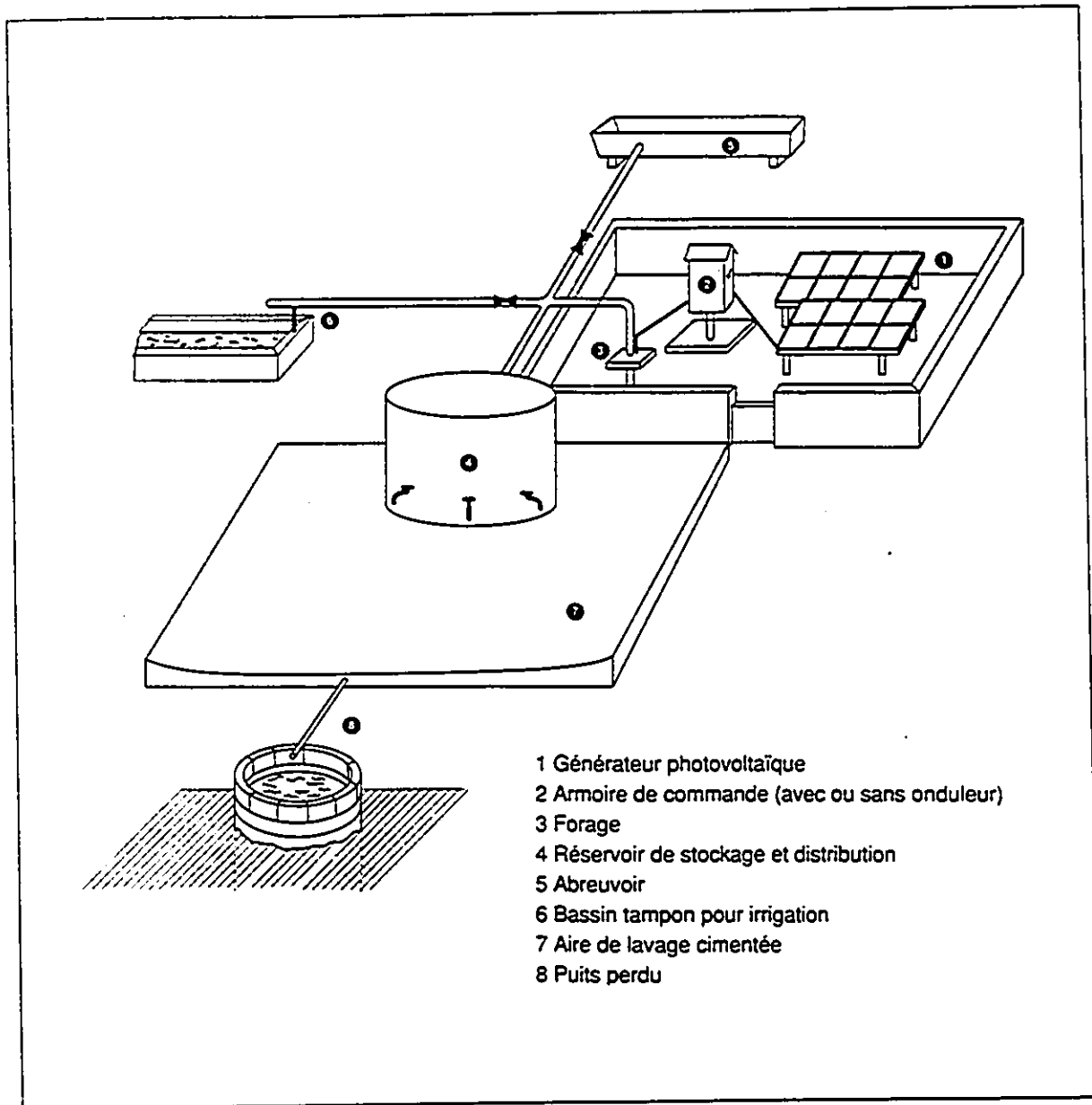


Figure 2.1 - Système solaire pour l'approvisionnement en eau d'un village [2]

2.2 Description des composantes et leur fonctionnement

Dans cette section nous étudierons séparément chacune des composantes d'un système de pompage au fil du soleil. Chaque composante sera d'abord décrite de façon générale pour pouvoir ensuite en donner une analyse plus détaillée de leur fonctionnement.

2.2.1 Générateur photovoltaïque

2.2.1.1 Pratique courante

Les piles solaires peuvent être fabriquées avec différents matériaux. Elles sont aussi connectées ensemble de différentes façons.

Les cellules au silicium (Si) monocristallin ont un taux de conversion de près de 15%, grâce à des techniques de production sophistiquées: le procédé Czochralski et la méthode de la zone-flottante.

Le taux de rendement des piles au silicium polycristallin est plus bas (autour de 12%) car le procédé employé laisse plus d'impuretés, limitant ainsi le flot des électrons [4]. Elles emploient aussi moins de matériel de base. Enfin, on a remarqué que la performance de ces piles diminuait avec le temps [19].

L'efficacité des photopiles au silicium amorphe est de 4 à 6%. Elles sont moins dispendieuses car elles nécessitent beaucoup moins de matériel lors du processus de fabrication. La structure atomique est beaucoup moins bien ordonnée que dans les deux types de cellule décrits plus haut. Ces piles se retrouvent dans des applications à très petite demande énergétique (les calculatrices et les montres par exemple) [20,21].

Les cellules à l'arséniure de gallium (GaAs) atteignent des taux de conversion supérieurs à 22% et résistent très bien à de hautes températures. D'une structure atomique similaire au Si, le GaAs absorbe cependant la lumière beaucoup plus vite. Les techniques de fabrication sont très différentes et plus onéreuses. Ses attributs propres en font des photopiles aptes à être utilisées avec les appareils de réflexion (concentrateur) qui augmentent la lumière incidente sur les piles [21].

Aujourd'hui, la technologie des photopiles au silicium polycristallin est la plus utilisée pour les applications de pompage. D'un taux de rendement moindre, elles sont cependant très fiables et surtout économiques [22,23].

Pour connecter les cellules ensemble, les protéger de l'environnement et faciliter le montage sur site, les cellules sont encapsulées. Les encapsulations avec la face avant en verre sont reconnues comme les plus sûres. Les solutions retenues pour la face arrière sont le verre et le Tedlar, avec une préférence pour le verre, bien que l'encapsulation bi-verre fait des modules plus lourds. La guirlande des cellules est noyée dans un matériau organique transparent et relativement stable. La structure métallique auto-portante est en général de l'aluminium anodisé et des trous de fixation sont prévus en usine, permettant un montage rapide [3].

Pour produire la puissance recherchée, plusieurs modules doivent être associés en série et en parallèle. Ce qu'on appelle un champ ou une aire PV est ainsi constitué. Ainsi, par exemple, si le champ charge une batterie d'accumulateurs de 48 V, on montera en série 4 modules standard de 12 V. Le nombre de modules montés en parallèle dépend de la puissance requise. Par exemple, on utilisera 5 modules de 10 W_c montés en parallèle pour répondre à une charge de 50 W_c.

Il y a deux façons d'effectuer le montage requis en série ou en parallèle: on peut connecter en parallèle plusieurs chaînes dont les éléments sont montés en série ou inversement, connecter en série plusieurs groupes de modules parallèles. La figure 2.2 montre ces deux types de connexion.

Dans un champ comportant des chaînes de modules montés en série, la présence d'un seul module ombragé actionnera la diode de dérivation qui fera passer le courant provenant des autres modules connectés en série. Le retrait d'un module du circuit actif fera baisser d'autant plus la tension de sortie de la chaîne. Cela déclenchera à son tour la diode anti-retour, qui coupera effectivement la chaîne entière du reste du champ et diminuera la puissance de sortie de celui-ci. La sortie nette du champ se trouvera diminuée proportionnellement au nombre de chaîne que comporte celui-ci.

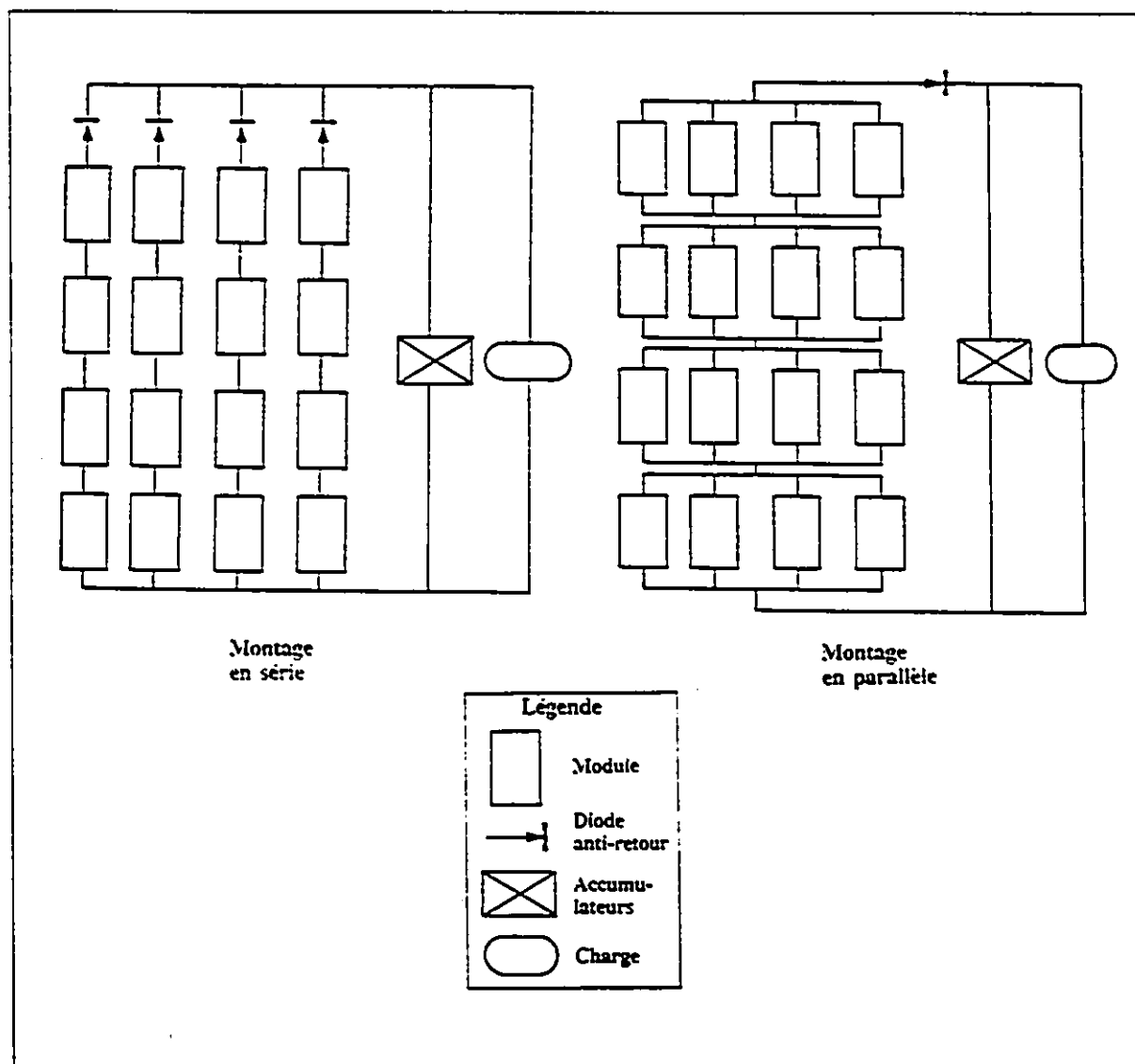


Figure 2.2 - Connexion de modules en série et en parallèle [4]

Lorsque le champ est constitué de groupes parallèles, la présence d'un module ombragé actionne la diode de dérivation assortie à ce groupe. La diode fait passer le courant provenant des autres groupes, en contournant le groupe touché et le mettant effectivement hors circuit. Il s'ensuit que la sortie du champ est diminuée proportionnellement à la contribution normale du groupe retiré.

Comme la plupart des charges exige une tension minimale (charge d'accumulateurs et la majorité des circuits électroniques), il est souhaitable de maintenir la tension nominale de sortie du champ, et il est donc beaucoup plus courant d'employer des champs constitués de chaînes de modules en série. Par contre, lorsque la charge exige un courant constant (dans le cas d'un moteur électrique exigeant un couple constant pour entraîner une pompe volumétrique, par exemple), il peut être préférable d'employer un champ composé de groupes parallèles montés en série [4].

Un système hybride est un système ayant plus d'une source d'énergie. Dans le cas du pompage PV, assez souvent les modules solaires sont accompagnés de batteries, générateur éolien et/ou d'un moteur (diésel ou gasoline) pour permettre le pompage hors des heures d'ensoleillement. Ces systèmes d'énergie alternative évitent aussi les interruptions de service lors de la maintenance, de bris ou d'accident [4]. Un site nouvellement doté d'un système solaire peut donc "recycler" la source d'énergie employée dans le passé. Cependant, ces systèmes auxiliaires sont vraiment utiles pour de grosses applications de pompage et/ou lorsque la demande énergétique est cruciale.

Pour les systèmes de pompage, une maintenance préventive diminue le taux d'arrêt du système. Une source de pièces de rechange à proximité du site permet des réparations rapides par une équipe spécialisée [22]. Donc, à moins que déjà disponible, une source alternative d'énergie n'est pas un pré-requis au bon fonctionnement des systèmes solaires qui nous intéressent.

Les systèmes de repérage du soleil sont des appareils mécaniques qui permettent aux aires PV de suivre la course apparente du soleil selon un ou deux axes. En théorie, ces systèmes augmentent les

rendements des champs PV. La position du soleil dans la voûte céleste peut être déterminée pour une heure et un lieu précis en terme de hauteur angulaire et d'azimut [24].

Cependant, pour les applications de pompage, ces systèmes se sont avérés délicats, complexes à opérer et trop onéreux pour l'augmentation de rendement qu'ils procuraient. Puisque l'importance des projets de pompage est petite, un simple mécanisme permettant un ajustement manuel selon un axe est suffisant.

Différents types de matériaux sont utilisés comme structure portante des panneaux solaires. L'aluminium est facile à travailler, léger, solide et il résiste bien à la corrosion. Il ne peut cependant pas être soudé, ce qui nécessite parfois de coûteuses connections. De plus, ce matériau est parfois difficile à se procurer dans les pays en voie de développement. L'acier inoxydable résiste très bien à la rouille mais il est dispendieux et difficile à utiliser. Le bois est le matériau le plus facile à se procurer, sauf peut-être en régions désertiques. Il n'est pas cher mais doit cependant être traité pour résister à l'humidité.

Les bases doivent être construites pour satisfaire les lignes directrices suivantes [4]:

- i) la structure doit soutenir le poids des panneaux solaires et résister à des vents de 200 km/h;
- ii) la base doit être stable;
- iii) la circulation d'air sous les panneaux est indispensable pour éviter les surchauffes qui entraînent des baisses de performance du générateur;
- iv) si des matériaux conducteurs sont employés, une mise-à-terre doit être installée;
- v) la base doit bien s'harmoniser avec son environnement et être choisie en consultation avec la population;
- vi) la structure doit pouvoir résister à tout acte de vandalisme ou usage non-autorisé. Une clôture entourant le site est à prévoir, des cas de pillage et de vol ont malheureusement eu lieu dans le passé;
- vii) la base doit avoir une durée de vie d'au moins 20 ans et nécessiter un minimum de maintenance;
- viii) la conception de la base doit respecter ces critères tout en étant économique.

La figure 2.3 nous montre un exemple de support pour modules photovoltaïques. La pratique habituelle, pour les systèmes où les panneaux sont complètement fixes, veut que ces derniers soient à un angle d'inclinaison égal à la latitude du site, à concurrence d'un angle minimum de 10°, pour permettre l'écoulement des eaux de pluies.

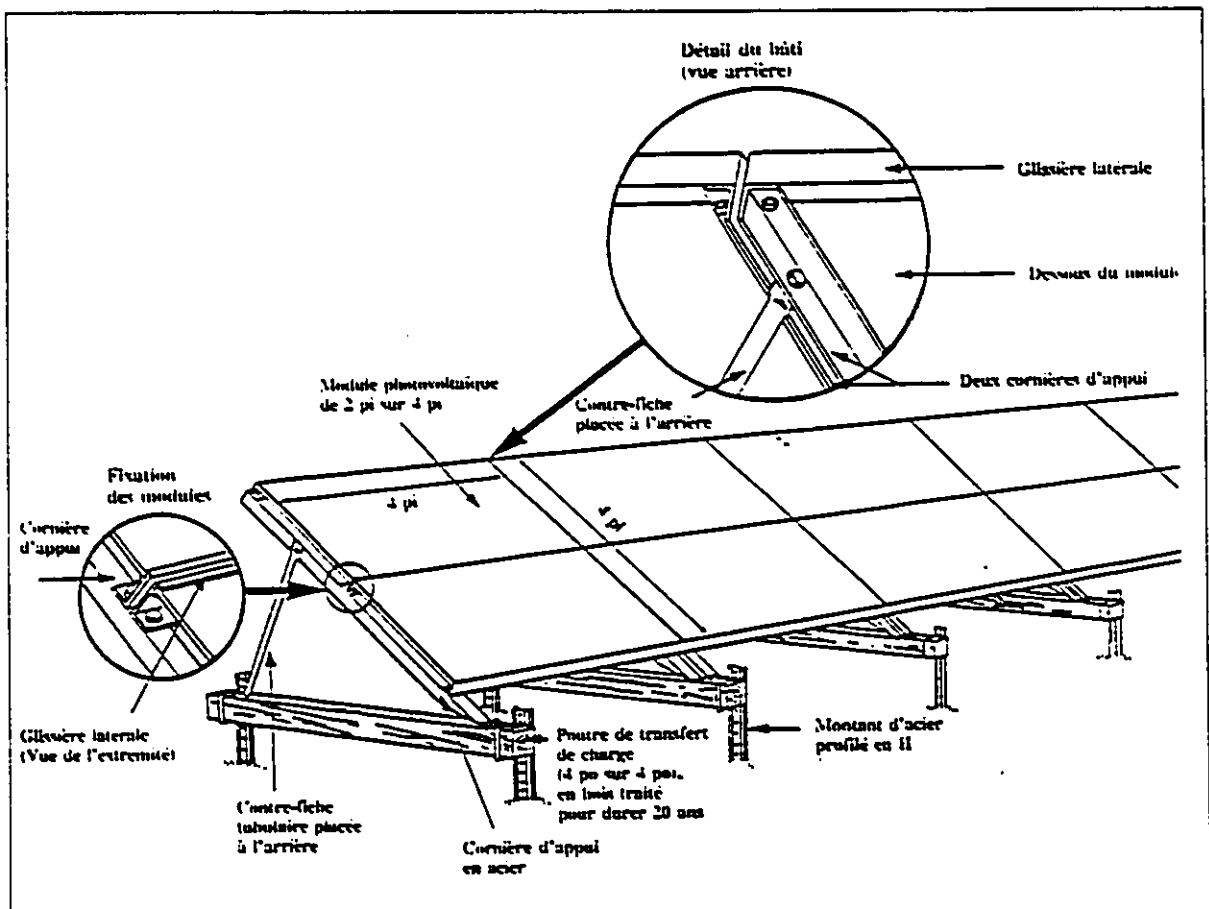


Figure 2.3 - Supports de modules photovoltaïques [4]

2.2.1.2 Principes fondamentaux

Il importe de comprendre comment fonctionne les piles photovoltaïques et quelles sont les données à considérer lors de la conception et l'opération des systèmes PV. Nous commencerons donc par

décrire les principes de base régissant le comportement des photopiles.

L'effet photovoltaïque est la conversion de la lumière en courant électrique. Les photons, de l'énergie à l'état pure, entrent dans une cellule et excitent ses électrons et libèrent ces derniers. Une barrière de potentiel inhérente agit sur ces électrons, produisant ce qui est parfois appelé un photovoltage. La figure 2.4 nous montre une pile solaire et ses parties principales [20]. Voyons maintenant plus en détails ce qui se passe à l'intérieur d'une pile au silicium par exemple.

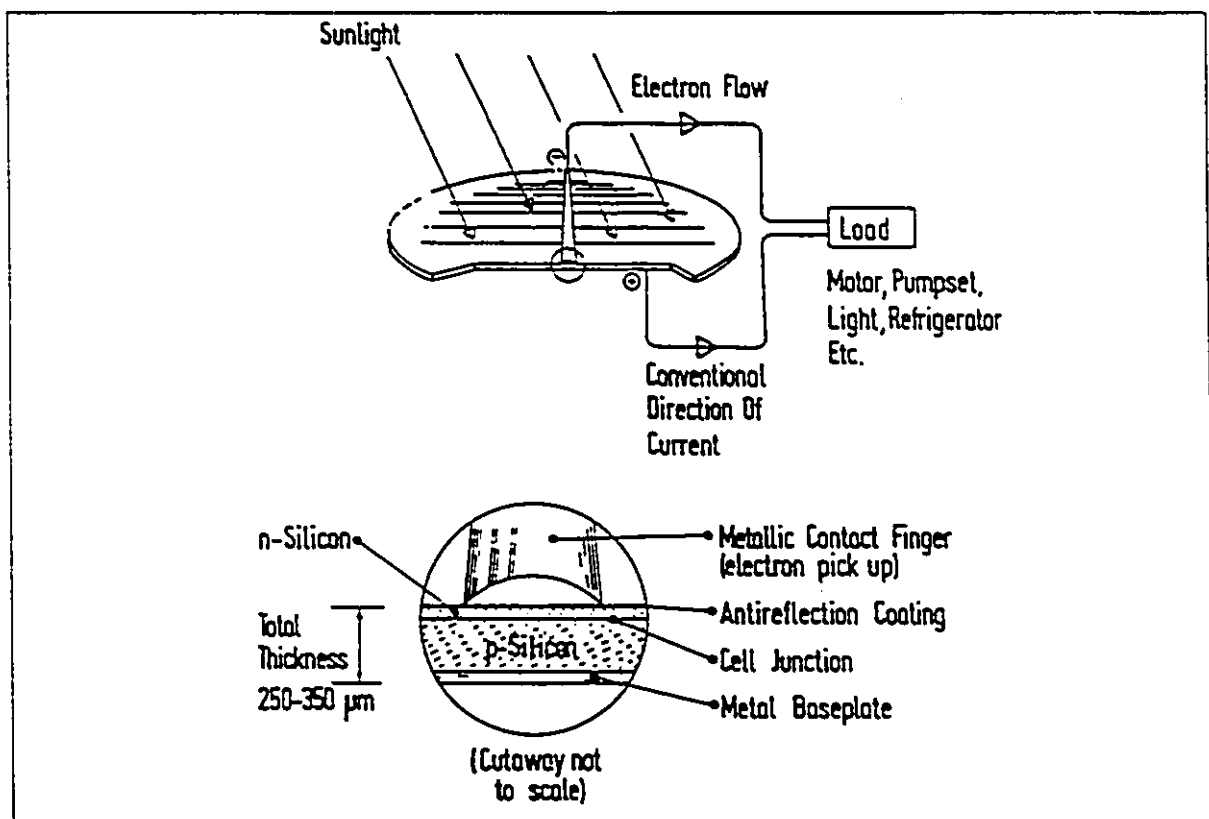


Figure 2.4 - Coupe transversale d'une pile solaire [20]

Lorsque la lumière frappe un cristal de silicium, elle peut être réfléchiée, être absorbée ou simplement passer au travers. La lumière absorbée, si elle est de basse intensité, peut causer chez les atomes des distorsions et des vibrations. Ces niveaux d'énergies ne sont pas stables et les

électrons retournent rapidement à leur niveau d'énergie original, dissipant l'énergie acquise sous forme de chaleur.

La lumière de haute énergie altère les propriétés électriques du matériau semiconducteur. Un électron frappé par un photon de lumière est "arraché" de sa position, laissant un lien sans électron, appelé un "trou". L'électricité circule, éventuellement dans un circuit extérieur, grâce à ces électrons libres. Les trous circulent, quoique moins rapidement, librement dans le cristal. Ce phénomène est à la base de l'effet PV mais il ne produit pas à lui seul le courant. Pour exploiter ce phénomène (la circulation - dans des directions opposées - des trous et des électrons dans le semiconducteur), un mécanisme supplémentaire est requis: un champ électrique interne.

Ce champ électrique interne, constitué par la jonction de deux différents semiconducteurs, sépare sélectivement les électrons des trous, les envoyant chacun de leur côté. Ainsi séparés, les électrons et les trous ont moins de chance de se rejoindre et de perdre leur énergie électrique. Cette séparation crée une différence de voltage, qui est utilisée pour générer un courant électrique dans un circuit externe.

Il existe plusieurs façon de former une jonction P-N. Un enduit de charge négative (le donneur), connu sous le nom d'enduit de type-N, introduit dans le cristal de silicium pur - Si - une impureté (le phosphore, P) ayant un électron de valence de plus (5 pour le P, 4 pour le Si). Il y a donc un électron sans lien à partager. Seul, le silicium de type-N ne peut former le champ électrique interne.

Du silicium altéré avec une impureté (le bore, B) ayant un électron de valence en moins (3 pour le B) aura un trou en plus, qui lui aussi se déplace dans le cristal. Ce semiconducteur positivement chargé est appelé un enduit de charge positive (accepteur) ou de type-P.

La jonction P-N entre ces deux types de matériaux établie le champ électrique interne essentiel à

l'opération d'une cellule PV. Il existe à cette jonction un débalancement fixe de charge.

Si, grâce à un circuit électrique externe, un côté de type-N est connecté à un côté de type-P, un courant circule dans le circuit car il y a une réduction dans le débalancement des charges de la cellule. Les électrons circulent vers le côté de type-P où ils se recombinent avec des trous près des électrodes, les contacts métalliques sur et sous les piles (voir figure 2.4). L'énergie de la lumière absorbée à l'origine est utilisée, ce qui fait exécuter aux électrons un travail utile. L'équilibre est ainsi maintenu [4,19].

2.2.13 Caractéristiques et taux de performance

Pour une pile solaire typique, la relation courant-tension (I-V) dépend du rayonnement solaire, exprimé en W/m^2 , et de la température, en $^{\circ}C$, à laquelle la pile opère. La figure 2.5 illustre ces différents comportements.

La puissance maximale réalisable pour une pile est obtenue lorsque les conditions d'opération sont au coude de la courbe I-V. La puissance crête est obtenue par la relation:

$$P_{\max} = V_{pm} I_{pm} \quad (2.1)$$

Selon la loi d'Ohm, lorsque la résistance d'un circuit augmente, le voltage augmente lui aussi jusqu'à ce qu'un voltage de circuit ouvert, V_{oc} , soit atteint, où le courant est nul ($I=0$). Lorsqu'il n'y a pas ou peu de résistance, la tension est très basse et la pile est considérée comme court-circuitée; un courant I_{cc} est défini lorsque $V=0$.

Les conditions standards d'ensoleillement de $1000 W/m^2$ et de température d'opération de $25^{\circ}C$ servent de comparaisons pour les piles couramment offertes sur le marché.

On remarque que seulement une partie de la lumière qui frappe une pile solaire est convertie en énergie électrique. Le reste est perdu par réflexion à la surface de la pile ou sous forme de chaleur. Certaines pertes sont inhérentes aux procédés physiques impliqués dans la conversion tandis que d'autres peuvent être minimisés par une conception attentive.

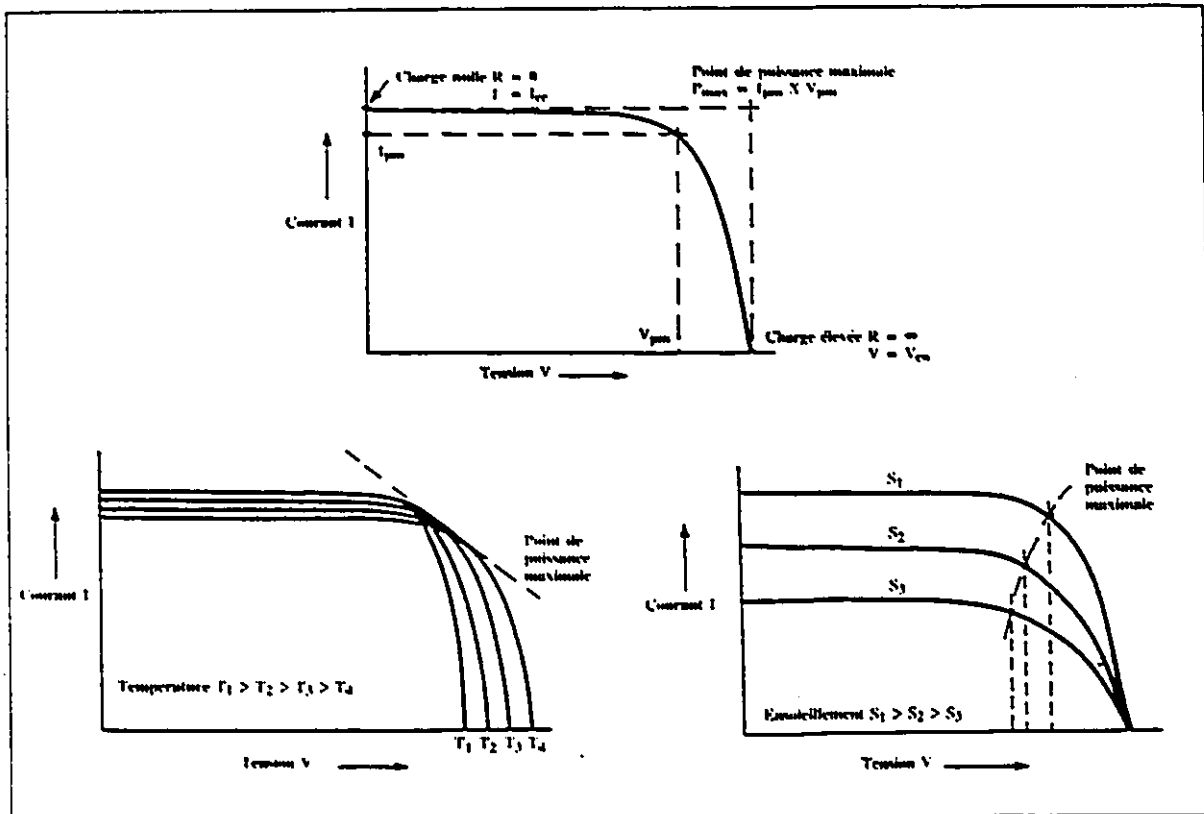


Figure 2.5 - Variations de la courbe I-V [4]

Les pertes optiques peuvent atteindre 35% de la lumière incidente pour des surfaces sans traitement. Une couche anti-réfléchissante réduit ces pertes à 5%. Les pertes dues à la conversion lumière-électricité sont causées par deux effets:

- i) les longueurs d'onde dans la bande infra-rouge du spectre lumineux ($< 0.4 \mu\text{m}$) n'ont pas assez d'énergie pour arracher des électrons. Elles passent à travers le semiconducteur et sont absorbées ou réfléchies par l'électrode de base [12];

- ii) les longueurs d'onde dans la partie visible et ultra-violet du spectre ($> 1.1 \mu\text{m}$) ont plus d'énergie qu'il n'en faut pour arracher les électrons et l'excès se dissipe en chaleur, résultat des collisions atomiques qui ne peuvent être exploitées.

Donc ces deux effets physiques font qu'une pile solaire à jonction P-N a une limite d'efficacité théorique de 20 à 30%.

Les pertes dues à la résistance du matériel de base, des couches de surfaces de la pile et des connexions du circuit changent selon le système étudié. Plus la résistance est grande, plus le courant diminue, encourageant ainsi la recombinaison des trous et des électrons. L'auto-ombrage est le fait des contacts métalliques qui font ombrage au matériel directement dessous. Ces pertes varient selon le manufacturier, la forme de la cellule et l'aspect que prend la grille de collection. Les pertes dues à la température dépendent du matériel utilisé. De façon générale, la performance diminue lorsque la température augmente. Ces pertes réduisent l'efficacité de conversion entre 5 et 25%, selon le matériel utilisé, la conception de la pile et la température ambiante [19].

2.2.1.4 Modèles pour les courbes caractéristiques I-V

La courbe caractéristique I-V a été décrite qualitativement à la section précédente où l'on a vu que la puissance maximale P_{max} est la puissance désirée pour l'opération d'une pompe. Voici quelques modèles qui ont été proposés pour décrire mathématiquement ces courbes.

2.2.1.4.1 Approche d'Appelbaum et Bany

Appelbaum et Bany constatent que la position de la courbe de charge d'une pompe centrifuge se compare bien avec la courbe de puissance du générateur photovoltaïque, même si une variation de

vitesse pour ce type de pompe est habituellement enregistrée (voir la figure 2.6). Cette caractéristique, si la variation se situe à l'intérieur d'une certaine limite, correspond à un taux d'exhaure constant pour presque toute la journée [25]. La pile PV est définie complètement par sa courbe I-V.

Un modèle pour décrire mathématiquement un GMP avec un moteur à courant continu est aussi intégré dans cette approche.

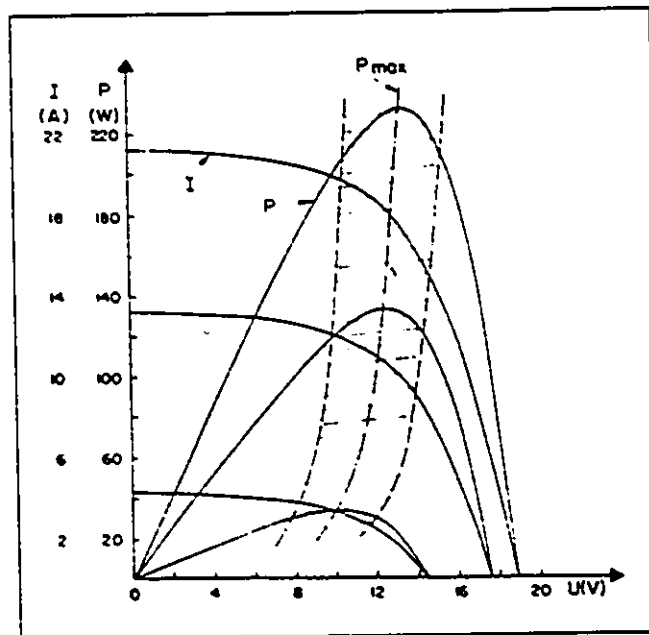


Figure 2.6 - Courbes I-V et P-V [25]

Pour un champ comprenant plusieurs cellules, la résistance shunt R_{sh} peut avoir un effet considérable sur les caractéristiques de l'aire. La formule suivante doit donc être utilisée.

$$U = -I R_s + \frac{1}{\Lambda} \ln \left(1 + \frac{I_{ph} - \beta I - \frac{U}{R_{sh}}}{I_o} \right) \quad (2.2)$$

où

$$\beta = 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

U est la tension, I est le courant de l'aire, R_s la résistance en série de l'aire, R_{sh} la résistance dérivée (shunt), $\Lambda = q/AkT$, q étant la charge électronique, A le facteur de complétion, k la constante de Boltzmann, T la température absolue, I_0 le courant de saturation inverse et I_{ph} le photocourant.

L'analyse mathématique requiert le calcul du courant, de la tension et de la puissance pour obtenir la performance de l'aire PV. Une procédure itérative est employée. Les approximations suivantes peuvent être faites: $U/R_{sh} \rightarrow 0$ et $I_{cc} = I_{ph}$. Le courant de court-circuit I_{cc} devient:

$$I_{cc} = \frac{1}{\beta} (I_{ph} - I_0 [\exp(\Lambda I_{cc} R_s) - 1]) \quad (2.4)$$

On essaiera d'opérer l'aire à son point maximal de puissance ou aux alentours. La puissance produite est exprimée comme étant:

$$P = U I \quad (2.5)$$

Le point maximal de puissance est obtenu à partir de la dérivée:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{dU}{dI} I + U = 0 \quad (2.6)$$

ou

$$U_p = -I_p \left. \frac{dU}{dI} \right|_p \quad (2.7)$$

où U_p et I_p sont la tension et le courant au point de puissance maximal p. A partir des équations 2.2 et 2.7, le courant au point de puissance maximal, I_p , peut être trouvé et exprimé sous forme quadratique telle que:

$$I_p = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2.8)$$

$$A = \beta R_s \quad (2.9a)$$

$$D = I_{ph} - \left(\frac{U_p}{R_{sh}} \right) + I_o \quad (2.9b)$$

$$B = -\beta \left(U_p + \frac{1}{\Lambda} \right) - D R_s \quad (2.9c)$$

$$C = U_p D + \frac{U_p}{\Lambda R_{sh}} \quad (2.9d)$$

La tension au point de puissance maximal est:

$$U_p = -I_p R_s + \frac{1}{\Lambda} \ln \left(1 + \frac{I_{ph} - \beta I_p - \frac{U_p}{R_{sh}}}{I_o} \right) \quad (2.10)$$

La ligne de puissance maximale et les deux lignes représentant $\pm 10\%$ de cette puissance sont illustrées à la figure 2.6. Les équations 2.8 et 2.10 sont des expressions qui peuvent être résolues simultanément de façon itérative. La puissance au point p, le coude de la courbe I-V, dépend de I_{ph} , qui est lui-même fonction de l'ensoleillement.

Les relations fondamentales qui gouvernent un GMP avec un moteur CC sont:

$$E = k_e \phi n \quad (2.11)$$

$$U_m = E + I_a R_a \quad (2.12)$$

$$T = k_t \phi I_a \quad (2.13)$$

$$I_m = I_a \quad (2.14)$$

où E est la force électromagnétique, k_e et k_t des constantes du moteur, ϕ le flux magnétique, n la vitesse, U_m la tension terminale de l'aire PV, I_a le courant de l'armature, R_a la résistance de l'armature, T la torque électromagnétique et I_m le courant du moteur.

La vitesse n , donnée par l'équation 2.15, incorpore $U(I)$ qui est définie par l'équation 2.2.

$$n = \frac{U(I) - I R_a}{k_e \phi} \quad (2.15)$$

Deux cas particuliers peuvent être dérivés de cette équation: lorsque $I = 0$:

$$n_{I=0} = \frac{U_{I=0}}{k_e \phi} \quad (2.16)$$

et lorsque $U = 0$ et $I = I_{cc}$:

$$n_{U=0} = - \frac{R_a}{k_e \phi} I_{cc} \quad (2.17)$$

Les caractéristiques de deux composantes du système, le moteur et les cellules sont donc mathématiquement définies. La caractéristique vitesse-torque du moteur, énoncée par l'équation 2.18, est calculée à partir des équations 2.13 et 2.15. Ces courbes sont en fonction du niveau d'ensoleillement et intersectent la courbe de la pompe pour une tension donnée produite par le champ PV.

$$n = \frac{U \left(\frac{T}{k_t \phi} \right) - \frac{T R_a}{k_t \phi}}{k_e \phi} \quad (2.18)$$

Le point d'intersection pour un ensoleillement donné est ensuite transformé en terme de courant

à être fourni par les cellules [25].

Les approches qui suivent ne concernent que les caractéristiques des cellules photovoltaïques.

2.2.1.4.2 Approche de Weider

La courbe I-V peut être spécifiée grâce à deux paramètres internes des photopiles, la responsivité spectrale moyenne et le courant de saturation [26]. Weider pose aussi l'hypothèse que les parties initiale et finale de la courbe I-V peuvent être approximées par des lignes droites. Après développement, il en arrive aux équations caractéristiques pour le courant J et la tension V des piles photovoltaïques.

$$J = K F - J_o \left[\exp\left(\frac{V}{k T}\right) - 1 \right] \quad (2.19)$$

$$V = k T \ln \left[\frac{K F - J}{J_o + 1} \right] \quad (2.20)$$

Le courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{∞} peuvent alors être exprimés.

$$J_{cc} = K F \quad (2.21)$$

$$V_{\infty} = k T \ln \left[\frac{K F}{J_o} + 1 \right] \quad (2.22)$$

où K est la responsivité spectrale moyenne (qui dépend de la distribution spectrale des rayons incidents, mesurée en mA/cm²/sun), F est le flux solaire total en W/m² ou en sun (1 sun est égal à 1000 W/m²), J_o est le courant de saturation inverse en mA/cm², k est la constante de Boltzmann en eV/K et T est la température en degré Kelvin.

Cette approche empirique est semi-quantitative car une analyse détaillée du photocourant à une échelle microscopique impliquerait un développement énorme et nécessiterait des données pas toujours quantifiables.

2.2.1.4.3 Approche de Braunstein et al.

Braunstein et al., dans leur article paru en 1977 [27], ont adopté une approche qui réduit le nombre de paramètres permettant de définir complètement le comportement des cellules PV de cinq à trois. L'équation de départ est toujours la même, c'est-à-dire l'équation 2.2.

Une équation approximée peut être dérivée pour le voltage et sera celle à laquelle on se référera par la suite. Cette équation est une fonction implicite du courant et du voltage mais ne contient que trois paramètres, R_s , R_{sh} et Λ . β s'exprime comme à l'équation 2.3 et $\Lambda = q/AkT$.

$$U = U_{co} - I R_s + \frac{1}{\Lambda} \ln \left[\frac{\left(\beta (I_{cc} - I) - \left(\frac{U}{R_{sh}} \right) \right)}{\beta I_{cc} - \left(\frac{U_{co}}{R_{sh}} \right)} - \exp[\Lambda (I_{cc} R_s - U_{co})] \right] \quad (2.23)$$

Les valeurs de U_{co} et de I_{cc} sont directement mesurables. Les deux autres paramètres qui restent, I_o et I_{ph} , sont facilement calculables une fois les équations suivantes résolues.

$$I_{ph} = \frac{\left(\beta I_{cc} - \frac{U_{co}}{R_{sh}} \right) \gamma}{(1 - \gamma)} \quad (2.24)$$

$$I_o = \frac{\beta I_{cc} - \frac{U_{co}}{R_{sh}}}{\exp(\Lambda U_{co}) - \exp(\Lambda I_{cc} R_s)} \quad (2.25)$$

$$\gamma = \frac{\exp(\Lambda I_{cc} R_s) - 1}{\exp(\Lambda U_{co}) - 1} \quad (2.26)$$

L'équation 2.23 est linéaire avec ses deux paramètres, R_s et $(1/\Lambda)$. Les auteurs offrent dans leur article la solution pour cette équation en utilisant la méthode des moindres carrés, en limitant la procédure d'analyse au cas uni-dimensionnel seulement.

Cette approche permet de mesurer les caractéristiques de la courbe I-V non seulement en laboratoire mais aussi dans ses conditions d'opération. L'algorithme proposé offre des résultats très similaires à ceux obtenus par expérimentation.

2.2.1.4.4 Approche de Singer et al.

Singer et al. (1984) essaient à leur tour d'approximer la courbe I-V à partir de trois paramètres facilement mesurables, V_{co} , I_{cc} et P_m [28]. Ils prennent en considération la température de la pile et la radiation solaire. A partir de l'équation classique:

$$I = I_l - I_o \left[\exp\left(\left(\frac{q}{A K T} \right) (V + I R) \right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

où I_o est le courant de saturation de la diode, I_l le courant généré par la lumière, R la résistance en série, I le courant, V le voltage et q , A , K et T définis comme auparavant. Leur modèle est basé sur la relation 2.27, mais ils y ajoutent deux simplifications:

$$\exp\left(\frac{q}{A K T} V \right) > 1 \quad \text{et} \quad I_l = I_{cc} \quad (2.28)$$

L'équation se résume donc à:

$$I = I_{cc} \left[1 - \left(\frac{I_o}{I_{cc}} \right) \exp\left((V + I R) \left(\frac{q}{A K T} \right) \right) \right] \quad (2.29)$$

Puisque (q/kT) et R sont les inconnus, deux conditions sont requises pour utiliser l'équation 2.29:

- i) si $I = 0$, alors $V = V_{co}$;
- ii) $P_m = I V$ au point de puissance maximum.

La condition (i) nous donne:

$$V_{co} = V|_{I=0} = \frac{A K T}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_o}\right) \quad (2.30)$$

Des valeurs typiques de I_o/I_{cc} à $T = 25^\circ C$ et 1 sun sont de 10^{-8} à 10^{-10} . On peut alors déterminer le courant I comme le montre l'équation 2.31.

$$I = I_{cc} \left[1 - 10^{-9} \exp\left(\frac{20.7(V + I R)}{V_{co}}\right) \right] \quad (2.31)$$

Nous obtenons à partir de la condition (ii):

$$V \Big|_{I=I_m} = \frac{P_m}{I_m} \quad (2.32a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial I} \Big|_{I=I_m} = \frac{P_m}{I_m^2} \quad (2.32b)$$

En résolvant, nous trouvons:

$$\frac{P_m}{I_m^2} = \left(\frac{V_{co}}{20.7}\right) \left(\frac{1}{I_{cc} - I_m}\right) + R \quad (2.33)$$

En combinant ces équations, nous obtenons l'expression suivante pour I_m :

$$I_m \left[1 + \frac{1}{20.7} \left(\frac{I_m}{I_{cc} - I_m} + \ln \frac{I_{cc} - I_m}{I_{cc}} \right) \right] - \frac{2 P_m}{V_{co}} = 0 \quad (2.34)$$

La valeur de I_m est trouvée avec l'équation 2.34. R est ensuite trouvé grâce à l'équation 2.33 et est substitué dans l'équation 2.31 pour trouver le courant I de la pile solaire.

2.2.1.4.5 Approche de Rauschenbach

Rauschenbach propose trois modèles qui aident à obtenir la courbe I-V sur ordinateur [29]. Nous les présenterons brièvement tous les trois dans cette section. De plus, il nous rappelle qu'une approche non-analytique peut être employée pour définir la courbe I-V. Les différents points de la courbe peuvent facilement être emmagasinés dans la mémoire de l'ordinateur. Ces séries de points peuvent ensuite être utilisées lorsque les conditions d'opérations à simuler sont définies.

Modèle I:

L'équation générale est de la même forme que l'équation 2.27 utilisée précédemment sauf que le terme $\{-V/R_{sh}\}$ n'est pas négligé. L'expression est alors solutionnée pour la tension V:

$$V = R_{sh} (I_l - I - I_o [\exp[k_o (V + I R_s)] - 1]) \quad (2.35)$$

Les paramètres suivants sont définis et substitués dans 2.35:

$$v = \frac{V}{V_{co}} ; i = \frac{I}{I_{cc}} ; i_o = \frac{I_o}{I_{cc}} ; i_l = \frac{I_l}{I_{cc}} \quad (2.36a)$$

$$r_p = \frac{R_{sh} I_{cc}}{V_{co}} ; r_s = \frac{R_s I_{cc}}{V_{co}} ; \alpha = k_o V_{co} \quad (2.36b)$$

Les équations pour la tension et le courant sont présentées à la page suivante.

$$v = r_p (i_l - i - i_o [\exp[\alpha (v + r_s i)] - 1]) \quad (2.37)$$

$$i = i_l - \frac{v}{r_p} - i_o [\exp[\alpha (v + r_s i)] - 1] \quad (2.38)$$

Puisque $i = 0$ lorsque $v = 1$ et $v = 0$ lorsque $i = 1$, on peut facilement appliquer ces deux conditions aux équations 2.37 et 2.38 pour obtenir la solution du système. Seulement les paramètres r_s , r_p et α sont indépendants et suffisent à déterminer le modèle mathématique de la courbe I-V, avec bien sûr des valeurs mesurées pour I_{cc} et V_{co} .

Modèle II:

L'expression $\{- V/R_{sh}\}$ est négligée, ce qui nous donne une équation de départ comme celle que l'on retrouve en 2.27. Un développement assez complexe est accompli pour en arriver à une équation qui doit être résolue par méthodes numériques. Les données initiales requises sont I_{cc} , I_{pm} , V_{pm} et V_{co} .

Ce modèle définit très bien la pile solaire ($\pm 2\%$) lorsque la tension de l'aire est importante.

Modèle III:

Ce modèle se base encore sur l'équation 2.27 mais il utilise une approche beaucoup plus empirique pour compenser les erreurs qui surviennent lorsque l'intensité lumineuse est grande. L'auteur en arrive à une équation comprenant les trois points caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

2.2.2 Onduleur

Un onduleur permet la transformation du courant continu (CC) généré par le champ PV en courant alternatif (CA) requis pour certains types de moteur.

La combinaison onduleur-moteur CA est souhaitable dans les applications qui requièrent de grandes puissances. Pour les plus petits systèmes, ce duo peut s'avérer non-économique. Cependant, la gamme de moteurs CA offerte par les fabricants est tellement vaste que généralement, les systèmes de pompage sont dotés d'onduleurs [8].

Un autre type d'onduleur, CC-CC celui-là, permet un meilleur couplage entre les caractéristiques des modules et celles d'un moteur à courant continu.

Les onduleurs ne sont pas employés conjointement avec des batteries, car ces dernières stabilisent déjà la tension. Dans les applications de pompage "au fil du soleil", les batteries ne sont de toute façon pas employées. Dans un système de pompage PV, l'onduleur doit avoir les qualités suivantes:

- i) capacité de répondre au courant de démarrage que requiert certains GMP, et qui peut être plus de trois fois la moyenne;
- ii) régulation de la tension, à plus ou moins 5% de variation;
- iii) faible consommation d'énergie;
- iv) modulaire et facile à installer.

Il est recommandé que l'onduleur soit installé dans une armoire de commande, voir la figure 2.1, ou sous le champ PV. L'onduleur est ainsi protégé des intempéries et de la chaleur.

L'onduleur doit pouvoir fournir la puissance nominale, exprimée en V-A, de tous les appareils susceptibles d'être installés sur le réseau de distribution. S'il s'agit d'une pompe centrifuge avec moteur CC, l'onduleur n'est pas nécessaire. Cependant, si plusieurs appareils sont sur le réseau,

l'onduleur s'avère utile. Dans ce cas, il est rare que tout les appareils fonctionnent simultanément. Le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation. Même si l'onduleur peut généralement donner une puissance supérieure à la nominale pour une certaine période de temps, il doit être protégé en se "disjonctant" du système. On peut alors le réarmer manuellement [4].

Le rendement à pleine charge n'est pas un facteur pertinent pour la sélection d'un onduleur. En effet, la puissance appelée sera très souvent largement inférieure à la puissance nominale. Lors de la conception, il importe que le rendement soit le plus élevé possible sur une plage de puissance la plus large possible, comme l'illustre bien la courbe B de la figure 2.7. Le convertisseur A quant à lui serait plus adéquat pour un facteur de charge élevé.

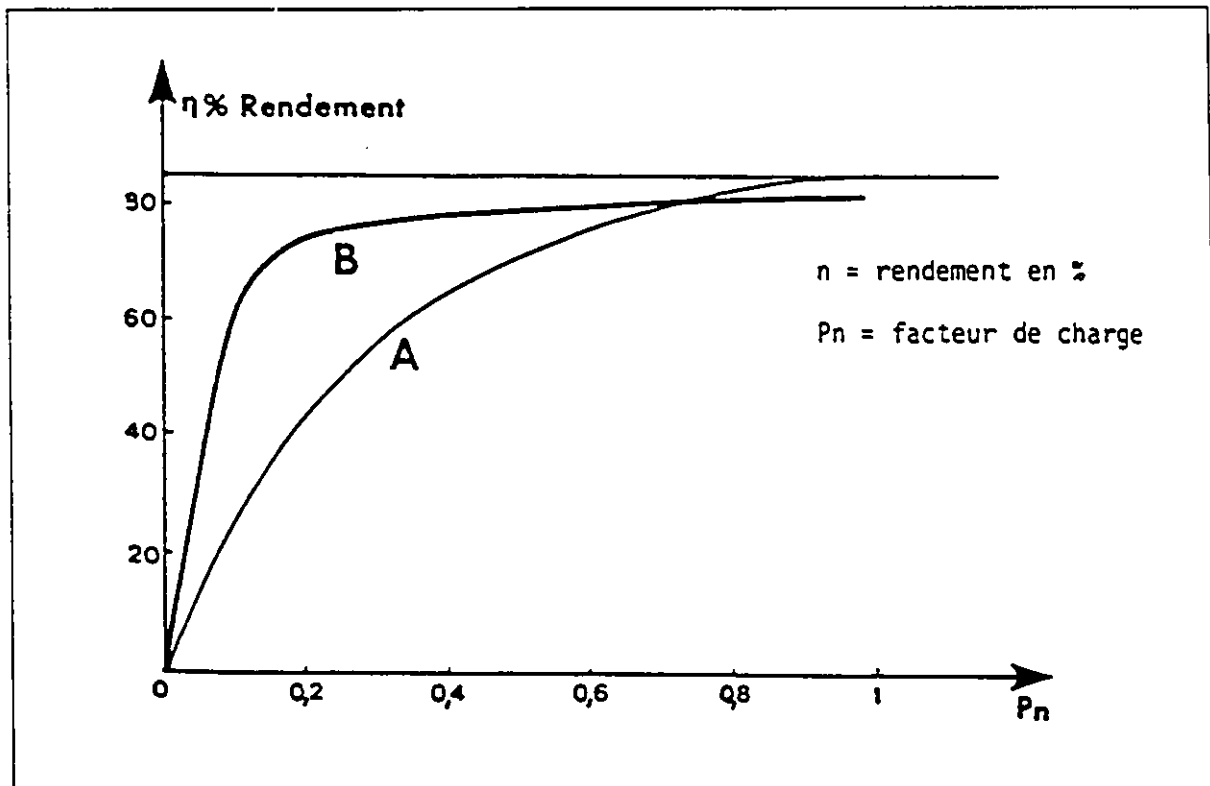


Figure 2.7 - Comparaison de la performance de deux onduleurs [23]

D'autres équipements électroniques sont disponibles. Les maximiseurs de puissance sont des appareils électroniques qui maintiennent la tension des modules PV à leur maximum, malgré les changements d'impédance de charge et les variations de température et d'ensoleillement.

Les changeurs de configuration permettent de modifier la configuration de l'arrangement des modules, en réponse aux conditions d'ensoleillement ou de charge. Dans le cas du pompage, puisque la torque est directement proportionnelle au courant de l'armature (équation 2.13) et que le courant produit par le générateur est proportionnel à l'ensoleillement, un changeur pourrait fournir le courant élevé requis le matin pour démarrer la pompe en choisissant un type de connexion avec prédominance des modules branchés en parallèle. Une fois le démarrage bien enclenché, on passe automatiquement à une connexion où prédominent les modules en série [43].

2.2.3 Groupe moto-pompe

Le type de moteur électrique qui convient le mieux pour l'entraînement d'une pompe centrifuge est le moteur à cage (Permanent Magnetic DC, ou appelé moteur à commutation électronique à aimants permanents sur le rotor) qui, grâce à certains artifices, permet un démarrage sous tension réduite. Ce type de moteur se construit pour toutes les puissances courantes d'utilisation des pompes centrifuges.

L'inconvénient du démarrage sous tension réduite est de diminuer le couple de démarrage, lequel est proportionnel au carré de la tension appliquée au stator. Mais comme le couple résistant des pompes centrifuges est faible (10% du couple maximal), ce type de démarrage est convenable.

La pompe centrifuge multicellulaire semble être la plus appropriée pour les applications de pompage PV car ses caractéristiques de puissance font qu'elle est facile à combiner avec les

modules photovoltaïques. La pompe centrifuge peut opérer à des puissances près de P_{max} , sans avoir recours à un maximiseur [8].

L'opération d'une pompe est généralement décrite par une relation entre le débit, Q , et les différentes valeurs que peuvent prendre la hauteur manométrique totale H , ou souvent dénommée HMT. La figure 2.8 illustre cette relation pour une pompe de marque Jacuzzi. Deux types d'arrangement sont possibles pour le couple moteur/pompe.

2.2.3.1 Moteurs de surface

Ces moteurs sont les plus répandus mais ne sont cependant pas les plus appropriés pour les systèmes photovoltaïques. Les moteurs de surface sont exposés à l'air, ce qui les rend vulnérables à l'humidité. Nécessitant un arbre de transmission entre le moteur et la pompe enfouie, ce genre d'installation est susceptible de bris majeurs et même d'arrêt complet en cas d'effondrement ou de déviation du puit ou du forage. Lorsque le fonctionnement est adéquat, ce type d'installation offre des rendements très ordinaires puisque la transmission occasionne d'importantes pertes.

2.2.3.2 Moteurs immergés

Cette technologie est assez récente et offre des gages de succès élevés pour le pompage PV. En étant sous terre, le moteur opère dans un environnement relativement protégé et est efficacement refroidi. Le moteur est scellé et habituellement rempli d'huile, prévenant ainsi toute fuite. L'huile et le sceau réduisent l'efficacité et rendent la maintenance et les réparations difficiles, mais prolongent la durée de vie du moteur puisqu'aucune particule ne peut pénétrer dans le moteur. Le moteur à cage est le plus efficace et le moins cher, lorsque comparé à d'autres types [31].

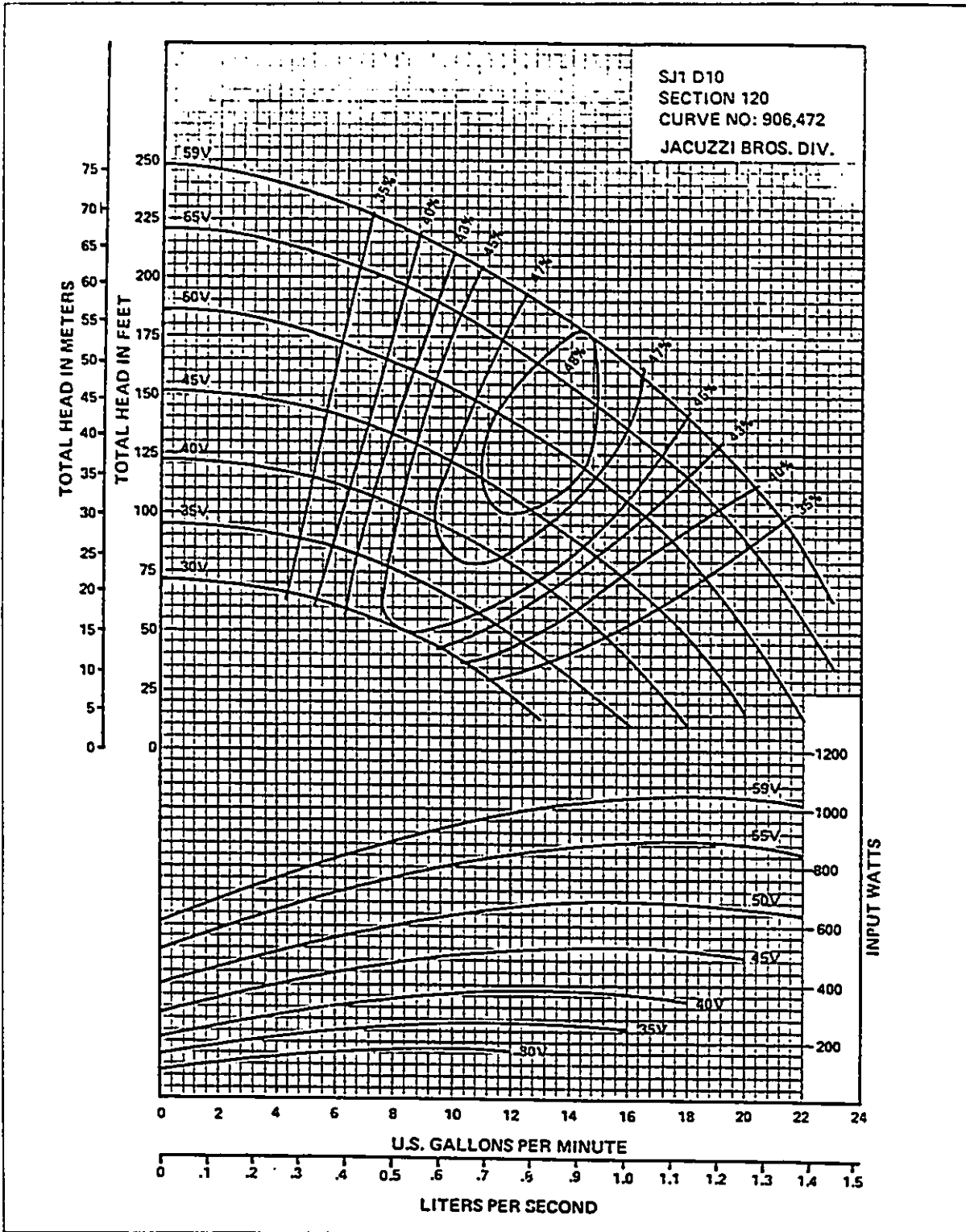


Figure 2.8 - Courbe caractéristique H - Q [30]

2.2.3.3 Conception et taux de rendement

Pour la plupart des applications commerciales, la pompe est directement couplée au moteur dans le but de rendre la puissance requise par la pompe égale à celle fournie par le moteur.

Or nous savons que la vitesse de la pompe est dépendante de la tension. Les courbes H-Q pour un voltage constant peuvent alors être préparées pour un duo en particulier. Les courbes H-Q peuvent être utilisées directement pour choisir le duo moteur/pompe et concevoir la configuration du champ photovoltaïque.

Lorsque le moteur n'est pas couplé à la pompe, des méthodes graphiques, suggérées par Appelbaum (section 2.2.1.4.1), et empiriques, proposées par Halcrow [32], convertissent les caractéristiques mécaniques de la pompe (torque et vitesse) en terme de caractéristiques électriques (courant et voltage), aidant ainsi le processus de sélection.

Le moteur peut atteindre un taux de rendement variant de 85 à 90% [32]. Cependant, combiné à une pompe, le taux de rendement du duo diminue à 30-35% [8].

2.2.3.4 Modèles théoriques

2.2.3.4.1 Approche conventionnelle

Plusieurs façons d'améliorer la performance des moteurs ont été soulignées dans des études antérieures [32]. Les approches ont pour but de réduire la maintenance et/ou d'augmenter la durée de vie du moteur. Nous tenterons ici de nous en tenir à l'approche conventionnelle pour décrire analytiquement le moteur à cage.

Le moteur est caractérisé par quatre paramètres: V_m , la tension (volts); I_m , le courant (ampères); s , la vitesse (rpm) et τ , la torque (N.m). L'indice «m» indique le point d'opération du générateur PV. La puissance d'opération du moteur - celle générée par l'aire PV au point m - est exprimée par l'équation 2.39.

$$P_{\text{entrée}} = V_m I_m \quad (2.39)$$

La puissance mécanique générée par le moteur, et destinée à la pompe, est:

$$P_{\text{sortie}} = \frac{2 \pi s \tau}{60} \quad (2.40)$$

Le taux de conversion est donc:

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} \quad (2.41)$$

Les pertes dans un moteur sont de trois catégories: les pertes dues à la résistance du courant continu ($R_m = R_g = I^2 R$), les pertes mécaniques et les pertes reliées à l'hystérésis et aux tourbillons (représentées par ΔP_m et ΔP_g). L'indice «g» représente le courant et la tension de sortie du moteur.

La puissance transférée par l'arbre de transmission du moteur est:

$$P_{\text{arbre}} = I_m V_m - I_m^2 R_m - P_{m0} - \Delta P_m \quad (2.42)$$

et la pompe reçoit la puissance suivante:

$$P_{\text{pompe}} = I_g V_g - I_g^2 R_g - P_{g0} - \Delta P_g \quad (2.43)$$

Les paramètres R_m , R_g , P_{m0} et P_{g0} peuvent être mesurés et on pose l'hypothèse que ΔP_m et ΔP_g tendent vers 0. Une procédure pour déterminer le taux de rendement du moteur est élaborée en utilisant ces paramètres [31].

Si le moteur est directement couplé à la pompe, les caractéristiques de ces deux composantes se confondent, diminuant certaines des pertes énumérées ci-dessus. Les paramètres de conception sont habituellement fournis par les fabricants.

2.2.3.4.2 Approche de Norman et al.

Appelbaum et Bany, comme on l'a vu à la section 2.2.1.4.1, ont proposé une définition mathématique d'un moteur CC, qu'on retrouve souvent conjugué avec une pompe centrifuge.

Norman et al. [31] proposent l'approche qui suit pour déterminer analytiquement les caractéristiques de la pompe centrifuge. La notation suivante est utilisée:

g	constante gravitationnelle
H_0	hauteur manométrique idéale, selon Euler
H	hauteur manométrique réelle
u	vitesse tangentielle de l'aube (= ωr)
ω	vitesse angulaire de l'aube
r	rayon de l'aube
b	largeur de l'aube
C_r	composante radiale de la vitesse de l'eau sortante
B	angle de sortie de l'eau
K_1	coefficient de perte pour la friction dans la turbine
K_2	coefficient de perte pour la friction dans l'aube
K_3, K_4	coefficients de perte pour l'angle d'entrée dans la turbine
ϕ_0	coefficient de débit pour l'angle d'entrée dans la turbine
Q_0	débit volumétrique idéal de la pompe
Q	débit volumétrique réel de la pompe
Q_L	débit des fuites
η_H	taux de rendement hydraulique
η_V	taux de rendement volumétrique
η_T	taux de rendement total
τ	torque totale de la pompe
τ_d	contribution de la friction de la turbine à la torque
τ_m	contribution de la friction mécanique à la torque
ρ	densité du liquide en circulation (varie avec T)
T	température
S	vitesse spécifique

Le débit manométrique idéal est obtenu par l'équation d'Euler:

$$g H_o = u^2 - u C_r \cot B \quad (2.44)$$

Une équation semi-empirique pour H a été développée, tenant compte des pertes causées par la friction des différentes composantes et des déviations de l'angle d'entrée. Cette formule se lit comme suit:

$$g H = u^2 - u C_r \cot B - \frac{K_1}{2}(u - C_r \cot B)^2 + C_r^2 - \frac{K_2 C_r^2}{2}(1 + \cot^2 B) - \frac{K_3}{2}(C_r - u \phi_o)^2 - \frac{K_4}{2u}(C_r - u \phi_o)^2 \quad (2.45)$$

Les constantes reliées aux pertes, K_n , diminuent légèrement lorsque le nombre de Reynold, R_n , augmente, c'est-à-dire lorsque la vitesse de la pompe augmente.

Le débit est donné par:

$$Q - Q_L = C_r (2 \pi r b) \quad (2.46)$$

Les rendements hydraulique et volumétrique sont donnés par les expressions suivantes:

$$\eta_H = \frac{H}{H_o} ; \eta_V = \frac{Q}{Q + Q_L} \quad (2.47)$$

La torque est définie comme étant:

$$\tau = \frac{\rho g H Q}{\omega \eta_H \eta_V} + \tau_D + \tau_M = \frac{\rho g H Q}{\omega \eta_T} \quad (2.48)$$

où

$$\tau_D \propto \sqrt{H} ; \tau_M \propto u ; Q_L \propto \sqrt{H} \quad (2.49)$$

D'après ces relations, lorsque la hauteur manométrique est constante, et c'est le cas dans le pompage PV, Q_L est constant. Si la courbe H-Q est presque horizontale, τ_D et τ_M seront eux aussi constants, puisque la vitesse u sera constante. La vitesse spécifique est communément employée pour définir un groupe de pompes. L'expression est la suivante:

$$S = u \sqrt{Q} H^{-\frac{3}{4}} \quad (2.50)$$

S est le nombre de révolutions par minute (rpm) auquel devrait tourner la turbine d'une pompe centrifuge qui débiterait 1 m³/sec à 1 m de hauteur de relevage. L'expression 2.50 permet de sélectionner une pompe lorsque Q, H et u sont connus.

Finalement, la puissance requise pour une pompe, P, est trouvée à partir de l'équation 2.48 et est exprimée par:

$$P = \frac{\rho g H Q}{\eta_T} \quad (2.51)$$

Grâce à ces différentes équations, nous pouvons définir mathématiquement la pompe centrifuge.

2.2.4 Système d'adduction

Le système d'adduction englobe le réservoir et la tuyauterie qui amène l'eau au(x) point(s) de distribution. Le système de distribution doit être simple et approvisionner la communauté rurale en eau de bonne qualité et à une pression suffisante.

Lors du dimensionnement des composantes du système d'adduction, le concepteur doit garder à l'esprit que la demande en eau d'une communauté varie considérablement au cours d'une même journée. Pour les systèmes dédiés à l'irrigation, cette demande varie selon les saisons et le type de culture.

2.2.4.1 Réservoir

Le réservoir doit avoir les fonctions suivantes: atténuer la différence entre la demande journalière moyenne et la demande crête, et constituer une réserve d'eau en cas de sécheresse.

Un réservoir peut être classé selon la nature des matériaux employés: métallique, en maçonnerie (briques) ou en béton armé (ordinaire ou précontraint). Il peut aussi être de différents types, selon la situation des lieux: enterré (système passif tel qu'utilisé pour les qanats), semi-enterré ou surélevé (sur tour) [33].

L'acier est souvent utilisé, mais souffre de problèmes de corrosion; un réservoir en acier doit être peint à l'intérieur comme à l'extérieur régulièrement. On peut même y connecter une protection cathodique. Le bois, souvent employé comme base pour la cuve, doit aussi être traité. La brique est utilisée aussi pour l'édification de la tour.

Une solution économique pour le stockage de l'eau en milieu rural, qu'on retrouve au Sénégal, est le réservoir cylindrique d'une capacité de 18 m³ présenté à la figure 2.9. La fondation est en béton et la paroi est constituée de briques coffrantes en ciment. Le béton est coulé après la pose d'un ferrailage [6].

La simplicité et la rapidité de construction (un mois entre le début des travaux et la mise en eau), le faible coût de réalisation et la participation importante de la population locale compensent largement la faible surélévation (ce qui entraîne des problèmes de faibles pressions) et la capacité limitée de ce type de réservoir.

Certains principes s'appliquent à la construction d'un réservoir. En plus d'être construit de matériaux durables, le réservoir doit être couvert, à l'abri des contaminants, des eaux souterraines

d'infiltration, des pluies et des poussières. Il doit être bien aéré et de plus visitable pour permettre l'entretien, s'il est de bonne taille. Dans ce cas-là, il est recommandé de compartimenter le réservoir, permettant ainsi des visites sans avoir à couper le service [7].

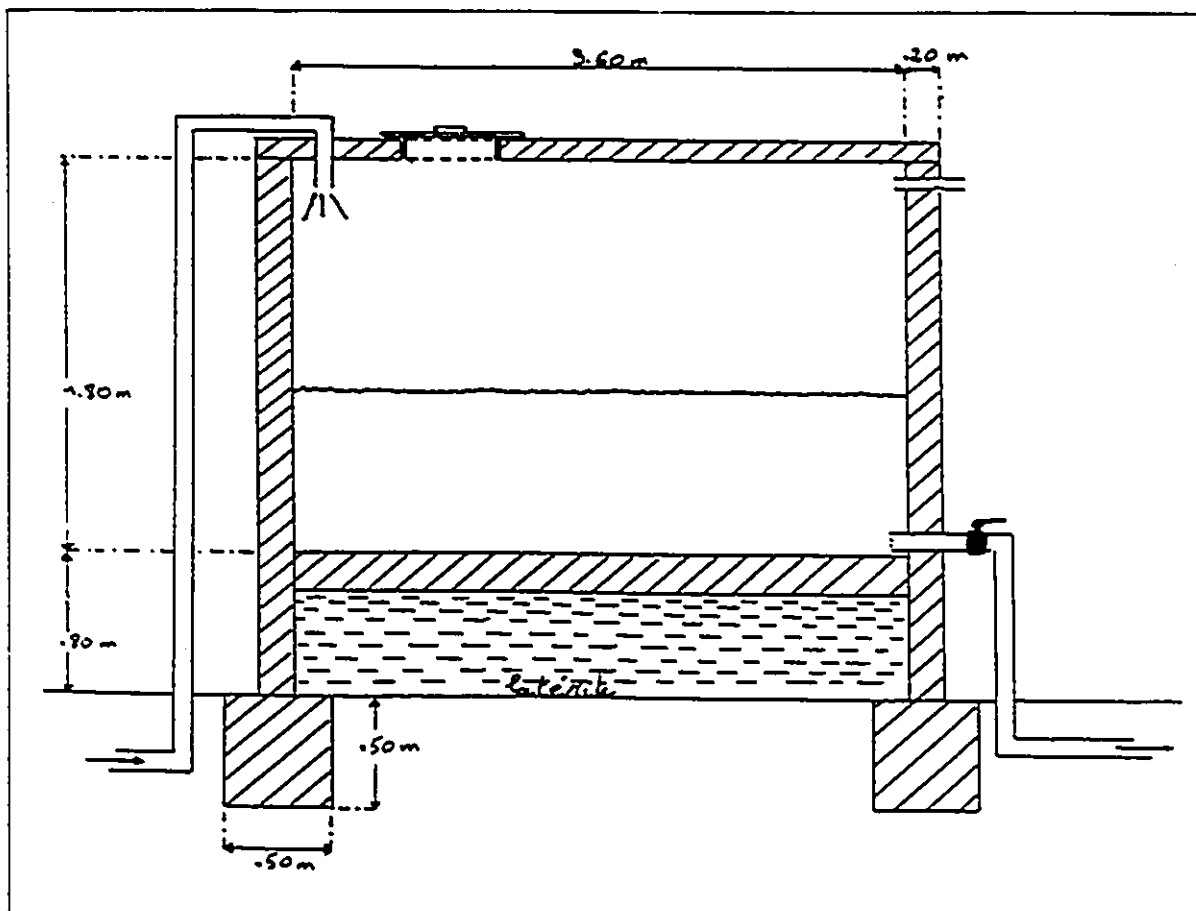


Figure 2.9 - Dimensions d'un réservoir [6]

L'étanchéité peut être réalisée par l'utilisation de produits à base de ciment ne donnant pas de goût à l'eau.

Différents types de conduites permettent de relier le GMP au réservoir, et ensuite le réservoir au réseau de distribution.

La conduite d'adduction, à son entrée dans le réservoir, doit pouvoir s'obturer quand l'eau atteint son niveau maximal dans la cuve. Un dispositif permettant l'arrêt du moteur peut être installé. Ce système électrique devrait permettre la reprise du pompage, s'il y a toujours du soleil, dès que le plan d'eau dans le réservoir s'abaisse au-dessous d'un certain niveau. Ces opérations doivent pouvoir s'effectuer dans un minimum de temps et avec un minimum de supervision.

L'arrivée en surverse, illustrée à la figure 2.10, permet d'avoir une élévation constante définie par le niveau supérieur de la crosse d'arrivée.

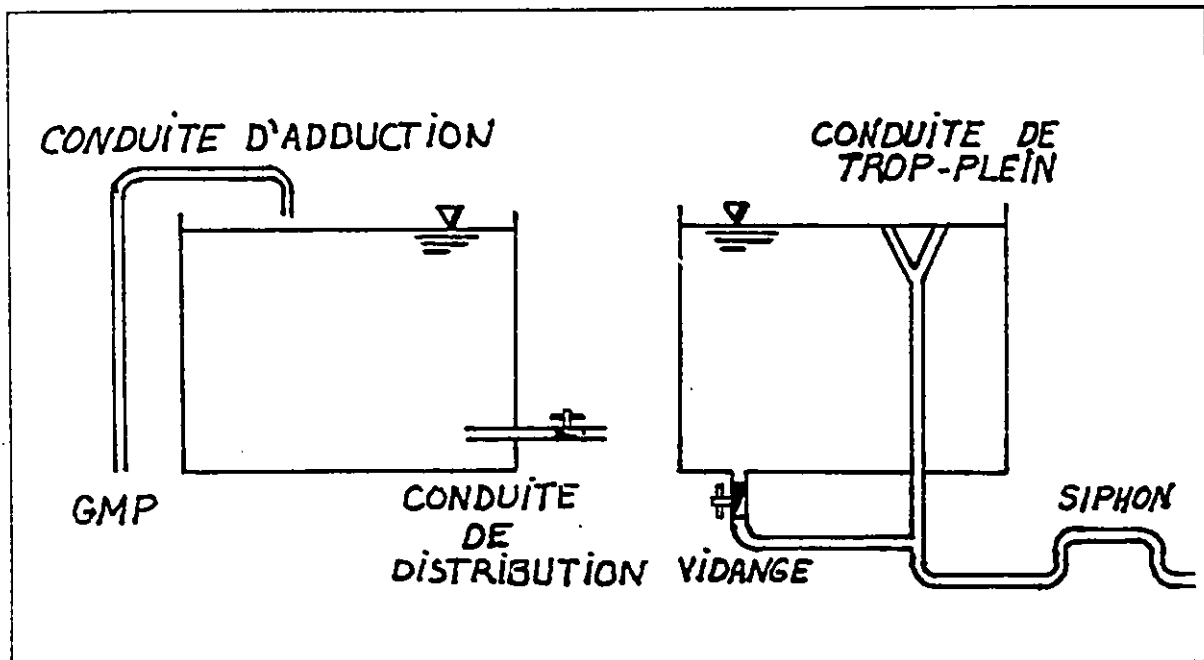


Figure 2.10 - Différentes conduites reliées au réservoir

La pompe travaille ainsi sous hauteur manométrique constante, et le débit est également constant pour un niveau d'ensoleillement donné, puisque Q et H sont liés comme le montre l'équation 2.49. Ce genre d'adduction crée cependant certains problèmes d'entartrage dus à l'aération produite, précipitant ainsi le calcium qui peut être présent dans l'eau [33].

Le départ de la conduite de distribution peut se situer à 0.15 ou 0.20 mètres au-dessus du fond du réservoir, comme à la figure 2.10. Cela évite d'introduire dans le système de distribution des sables ou des boues, qui peuvent s'accumuler dans le fond de la cuve. Un robinet doit être aménagé au début de la conduite.

Une conduite de trop-plein peut être arasée au niveau maximal susceptible d'être atteint par l'eau dans le réservoir, évitant ainsi l'installation d'un dispositif d'arrêt de la pompe. Cette conduite, montrée à la figure 2.10, comporte au départ un évasement et n'a pas de robinet. Cette conduite est nécessaire dans les systèmes photovoltaïques car l'arrêt de la pompe n'est pas toujours effectué par le-la responsable. Lorsqu'il y a demande, la pompe débite donc plus ou moins directement à l'utilisateur. Cependant, lorsque la demande est basse ou nulle, le réservoir se remplit quand l'ensoleillement le permet. Une fois plein, l'eau est évacuée du réservoir par cette conduite.

La canalisation de trop-plein débouchera à un exutoire voisin. Des précautions doivent être prises pour éviter la contamination des eaux dans cet exutoire, tel un siphon qui permet une bonne évacuation des eaux tout en empêchant le dégagement d'odeurs. L'eau peut aussi être renvoyée dans le sol pour recharger la nappe phréatique.

Une conduite de vidange part du fond de la cuve et peut se raccorder sur la canalisation de trop-plein. Cette conduite est munie d'un robinet. Voir la figure 2.10.

On suggère souvent dans la littérature que la cuve doit avoir, dans la mesure du possible, un rapport hauteur-diamètre peu élevé, dans l'ordre de 1:4 [8.32]. Il est recommandé de donner à cette cuve une forme simple.

Quant à la taille que doit avoir le réservoir, on suggère que ce dernier doit avoir une capacité équivalente à deux ou trois journées de pompage.

2.2.4.2 Connections

En général, pour l'approvisionnement d'une petite communauté, peu d'habitations sont connectées et les points d'eau sont publics. Ce type de réseau, qu'on appelle ramifié (en forme d'arbre), n'est cependant pas adéquat pour de plus grands systèmes de distribution, où le réseau maillé est de beaucoup préférable [34]. La section 2.2.4.3 présente ces réseaux.

Il existe trois principaux types de connections pour un village en région rurale. La connection domestique, habituellement faite d'un tuyaux de 9 ou 12 mm de diamètre, se rend jusqu'à l'intérieur de l'habitation. Le tuyau utilisé doit être compatible avec les connections disponibles et être de format standard. Cette connection peut se retrouver dans le jardin; l'eau peut ainsi être utilisée pour arroser des petites parcelles. Dans ce type de connection, les tuyaux peuvent être en PVC ou en acier galvanisé. La connection peut aussi être installée directement sur le réservoir, ce qui est le système de distribution le plus simple qui soit. Cette pratique est cependant peu populaire et engendre certains problèmes si le robinet n'est pas assez éloigné de la paroi du réservoir. Enfin, la connection publique est, depuis toujours, la plus répandue, et elle le sera encore pour longtemps.

Chaque connection publique du réseau ramifié doit se situer à un endroit qui convient à la communauté. La sélection de ces sites doit être faite en collaboration avec toute la collectivité impliquée. Au Sénégal, on retrouve souvent ces connections près du réservoir. Habituellement, un point d'eau peut approvisionner en eau de 250 à 300 personnes quotidiennement. Ces connections peuvent fonctionner à de basses pressions, donc utiliser des tuyaux moins résistants. La figure 2.11 nous montre certains arrangements possibles, avec la très importante bavette en gravier ou béton.

La connection publique est vraiment la seule option pratique pour les communautés qui n'ont ni les capitaux requis ni un support technique pour assurer la maintenance d'un réseau plus sophistiqué. Par ailleurs, les domiciles sont rarement construits pour permettre une connection

intérieure. Une précaution simple, telle que couvrir les bassines d'eau durant le transport entre la connection et le lieu d'utilisation, permet d'éviter la contamination de l'eau. D'autres mesures, comme la construction d'une bavette au pied du point d'eau et d'une barrière autour du site (pour éloigner les animaux), rendent les installations communautaires très adéquates en ce qui concerne la préservation de la qualité de l'eau. On doit toujours s'assurer de la qualité de l'eau que ce soit celle de la nappe phréatique ou celle qu'on puise dans les cours d'eau.

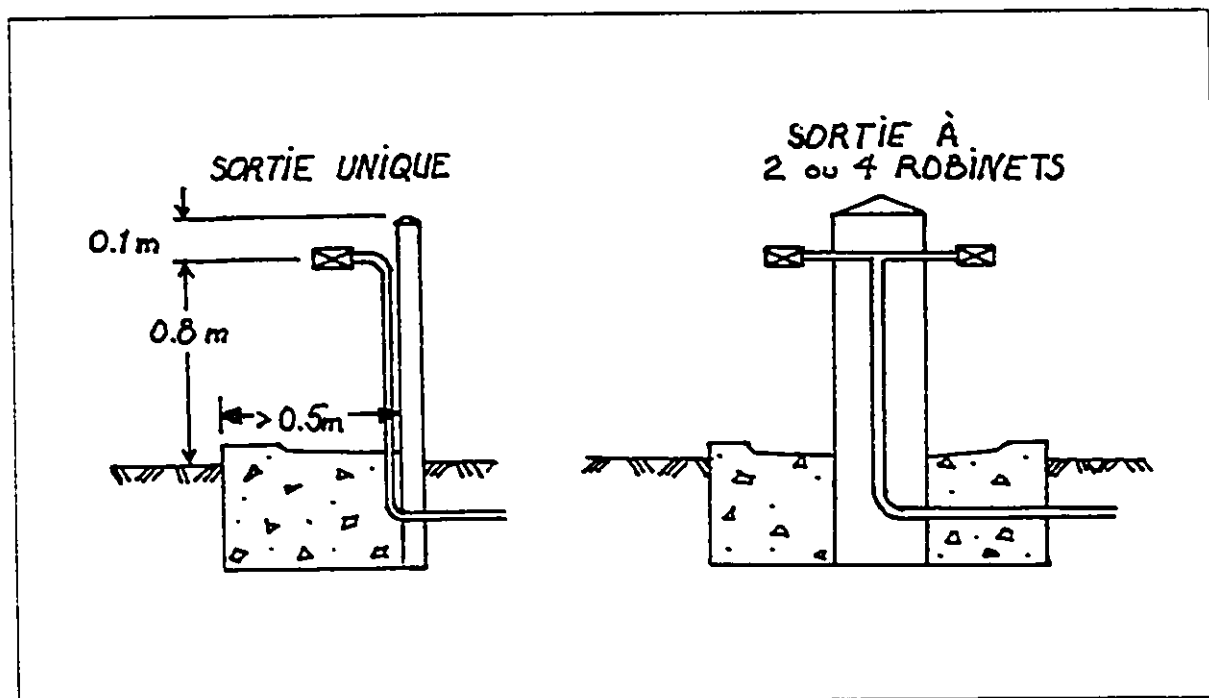


Figure 2.11 - Types de connection publique

Pour les applications maraîchères, le pompage PV est adéquat dans la mesure où les méthodes de distribution de l'eau aux récoltes sont bien adaptées. Les méthodes des canaux, des sillons et d'égouttement sont utilisées avec succès. Par contre, les appareils d'arrosage requièrent des pressions trop grandes pour être efficaces, pressions que ne peut leur fournir un système de pompage PV conventionnel. La méthode de noyer les champs, comme pour le riz, requiert quant à elle de trop grands volumes d'eau.

2.2.4.3 Réseau de distribution

Le réseau ramifié présente l'avantage d'être économique et simple de conception. La direction du flot hydraulique dans chaque tuyau est facilement identifiable, de même que le débit. Cependant, ce type de réseau a de graves lacunes en ce qui concerne la sécurité et la souplesse en cas de rupture. Un accident sur la conduite principale privera d'eau tous les abonnés en aval.

Le réseau maillé permet une circulation dans les deux sens, évitant ainsi l'inconvénient signalé plus haut. Une simple manoeuvre de robinets permet d'isoler un tronçon accidenté et de poursuivre l'alimentation des autres bénéficiaires. Donc, du point de vue de la sécurité, ce type de réseau est préférable mais il est cependant plus coûteux et pas vraiment nécessaire pour des applications de la taille des systèmes de pompage photovoltaïques.

Les canalisations en PVC sont très souvent utilisées quoique l'acier galvanisé est encore un matériau très répandu. Le choix du matériau à utiliser doit être fait selon des considérations techniques et économiques.

On peut aussi retrouver comme canalisation de refoulement dans le forage un tuyau souple autoporteur. Son utilisation permet de remonter facilement le GMP.

Les pertes de charges dans le réseau de distribution (exprimées en mètres) doivent être ajoutées à la hauteur de relevage pour obtenir ainsi la HMT. En plus des pertes causées par la friction sur la paroi de la conduite, d'autres pertes d'énergie ont lieu lorsqu'il y a un changement dans le diamètre de la conduite ou de la direction du flot. Ces pertes sont dites mineures, car dans de longues conduites, les pertes causées par la friction sont généralement beaucoup plus grandes. Dans plusieurs cas cependant, ces pertes ne sont pas négligeables. Par exemple, un petit robinet mal fermé occasionne de plus grandes pertes dans un système que la friction. Les pertes mineures sont

typiquement causées par les équipements tels le tuyau d'entrée dans le réservoir, le tuyau de sortie et les équipements s'y reliant, les expansions et les contractions (abruptes ou graduelles), les connections, courbes, diviseurs et/ou raccordements et finalement les robinets (même complètement ouverts).

La nature des phénomènes de turbulence dans les équipements mentionnés est complexe et difficile à analyser théoriquement. Des expériences ont été menées et les pertes, H_L , ont été exprimées en fonction de la vitesse V de l'eau dans la conduite, grâce au coefficient de perte K .

$$H_L = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.52)$$

Les tables de coefficients sont habituellement fournies par le fabricant.

3

Présentation du logiciel CITERNE

Ce chapitre décrit l'approche théorique employée pour optimiser la taille du réservoir dans les systèmes de pompage PV. Nous ferons la description de la modélisation dans ses termes généraux. Les hypothèses de travail et les modèles théoriques employés seront présentés au chapitre 4.

3.1 Position du problème

Lorsque le débit de la pompe et les habitudes de consommation villageoises sont connus, nous pouvons estimer la taille du réservoir nécessaire en analysant les surplus et les déficits en eau pour chaque heure.

Alors que le débit d'un GMP peut être déterminé avec précision, le paramètre des habitudes de consommation par contre, est très peu étudié dans le cas du pompage solaire. Cependant, l'expérience montre que, dans certains cas, les femmes vont tôt le matin au puit, n'y vont pas sur l'heure du midi (à cause de la chaleur) et reprennent leurs activités en soirée. Le réservoir doit alors subvenir aux besoins matinaux grâce aux surplus stockés la veille. Les besoins de l'après-midi sont, eux, comblés par la quantité imposante d'eau pompée au cours de la période du midi. Ce qui reste doit alors être suffisant pour le lendemain matin. Notons que très souvent il ne reste pas d'eau dans le réservoir en fin de journée, l'eau trouvant toujours preneur.

Un autre type d'utilisation rencontré sur le terrain est que les femmes ne vont au puit qu'en après-midi, une fois la citerne remplie.

Nous pouvons considérer ces habitudes de consommation quotidienne comme étant à peu près constantes au cours de l'année, sauf pour les sites où il y a d'importantes migrations saisonnières de troupeaux.

L'approvisionnement en eau au cours de la journée quant à lui, n'est pas constant, car le débit d'une pompe solaire est proportionnel à l'ensoleillement. D'importantes variations dans le débit sont aussi constatées selon le mois de l'année. Au Sénégal par exemple, l'ensoleillement est à son plus bas niveau en décembre et en janvier.

Nous voulons déterminer la taille du réservoir qui sera adéquate pour ces systèmes de pompage. L'expérience villageoise nous a fait découvrir que des débordements ou des assèchements de réservoirs sont survenus dans le passé. Ces occurrences démontrent que la conception du réservoir, ainsi que la gestion du pompage, doivent être réévaluées.

3.2 Présentation de l'analyse de dimensionnement

Le but de l'analyse est de présenter une courbe corrélant le volume d'eau à stocker sur un ou plusieurs réservoirs, donc l'investissement initial, avec le risque de pénurie. Ces courbes doivent être définies pour chaque mois ou pour le (les) plus mauvais mois, dépendamment du niveau d'ensoleillement disponible.

Le champ d'application de cette analyse se limite à la seule conception du réservoir. La taille du réservoir choisi a bien sûr une influence à son tour sur l'importance que devront avoir les autres composantes du système. Cependant nous nous limiterons à suggérer l'ordre de grandeur que pourraient prendre le générateur et le GMP. La taille de ces composantes devra être estimée de la façon traditionnelle, très souvent grâce à la documentation des manufacturiers et/ou de modèles

informatiques disponibles.

Avec des données d'ensoleillement et de température ambiante, nous calculons la moyenne de la température, de même que la moyenne et l'écart-type du rayonnement global et ce, pour chaque heure de la journée. Nous regrouperons ces données par mois dans le but d'uniformiser notre approche le plus possible avec celles généralement utilisées dans la pratique, même si, comme on se l'imagine, un groupe de 30 journées critiques peut s'étendre sur deux mois.

Nous obtenons ce que nous appellerons une « journée-type » pour le mois étudié, contenant les paramètres d'environnement horaires moyens. Voir à cet effet la figure I.4 de l'annexe I. L'écart-type de l'éclairement pour chaque heure de la journée-type, nous permettra de calculer la disponibilité moyenne, D (%), de l'ensoleillement (W/m^2) pour le système PV. Un exemple pour deux heures de la journée-type de décembre 1990 (10 et 13 heure) est donné au tableau 3.1.

Les scénarios de disponibilité qui ont été étudiés sont de 100%, 95%, 90%, 80% et 75%. La personne responsable de la conception aura le loisir de changer ces scénarios.

Les données et les résultats présentés dans ce tableau et ceux qui suivront sont des extraits réels du logiciel de simulation CITERNE. On retrouve les présentations à l'écran de CITERNE à l'annexe I.

Le tableau 3.1 permet de savoir qu'à 13 heure par exemple, il y a 100% de chance d'avoir un ensoleillement d'au moins $500 W/m^2$. Par contre, si nous prenons un ensoleillement plus élevé pour la conception, disons $950 W/m^2$, il y a 20% de risque de ne pas atteindre ce niveau d'ensoleillement. On voit donc clairement que pour une conception conservatrice - impliquant de plus grands investissements initiaux - on choisira un haut pourcentage de disponibilité.

La température de la cellule est trouvée à partir d'une relation mettant en cause la température ambiante et l'ensoleillement. Les caractéristiques I-V peuvent alors être déterminées en utilisant les paramètres d'environnement dans un modèle pour trouver la puissance d'opération P_{max} du générateur.

Décembre 90 - 10 heure		Décembre 90 - 13 heure	
Enso (W/m ²)	D (%)	Enso (W/m ²)	D (%)
150	100	500	100
200	99.8	600	99.4
250	99.2	700	97.2
300	96.7	743.1	95
314.3	95	750	94.7
350	90.8	800	91.7
355.2	90	822.4	90
400	82.9	850	88.0
417.4	80	900	84.0
447.5	75	950.2	80
450	74.6	1000	76.2
		1016.2	75
		1050	72.6

Tableau 3.1 - Disponibilité de l'ensoleillement

Les résultats obtenus de ce modèle sont comparés aux données empiriques recueillies sur le banc d'essais de pompage du CÉRÉR, tel qu'on le montre au tableau 3.2. Connaissant la puissance électrique produite par le générateur, nous pouvons maintenant estimer le débit du GMP pour chaque heure de la journée-type du mois étudié, et ce pour les divers scénarios d'ensoleillement. En superposant à ces différentes courbes de débit la courbe de consommation, on peut déterminer

la quantité d'eau disponible à la consommation à toute heure du jour en employant une méthode volumétrique.

Procédure de validation pour DÉCEMBRE 1990			
Heure	Puissance théorique (W)	Puissance empirique (W)	Différence (%)
10	222.4	235.2	5.8
11	402.8	418.2	3.8
12	503.8	525.7	4.4
13	570.3	593.7	4.1
14	570.3	593.2	4.0
15	546.1	566.6	3.8
16	478.4	492.2	2.9
17	353.7	360.5	1.9
18	148.4	173.8	17.1

Tableau 3.2 - Validation entre les puissances réelle et simulée

Pour l'exercice de conception d'un nouveau système, le volume du réservoir requis peut alors être évalué selon les différents scénarios de disponibilité de l'ensoleillement. Cette décision devra se prendre en concertation avec le village.

La courbe des coûts reliés à la construction du réservoir versus le risque de pénurie est tracée pour différents mois. Il est ensuite du ressort du concepteur de décider de la taille du réservoir, ayant à l'esprit les capitaux que la communauté peut investir ainsi que les risques de pénurie que la population est prête à prendre.

Dans le cas de l'analyse d'un système existant, on prendra le volume trouvé à partir du débit moyen du système en place, qui devrait correspondre à la demande moyenne si la conception a bien été

effectuée. On pourra ensuite procéder à la construction d'un réservoir auxiliaire ou à un changement dans la gestion de la pompe.

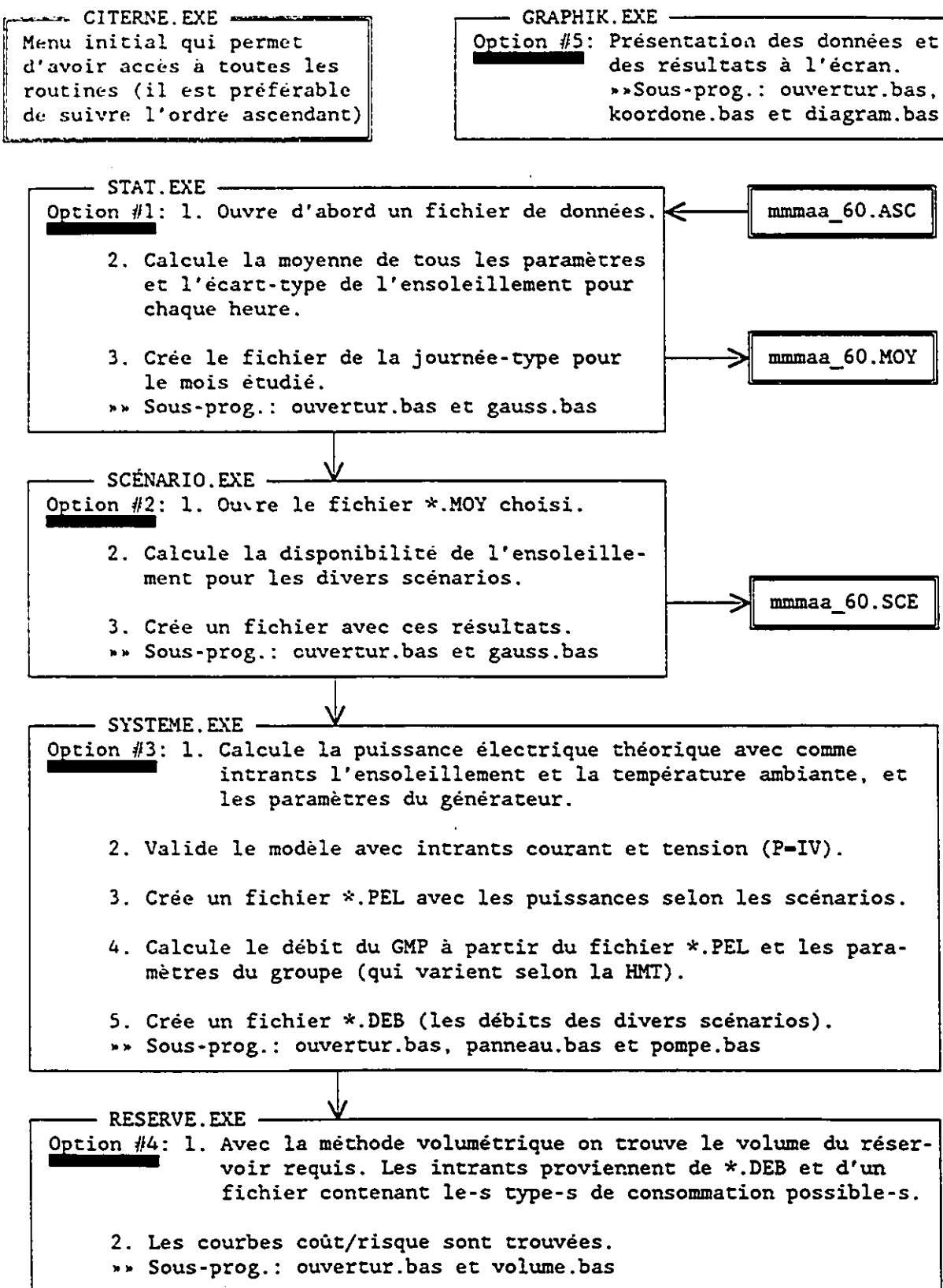
3.3 Algorithme informatique

Les relations entre les différentes routines du logiciel CITERNE sont illustrées à la figure 3.1. Les fichiers de données créés sont en double encadré (les lettres « mmaa » représente le mois et l'année; e.g. DEC90). Le logiciel procède à la lecture d'autres fichiers de paramètres, notamment ceux concernant le générateur et le GMP.

On peut donc voir qu'avec un fichier de données horaires pour un site donné pour une période significative (avec au moins l'ensoleillement et la température ambiante) et une bonne paramétrisation des composantes champ PV et GMP, le logiciel offre la souplesse nécessaire pour étudier n'importe quel système de pompage PV, quelque soit le site d'application.

De plus le langage de programmation choisi, le BASIC, permet une grande flexibilité pour d'éventuels changements dans les codes originaux. Si, par exemple, on préfère utiliser un modèle différent pour simuler la température de la cellule, il sera très simple de modifier le modèle existant pour satisfaire les besoins particuliers du concepteur.

Figure 3.1 - Algorithme du logiciel CITERNE
(présentation des sous-routines)



4

Modélisation de systèmes de pompage PV

Pour modéliser les systèmes de pompage PV, nous avons eu à poser certaines hypothèses de travail, en ayant toujours à l'esprit le type, la quantité et la qualité des données recueillies au CÉRÉR. Nous avons ensuite choisi les modèles théoriques appropriés pour arriver aux résultats souhaités, tels que décrits dans le chapitre précédent.

4.1 Hypothèses de travail

Nous décrirons dans cette section les diverses hypothèses de départ qui sous-tendent notre travail.

4.1.1 Courbes caractéristiques I-V

Les caractéristiques de courant (ampères) et de tension (volts) d'un générateur PV sont d'une importance primordiale dans toute analyse de systèmes solaires PV. Le modèle qui doit déterminer ces caractéristiques doit être sélectionné selon certains critères. Il doit simuler la courbe I-V dans le domaine de température, de rayonnement et de dégradation de la cellule dans lequel le système opère, et cela avec plus de raffinement que les courbes du constructeur. La précision des résultats du modèle doit être adéquate. Dans le cas de problèmes qui requièrent la prédiction de la puissance générée, la précision de l'analyse devrait être à son mieux à P_{max} , tout en pouvant être moindre aux points I_{cc} et V_{co} .

Habituellement, la précision est grande lorsque les conditions d'opération ont été définies par des données recueillies sur le terrain et qui sont directement utilisables par le modèle de simulation. Une précision de $\pm 1\%$ peut alors être atteinte. Cette précision se dégrade rapidement ($\pm 10\%$) lorsqu'on doit se servir de données dont la qualité est suspecte.

Notre objectif n'est pas de se concentrer trop en profondeur sur l'aspect électrique des systèmes de pompage PV, c'est-à-dire le comportement du générateur et de l'onduleur. Un modèle à la fois simple d'application, qui considère tous les paramètres d'environnement nécessaires, qui emploie directement le type de données recueillies au CÉRÉR et qui produit des résultats valables doit être sélectionné parmi les nombreux modèles existants.

Aucun modèle parmi ceux présentés à la section 2.2.1.4 ne remplissait vraiment ces conditions, mais la simulation du générateur peut être accomplie grâce à l'algorithme de Marquardt (voir la section suivante et 4.2.4). Cependant, pour ce faire, il est nécessaire d'avoir des courbes expérimentales I-V pour différents niveaux d'ensoleillement et de température de jonction. Comme ces données n'étaient pas disponibles pour le générateur FrancePhoton du CÉRÉR, nous avons eu à effectuer des tests sur le banc d'essais. Les résultats obtenus sont illustrés à la section 5.3.1. Ces courbes montrent d'importantes irrégularités qui sont le fait de défaillances dans l'équipement d'expérimentation et de la difficulté d'effectuer une trace pour un niveau d'ensoleillement constant. On a enregistré des variations de $\pm 10 \text{ W/m}^2$ entre le début et la fin d'une trace, qui pourtant ne dure que quelques minutes.

Le modèle développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) en 1976, et qui est encore très souvent employé aujourd'hui dans le domaine du photovoltaïque pourra nous être utile [9,10,43]. Le modèle JPL permet l'utilisation directe des données recueillies au CÉRÉR et produit des résultats qui se comparent bien avec ceux obtenus en situation réelle de fonctionnement. Des coefficients de perte reliés au vieillissement des panneaux, à la poussière et aux connections pourront être pris en

considération. Ce modèle est présenté à la section 4.2.1.

4.1.2 Distribution statistique

Le choix d'une distribution statistique appropriée pour décrire un phénomène aléatoire tel que l'ensoleillement est difficile à faire. Une étude faite aux États-Unis a permis une segmentation selon différents types de distribution (Weibull, beta et normale) nécessaire pour tenir compte le plus possible des variations journalières et saisonnières. On conclut que pour les sites étudiés, les distributions de Weibull et beta sont celles qui représentent le mieux la nature aléatoire des variations de l'ensoleillement [10]. N'ayant pas les moyens de recherche requis pour une telle étude, il est impossible de se baser sur ces travaux.

Un ouvrage récent réalisé au Sénégal, emploie la distribution normale dans son approche pour concevoir les systèmes PV. Cette pratique offre l'avantage d'une grande simplicité d'utilisation [11]. En s'inspirant de cette dernière méthode - on a besoin de connaître la moyenne et l'écart-type de l'ensoleillement - on pourra évaluer la disponibilité D de l'ensoleillement au cours d'une journée-type pour un certain mois, et ce même si ce mois est incomplet, comme c'est le cas pour les données recueillies au CÉRÉR. Nous jugeons l'échantillon représentatif du mois s'il comporte au moins dix jours, pas nécessairement consécutifs. On a remarqué une surestimation des performances lorsque le calcul est effectué avec seulement quelques journées par mois [41].

4.1.3 Groupe moto-pompe

Puisque les données recueillies au CÉRÉR ne permettent pas d'utiliser des modèles aussi sophistiqués que ceux présentés à la section 2.2.3.4 - qui requièrent une bonne connaissance des

caractéristiques de torque et de vitesse de rotation - il a fallu puiser à nouveau dans la documentation sur le sujet pour trouver un modèle satisfaisant nos besoins.

On rencontre fréquemment dans la littérature concernant le pompage PV une équation de la forme $P_e = f(\Omega)$ qui met en cause la puissance électrique produite par le générateur (W) et le débit horaire (m^3/h). Cette équation est utilisée très souvent au troisième ordre dans la documentation parcourue [12]. Des paramètres doivent alors être déterminés. Ce modèle très simple, une fois les paramètres connus pour différentes hauteurs de relevage, nous permettra de trouver le débit à partir de la puissance électrique qu'on aura déterminée grâce au modèle JPL.

Pour l'exercice d'identification de paramètres, nous utiliserons la méthode de Marquardt, qui permet de naviguer astucieusement entre la méthode du gradient et celle des moindres carrés [13]. L'algorithme de Marquardt est un outil mathématique puissant, capable de traiter une grande diversité de problèmes. Cependant quelques considérations doivent être prises en ligne de compte lors de son application. Il faut absolument, pour valider un modèle, un grand nombre de données expérimentales (au moins 100). Lorsque le modèle est compliqué, un grand nombre de solutions est possible. L'algorithme peut alors très bien converger vers un minimum local qui ne correspond pas du tout à la réalité physique. Finalement, la convergence dépend fortement des paramètres initiaux [39].

Puisque notre analyse se base sur un nombre limité de données expérimentales (jamais plus de 8 couples $[P_e, Q]$ pour chaque hauteur de relevage) et que nous estimons nos paramètres initiaux à partir de ceux qui ont été déterminés pour d'autres GMP [12], les restrictions énumérés précédemment nous amènent à considérer les résultats obtenus avec l'équation du troisième ordre avec circonspection. Par conséquent, une comparaison sera faite avec une équation plus simple, du premier ordre, et des données réelles.

4.1.4 Réseau de distribution

La méthode des longueurs équivalentes pourra être employée pour estimer les pertes hydrauliques dans un système de distribution. Ces derniers sont généralement peu complexes ce qui permet l'utilisation d'une simple règle à calcul hydraulique, d'un tableur électronique, tel EXCEL, ou encore d'un progiciel (pour des systèmes plus sophistiqués). Les pertes mineures et celles causées par la friction, estimées en mètres, sont par la suite incorporées à la hauteur géométrique totale (HGT) pour obtenir la hauteur manométrique totale (HMT). Le logiciel CITERNE n'offre pas la possibilité de calculer ces pertes puisque les outils permettant de faire cet exercice existent déjà et sont facilement accessibles à tout concepteur. En ce qui concerne les données recueillies au CÉRÉR, les pertes sont comptabilisées dans les valeurs de pression enregistrées puisque le manomètre est au début de la boucle hydraulique. Seul la différence d'élévation doit être ajoutée à cette lecture, la petite longueur de tuyau entre le GMP et où se trouve le manomètre est négligée.

Un autre facteur qui affecte la valeur que doit prendre la HMT c'est que le débit n'est pas constant au cours de la journée. On peut donc s'attendre à des fluctuations du niveau dynamique de la nappe phréatique. Nous posons l'hypothèse que ces variations sont peu significatives dans la plupart des cas. La pratique courante consiste à immerger le GMP de façon à ce qu'il ne tourne jamais à vide. Un test de forage permet de déterminer l'exhaure permissible et l'ampleur du rabattement de l'aquifer. On utilise la valeur maximale du rabattement pour localiser le GMP dans le forage. Cette valeur est ensuite incorporée dans la valeur de la HMT qu'on utilisera dans le logiciel.

4.1.5 Dimensionnement du réservoir

La méthode volumétrique, qu'utilise entre autres Al-Layla et al. [16], semble encore être la méthode la plus utilisée, surtout lorsqu'on est intéressé par un traitement horaire des données, comme c'est

le cas dans notre travail. De plus, la simplicité et la facilité d'implantation informatique de cette méthode en font un choix privilégié.

4.1.6 Comportement des utilisatrices

Ce type d'analyse n'a pas encore été poussé de façon systématique et sur des périodes de temps significatives. Il a donc fallu effectuer une étude sur le terrain lors d'une mission dans deux villages équipés de systèmes de pompage PV, Mérina-Dakhar (1500 W_c) et N'diné (900 W_c). L'installation de N'diné comporte un réservoir de 18 m³ du type décrit à la section 2.2.4.1. A Mérina-Dakhar, deux réservoirs sont utilisés en alternance: les utilisatrices d'un quartier vont à puits une fois tous les deux jours. Cette pratique implique que des réserves sont constituées dans les cases [35].

La prise de données a été effectuée visuellement, en comptant le nombre de bassines remplies par heure. Cette méthode expérimentale implique une très grosse marge d'erreur - comme on peut s'y attendre - mais il a fallu s'en contenter car il n'a pas été possible d'installer un débitmètre à la sortie du réservoir. On se servira de ces résultats, présentés à la section 5.3, pour effectuer l'analyse.

4.1.7 Aspect économique

Peu d'informations sont disponibles sur les coûts reliés au seul réservoir. Très souvent ces investissements sont inclus dans la rubrique "génie civil" qui englobe d'autres dépenses importantes. Des analyses détaillées comme celle de Farcot [6] pour le Sénégal sont rares mais nous tenterons, à partir de chiffres pour le Mali [2,36] d'évaluer le mieux possible le coût réel du matériel et de la main-d'oeuvre dans ces pays. Nous utiliserons un facteur exprimant le coût au mètre cube (FF/m³). Dans le cas des sommes reliées au générateur et au GMP, les informations ne manquent pas. On

utilisera l'expression reliant le coût par W_c (FF/W_c).

4.2 Modèles utilisés

Les modèles théoriques utilisés dans le logiciel CITERNE et qui n'ont pas été définis auparavant sont présentés dans cette section.

4.2.1 Modèle du Jet Propulsion Laboratory

Une cellule solaire est généralement représentée par le circuit électrique équivalent schématisé à la figure 4.1 ci-dessous.

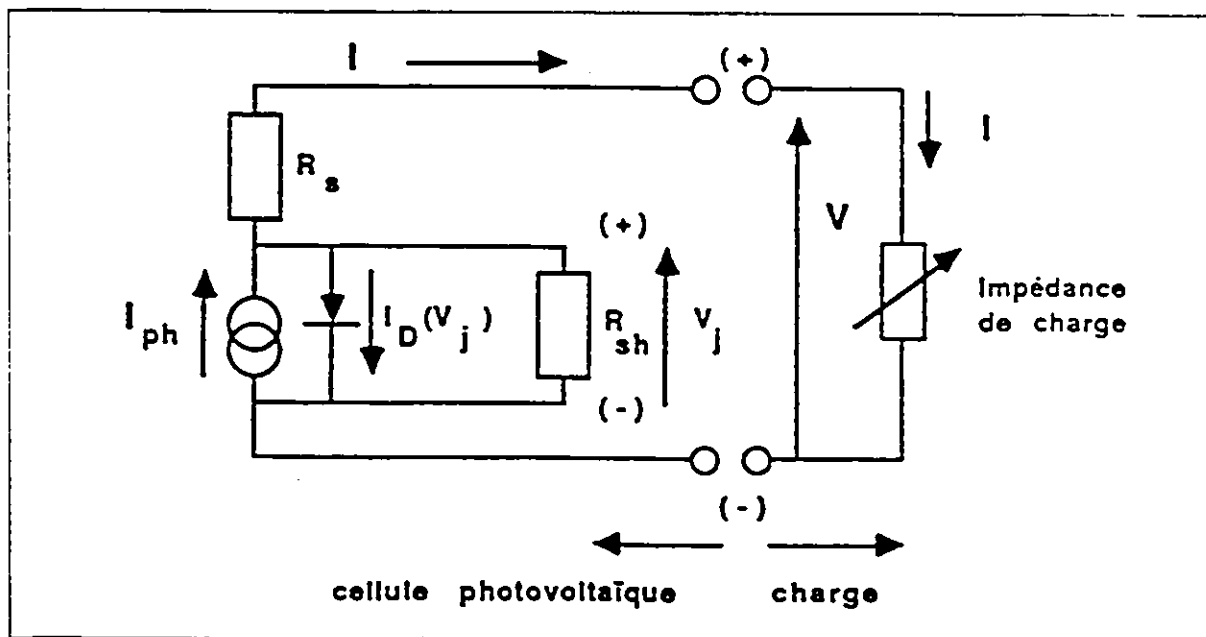


Figure 4.1 - Circuit électrique équivalent [3]

A partir de ce circuit, le courant dans la cellule est donné par l'expression

$$I_c = I_l - I_o \left(\exp\left(\frac{q (V_c + I_c R_s)}{A K T}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_c}{R_{sh}}\right) \quad (4.1)$$

où I_l est le courant d'une cellule (A), V_c la tension dans une cellule (V), I_o le courant de saturation de la diode, (ampères, I_0 dans la figure), I_l le photocourant (ampères, I_{ph} dans la figure), A une constante de la diode (entre 1 et 5), K la constante de Boltzmann (1.3812×10^{-23} J/K), q la charge électronique (1.6×10^{-19} Coulomb), T la température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$), R_s la résistance de série (Ω) et R_{sh} la résistance du shunt (Ω). Comme $R_{sh} \gg V_c$, nous avons:

$$\left(\frac{V_c}{R_{sh}}\right) = 0 \quad (4.2)$$

L'expression du courant de la cellule se lit donc comme suit:

$$I_c = I_l - I_o \left(\exp\left(\frac{q (V_c + I_c R_s)}{A K T}\right) - 1 \right) \quad (4.3)$$

L'équation 4.3 n'est applicable qu'à un seul niveau d'ensoleillement et de température de la cellule. Le modèle JPL nous permet d'obtenir le courant et la tension de la cellule dans des conditions autres que celles de référence. La transformation est effectuée grâce aux équations suivantes:

$$\Delta T = T - T_r \quad (4.4)$$

$$T = T_a + m S \quad (4.5)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{S}{S_r}\right) \Delta T + \left(\frac{S}{S_r} - 1\right) I_{cc} \quad (4.6)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (4.7)$$

$$V_c = V_r + \Delta V \quad (4.8)$$

$$I_c = I_r + \Delta I \quad (4.9)$$

où S_r est le rayonnement énergétique de référence (W/m^2), S le rayonnement énergétique au niveau qu'on veut étudier (W/m^2), T_r la température de la cellule de référence ($^{\circ}C$), T_a la température ambiante ($^{\circ}C$), $m \approx 0.02$, un coefficient de linéarité pour la température de la cellule, α le coefficient de changement de température pour le courant ($A/^{\circ}C$), β le coefficient de changement de température pour la tension ($V/^{\circ}C$), I_{cc} le courant de court-circuit de l'aire (A), V_r la tension de la cellule aux conditions de référence (V), I_r le courant de la cellule aux conditions de référence (A) et R_s la résistance des cellules en série (Ω), une expression obtenue à partir de deux courbes caractéristiques pour différents niveaux d'ensoleillement et de l'équation 4.10.

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_1 - I_2} \quad (4.10)$$

Le générateur PV contient N_p chaînes en parallèle et N_s cellules sont connectées en série dans une chaîne. La tension V (V) et le courant I (A) pour ce générateur sont alors:

$$V = N_s V_c \quad (4.11)$$

$$I = N_p I_c \quad (4.12)$$

La puissance générée P (W) par l'aire pour des conditions d'ensoleillement S et de température ambiante T_a est exprimée par l'équation 4.13.

$$P = V I \quad (4.13)$$

En considérant les pertes de rendement qui affectent la performance d'un générateur, telles que: E_v les pertes dues au vieillissement des panneaux, E_p les pertes causées par la poussière (en moyenne) et l'ombrage, et E_c les pertes de connection (entre chaque cellule et par le câblage), la puissance réelle $P_{réelle}$ doit être exprimée de la façon suivante:

$$P_{réelle} = E_v E_p E_c P \quad (4.14)$$

4.2.2 Distribution normale

La distribution normale $f(x)$ qui décrit la densité de probabilité de l'ensoleillement S pour l'heure est donnée comme suit:

$$f(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2} \right) \quad (4.15)$$

$$x = \frac{S - \bar{S}}{\sigma} \quad (4.16)$$

où

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.17)$$

et

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n S_i^2 - n \bar{S}^2 \right) \quad (4.18)$$

$f(x)$ est la distribution normale, n le nombre de jours considérés, S l'ensoleillement horaire, \bar{S}

l'ensoleillement horaire moyen, et σ , l'écart-type de l'ensoleillement horaire.

La probabilité Z qu'un ensoleillement journalier de l'intervalle $[S, S + dS]$ se produise est donnée par:

$$Z = f(x) dx \quad (4.19)$$

en utilisant la relation entre x et S de l'équation 4.16. Un certain ensoleillement nominal, appelé la demande en ensoleillement S_d , et un facteur de disponibilité $D(S_d)$ sont nécessaires pour l'évaluation de l'expression 4.19. Ainsi la contribution à la disponibilité moyenne \bar{D} est donnée par l'équation 4.20.

$$d \bar{D}(S_d) = D(S_d) Z \quad (4.20)$$

où, pour $S < S_d$,

$$D(S_d) = \frac{S}{S_d} \quad (4.21a)$$

et pour $S \geq S_d$,

$$D(S_d) = 1 \quad (4.21b)$$

Si l'ensoleillement réel S est plus grand ou égal à S_d , la disponibilité est dans ce cas 100%. D'autre part, si $S < S_d$, l'ensoleillement n'est disponible qu'en partie.

Grâce aux équations 4.19 et 4.20, la disponibilité moyenne est obtenue avec:

$$\bar{D}(S_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(S_d) f(x) dx \quad (4.22)$$

où avec les équations 4.21a et 4.21b, nous obtenons:

$$\bar{D}(S_d) = \int_{-\infty}^{x_d} \frac{S(x)}{S_d} f(x) dx + \int_{x_d}^{+\infty} f(x) dx \quad (4.23a)$$

avec

$$x_d = \frac{S_d - \bar{S}}{\sigma} \quad (4.23b)$$

et

$$S(x) = x \sigma + \bar{S} \quad (4.23c)$$

4.2.3 Simulation du GMP

Un modèle du troisième ordre

$$P_e = a Q^3 + b Q^2 + c Q + d \quad (4.24a)$$

est très souvent utilisé dans la littérature [12,15] pour exprimer la relation entre la puissance électrique (W) et le débit (m³/h).

Par ailleurs, on remarque qu'un modèle plus simple est employé dans la documentation technique de certains manufacturiers [40].

$$P_e = c Q \quad (4.24b)$$

Les coefficients a, b, c et d varient selon la hauteur manométrique totale.

4.2.4 Méthode de Marquardt

L'identification est définie comme étant une représentation mathématique d'un processus réel. Ce dernier doit être entièrement caractérisé par une collection de signaux classés en entrées et en sorties, afin de définir une classe de modèles susceptibles de le représenter. Alors, le but de l'identification est de déterminer le modèle parmi la classe définie qui minimise la norme d'erreur pour un comportement entrées-sorties donné. L'algorithme d'identification de Marquardt s'appuie sur les avantages et élimine les inconvénients de deux autres méthodes: la méthode du gradient et la méthode des moindres carrés [13].

L'écriture symbolique d'un modèle est la suivante:

$$Y_m = F(\phi, U) \quad (4.25)$$

où Y_m est la sortie du modèle, F est la fonction (qui peut être linéaire ou implicite), ϕ est le vecteur des paramètres à identifier et U , le vecteur des entrées.

Pour N mesures de l'entrée U et de la sortie Y , notées respectivement U_i et Y_i , l'erreur entre la sortie réelle et la sortie du modèle pour une valeur donnée de ϕ peut être représentée par la grandeur suivante:

$$\xi_i(\phi) = Y_i - F(\phi, U_i) \quad (4.26)$$

Le but de l'identification est de chercher la valeur de ϕ qui minimise le critère $J(\phi)$:

$$J(\phi) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \|\xi_k(\phi)\|^2 \quad (4.27)$$

où ξ_k est un vecteur de dimension n représentant l'erreur entre la valeur calculée et celle mesurée. Voir l'équation 4.28.

$$\xi_k = \begin{bmatrix} \xi_1^k \\ \cdot \\ \cdot \\ \xi_n^k \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

La méthode de Marquardt utilise une direction de descente intermédiaire entre les méthodes du gradient et des moindres carrés.

L'évaluation du gradient de critère g par rapport aux paramètres est effectuée à partir de la relation:

$$g = \sum_{i=1}^N \frac{\partial Y_i}{\partial \phi} \xi_i \quad (4.29)$$

L'approximation de la matrice Hessienne A est:

$$A = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial Y_i}{\partial \phi} \right]' \left[\frac{\partial Y_i}{\partial \phi} \right] \quad (4.30)$$

Le symbole $(.)'$ dénote la transposition de la matrice.

Du point de vue de l'utilisateur, le seul calcul nécessaire pour identifier un modèle est la dérivée partielle du vecteur de sortie par rapport au vecteur des paramètres.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial \phi} \quad (4.31)$$

Le calcul du gradient de critère (eq. 4.29) et de la matrice A (eq. 4.30) peut alors être effectué. C'est d'ailleurs ces dérivées partielles que l'on retrouve comme principaux paramètres initiaux pour le bon fonctionnement de la routine NLIN (Non-LINear regression) du logiciel statistique SAS (Statistical Analysis System) [14]. Cette procédure permet de construire des modèles de régression non-linéaire. Les intrants sont les dérivés partielles par rapport aux paramètres recherchés, une

estimation de départ et un domaine de recherche pour les paramètres. On considère que l'algorithme a convergé lorsque le critère, l'équation 4.27, devient plus petit que 10^{-8} .

4.2.5 Méthode volumétrique

Une méthode analytique calculant le bilan (le débit moins la consommation) hydrique pour chaque heure dans le réservoir a été employée dans le logiciel CITERNE [16]. Cette méthode présente ensuite la variation du stockage pour chaque heure, permettant de trouver le volume du réservoir requis pour satisfaire les grandes variations. Le tableau 4.1 illustre le procédé avec un exemple d'analyse pour une pompe à débit constant.

Time (Hours)	Draft in % of Max. Daily Requirement	Inflow in % of Max. Daily Requirement	Inflow-Draft %	Storage Variation in % of Max. Daily Requirement
(1)	(2)	(3)	(4) = (3) - (2)	(5) = $\Sigma(4)$
0-1	2	-	-2	- 2
1-2	1	-	-1	- 3
2-3	0.5	-	-0.5	- 3.5
3-4	0.5	-	-0.5	- 4.0
4-5	0.5	-	-0.5	- 4.5
5-6	2.5	-	-2.5	- 7.0
6-7	3	-	-3	-10.0
7-8	3	-	-3	-13.0
8-9	4	10	+6	- 7.0
9-10	6	10	+4	- 3.0
10-11	4	10	+6	+ 3.0
11-12	7.5	10	+2.5	+ 5.5
12-13	11	10	-1	+ 4.5
13-14	8.5	10	+1.5	+ 6.0
14-15	7	10	+3.0	+ 9.0
15-16	5	10	+5.0	+14.0
16-17	3	10	+7.0	+21.0
17-18	5	10	+5.0	+26.0
18-19	5	-	-5.0	+21.0
19-20	5	-	-5.0	+16.0
20-21	7	-	-7.0	+ 9.0
21-22	5	-	-5.0	+ 4.0
22-23	2	-	-2.0	+ 2.0
23-24	2	-	-2.0	0.0
Sum	100	100	0	-

Tableau 4.1 - Méthode analytique d'estimation de la taille d'un réservoir [16]

Validation du logiciel CITERNE

Le processus de validation d'un logiciel de simulation est indispensable pour vérifier la crédibilité des résultats du logiciel CITERNE. A partir de données réelles, nous pourrions vérifier que les modèles choisis décrivent de façon réaliste les composantes d'un système de pompage PV.

5.1 Méthodologie expérimentale

Les installations d'essais doivent nous permettre d'observer un système de pompage PV dans différentes conditions d'opération et de contrôler, dans la mesure du possible, certains paramètres. Les instruments de mesure, une fois calibrés, doivent pouvoir nous donner des résultats fiables pour les paramètres pertinents au système étudié.

On pu faire une collecte de données avec les toutes récentes installations qu'offraient le Centre d'études et de recherches sur les énergies renouvelables - CÉRÉR - de Dakar entre décembre 1990 et avril 1991. Ces données ont permis de valider le logiciel CITERNE.

5.1.1 Banc d'essais de pompage

Les différents éléments qui constituent le banc d'essais de pompage du CÉRÉR sont les suivants:

a) Générateur: France Photon

Le générateur du banc d'essais est constitué de 16 modules d'une puissance théorique de 1280 W, câblé en 2 parallèles de 8 panneaux en série. Chaque panneau compte 4 modules de 36 cellules de type monocristallin. Ces panneaux sont vieux de 10 ans. La documentation n'est pas disponible, ce qui nécessite de faire la trace des caractéristiques I-V pour tout le générateur avec une charge variable de 200 Watts pour déterminer la valeur de R_s à l'aide de l'équation 4.10. La tension nominale est de 12 volts pour un module.

b) Onduleur: Total Énergie Développement No. N41-1627

L'onduleur fonctionne au fil du soleil (couplage direct au générateur). L'alimentation s'effectue entre 70 et 150 volts à un courant de 14 ampères. L'utilisation se fait à une tension variant entre 0 et 110 V et avec un maximum de 15 A. Deux voyants lumineux permettent d'indiquer le type de panne: lors d'un manque d'eau et lors de disjonction.

c) Groupe moto-pompe: Leroy-Somer

La pompe centrifuge multicellulaire est de type immergé, et est constituée de sept étages hydrauliques de type RA. Les caractéristiques du fabricant sont disponibles et on en retrouve quelques unes à la figure 5.1. Le GMP est composé d'un moteur asynchrone triphasé (tension variable de 0 à 80 V). La vitesse de rotation nominale n'est pas connue. L'orifice de refoulement a un diamètre de 2 pouces.

Le réseau hydraulique, en acier galvanisé (diam. 2"), est monté en circuit fermé. Les dimensions du réseau sont présentées à la figure 5.2 [18]. Le bassin d'essais où sont placés les engins à tester fait 3 m de côté et 2.5 m de profondeur. Ce bassin est couvert. La canalisation comprend les instruments de régulation et de mesure suivants [17].

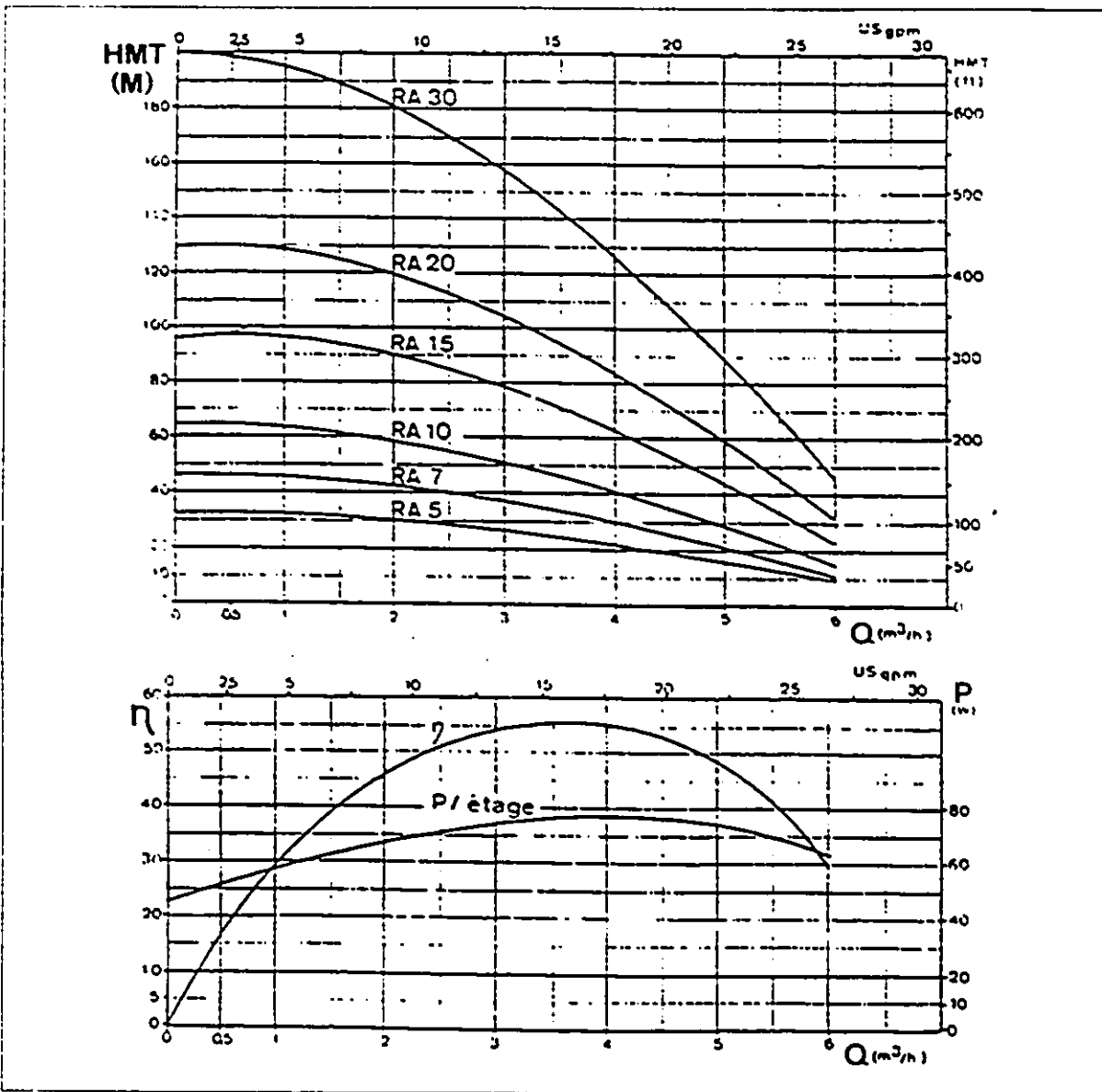


Figure 5.1 - Caractéristiques de fonctionnement à 2900 tr/min [37]

d) Manomètre transmetteur: Wika Instruments modèle 89232

Cet appareil permet la mesure de pression de refoulement par lecture directe ou par transmission d'un signal électrique standard. L'étendue d'indication de l'appareil est de 0 à 6 bars et le signal varie proportionnellement de 4 à 20 mA. Les pertes de charge dans la boucle, qui varient selon le débit, peuvent être calculées avec l'aide d'un tableur électronique

développé au CÉRÈR. Sur le banc d'essais, les pertes de charge sont intégrées dans la lecture du manomètre, qui est placé très près du GMP. Il n'y a qu'à rajouter la différence d'élévation entre le manomètre et le niveau d'eau du bassin.

e) Ballon:

Un ballon est installé dans le but d'amortir les variations de pression et d'éviter les coups de bélier. Le diamètre est de 45 cm et la hauteur de 85 cm.

f) Déverseur-régulateur: Sereg "Backflo" de Schlumberger No. 6124.02

La fonction de cet appareil est de maintenir la pression de refoulement du GMP à une valeur constante, quelque soit le débit de celle-ci, réalisant ainsi la simulation de pompage sur forage ou puit. Le réglage est fiable pour une pression de 10 à 100 mètres de façon à peu près constante au cours de la journée. Le diamètre intérieur est de 50 mm.

g) Compteur d'irrigation: Flonic de Schlumberger

Le diamètre intérieur est 80 mm et la lecture directe.

h) Débitmètre à flotteur: Khrono

Cet appareil permet une lecture visuelle seulement.

i) Compteur à impulsion: Doris SM de Schlumberger

Cet appareil émet une impulsion à chaque litre qui passe. Comme l'appareil est placé en fin de boucle, c'est le débit réel qui est enregistré. Le diamètre est de 40 mm.

j) Pyranomètre: Kipp & Zonen modèle CM 5

L'appareil est installé dans le plan des panneaux, c'est-à-dire 15° vers le sud.

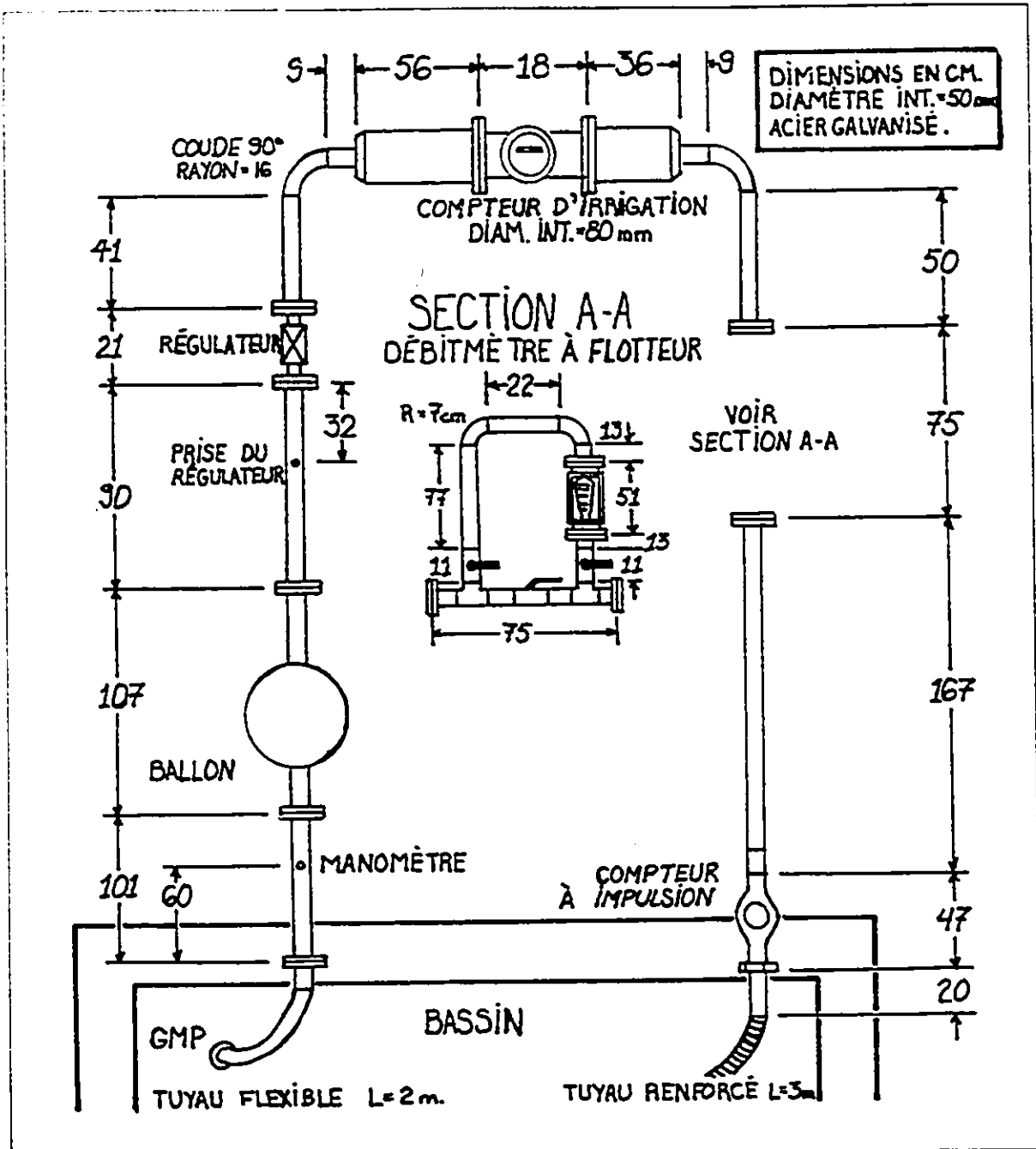


Figure 5.2 - Schéma du banc d'essais de pompage du CÉRÉR

1) Sondes de Température:

Une sonde de surface de type Pt100 permet la lecture de la température de la face arrière

des modules tandis qu'une autre sonde, aussi de type Pt100, permet la lecture de la température ambiante à l'ombre du générateur.

m) Centrale d'acquisition: Modas 12 de Neue Energie System

Les capteurs sont reliés à cette centrale d'acquisition Modas (Mobile data acquisition system) permettant ainsi d'automatiser la prise de données. Deux cartes-mémoires de 8 Kilo-octets, un appareil de lecture-transfert et un logiciel (DailyVal) permettent le traitement des données sur un micro-ordinateur de type IBM.

5.1.2 Réalisation des essais

Les points de mesure sont relevés à toute les 2 secondes, puis la moyenne de ces lectures sur 10 minutes est stockée par le système d'acquisition. Ces valeurs sont les suivantes:

Données météorologiques:

E (W/m^2), éclairement énergétique total dans le plan des modules.
 T_a ($^{\circ}C$), température ambiante.

Valeurs électriques:

V (V), tension du générateur à l'entrée de l'onduleur.
 I (A), courant du générateur à l'entrée de l'onduleur.

Valeurs hydrauliques:

HMT (m), hauteur manométrique totale ($P_{mètre} = 10.189 * P_{bar}$).
 Q (m^3/h), débit de la pompe.

Autre paramètre:

T_{fa} (°C), température de la face arrière du générateur.

Nous avons finalement sauvegardé les résultats sous forme de moyennes horaires (60 minutes), grâce au logiciel qui accompagne le Modas. Le pas de temps horaire au niveau de l'expérimentation semble suffisant pour le calcul des performances de systèmes de pompage PV [41]. Pour avoir une meilleure simulation du seuil de démarrage d'un GMP, un pas de temps plus fin serait alors à conseiller pour ce genre d'analyse.

Les premiers essais ont eu lieu entre le 13 et le 27 décembre 1990. Les tests de performance sur 2-3 jours ont alors été effectués pour des HMT de 10, 15, 20 et 25 mètres. D'autres essais ont eu lieu au cours de l'année comme l'illustre le tableau 5.1.

Les causes d'arrêt dans les tests ont été dûs à une panne de Modas (la batterie interne ne pouvant assumer l'approvisionnement au cours de la nuit), à des bris d'équipements (fuites dans la boucle hydraulique) et finalement à des arrêts prévus (stage de formation où le banc sert comme outil pédagogique).

Mois	Nom du fichier	Nombre de lignes	Date	Période jours
décembre 90	DEC90_60.ASC	361	du 13 au 27	15
janvier 91	JAN91_60.ASC	481	du 12 au 31	20
février 91	FEV91_60.ASC	673	du 1 au 28	28
mars 91	MAR91_60.ASC	241	du 1 au 5 et du 14 au 18	10
avril 91	AVR91_60.ASC	73	du 22 au 24	3

Tableau 5.1 - Fichiers de données ASCII obtenus au CÉRÉR

Ces données ont été obtenues avec le GMP décrit à la section 5.1.1c) sauf pour le mois d'avril 91 où la pompe de Mérina-Dakhar a été testée. La partie hydraulique de Médina-Dakhar est composée de 9 étages de type RA tandis que celle du banc en compte 7. De plus, le générateur du site diffère de celui installé au CÉRÉR (1500 W_e, monocristallin et 20° d'inclinaison). Les résultats obtenus pour ce mois d'avril 91 devront aussi être traités avec précaution vu le petit nombre de journées disponibles.

5.13 Études sur site

Le comportement des utilisatrices a été étudié sur les sites de Mérina-Dakhar et de N'diné. On a déterminé la consommation horaire (m³/h) de l'eau au cours d'une journée en mesurant le niveau de l'eau dans le réservoir. Le nombre de bassines remplies par les femmes au point d'eau a aussi été déterminé. Les graphes de consommation ainsi obtenus sont présentés à la section 5.3.

5.2 Équations empiriques

A partir des données recueillies sur le banc, nous pouvons calculer les valeurs empiriques suivantes.

La puissance électrique (W) est le produit du courant (A) avec la tension (V):

$$P_e = I \times V \quad (5.1)$$

La puissance hydraulique de l'électropompe, fondée sur l'équation 2.48, est donnée par la relation suivante en Watts.

$$P_h = 2.725 \times Q \times HMT \quad (5.2)$$

où le débit, Q , est en m^3/h et la HMT en mètres. La constante 2.725 est obtenue en multipliant la masse volumique (1000.0 kg/m^3 à $25 \text{ }^\circ\text{C}$) par la pesanteur (9.81 m/s^2) et en divisant le tout par 3600, pour obtenir une équation homogène.

Le rendement de l'électropompe et de l'onduleur (%) est:

$$R_p = \frac{P_h}{P_e} \times 100 \quad (5.3)$$

Le rendement de conversion du champ PV est:

$$R_c = \frac{P_e}{P_i} \times 100 = \frac{P_e}{(E \times S)} \times 100 \quad (5.4)$$

où P_i est la puissance incidente (W), E est l'éclairement énergétique total incliné (W/m^2) et S est la surface totale "hors-bord" du champ (m^2).

Le rendement global, R_g , est:

$$R_g = \frac{P_h}{P_i} \times 100 = R_p \times R_c \quad (5.5)$$

Ces équations sont couramment utilisées lors de missions de suivi technique sur le terrain.

5.3 Résultats et comparaisons

Les données recueillies au CÉRÉR de Dakar et sur les sites au Sénégal sont d'abord présentées. L'analyse du générateur et du GMP du CÉRÉR ainsi que certains facteurs économiques permettra ensuite l'utilisation du logiciel CITERNE. Nous présenterons des résultats typiques obtenus avec chacune des routines composant le logiciel.

5.3.1 Collecte de données au Sénégal

Les données horaires typiques enregistrées sur le banc d'essais de pompage du CÉRÈR de Dakar sont illustrées aux figures 5.3 et 5.4. Ces photographies montrent les sept paramètres recueillis pour une journée de décembre sur le Modas (fichier DEC90_60.ASC). Ces figures sont générées avec la routine GRAPHIK, qui permet de tracer jusqu'à sept courbes à la fois, même si les unités de ces dernières diffèrent. Pour faciliter la lecture, l'ordonnée est graduée de 0 à 1, représentant le pourcentage de la valeur qu'on retrouve dans la légende pour une courbe donnée. L'abscisse est le temps, ici une journée de 24 heures.

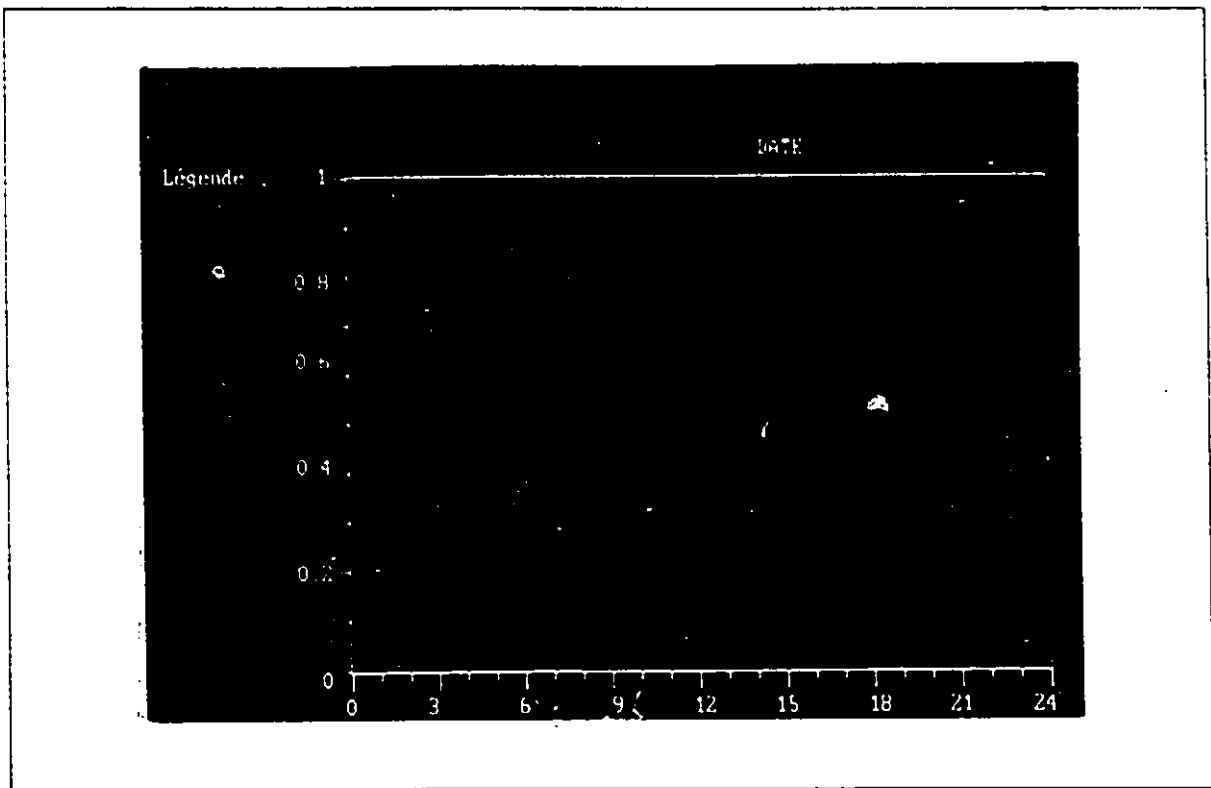


Figure 5.3 - Présentation des données pour une journée typique - I

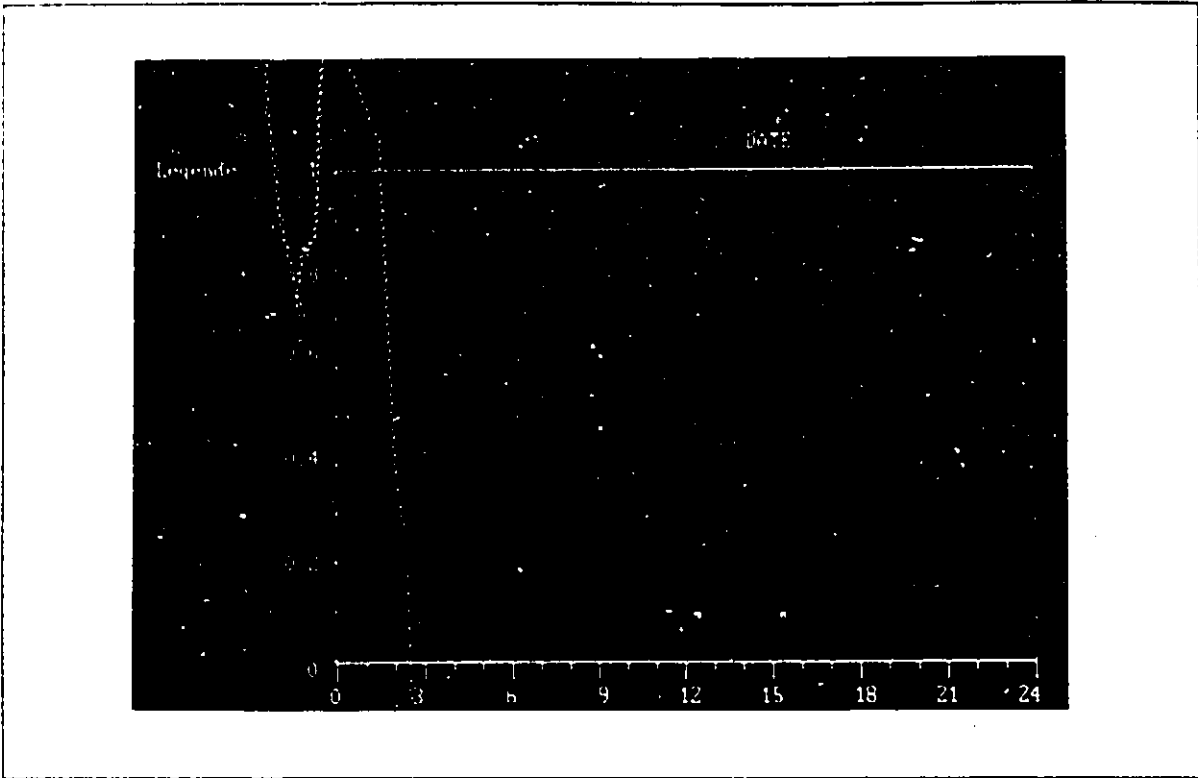


Figure 5.4 - Présentation des données pour une journée typique - II

Les caractéristiques I-V ont aussi été observées pour le générateur FrancePhoton du banc d'essais. Les différentes courbes courant (A) versus tension (V) sont présentées à la photo de la figure 5.5 pour divers niveaux d'ensoleillement (W/m^2). Le fichier de données s'appelle FP_CERER.GEN et est lui aussi accessible par GRAPHIK.

La consommation quotidienne typique pour les villages de Mérina-Dakhar et N'diné au Sénégal est montrée à la figure 5.6. On compare ces comportements avec le débit typique d'un système de pompage PV. Ces courbes ont été créées avec le logiciel Quattro Pro à partir des données contenues dans le fichier CONSO.VIL.

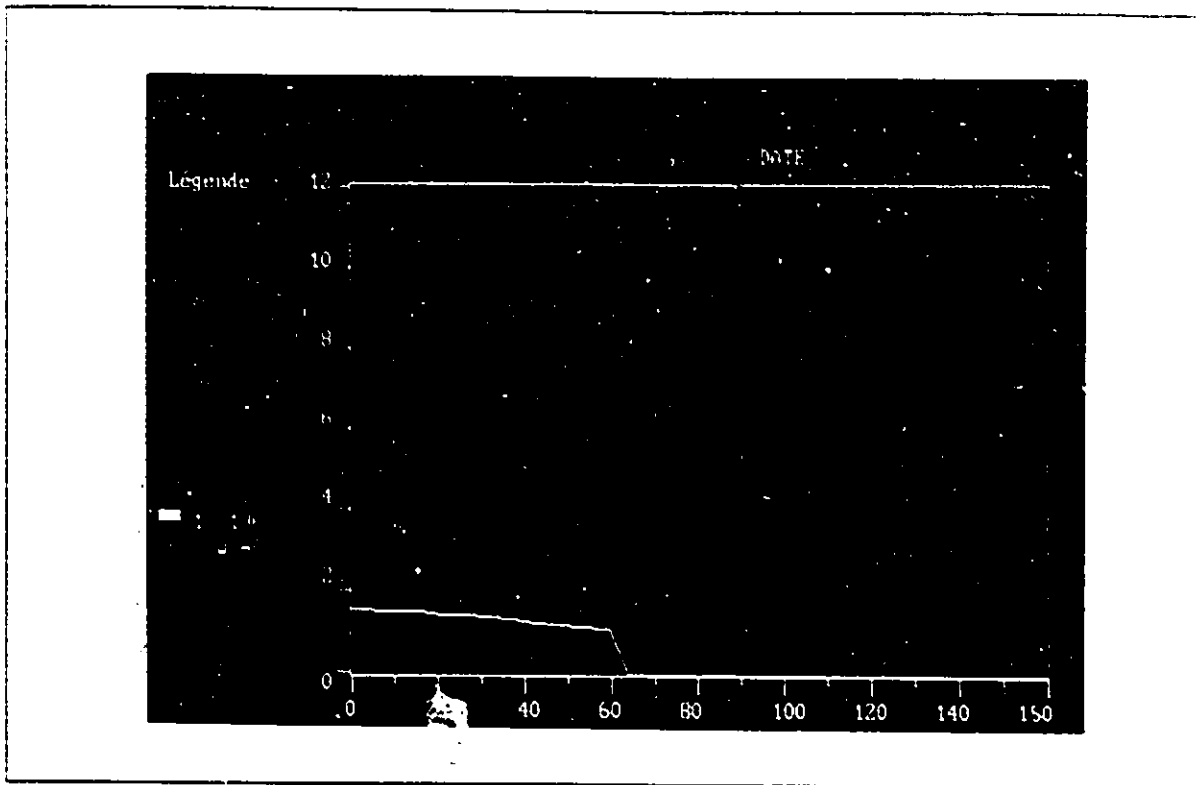


Figure 5.5 - Caractéristiques I-V pour différents niveaux d'ensoleillement

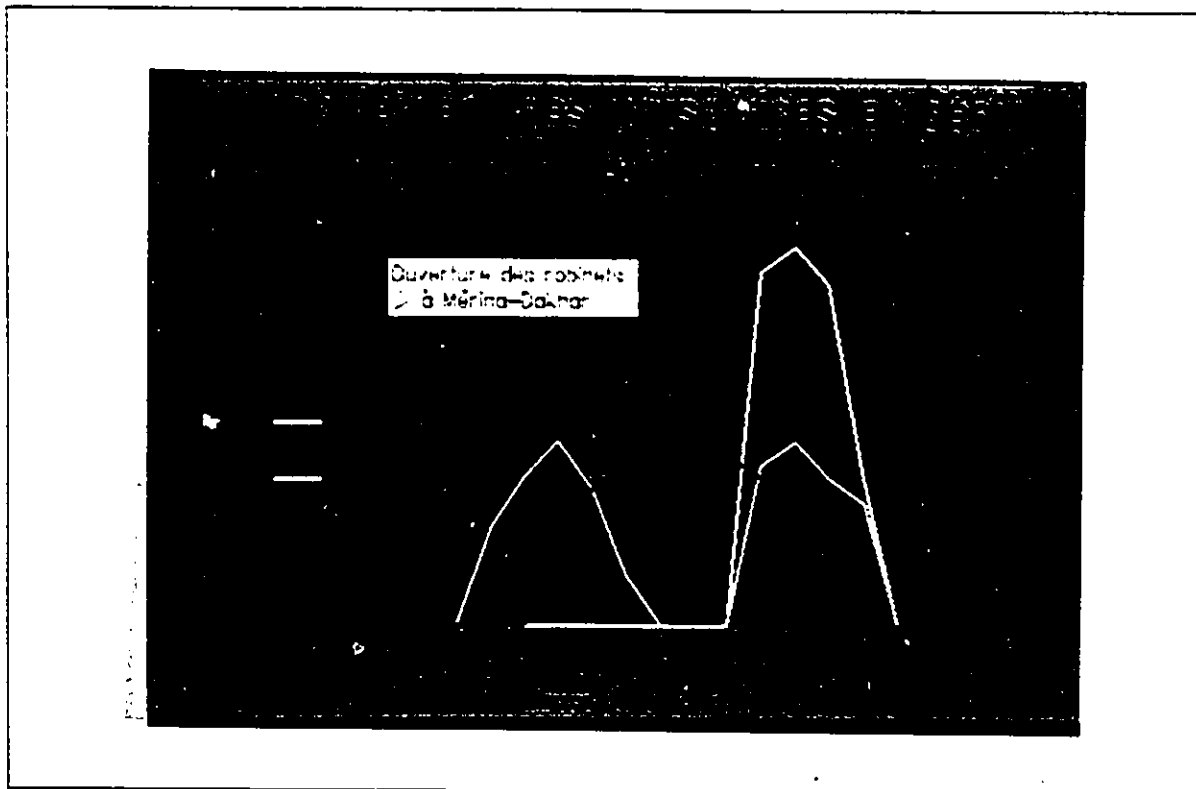


Figure 5.6 - Comparaison entre la consommation villageoise et un débit typique

5.3.2 Paramètres du GMP du banc d'essais

Ces résultats ont été obtenus grâce à l'utilisation de la méthode de Marquardt sur SAS. Le programme contenant la procédure NLIN se retrouve à l'annexe II, dans sa forme abrégée. Le tableau 5.2 nous présente ces résultats pour l'équation du troisième ordre discutée à la section 4.2.3, c'est-à-dire $P_i = aQ^3 + bQ^2 + cQ + d$.

Les résultats pour les diverses HMT ont été sauvegardés dans le fichier TED_ORD3.GMP. Le fichier TED_ORD1.GMP contient lui aussi des paramètres pour le même GMP, mais pour satisfaire une équation du premier degré. Ces résultats permettent de sélectionner le modèle qui simule le mieux le débit réel. Pour une journée de décembre, nous avons comparé le débit réel moyen avec les débits obtenus avec les deux modèles. Se référer à la figure 5.7.

Extrants obtenus avec la méthode de Marquardt (troisième ordre)				
HMT	a	b	c	d
15	33.1271	-178.1222	405	3.8109
20	-22.7923	64.3873	391	-591
25	-27.8684	81.6296	409	-578
30	-77.0234	208.0489	415	-575
35	-135.0675	291	544.4556	-559

Tableau 5.2 - Paramètres du GMP du CÉRÉR

5.3.3 Paramètres du générateur du banc d'essais

Le fichier FP_PARAM.GEN contient les paramètres de générateur montrés au tableau 5.3.

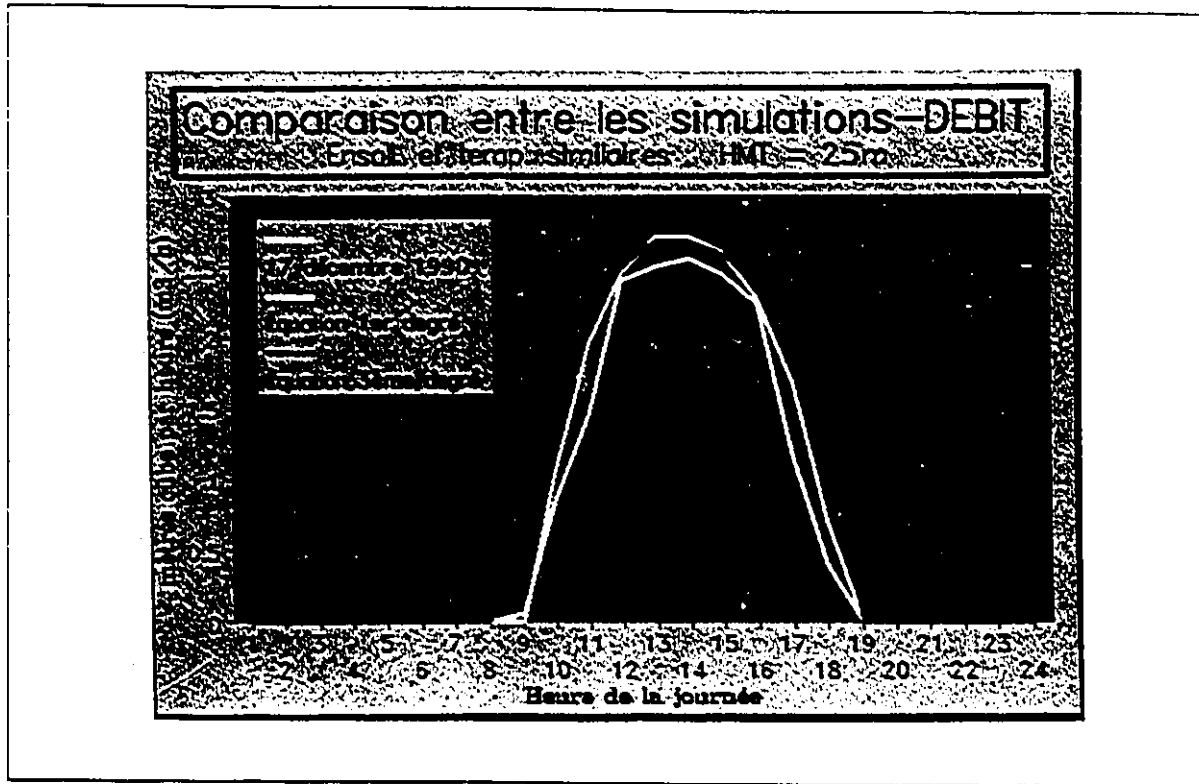


Figure 5.7 - Comparaison entre les débits

Caractéristiques du générateur FrancePhoton du CÉRÉR										
Aire générateur m ²	Aire cellule cm ²	E_v	E_p	E_c	α A/°C	β V/°C	V_r V	I_r A	I_{cc} A	R_s Ω
12.6175	52.81	.90	.80	.90	1.32e-3	2.20e-3	0.48	2.174	2.47	0.050

Tableau 5.3 - Paramètres du générateur

5.3.4 Analyse économique

Les résultats de la routine RESERVE doivent s'inspirer de l'expérience vécue au Mali et Sénégal. L'analyse disponible pour le Sénégal [6] conclut que le coût au mètre cube pour le réservoir en béton

cylindrique décrit à la section 2.2.4.1. s'élève à 23 333 FCFA/m³, soit 470 FF/m³ (en 1988), transport non-compris.

On compare ensuite cette somme à celles obtenues pour d'autres types de réservoirs installés dans la périphérie de Dakar à la même époque: 1200 FF/m³ pour un réservoir métallique et 1675 FF/m³ pour un réservoir en béton armé. Tout ces prix incluent le coût de la main-d'oeuvre et les taxes.

On a tenté d'évaluer de la même façon le coût au m³ pour le Mali à partir de chiffres disponibles dans certains documents [2,36]. La rubrique "génie civil" incorpore les coûts d'installation (forage), d'aménagement (réservoir, point de distribution et abreuvoir) et la plomberie. La main-d'oeuvre et le transport sont probablement compris. L'installation typique comprends une cuve en métal de 10 m³ surélevé de 1 mètre, une rampe de distribution de 6 robinets, une aire de propreté bétonnée et de deux abreuvoirs métalliques. En isolant les coût reliés au réservoir, nous obtenons entre 2000 et 3000 FF/m³ pour un réservoir métallique. De plus, ce montant est hors taxes et hors douane. La différence avec le résultat pour le même type de réservoir au Sénégal est très importante. Ce qui n'empêche pas que c'est peut-être effectivement l'échelle de prix que l'on rencontre sur le marché malien. Cette incertitude nous amène à laisser de côté cette estimation et suggérer au concepteur d'utiliser plutôt l'ordre de grandeur des valeurs en cours au Sénégal. Les dépenses reliées au transport doivent aussi être correctement considérées.

Notre analyse requiert aussi une connaissance des coûts reliés au générateur PV. On exprime souvent dans la littérature les coûts en fonction de la puissance disponible; nous convertirons les valeurs trouvées en FF/W_c.

Les valeurs présentées ici représentent le coût au W_c d'un système PV sans l'aspect génie civil. Les coûts considérés sont donc ceux du générateur, du GMP, de l'onduleur et des accessoires.

On a constaté que les installations PV installées représentent des coûts qui varient entre 50 et 125 FF/W_c [1,20]. A Mérina-Dakhar par exemple, l'installation revient à 75 FF/W_c [42]. Au Mali, ces coûts varient entre 78 et 122 FF/W_c [2]. On trouve beaucoup d'installations qui reviennent à 90 FF/W_c.

La réalisation du forage, l'installation (plomberie), le transport et l'entretien ne sont pas considérés dans ni l'une ni l'autre de ces valeurs (FF/m³ et FF/W_c). Pour l'analyse qui nous intéresse, nous n'avons pas à les détailler puisqu'elles ne varient pas, que ce soit un petit ou un gros système. Nous utiliserons la valeur de 90 000 FF/installation pour ces travaux. Notons au passage que les coûts reliés au seul forage représente 67 % de cette somme [2].

5.3.5 Résultats du logiciel CITERNE

A partir des paramètres et des données présentés précédemment, nous pouvons maintenant utiliser le logiciel CITERNE. Les courbes obtenues pour chacune des sous-routines sont créées par GRAPHIK (option # 5, voir les figures 1.19 et 1.20 de l'annexe I). Les tableaux présentés ici sont dans un format légèrement différent de ceux générés sur ordinateur.

Pour avoir un aperçu des présentations à l'écran, des intrants et des extrants de chaque routine auxquels on fera allusion tout au long de cette section, se référer à l'annexe I. Le menu principal du logiciel CITERNE est montré à la figure I.1.

5.3.5.1 Sous-routine STAT.EXE (option # 1)

Cette routine permet de calculer la moyenne de la température ambiante et de l'ensoleillement ainsi

que l'écart-type de l'ensoleillement à partir d'un fichier *.ASC. Une fichier *.MOY est ensuite créé, contenant des résultats comme ceux qu'on retrouve au tableau 5.4. On retrouve aux figures 1.2 et 1.3 les paramètres de départ et les résultats à l'écran.

Les moyennes de la HMT et du débit ont aussi été effectuées. On doit cependant ignorer ces résultats pour les données recueillies au CÉRÉR, car on a varié la pression dans le système à quelques reprises. Ces changements dans les conditions d'expérimentation invalident les moyennes.

Résultats partiels du fichier DEC90_60.MOY			
h	Température ambiante (°C)	Moyenne de l'enso. (W/m²)	Écart-type de l'enso.
8	17.5	3.6	1.6
9	18.0	96.5	35.1
10	21.1	336.4	61.0
11	22.6	538.9	78.6
12	23.5	668.3	103.4
13	24.1	762.3	113.8
14	24.3	763.0	129.6
15	24.4	728.8	118.4
16	24.1	636.5	132.2
17	23.8	483.1	105.4
18	22.8	262.0	69.2
19	20.2	56.3	15.9
20	19.4	0.7	0.2

Tableau 5.4 - Moyenne et écart-type des données climatologiques

On doit aussi s'assurer que le courant (I) et la tension (V) ont bien été enregistrés. Il se peut en effet qu'une panne de générateur se produise sans que cela n'affecte la prise des données

météorologiques. Cela rendrait le fichier *.MOY impropre à être utilisé pour le processus de validation de la puissance électrique. Pour vérifier les données contenues dans les fichiers *.ASC, on se servira de la routine GRAPHIK.

Les courbes moyennes peuvent être produites par GRAPHIK dans un format similaire à celles qu'on retrouve aux figures 5.3 et 5.4. La journée-type utilisée dans la conception illustrant les conditions d'environnement est montrée à la figure I.4.

5.3.5.2 Sous-routine SCENARIO.EXE (option # 2)

La routine SCENARIO exécute le calcul de cinq scénarios de disponibilité d'ensoleillement et sauvegarde ces résultats dans un fichier de type *.SCE. Les résultats sont semblables à ceux présentés au tableau 3.1, mais pour toutes les heures de la journée.

A titre de comparaison, on permet l'affichage d'une sixième courbe représentant l'ensoleillement moyen. Cela permet au concepteur d'évaluer les risques liés à l'emploi de la moyenne dans la conception. Par exemple, pour les scénarios de décembre 1990 présentés à la figure 5.8, on constate que la courbe moyenne se situe entre les courbes représentant 5 et 10 % de risque de ne pas atteindre ces niveaux d'ensoleillement.

Les paramètres initiaux requis pour ce calcul sont présentés à la figure I.5 et les changements dans les scénarios de risque sont possibles comme le montre la figure I.6. Les résultats apparaissent à l'écran comme les figures I.7 et I.8 l'illustrent.

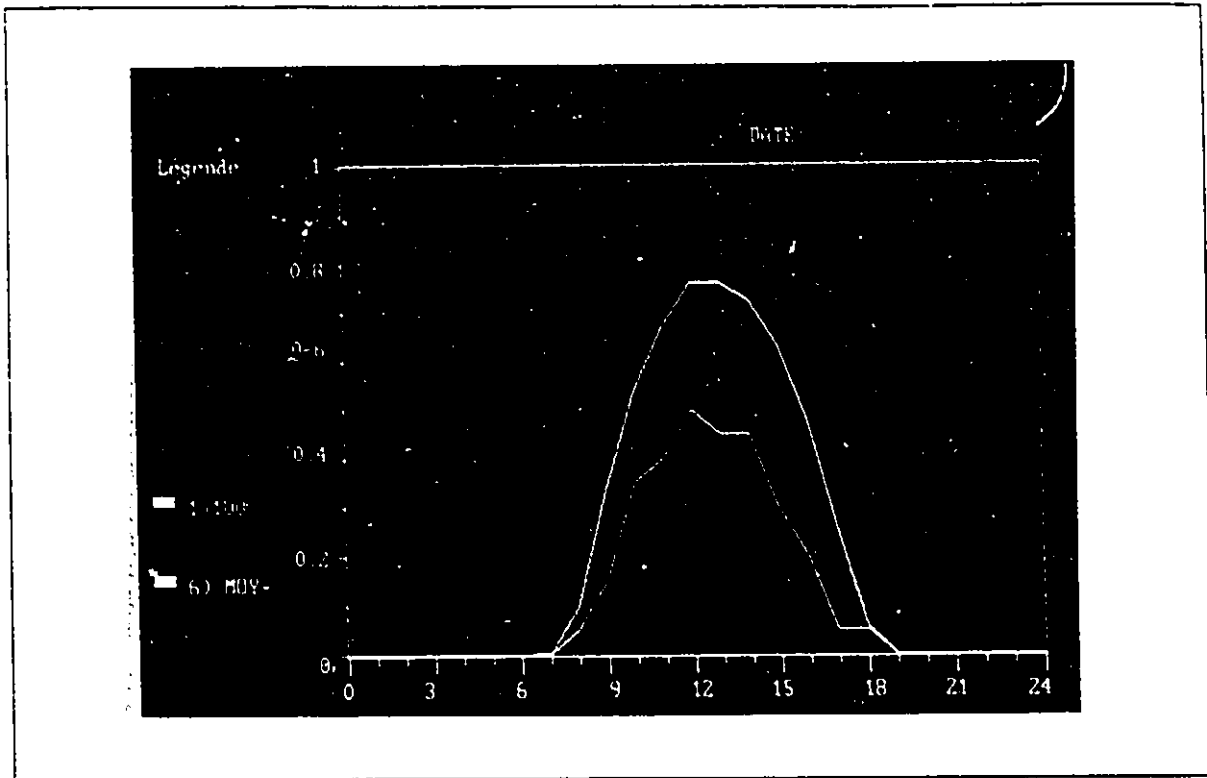


Figure 5.8 - Cinq scénarios de disponibilité d'ensoleillement et la moyenne

5.3.5.3 Sous-routine SYSTEME.EXE (option # 3)

Cette routine calcule la puissance du générateur selon les différents scénarios d'ensoleillement avec le fichier *.SCE créé par la routine précédente. Le calcul se base sur le modèle JPL.

Une fois les données de départ introduites comme à la figure I.9, SYSTEME permet d'abord un processus de validation - si le concepteur le désire et si les valeurs de courant et de tension sont disponibles - pour comparer les puissances théoriques obtenues (avec l'ensoleillement et la température ambiante: modèle JPL) et les puissances empiriques (basées sur l'équation 5.1). Ces résultats sont tabulés au tableau 3.2 et apparaissent à l'écran dans le format de la figure I.10. Le pourcentage de différence entre les puissances théorique et empirique nous permet de voir si le

modèle est adéquat et/ou si les paramètres du générateur sont précis.

A la lumière de ces résultats, il semble qu'en début et fin de journée le modèle théorique ne simule pas très bien le générateur. Après l'étude des données des autres mois, nous concluons que pour des niveaux d'ensoleillement inférieurs à 250 W/m², le concepteur ne doit pas se fier aux résultats du modèle JPL. Pour des niveaux plus élevés, et c'est ce qui nous intéresse, le modèle offre de bons résultats. Ces derniers sont sauvegardés dans un fichier *.PEL. Se référer aux figures I.11 et I.12.

Le fichier des paramètres du générateur FrancePhoton du CÉRÉR se nomme FP_PARAM.GEN comme discuté plus tôt à la section 5.3.3. Tout fichier pour d'autre type de générateur doit comprendre ces paramètres et dans un format précis pour pouvoir être «lisible» par SYSTEME.

Le calcul des débits pour une HMT donnée est maintenant possible grâce aux paramètres de Marquardt stockés dans le fichier TED_ORD3.GMP ou les paramètres pour l'équation du premier degré stockés dans le fichier TED_ORD1.GMP. Les données de départ nécessaires au calcul du débit sont introduites dans la routine comme on le montre à la figure I.13. Le fichier *.DEB contient ces débits pour les différents scénarios.

Le tableau 5.5 résume les résultats (ensoleillement, puissance générée et débit) pour un scénario d'ensoleillement et la moyenne. La HMT à laquelle on a simulé le système est de 25 mètres. Des résultats plus complets sont montrés à la figure I.14. On remarque que le GMP ne débite pas pour des ensoleillements inférieurs à 200 W/m².

5.3.5.4 Sous-routine RESERVE.EXE (option # 4)

On a besoin comme fichiers de départ de la routine RESERVE le fichier des débits pour une

certaines HMT selon les scénarios (*.DEB) ainsi que le fichier des caractéristiques de consommation des utilisatrices (*.VIL). Les intrants nécessaires à la routine sont présentés aux figures 1.15 et 1.16.

Résumé des résultats pour une HMT de 25 mètres						
h	Scénarios d'ensoleillement = 95 %			Ensoleillement moyen		
	Enso (W/m ²)	Puissance (W)	Débit (m ³ /h)	Enso (W/m ²)	Puissance (W)	Débit (m ³ /h)
9	57.2	0.0	0.0	96.5	0.0	0.0
10	314.3	203.3	0.97	336.4	225.0	1.07
11	526.5	399.9	1.91	538.9	410.6	1.96
12	647.4	499.9	2.39	668.3	516.3	2.46
13	743.1	556.9	2.66	762.3	570.3	2.72
14	728.3	546.1	2.61	763.0	570.3	2.72
15	700.4	525.7	2.51	728.8	546.1	2.61
16	576.8	431.4	2.06	636.5	478.4	2.28
17	429.6	306.7	1.46	483.1	353.7	1.69
18	213.0	98.6	0.47	262.0	148.4	0.71
19	76.4	0.0	0.0	56.3	0.0	0.0

Tableau 5.5 - Résultats pour un scénarios et la moyenne de l'ensoleillement

Nous présentons au tableau 5.6 les résultats finaux qui seront expliqués plus en détail au chapitre 6. Les résultats intermédiaires, c'est-à-dire la variation dans le stockage pour chaque heure apparaissent à l'écran et/ou sur l'imprimante (figures 1.17 et 1.18). Ces résultats sont sauvegardés dans un fichier *.VOL.

Poursuivons avec notre installation hypothétique où la HMT est de 25 mètres. La population du village est de 800 âmes qui consomment en moyenne 20 litres/jour/capita. Ajoutons à cela un troupeau de bétail de 50 têtes qui aiment bien avoir leur 35 litres/jour. La demande quotidienne

est donc estimée à 17.75 m³/jour. Après investigations, le comportement des utilisatrices lors du puisage est similaire à celui rencontré à N'diné, i.e. on collecte l'eau le matin et en après-midi.

Une fois ces paramètres introduits dans la routine RESERVE, nous obtenons les résultats tabulés ci-dessous. La valeur maximale de puissance atteinte au cours de la journée est aussi montrée.

Résultats pour un village de 800 personnes à une HMT de 25 mètres						
	Scénarios d'ensoleillement (%)					conditions moyennes
	100	95	90	80	75	
P _{cruc} (W. à 13h)	367.8	556.9	610.7	689.1	725.7	570.3
Débit (m ³ /j)	8.80	17.03	19.31	22.58	24.09	18.22
Volume (m ³)	8.95	9.45	10.76	13.07	14.14	9.81

Tableau 5.6 - Débit quotidien et volume du réservoir requis

Pour l'exercice d'analyse de systèmes existants, où le débit quotidien moyen du GMP se doit d'être égal ou légèrement supérieur à la demande hydrique journalière, on considère que le volume nécessaire à l'installation est le volume obtenu à partir des conditions moyennes d'environnement, 9.81 m³ dans notre exemple. Pour la conception de nouveaux systèmes, on effectue l'étude avec les résultats obtenus pour les différents scénarios de disponibilité d'ensoleillement.

Il peut sembler surprenant à prime abord que la grosseur des équipements requis (générateur et réservoir) augmente avec les risques de pénurie. Il faudra ajuster la taille de ces composantes selon la demande hydrique déterminée auparavant pour le village. On voit clairement que le générateur suggéré pour le scénario de 75 % débite beaucoup plus que ce ne l'est nécessaire tandis que celui du scénario de 100 % est insuffisant pour satisfaire la demande. Il ne faut pas perdre de vue que les investissements reliés au générateur sont plus importants que ceux reliés au réservoir.

Quant on considère ensemble ces deux facteurs, on obtient une courbe comme celle présentée à la figure 5.9, où la courbe des coûts cumulés (excluant le forage) suit la tendance à laquelle on s'attend, c'est-à-dire que plus les risques sont grands, plus les coûts diminuent.

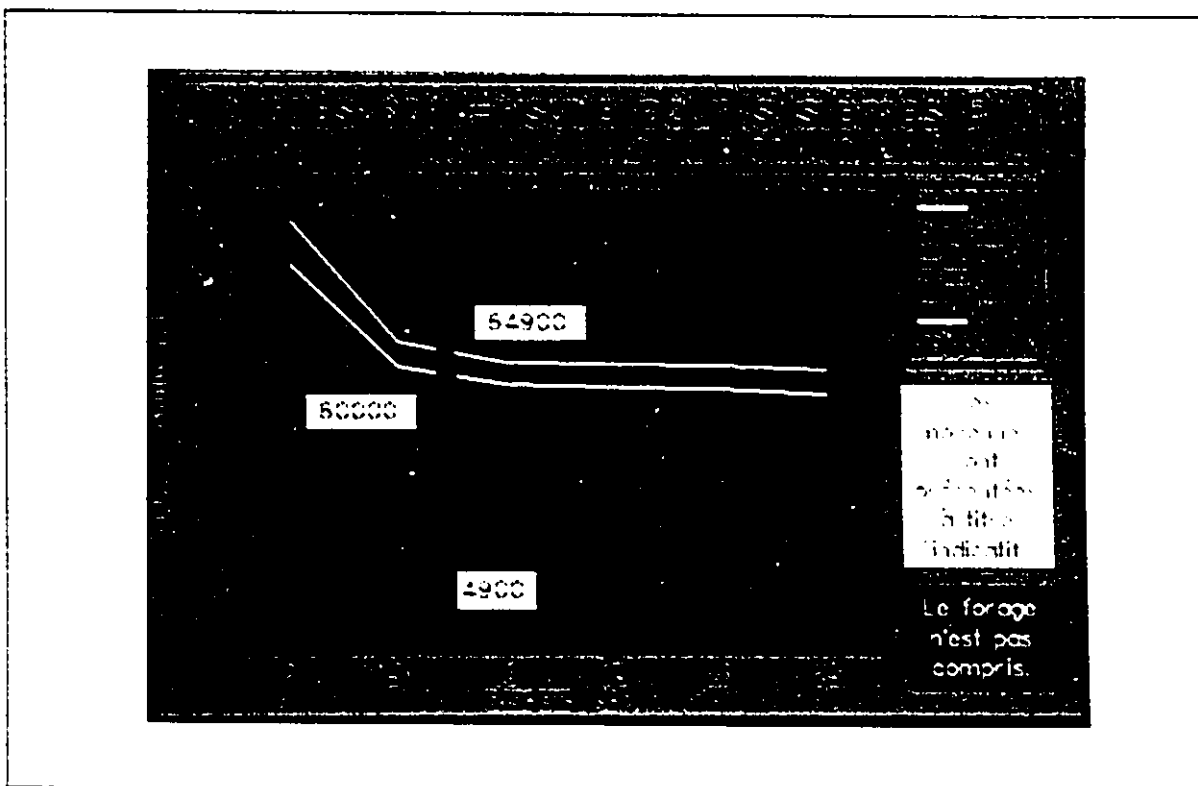


Figure 5.9 - Courbe coût/risque

Les intrants économiques sont dans l'ordre de grandeur de ceux suggérés précédemment dans l'analyse économique de la section 5.3.4. Pour le réservoir, nous avons employé 500 FF/m³. En ce qui concerne les coûts du générateur (et du reste de l'équipement), nous avons utilisé dans notre exemple 100 FF/W_e. Les coûts de forage et d'installation sont les mêmes quelque soit le dimensionnement choisi. Nous expliciterons la procédure à suivre dans le prochain chapitre.

6

Mise en application du logiciel

Le logiciel CITERNE peut être employé de deux façons, soit pour la conception du réservoir de nouveaux systèmes, soit pour l'analyse de systèmes existants. Un organigramme décisionnel est présentée à l'annexe III.

6.1 Diagnostic d'installations existantes

Le logiciel CITERNE permet l'analyse d'installations et suggère le volume d'eau qui devrait être stocké sur site. Le site typique pour ce genre d'analyse en est un où on aura par le passé expérimenté des débordements répétés du réservoir, entraînant des gaspillages de ressource en eau qui se traduisent par des privations pour les villageois et/ou des pertes d'argent.

Si, à l'inverse, des pénuries d'eau sont fréquentes sur ce site, le problème n'est pas relié à la taille du réservoir mais au sous-dimensionnement du reste du système.

Pour effectuer l'analyse d'un système où le réservoir est mal dimensionné, on doit dans un premier temps, s'assurer que les performances du générateur et du GMP sont à des niveaux satisfaisants. Une campagne de mesures doit être effectuée sur site, où les caractéristiques de courant, de tension, d'ensoleillement, de pression et de débit sont enregistrées. Les équations empiriques utiles ont été présentées à la section 5.2. Habituellement, le rendement global varie entre 25 et 32 % pour des heures où l'ensoleillement est supérieur à 500 W/m^2 [18,42].

Si le rendement global est acceptable, on peut affirmer que les débordements du réservoir sont causés soit par la trop petite taille de la cuve, soit par les pratiques courantes de puisage et de gestion de la pompe.

Si les besoins en eau sont satisfaits même avec les débordements, le responsable de la pompe n'a qu'à arrêter la pompe lorsque le réservoir est plein et la repartir si on a encore besoin d'eau et que l'ensoleillement le permet. On pourra installer une conduite de trop-plein telle que discuter précédemment à la section 2.2.4.1. Le générateur et le GMP ont été de toute évidence surdimensionnés et on pourra avantageusement chercher à changer (ou échanger si cela est possible) ces équipements pour d'autres plus modestes. Lorsque la demande hydrique n'est pas respectée et que des gaspillages d'eau se produisent, on doit alors songer à doter le site d'un réservoir complémentaire. CITERNE peut alors être utile pour déterminer la taille de ce réservoir.

On fournira d'abord à la routine STAT les données recueillies lors d'une campagne de mesure, qui se tiendrait idéalement lors d'une période où des débordements sont prévisibles. La période de collecte de données se doit d'être suffisamment longue pour représenter correctement les conditions habituelles d'opération. Au Sénégal, on a déjà installé des instruments de mesure et un Modas sur site (arrangement similaire à celui du CÉRÉR), permettant une étude étalée sur plusieurs jours avec un minimum de supervision. A tout le moins, on se contentera de données horaires obtenues avec des appareils portatifs à lecture visuelle pour une journée. Cela deviendra notre journée-type (fichier *.MOY) si on a confiance dans les valeurs enregistrées. On pourra comparer cette journée avec des données déjà compilées à l'échelle du pays.

Des contraintes informatiques nous imposent l'utilisation de SCENARIO, même si nous n'avons besoin que des conditions moyennes d'environnement et non des scénarios de disponibilité de l'ensoleillement pour l'exercice de diagnostic.

Avec les fichiers adéquats contenant les paramètres du générateur (*.GEN) et du groupe moto-pompe (*.GMP), la routine SYSTEME calcule les valeurs théoriques de la puissance générée et du débit produit. On pourra comparer ces résultats avec ceux obtenus sur le terrain.

Enfin, RESERVE estime la taille du réservoir nécessaire avec les paramètres de comportement au puisage (*.VIL) bien précis. La taille du réservoir complémentaire sera la différence entre ce résultat et le cubage du réservoir en place. Si cette différence est peu importante, quelques m³, la construction d'un bassin de reprise, non couvert et non surélevé, pourrait s'avérer une solution économique. Cette eau pourra servir aux usages autres que la consommation humaine (pour le bétail, le lavage, etc...)

6.2 Prédiction de la taille du réservoir

Le logiciel CITERNE a été développé dans le but d'éviter non seulement les débordements mais aussi le sur-dimensionnement du réservoir d'eau. Dans les deux cas, des pertes de capitaux importantes pourront être évitées aux communautés villageoises. Le logiciel pourra être employé dès la phase initiale de dimensionnement des composantes de nouvelles installations de pompage PV. A partir d'une première estimation pour le générateur et le GMP avec les méthodes de conception traditionnelles, on déterminera la taille du réservoir d'eau. En se basant ensuite sur des critères économiques, on pourra décider de la taille du réservoir et apporter des corrections, si nécessaires, à la taille du générateur et du GMP.

Reprenons l'étude de cas citée précédemment, où un village des environs de Dakar est composé de 800 personnes et d'un troupeau de 50 bêtes. La HMT est estimée à 25 mètres. La conception doit d'abord commencer avec une étude des moyennes horaires et/ou des moyennes quotidiennes (par exemple, le tableau 6.1, représentant des données compilées pour Dakar de 1974 à 1979 et

1981 [38]). Les mois les moins ensoleillés (décembre et janvier) ainsi que ceux très ensoleillés (avril et mai) sont les plus intéressants en ce qui concerne les risques de pénuries ou de débordements d'eau. Notons qu'un facteur d'inclinaison doit être appliqué puisqu'il s'agit ici de rayonnement global horizontal. Ces facteurs d'inclinaison, qui varient selon le mois et la latitude, nous permettent d'ajuster ce rayonnement global selon l'angle d'inclinaison du champ PV de l'éventuel site [8].

Une augmentation importante de la population est à prévoir. A Mérina-Dakhar, on a constaté une augmentation de 25% en trois ans [42]. La croissance démographique n'est pas seulement en cause mais aussi un transfert de la population environnante vers le village a eu lieu à la suite de la mise en route de la station de pompage. Du fait de la facilité d'avoir de l'eau à une borne fontaine, plutôt qu'au puisage manuel, on doit aussi s'attendre à une augmentation de la consommation per capita. Finalement, les migrations saisonnières de troupeaux doivent être dûment considérées.

Une enquête sur le futur site permet d'évaluer ces paramètres de consommation de même que le comportement de puisage actuel des consommatrices, même si on peut s'attendre à des changements importants avec l'introduction d'une pompe solaire. De plus, un test de forage nous permettra d'estimer l'exhaure permmissible ainsi que le rabattement de l'aquifer. Une campagne de mesures du type de celle décrite à la section 6.1 (ensoleillement et température ambiante) complètera la collecte des informations dont on aura besoin pour la conception.

Avec une bonne connaissance de ces facteurs, l'estimation du générateur, de l'onduleur et du GMP requis pour le site est possible avec les méthodes de conception généralement acceptées. Ce sont les paramètres de ces équipements qu'on retrouvera dans les fichiers de données (*.GEN et *.GMP) utilisés par CITERNE. C'est à ce point que logiciel nous offre un complément d'information en tenant compte de la nature stochastique de l'ensoleillement et donc des risques inhérents qu'encourent un système PV.

Variation de la radiation globale horizontale (W/m ²) à Dakar de 1974 à 1981, sauf 1980												
Heure	janv.	fev.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
5-6	1	1	1	2	5	6	6	3	1	0	0	1
6-7	18	38	60	86	101	94	84	77	57	41	22	13
7-8	150	227	257	300	303	268	240	241	220	221	173	132
8-9	344	459	493	531	521	478	409	418	406	432	375	311
9-10	518	650	688	730	702	651	550	556	568	616	555	481
10-11	649	790	827	867	838	775	644	674	664	751	684	604
11-12	713	864	901	939	900	834	696	751	721	817	744	673
12-13	719	860	909	942	902	838	711	755	725	819	741	671
13-14	649	798	833	872	834	759	665	702	678	755	681	608
14-15	537	660	696	738	705	639	553	583	579	621	564	468
15-16	364	469	498	539	521	481	415	436	414	439	388	325
16-17	178	251	275	311	308	290	258	247	245	232	185	156
17-18	16	28	40	58	70	65	59	51	41	27	29	22
18-19	1	1	1	3	7	9	9	6	1	0	0	1
Radiation quotidienne moyenne (kWh/m ²)												
	4.9	6.1	6.5	7.0	6.8	6.2	5.3	5.5	5.3	5.8	5.1	4.5

Tableau 6.1 - Données de rayonnement [38]

La procédure de conception est la même que celle décrite à la section précédente sauf qu'ici une étape supplémentaire est ajoutée, impliquant le processus décisionnel. Nous débutons donc avec les routines STAT et SCENARIO, qui calculent la disponibilité de l'ensoleillement pour le site étudié. Pour chacun de ces scénarios d'ensoleillement, la puissance générée et le débit produit à chaque heure sont déterminés avec la routine SYSTEME. Finalement, la routine RESERVE calcule le volume (en m³) du réservoir d'eau. Les résultats sont similaires à ceux qui ont été obtenus précédemment au tableau 5.6 pour l'étude de cas qui nous intéresse.

On reprend au tableau 6.2 ces résultats pour la puissance, le débit et le volume pour illustrer la fin du cheminement qu'on doit suivre pour concevoir le générateur et le réservoir. Les valeurs de P_{crit} ont été ajustées pour refléter des puissances qu'on peut retrouver sur le marché (multiples de 40 Watts/panneaux).

Processus de sélection de la taille du générateur et du réservoir						
Demande = 18 m ³ /j	Scénarios (%)					Moyenne
	100	95	90	80	75	
P_{crit} (W)	400	560	640	720	760	600
Débit (m ³ /j)	8.8	17.0	19.3	22.6	24.1	18.2
Volume (m ³)	9.0	9.5	10.8	13.0	14.2	9.8
Facteur multiplicatif	2.10	1.10	0.90	0.79	0.75	1
P_{crit} requise (W)	840	620	580	570	560	600
Coût générateur (FF)	84000	62000	58000	57000	56000	60000
Volume ajusté (m ³)	19.0	10.5	9.7	10.3	10.7	9.8
Coût réservoir (FF)	9500	5250	4850	5150	5350	4900
% du total	5.2	3.3	3.2	3.4	3.5	3.2
Coût forage, etc... (FF)	90000	90000	90000	90000	90000	90000
Coût total (FF)	183500	157250	152850	152150	151350	154900
Risque (%)	0	5	10	20	25	5 - 10

Tableau 6.2 - Processus décisionnel pour la conception

Pour satisfaire la demande quotidienne (18 m³/j dans notre exemple), la taille du générateur et du GMP suggérée pour les différents scénarios doit être adaptée pour fournir le débit nécessaire. Pour le scénario de 100% par exemple, où le système ne produit que 8.8 m³/j, on devra un peu plus que doubler la puissance disponible (par 2.10) pour rendre ce système adéquat. Les coûts liés au

générateur (incluant l'onduleur et le GMP) sont enfin trouvés en utilisant la valeur de 100 FF/W_e. Similairement, le volume du réservoir d'eau est ajusté pour satisfaire les exigences du nouveau système. L'estimation pour un réservoir cylindrique en béton de 500 FF/m³ est employée. Le coût du forage et des installations de génie civil connexes est le même quel que soit le scénario. Le coût total du système (en FF) est finalement trouvé pour chaque scénario. Le choix du système peut ensuite être effectué avec les courbes coût-risque comme celles de la figure 5.9 (le coût du forage n'est pas représenté sur cette courbe).

Les pourcentages des coûts reliés au seul réservoir peuvent sembler bas, mais rappelons que souvent un forage ou un puit est déjà exploitable (c'est-à-dire que l'exhaure permmissible est suffisante) ce qui allège le fardeau financier de quelques 60000 FF. Le coût du réservoir peut alors représenter de 9 à 13 % de l'investissement total. Gardons aussi présent à l'esprit la pratique courante des agences de financement qui consiste à prendre à leur charge le plus gros des investissements initiaux (générateur, etc...) et de laisser au village les frais de construction et d'installation des accessoires dits "statiques", tel le réservoir.

On voit donc l'importance de la courbe définissant les coûts versus les risques pour le dimensionnement du réservoir. A titre d'exemple, on peut voir que les coûts tombent de presque de moitié lorsqu'on passe d'un scénario sans risque à un scénario qui comporte 5 % de risque, ce qui est encore acceptable. Au concepteur d'évaluer correctement les contraintes et surtout d'impliquer le comité villageois dans le processus décisionnel.

Conclusions et recommandations

A la lumière de tout ce qui a été avancé dans les chapitres précédents, nous croyons utile de présenter les conclusions auxquelles nous sommes arrivées et d'ajouter des recommandations le cas échéant. Nous rappellerons les résultats principaux de notre travail et tenterons ensuite d'ouvrir des perspectives sur certains aspects qui mériteraient des recherches approfondies.

Le logiciel informatique CITERNE a été développé pour optimiser la taille du réservoir dans un système de pompage photovoltaïque. Cet outil de conception et d'analyse exécute les tâches suivantes: la lecture des intrants pertinents au dimensionnement, le traitement et la validation de ces intrants grâce à des modèles théoriques et finalement la présentation - et la sauvegarde - des extrants pour enclencher le processus décisionnel. Le détail de ces tâches est comme suit:

INTRANTS:

- i) les paramètres d'environnement (température ambiante et ensoleillement) à partir d'un fichier de texte (mode ASCII);
- ii) les autres paramètres définissant les conditions d'opération (HMT) et les performances (courant, tension, débit), si disponibles;
- iii) les caractéristiques techniques des équipements (GMP et générateur) ainsi que le prix unitaire (exemple: $FF/W_{crée}$);
- iv) le comportement des utilisatrices au(x) point(s) de puisage ainsi que la population et le bétail (et leur consommation respective).

TRAITEMENT:

- i) exécute les moyennes des paramètres disponibles permettant ainsi de définir une journée-type pour la période à l'étude;
- ii) calcule la disponibilité de l'ensoleillement pour chaque heure de la journée-type;

- iii) calcule la puissance électrique théorique produite par le générateur PV et offre une comparaison avec la puissance empirique obtenue à partir des intrants de tension et de courant, s'ils sont disponibles;
- iv) trouve le débit du GMP à partir de la puissance du générateur pour chaque scénario d'ensoleillement;
- v) calcule le volume du réservoir requis pour chacun des scénarios d'ensoleillement et de la moyenne.

EXTRANTS:

- i) le volume du réservoir bien entendu;
- ii) les courbes coûts versus risque pour permettre le processus décisionnel;
- iii) une routine permet l'affichage des données horaires, des moyennes calculées et des scénarios de disponibilité de l'ensoleillement.

En ce qui a trait au projet lui-même, l'importance d'une méthode de dimensionnement précise pour le réservoir d'eau dans les systèmes de pompage PV a été mise en évidence. Puisque les investissements pour le réservoir sont très souvent à la charge des villageois-es, un effort pour optimiser la taille de cette composante est souhaitable. Une méthodologie simple et efficace a été élaborée pour faciliter l'analyse et la conception de systèmes de pompage PV. Les résultats permettent au concepteur d'optimiser la taille des composantes selon les capitaux disponibles.

Il faut noter cependant que la taille du réservoir d'eau peut être adéquate sur certains sites et si des problèmes sont expérimentés, la gestion du pompage et/ou les habitudes des consommateurs sont en cause. Le logiciel mettra en évidence ce genre de problèmes.

L'analyse de dimensionnement des composantes employée dans cette thèse est basée sur des pratiques courantes de conception. La nouveauté réside dans l'utilisation d'une approche qui tient compte du comportement aléatoire de l'ensoleillement, ce qui se traduit, pour les utilisateurs, par une diminution des risques de malfonctionnement.

L'approche statistique employée dans ce travail de recherche s'est avérée un outil qui produit

des résultats très satisfaisants. Il est donc souhaitable que ces techniques soient plus répandues et qu'elles servent éventuellement pour le dimensionnement de composantes qu'on retrouve dans les systèmes photovoltaïques autres que ceux dédiés au pompage.

L'emploi de données horaires et de journée-type a permis une analyse plus fine du comportement des systèmes PV que celles habituellement utilisées dans la conception, où on traite plutôt des données quotidiennes ou même mensuelles.

Les efforts pour évaluer le potentiel solaire dans les pays du Sahel, et d'autres où le soleil ne manque pas, doivent être encouragés afin de mettre à la disposition du concepteur le genre de données susceptibles de mieux définir les conditions dans lesquelles les systèmes PV opèrent. Un projet météorologique de la sorte est d'ailleurs en route présentement au Sénégal.

Finalement, le logiciel CITERNE développé dans ce travail offre la souplesse nécessaire pour permettre l'étude de divers équipements dans des conditions d'opération qui peuvent aussi varier. On pourra donc prédire les performances des équipements pour un site donné, ce qui implique que des campagnes de mesure doivent avoir lieu et que les paramètres des équipements doivent être connus. Il sera intéressant d'analyser quelques systèmes existant au Sénégal pour valider les résultats obtenus avec CITERNE et comparer ces résultats avec les méthodes de dimensionnement traditionnelles.

Le logiciel CITERNE prend peu de place de mémoire sur un ordinateur, ce qui permet son utilisation sur site avec un ordinateur portable. En se servant des scénarios de disponibilité de l'ensoleillement calculés par CITERNE, on peut facilement bâtir ses propres routines pour la simulation d'autres sources d'énergie - comme l'éolienne - et d'autres appareils électriques, que ce soient des lampes, des chargeurs de batteries ou des réfrigérateurs.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Le pompage photovoltaïque*
Bernard Chabot
Agence française pour la maîtrise de l'énergie - AFME
Valbonne, 1987

- [2] *Le pompage solaire photovoltaïque; 13 années d'expériences et de savoir-faire au Mali*
AFME, Direction nationale de l'hydraulique et de l'énergie (Mali) et
Ministère de la coopération et du développement
France, 1991

- [3] *Notions de base sur les convertisseurs photovoltaïques; notes de cours*
J. A. Roger
Université Claude Bernard
Lyon, 1988

- [4] *Conception des systèmes photovoltaïques*
Marbek Resources consultants, Darentek corp. & Ward and ass.
Énergie, mines et ressources Canada
Ottawa, 1989

- [5] *Le pompage photovoltaïque et l'approvisionnement en eau*
Michel Courillon
AFME
Paris, 1990

- [6] *Fiche technique: Réservoir en béton de 18 m³*
Antoine Farcot
Centre d'études et de recherches sur les énergies renouvelables
Dakar, 1988

- [7] *Ferrocement Water Tanks*
S. B. Watt
Intermediate Technology Publications Ltd.
London, 1978

- [8] *Solar Water Pumping*
J. Kenna & B. Gillett
Intermediate Technology Publications Ltd.
London, 1985

- [9] *Solar Cell Design Handbook vol. 11*
Jet Propulsion Laboratory
Pasadena, CA, 1976
- [10] *A Probabilistic Approach to PV Generator Performance Prediction*
M. A. Khallat & S. Rahman
IEEE Transactions on Energy Conversion
Vol. EC-1, no. 3, September 1986
- [11] *Le dimensionnement de systèmes PV standard à l'aide du bilan énergétique*
Andréas Wagner
Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit - GTZ
Projet Sénégal-Allemand, octobre 1988
- [12] *Étude et simulation des performances réelles sur une longue période des systèmes de pompage photovoltaïque au fil du soleil*
A. Hamidat
Centre de développement des énergies renouvelables - CDER
Alger, 1989
- [13] *Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'identification sans jamais oser le demander*
F. P. Neirac & P. Nolay
École nationale supérieure des mines de Paris
- [14] *SAS User's Guide: Statistics*
version 6.03, for Personal Computers
Statistical Analysis System Institute
North Carolina, 1990
- [15] *Analyse du fonctionnement des installations de pompage PV de Dargol et Bandio, Niger*
J. M. Servant
AFME, 1984
- [16] *Water Supply Engineering Design*
M. A. Al-Layla, S. Ahmad & E. J. Middlebrooks
Ann Arbor Science, 1977
- [17] *Montage et réalisation d'un banc d'essais de qualification de pompe solaires PV*
A. Farcot & L. Hoang-Gia
CÉRÉR
Dakar, février 1988

- [18] *Essais de caractérisation de la pompe immergée Grundfos de Ndieurba*
A. Farcot
CÉRÉR
Dakar, décembre 1990
- [19] *Basic Photovoltaic Principles and Methods*
Solar Energy Research Institute
Van Nostrand Reinhold, 1984
- [20] *Solar Photovoltaic Products*
A. Derrick, C. Francis & V. Bokalders
Intermediate Technology Publications, 1989
- [21] *Solar Cells*
M. A. Green
Prentice Hall, 1982
- [22] *Optimisation du pompage photovoltaïque au Sahel: cas du Mali et du Sénégal*
M. Souare
Université d'Ottawa, 1989
- [23] *Systèmes photovoltaïques pour les pays en voie de développement*
T. Fogelman
Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, 1982
- [24] *The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position*
J. J. Michalsky
Solar Energy, vol. 40 (p. 227-235) 1988
- [25] *Performance Analysis of DC Motor-PV Converter Systems*
J. Appelbaum & J. Bany
Solar Energy, vol. 22 (p. 439-445) 1979
- [26] *An Introduction to Solar Energy for Scientists and Engineers*
S. Wieder
John Wiley & Sons, 1982
- [27] *Determination of Solar Cell Equation Parameters from Empirical Data*
A. Braunstein, J. Bany & J. Appelbaum
Energy Conversion, vol. 17, p. 1-6, 1977

- [28] *Characterization of PV Array Output Using a Small Number of Measured Parameters*
S. Singer, B. Rozenstein & S. Surazi
Solar Energy, vol. 32, p. 603-607, 1984
- [29] *Solar Cell Array Design Handbook*
H. S. Rauschenbach
Van Nostrand Reinhold Co., 1980
- [30] *Jacuzzi Solar Flow Pump Systems*
Data Sheets
- [31] *Final Report on Development of Photovoltaic Powered Shallow Well Pumping Systems*
C. E. Norman, C. Robins & B. G. Keefer
TPK Solar Systems Inc., 1984
- [32] *Small-Scale Solar Powered Pumping Systems*
Sir William Halcrow and Associates
Intermediate Technology Power Ltd, 1983
- [33] *Hydraulique urbaine, tome 2*
A. Dupont
Éditions Eyrolles, 1971
- [34] *Small Community Water Supply*
E. H. Hofkes, editor
John Wiley & Sons, 1983
- [35] *Enquête auprès des utilisateurs de la station de pompage solaire de Médina-Dakhar*
A. Farcot
CÉRÉR
Dakar, 1988
- [36] *Learning from Success: Photovoltaic-Powered Water Pumping in Mali*
Meridian Corporation & IT Power Ltd.
1990
- [37] *Systèmes de pompage photovoltaïque*
Total Énergie Développement - TED
Document technique

- [38] *Évaluation du potentiel éolien et solaire au Sénégal: exploitation des données disponibles en 1983*
B. S. Sy & A. Gauthier
CÉRÉR - AFME
Dakar, 1983
- [39] *Étude des caractéristiques de composants photovoltaïques*
H. Meunier
École nationale supérieure des mines de Paris
Sophia-Antipolis, 1988
- [40] *Pompes solaires de forage TSP série 4000*
Documents techniques
- [41] *Estimation sur une longue période des performances de systèmes de pompage PV au fil du soleil*
D. Mayer & A. Hamidat
AFME - ARMINES, 1990
- [42] *Projet de réhabilitation de la station de pompage solaire de Médina-Dakhar*
A. Farcot
CÉRÉR
Dakar, juillet 1989
- [43] *Two-Stage Electrical Array Reconfiguration Controller for PV-Powered Water Pump*
Z. Salameh, A. K. Mulpur & F. Dagher
Solar Energy, vol. 44, p. 51-56, 1990

Annexe I - Exemple de conception

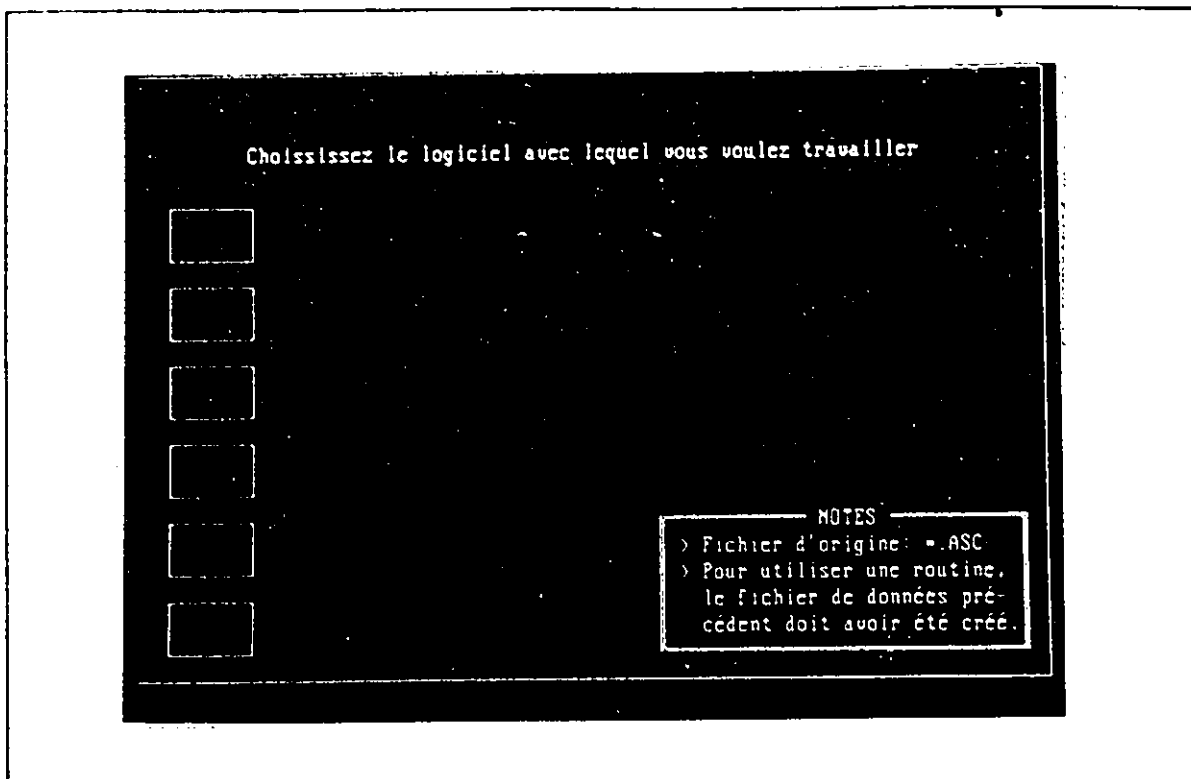


Figure I.1 - Menu principal du logiciel CITERNE

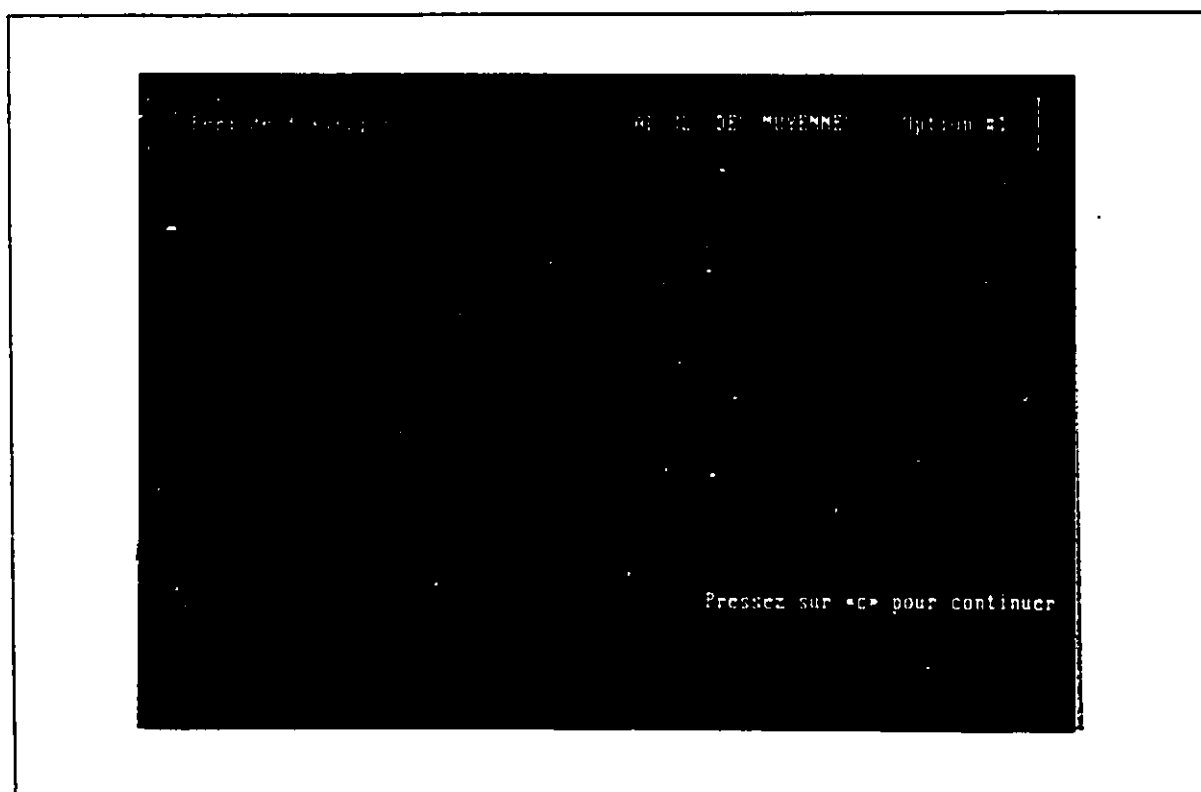


Figure I.2 - Données initiales pour la sous-routine STAT

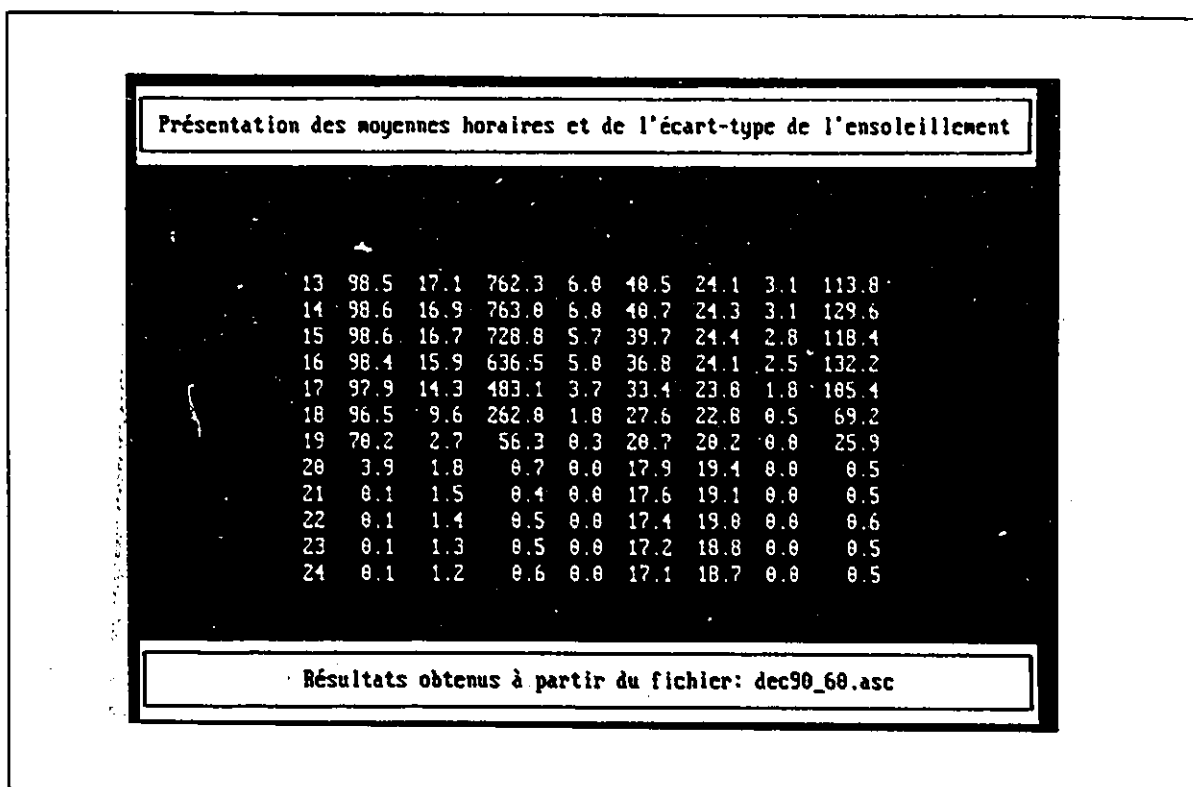


Figure I.3 - Tableau des moyennes de 13 à 24 heure avec STAT

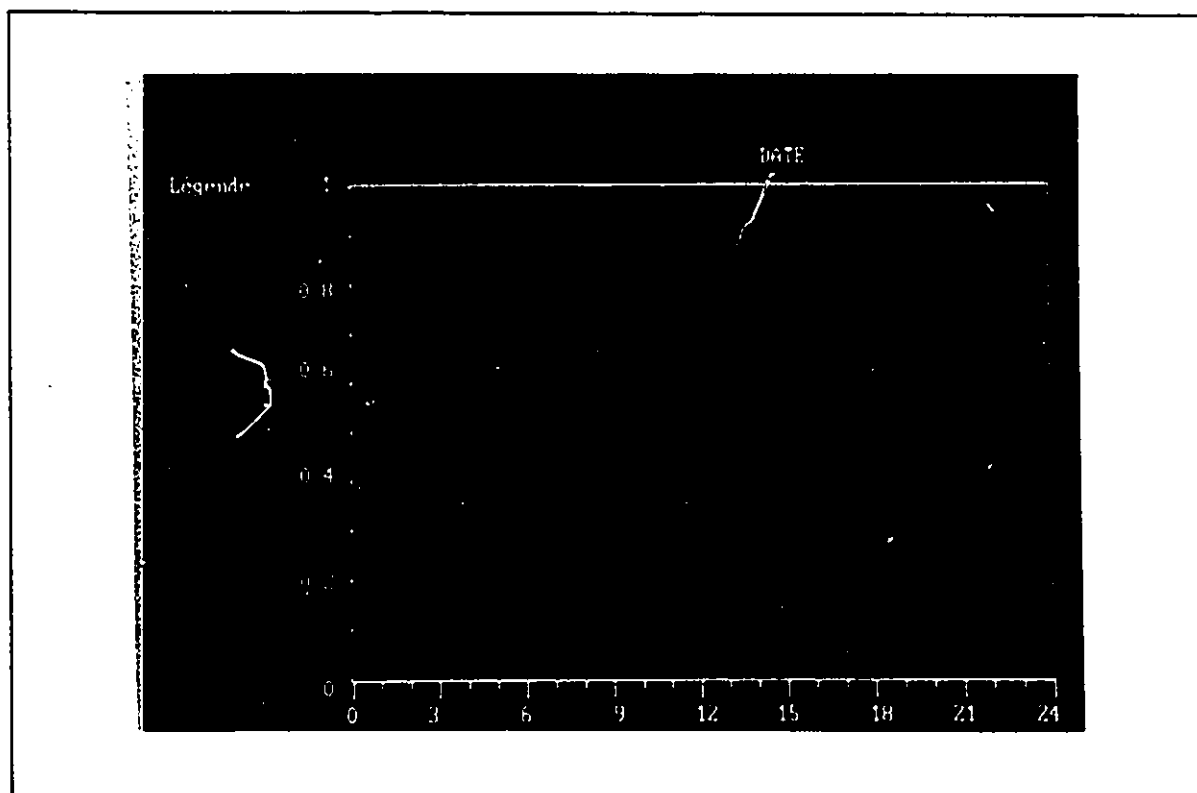


Figure I.4 - Paramètres d'environnement pour la journée-type de décembre

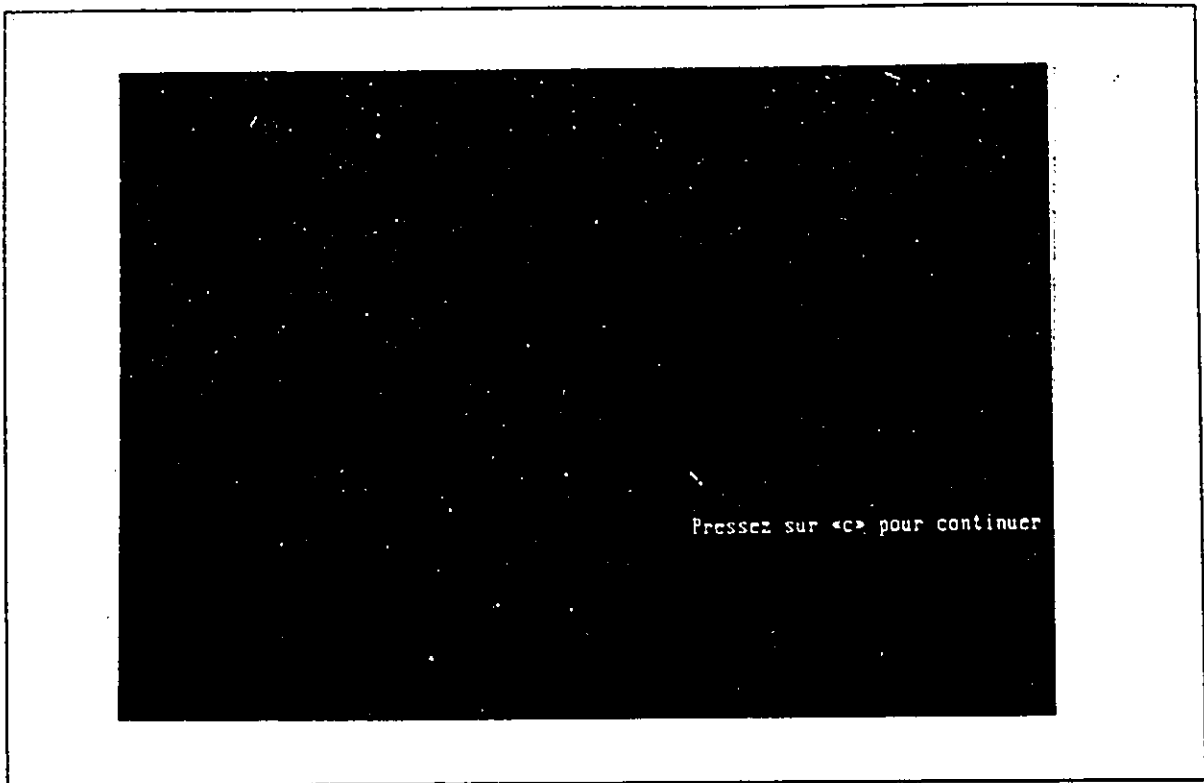


Figure I.5 - Données initiales pour la sous-routine SCÉNARIO

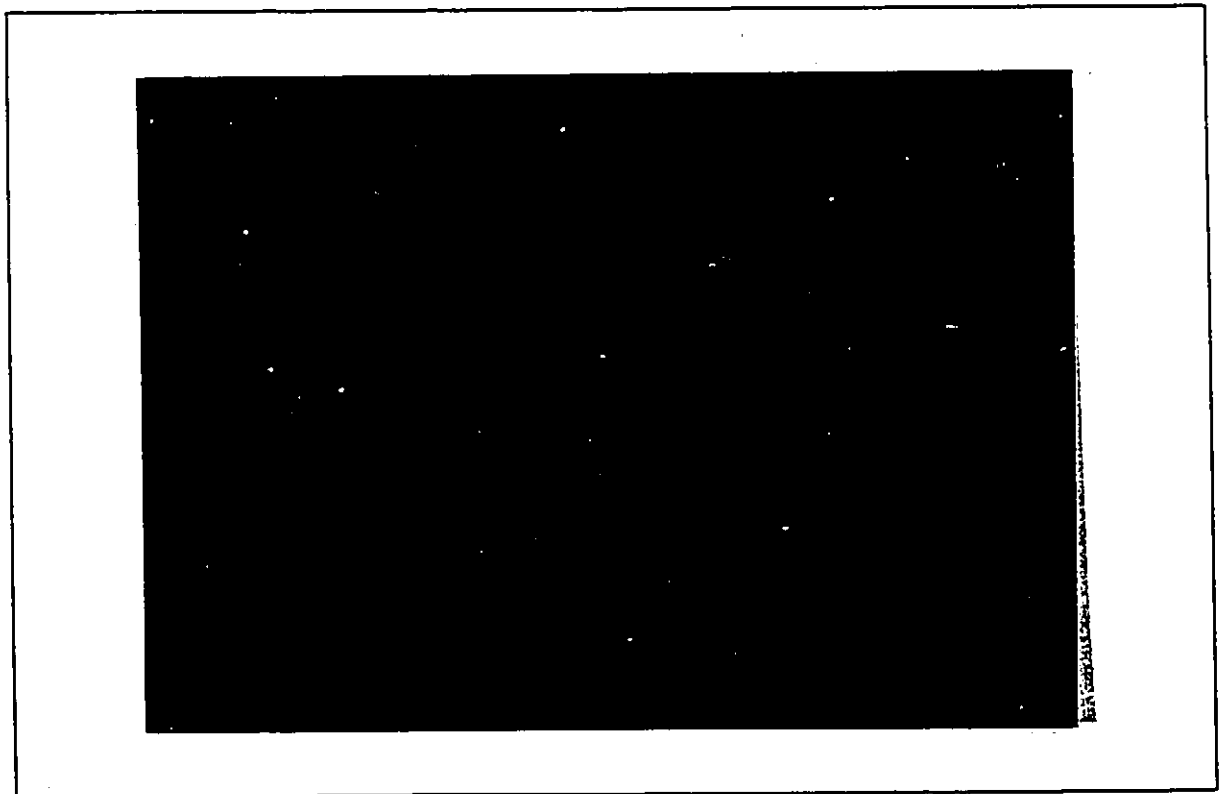


Figure I.6 - Sélection des scénarios à étudier

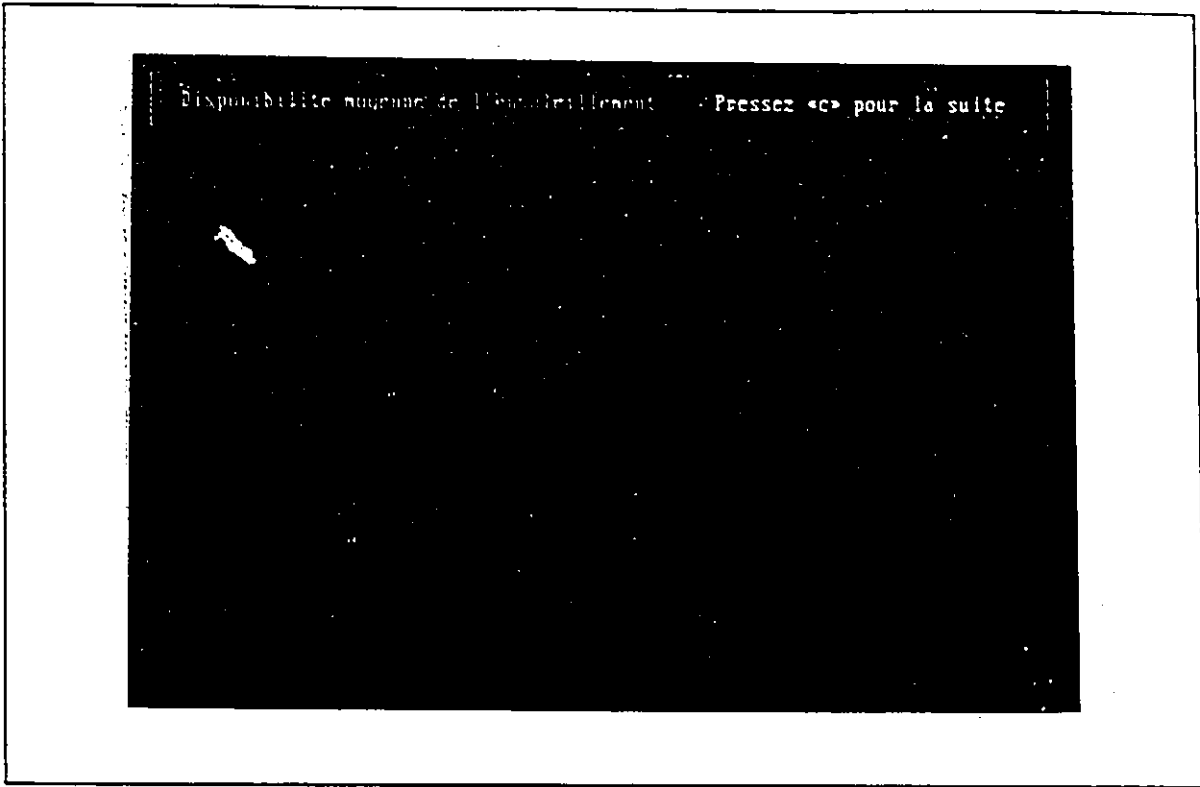


Figure I.7 - Résultats pour les trois premières heures de la journée

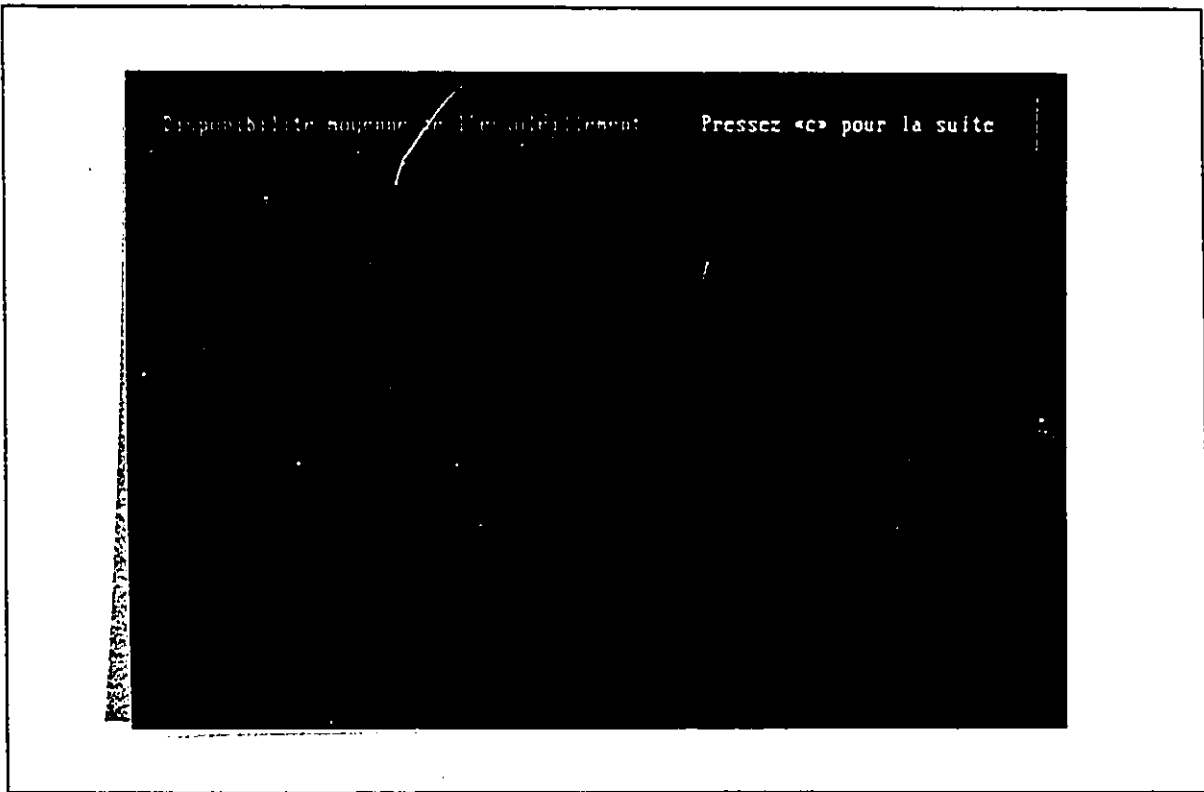


Figure I.8 - Résultats pour les deux dernières heures de la journée

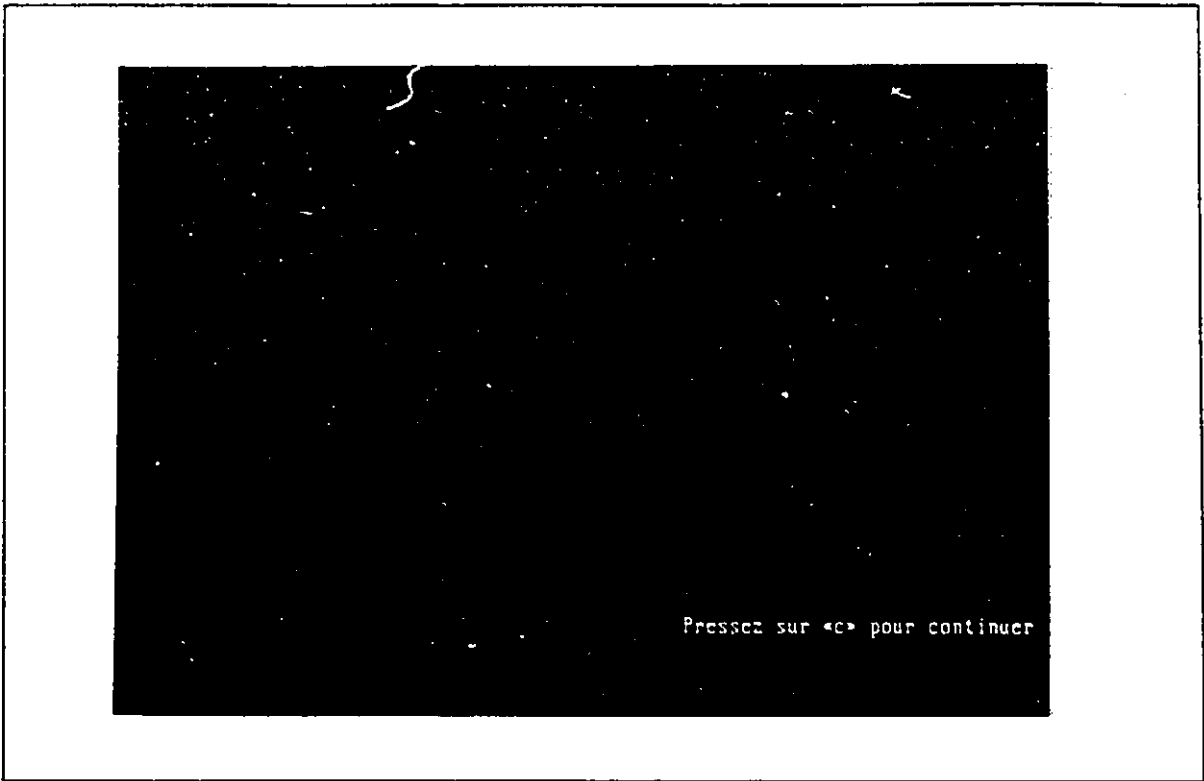


Figure I.9 - Données initiales pour la sous-routine SYSTEME

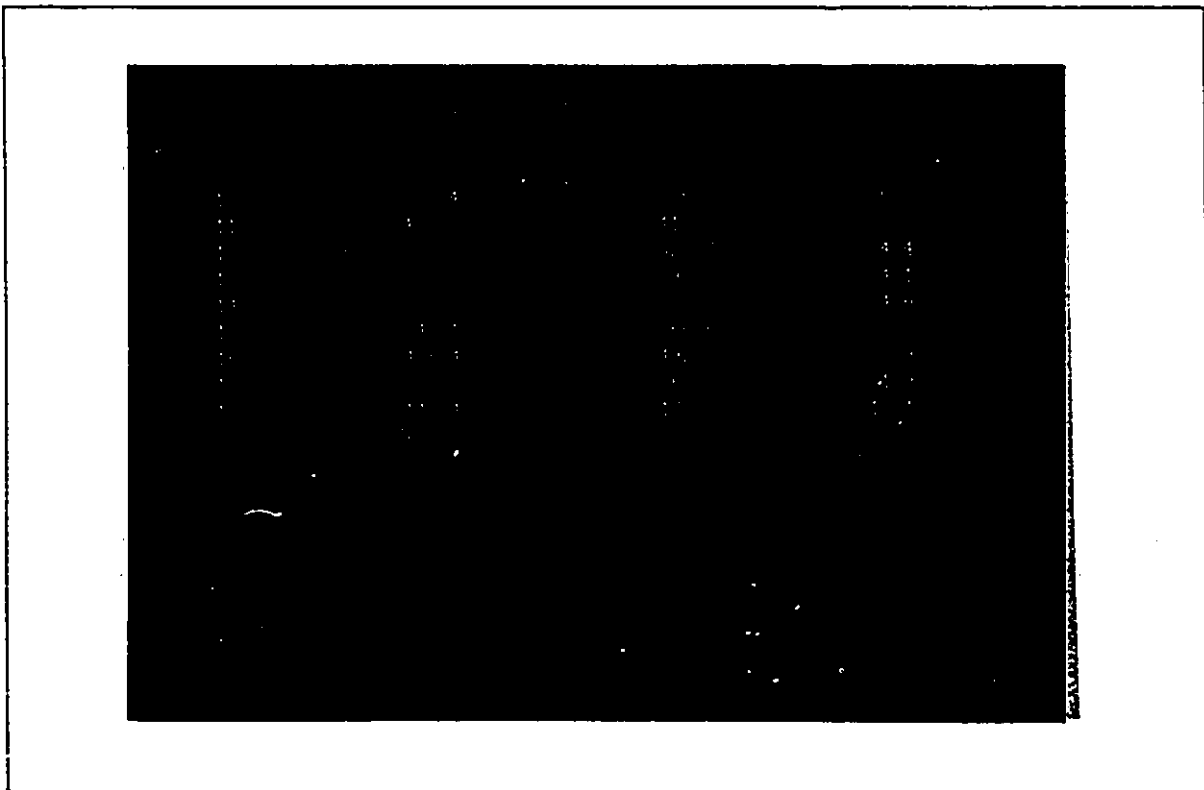


Figure I.10 - Résultats de la validation pour la puissance (W)

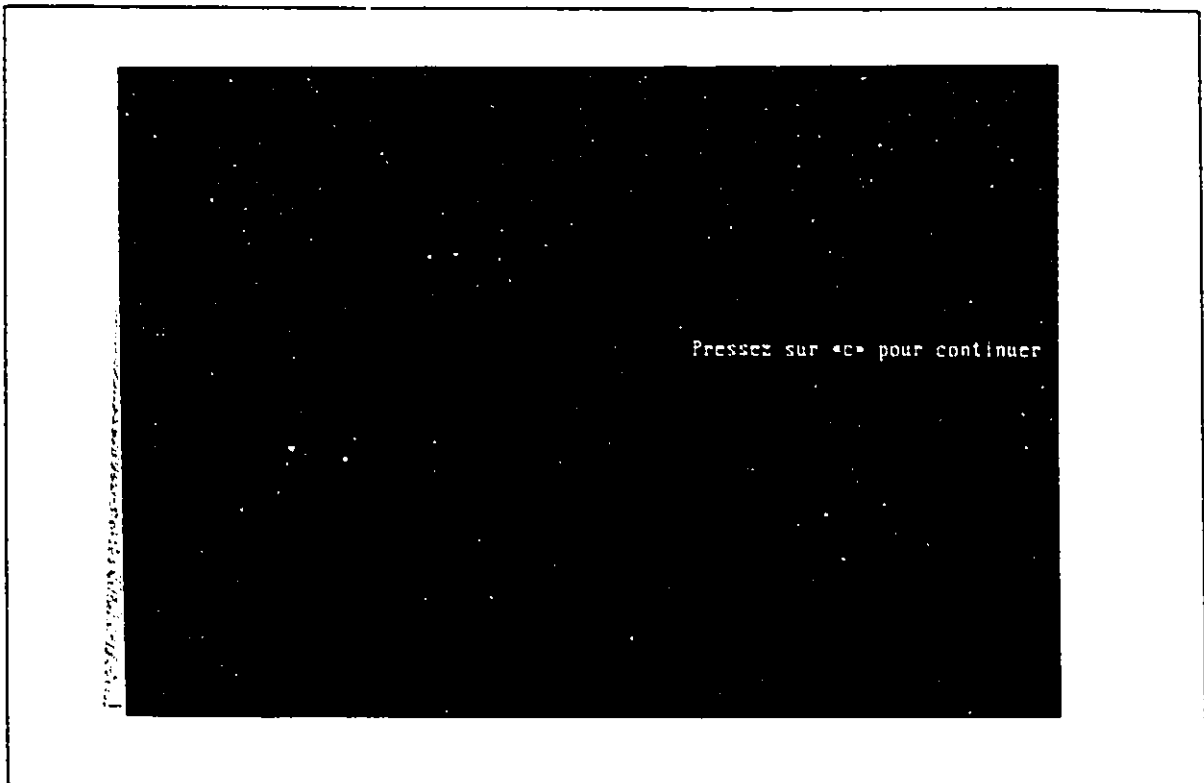


Figure I.11 - Lecture du fichier des scénarios d'enseleillement

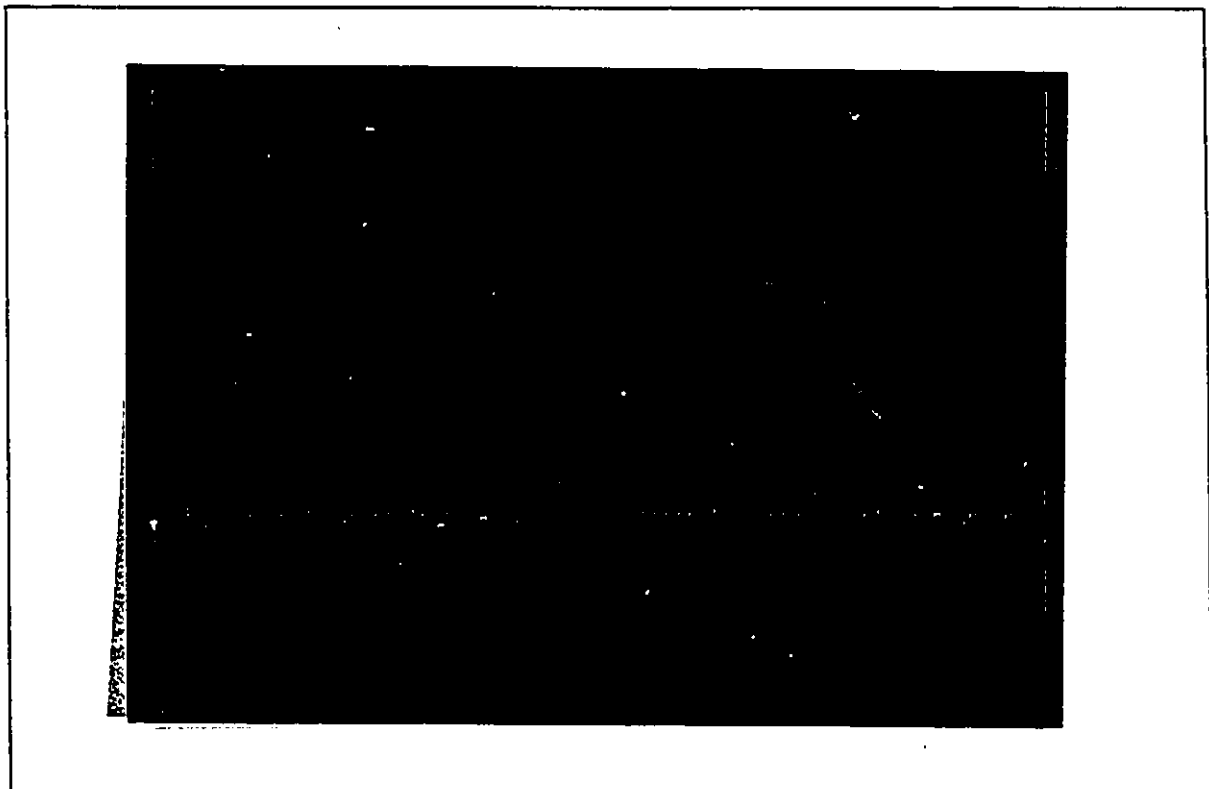


Figure I.12 - Puissance du générateur selon les scénarios d'enseleillement

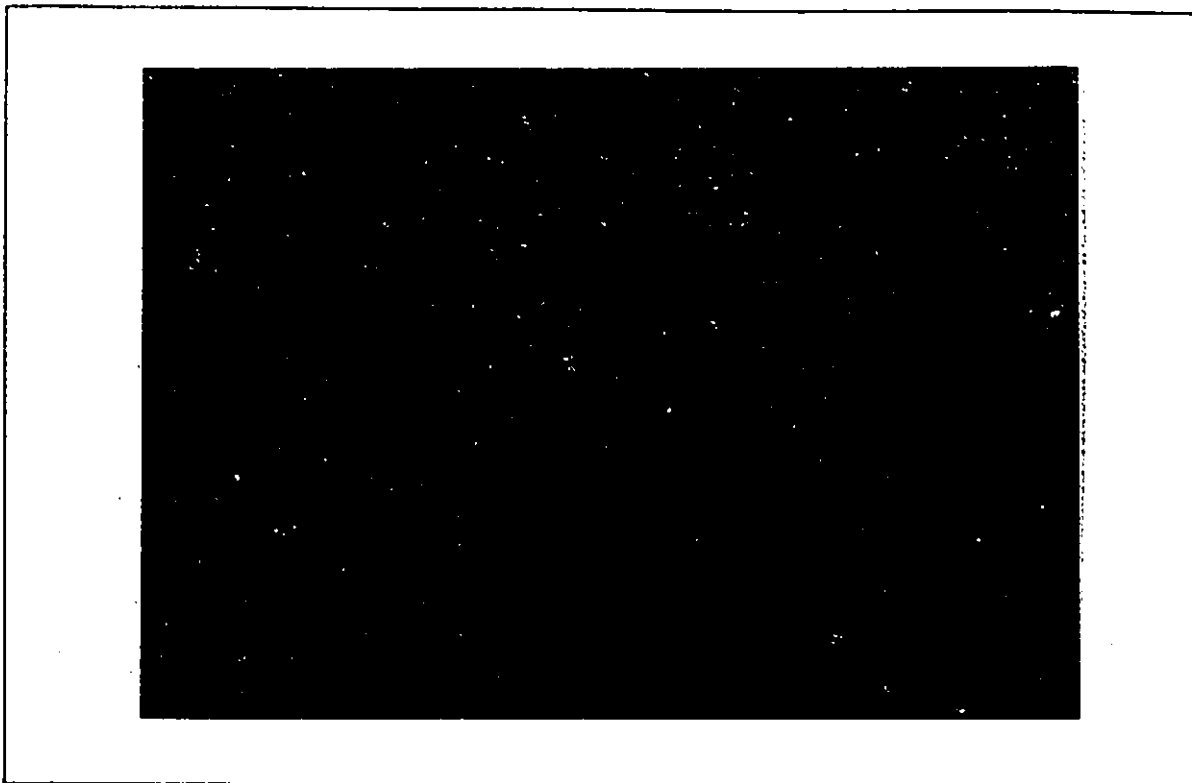


Figure I.13 - Données initiales pour le calcul des débits avec SYSTEME

h	Scé. : 100%		Scé. : 95%		Scé. : 90%		Scé. : 80%		Scé. : 75%		Moyenne	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
9	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	2.3	0.01	0.0	0.00
10	32.7	0.16	203.3	0.97	243.3	1.16	302.1	1.44	329.7	1.57	225.0	1.07
11	238.4	1.14	399.9	1.91	446.4	2.13	519.1	2.48	554.4	2.65	410.6	1.96
12	286.2	1.37	499.9	2.39	554.5	2.65	635.4	3.03	673.7	3.22	516.3	2.46
13	367.8	1.76	556.9	2.66	619.7	2.91	689.1	3.29	725.7	3.46	570.3	2.72
14	324.3	1.55	546.1	2.61	604.3	2.88	687.7	3.28	724.9	3.46	570.3	2.72
15	324.1	1.55	525.7	2.51	582.2	2.78	663.0	3.16	700.0	3.34	546.1	2.61
16	165.2	0.80	431.4	2.06	496.5	2.37	585.1	2.79	625.0	2.98	478.4	2.28
17	04.9	0.41	306.7	1.46	364.8	1.74	445.4	2.13	482.0	2.30	353.7	1.69
18	0.0	0.00	98.6	0.47	143.0	0.68	263.1	0.97	228.4	1.09	148.4	0.71

Figure I.14 - Débits produits selon les scénarios d'ensoleillement

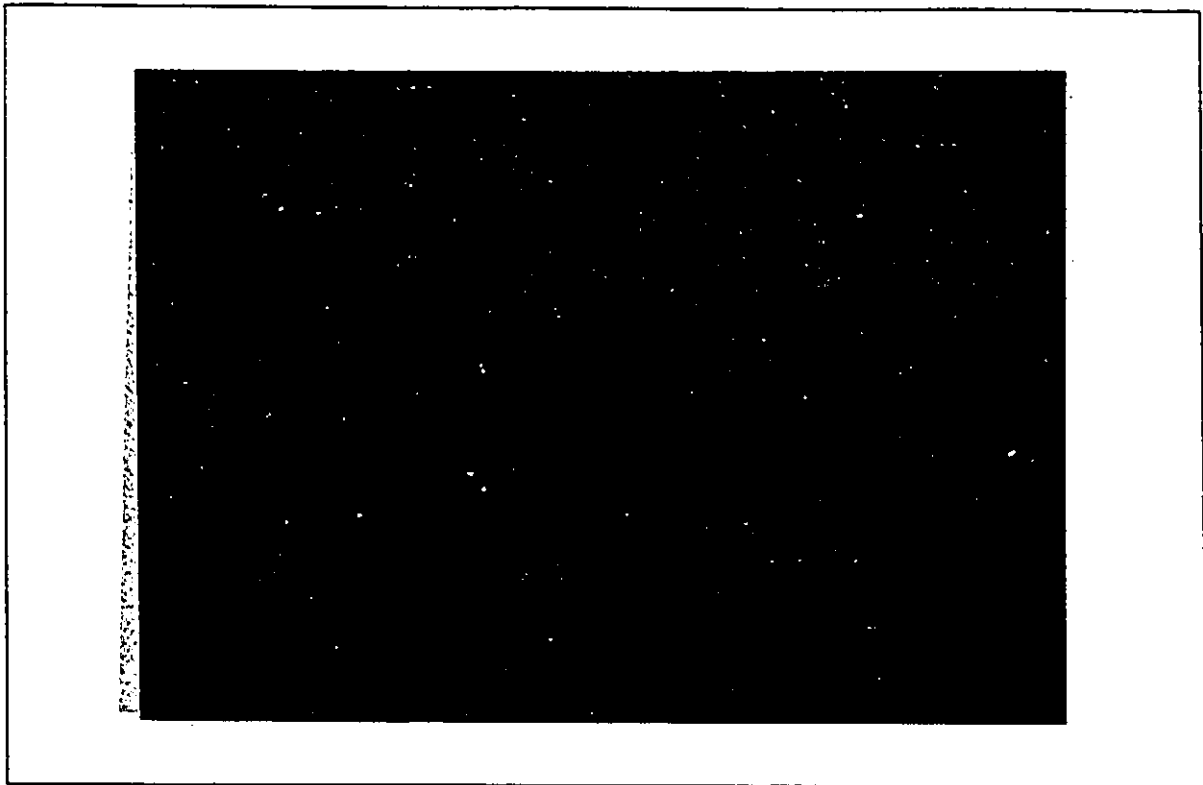


Figure I.15 - Données initiales pour la sous-routine RESERVE

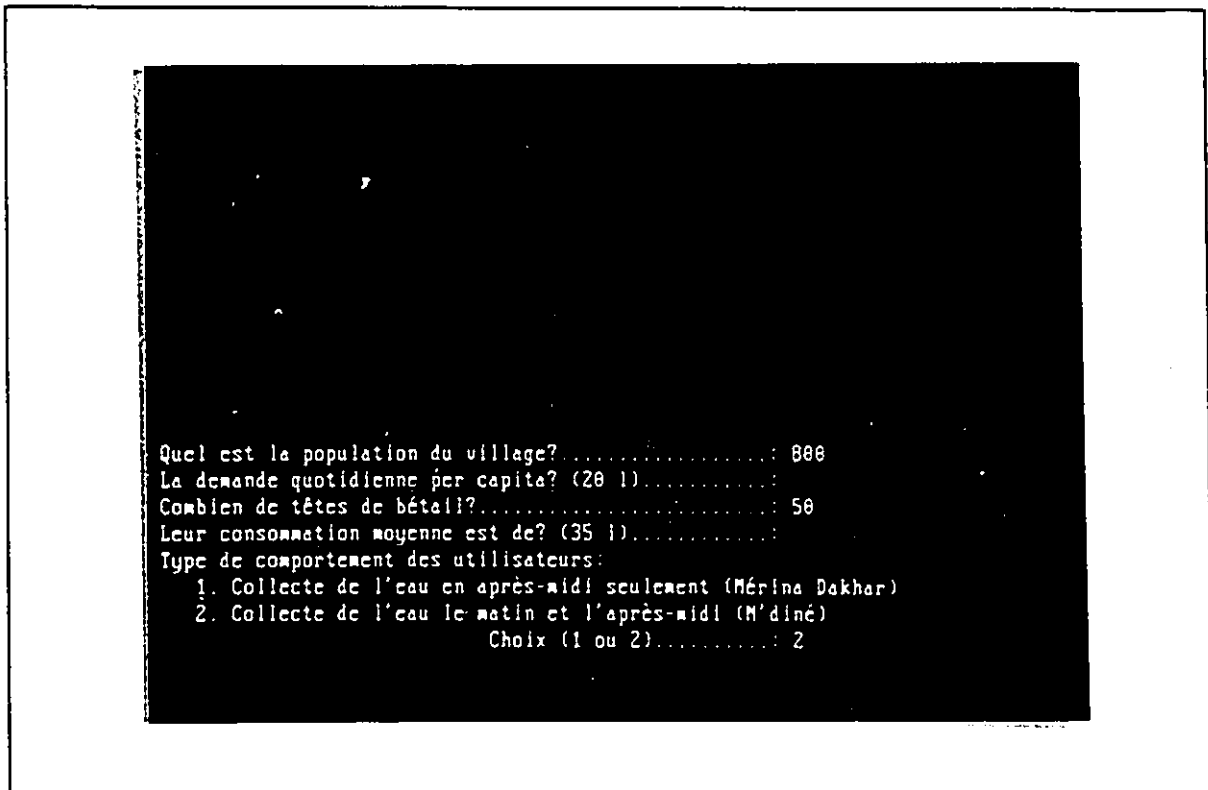


Figure I.16 - Données initiales pour la sous-routine RESERVE

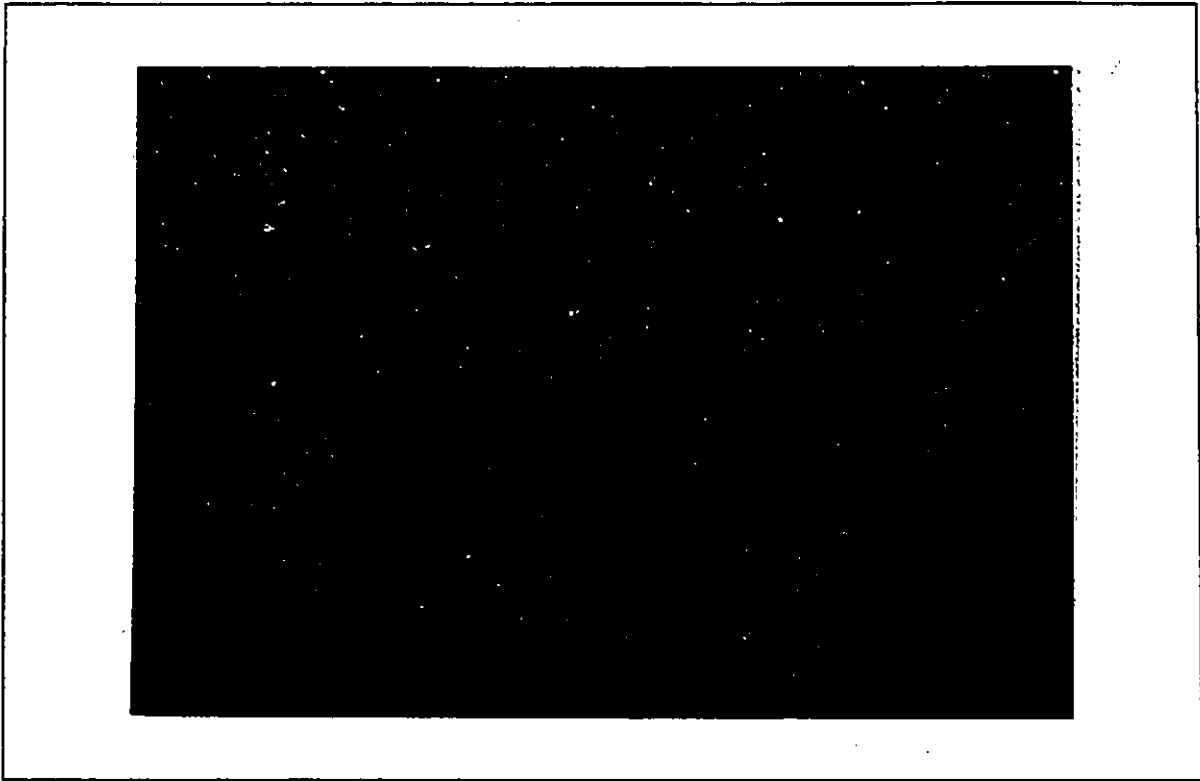


Figure I.17 - Résultats de RESERVE pour le scénario de 100% d'ensoleillement

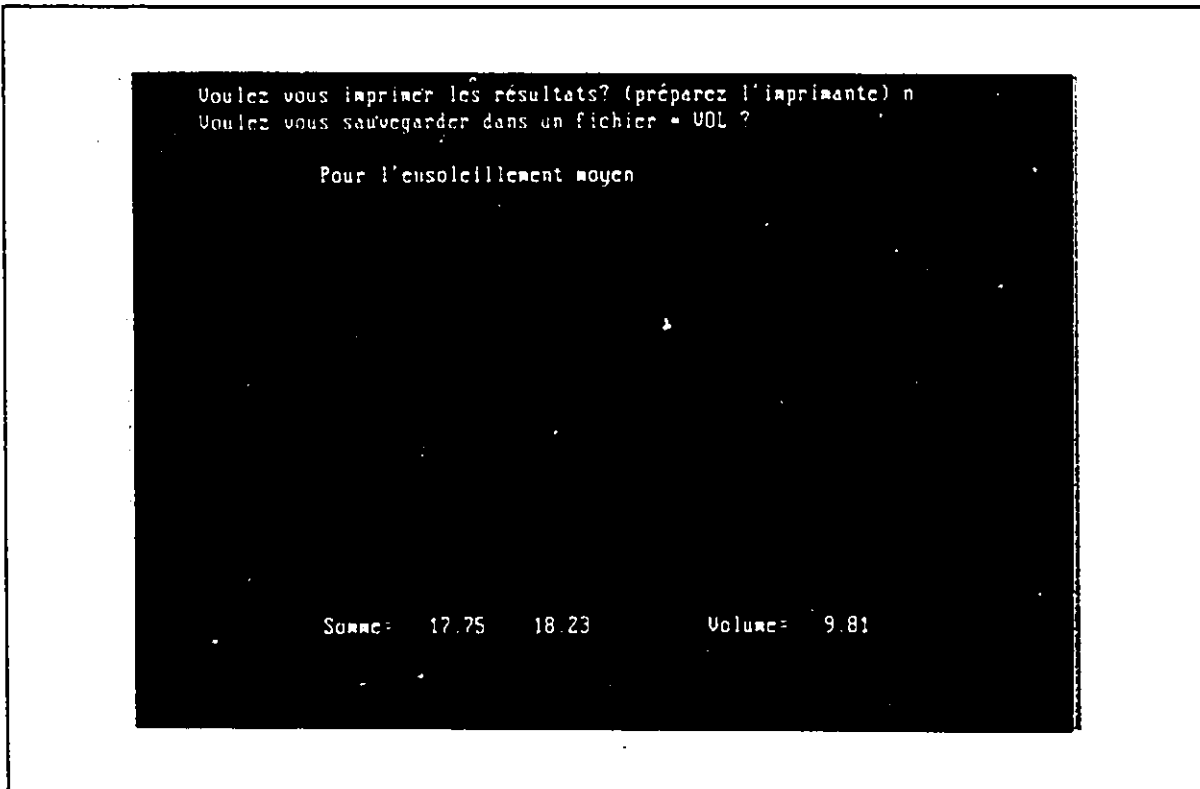


Figure I.18 - Résultats de RESERVE pour la moyenne de l'ensoleillement



Figure I.19 - Données initiales pour la sous-routine GRAPHIK

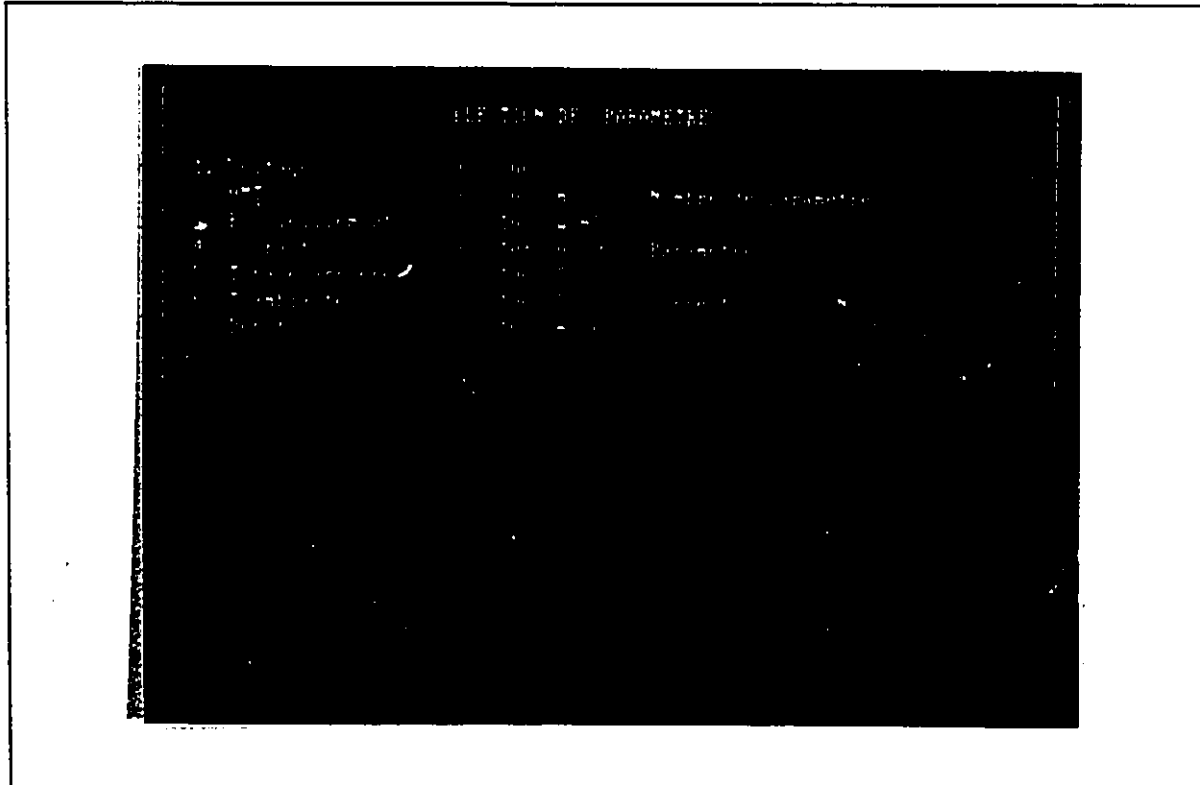


Figure I.20 - Sélection des paramètres à dessiner avec GRAPHIK

Annexe II - Listing informatique

CITERNE.EXE.....	1
Ouverture.bas.....	4
STAT.EXE.....	12
SCENARIO.EXE.....	13
Gauss.bas.....	14
SYSTEME.EXE.....	23
Panneau.bas.....	27
Pompe.bas.....	31
RESERVE.EXE.....	33
Volume.bas.....	35
GRAPHIK.EXE.....	38
Koordinate.bas.....	40
Diagram.bas.....	44
Routine SAS.....	50
Fichiers *.GEN.....	51
Fichiers *.GMP.....	52
Fichier *.VIL.....	53

CITERNE.EXE

```

CITERNE.BAS

                                MENU

Ce programme, créé à l'origine pour "encadrer" les utilisateurs
du C.É.R.É.R. (Dakar, mars 91), a été recyclé pour les fins de ma thèse
en cet humide mois de juin à Ottawa.

Présente le menu qui permet aux utilisateurs d'accéder aux
diverses routines de conception pour optimiser la taille du réservoir.

Note: Les fichiers STAT.EXE, SCENARIO.EXE, SYSTEME.EXE,
RESERVE.EXE et GRAPHIK.EXE doivent TOUS être dans le même répertoire
que CITERNE.EXE.
                                18-IX-91

```

debut:

```
DIM titre$(1:6), action$(1:6)
```

```
'----- Lecture des options disponibles -----
```

```
FOR i% = 1 TO 6
```

```
    READ titre$(i%), action$(i%)
```

```
NEXT i%
```

```
DATA "1. Calcul des moyennes et de l'écart-type           (*.MOY)", "STAT"
DATA "2. Calcul de la disponibilité d'ensoleillement      (*.SCE)", "SCENARIO"
DATA "3. Calcul des puissances et des débits              (*.DEB)", "SYSTEME"
DATA "4. Calcul du volume selon les scénarios             (*.VOL)", "RESERVE"
DATA "5. Présentation graphique                           ", "GRAPHIK"
DATA "Sortie au système d'opération                       ", "exit"
```

```
'----- Impression du cadre principal -----
```

```
CLS
```

```
COLOR 15, 0
```

```
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
FOR i% = 1 TO 6
PRINT "
PRINT "
PRINT "
NEXT i%
PRINT "
";
```

```

COLOR 5, 0
LOCATE 2,3
PRINT " _____ ]"
LOCATE 3,3
PRINT "| _____ ]"
LOCATE 4,3
PRINT "| _____ ]"
LOCATE 5,3
PRINT " _____ ]";
COLOR 6, 0: LOCATE 3, 20
PRINT "Conception du réservoir pour systèmes PV"
COLOR 15, 3: LOCATE 4, 5
PRINT SPC(6);"Choisissez le logiciel avec lequel vous voulez
travailler";SPC(7); COLOR 2, 0: LOCATE 6, 60
PRINT "Création du fichier"

```

'----- Clés de fonction pré-définie -----

```

ON KEY(1) GOSUB F1
ON KEY(2) GOSUB F2
ON KEY(3) GOSUB F3
ON KEY(4) GOSUB F4
ON KEY(5) GOSUB F5
ON KEY(6) GOSUB SortieDOS

```

```

KEY(1) ON: KEY(2) ON: KEY(3) ON: KEY(4) ON: KEY(5) ON: KEY(6) ON

```

'----- Impression du reste du menu, lorsque l'on sait à qui on a affaire -----

```

COLOR 2, 0
j% = 1
FOR i% = 7 TO 22 STEP 3
  COLOR 10, 0
  LOCATE i%, 7: PRINT "F"+RIGHT$(STR$(j%),1)
  COLOR 11, 0
  IF j%= 6 THEN COLOR 4, 0
  LOCATE i%, 14: PRINT titre$(j%)
  j% = j% + 1
NEXT i%

```

```

COLOR 14,0
LOCATE 18,46: PRINT CHR$(201); STRING$(12,205); " NOTES "; STRING$(11,205);
CHR$(187)
LOCATE 19,46: PRINT CHR$(186);" > Fichier d'origine: *.ASC ";CHR$(186)
LOCATE 20,46: PRINT CHR$(186);" > Pour utiliser une routine, ";CHR$(186)
LOCATE 21,46: PRINT CHR$(186);" le fichier de données pré- ";CHR$(186)
LOCATE 22,46: PRINT CHR$(186);" cédent doit avoir été créé.";CHR$(186)
LOCATE 23,46: PRINT CHR$(200); STRING$(30,205); CHR$(188)

```

'----- Attend ici une éventuelle commande -----

```

Findumonde:
GOTO Findumonde

```

```

END

```

Voici les procédures qui activent les options de CITERNE

SortieDOS:

```
SEVENT off
COLOR 7, 0: LOCATE 18,46: PRINT CHR$(201);STRING$(30,205);CHR$(187)
FOR i% = 19 TO 22
    LOCATE i%,46: PRINT CHR$(186);SPC(30);CHR$(186)
NEXT i%
LOCATE 23,46: PRINT CHR$(200);STRING$(30,205);CHR$(188);
COLOR 2, 0: LOCATE 19, 47: PRINT " Copyright François Carrier "
COLOR 7, 0: LOCATE 21, 47: PRINT " Vive les Nordiques de Québec!"
COLOR 11, 0: LOCATE 22, 47: PRINT " Nous vaincrons. "
DELAY 2
CLS: COLOR 10, 0
LOCATE 11,1
PRINT " "
LOCATE 12,1
PRINT " De retour au DOS... "
LOCATE 13,1
PRINT " "
COLOR 14, 0
CLEAR
END
```

RETURN

F1:

```
CLS
SHELL action$(1)
CLEAR: GOTO debut
```

RETURN

F2:

```
CLS
SHELL action$(2)
CLEAR: GOTO debut
```

RETURN

F3:

```
CLS
SHELL action$(3)
CLEAR: GOTO debut
```

RETURN

F4:

```
CLS
SHELL action$(4)
CLEAR: GOTO debut
```

RETURN

F5:

```
CLS
SHELL action$(5)
CLEAR: GOTO debut
```

RETURN

OUVERTUR.BAS

OUVERTUR.BAS

Inclu dans les 5 fichiers *.BAS

Sous-routine d'ouverture des fichiers de données.

Deux types de fichiers-données (*.ASC) : pas de temps de 10 minutes ou d'une heure. Ce sont des fichiers mensuels avec un titre en ligne 1.

Liste des fichiers obtenus à partir du banc d'essais du CÉRÉR.

(!) NOV90_60.ASC	97 lignes	5629 octets	4 jours	(12 au 15)
DEC90_60.ASC	361 "	20477 "	15 "	(13 au 27)
JAN91_60.ASC	481 "	27133 "	20 "	(12 au 31)
FEV91_60.ASC	673 "	38001 "	28 "	(1 au 28)
MAR91_60.ASC	241 "	13585 "	10 "	(1-5 et 14-18)
(!) AVR91_60.ASC	73 "	4093 "	3 "	(22 au 24)

Les fichiers-moyennes (*.MOY) se présentent de la même façon.

(!) fichiers non-significatifs p.c.q la période est trop courte.

Trouve le ou les fichiers(s) couvrant la période désirée

SUB TrouveFichier(fiche\$,jour\$,mois\$,annee\$,periode\$,type\$)

SHARED jourfin%, moisfin%, anneeFin\$, jpm%(), ndm\$(), nomfichier\$(),
fichier%, t%, f%

LOCAL diffannees%

DIM jpm%(1:12), ndm\$(1:12), nomfichier\$(1:2)

IF type\$ = "60" THEN t% = 24 ELSE t% = 144 ' # de lectures par jour

jpm%(1) = 31 : jpm%(2) = 28 : jpm%(3) = 31 : jpm%(4) = 30 ' Jours par mois

jpm%(5) = 31 : jpm%(6) = 30 : jpm%(7) = 31 : jpm%(8) = 31

jpm%(9) = 30 : jpm%(10) = 31 : jpm%(11) = 30 : jpm%(12) = 31

ndm\$(1) = "jan" : ndm\$(2) = "fev" : ndm\$(3) = "mar" ' Nom du mois

ndm\$(4) = "avr" : ndm\$(5) = "mai" : ndm\$(6) = "jun"

ndm\$(7) = "jul" : ndm\$(8) = "aou" : ndm\$(9) = "sep"

ndm\$(10) = "oct" : ndm\$(11) = "nov" : ndm\$(12) = "dec"

diffannees% = VAL(annee\$) - 1988 ' Traitement années bissextiles

IF (diffannees% - 4*INT(diffannees%/4) < 0.0001) THEN jpm%(2) = 29

jourfin% = VAL(jour\$) + VAL(periode\$) - 1

moisfin% = VAL(mois\$)

anneeFin\$ = annee\$

fichier% = 1

```

IF jourfin% > jpm%(VAL(mois$)) THEN          ' Si la période s'étend sur
    jourfin% = jourfin% - jpm%(VAL(mois$))    ' deux (2) mois
    fichier% = 2
    IF mois$ = "12" THEN
        moisfin% = 1
        IF RIGHT$(annee$,1) = "0" THEN anneeфин$ = LEFT$(annee$,1)+"1"
        IF RIGHT$(annee$,1) = "1" THEN anneeфин$ = LEFT$(annee$,1)+"2"
        IF RIGHT$(annee$,1) = "2" THEN anneeфин$ = LEFT$(annee$,1)+"3"
        IF RIGHT$(annee$,1) = "3" THEN anneeфин$ = LEFT$(annee$,1)+"4"
        IF RIGHT$(annee$,1) = "4" THEN anneeфин$ = LEFT$(annee$,1)+"5"
    ELSE
        moisfin% = VAL(mois$) + 1
        anneeфин$ = annee$
    END IF
END IF

```

```

nomfichier$(1) = ndm$(VAL(mois$)) + annee$ + "_" + type$ + "." + fiche$
nomfichier$(2) = ndm$(moisfin%) + anneeфин$ + "_" + type$ + "." + fiche$

```

```

COLOR 10, 0

```

```

SELECT CASE fiche$
    CASE "asc", "ASC"
        PRINT: PRINT SPC(14); "La période, d'une durée de "; periode$;_
            " jours, s'étend du"
        PRINT SPC(22); jour$; " "; ndm$(VAL(mois$)); ". 19"; annee$; " au";_
            jourfin%; ndm$(moisfin%); ". 19"; anneeфин$; "."
    CASE "moy", "MOY"
        PRINT: PRINT SPC(24); "La période, "; periode$; ", est pour"
        PRINT SPC(29); "le mois de "; ndm$(VAL(mois$)); ". 19"; annee$
    CASE "sce", "SCE"
        PRINT: PRINT SPC(24); "Les "; periode$; " d'ensoleillement"
        PRINT SPC(29); "sont pour "; ndm$(VAL(mois$)); ". 19"; annee$
        f$ = nomfichier$(1)
END SELECT

```

```

END SUB

```

<pre> Ouvre le-s fichier-s trouvé-s par la sous-routine TrouveFichier. fichier% égal 1 ou 2; p% est le nombre total de lignes à lire; p%() est le nombre de lignes du fichier; premt%() est la première journée du fichier. </pre>
--

```

SUB OuvreFichier(repertoire$, nomfichier$(1), fiche$, mois$, fichier%, type$)

```

```

SHARED    p%, p%(), titre$(), jour%(), mois%(), heure%(), voltage!(),_
          hmt!(), enso!(), courant!(), tarr!(), tamb!(), debit!(), premt%(),_
          ensoecart!()

```

```

LOCAL    kt, lt, mt, fichier$, debut%, fin%, nomb%()

```

```

DIM      nomb%(1:fichier%), premt%(1:fichier%), titre$(1:fichier%),_
          p%(1:fichier%)

```

```
SELECT CASE fiche$
```

```
  CASE "asc", "ASC"
```

```
    FOR k% = 1 to fichier%
```

```
      mois% = VAL(mois$)
```

```
      IF k% = 2 THEN mois% = VAL(mois$) + 1
```

```
      IF k% = 2 AND mois% = 13 THEN mois% = 1
```

```
      SELECT CASE nomfichier$(k%)
```

```
        ' [ Fichiers horaires (incomplets) ]
```

```
        CASE "nov90_60." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 4
```

```
          prem%(k%) = 12
```

```
        CASE "dec90_60." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 15
```

```
          prem%(k%) = 13
```

```
        CASE "jan91_60." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 20
```

```
          prem%(k%) = 12
```

```
        CASE "mar91_60." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 10
```

```
          prem%(k%) = 1
```

```
        CASE "fev91_60." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 28
```

```
          prem%(k%) = 1
```

```
        CASE "avr91_60." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 3
```

```
          prem%(k%) = 22
```

```
        ' [ Fichiers 10 minutes (incomplets) ]
```

```
        CASE "dec90_10." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 17
```

```
          prem%(k%) = 11
```

```
        CASE "jan91_10." + fiche$
```

```
          nomb%(k%) = 20
```

```
          prem%(k%) = 12
```

```
        ' [ Fichiers 10 ou 60 minutes, mais complets ]
```

```
        CASE ELSE
```

```
          nomb%(k%) = jpm%(mois%)
```

```
          ' vrai nombre de jours
```

```
          prem%(k%) = 1
```

```
      END SELECT
```

```
    NEXT k%
```

```
  CASE "moy", "MOY"
```

```
    mois% = VAL(mois$)
```

```
    nomb%(fichier%) = 1
```

```
    ' 1 jour
```

```
    prem%(fichier%) = 1
```

```
  END SELECT
```

```

p% = 0
FOR k% = 1 to fichier%
    ' Nombre de lignes à lire
    IF type$ = "10" THEN p%(k%) = (nomb%(k%) * 24 * 6)
    IF type$ = "60" THEN p%(k%) = (nomb%(k%) * 24)
    p% = p% + p%(k%)
NEXT k%

DIM jour%(1:p%), mois%(1:p%), annee%(1:p%), heure%(1:p%), minute%(1:p%),_
voltage!(1:p%), hmt!(1:p%), enso!(1:p%), courant!(1:p%), tarr!(1:p%),_
tamb!(1:p%), debit!(1:p%), ensoecart!(1:p%)

PRINT "
PRINT "      Lecture du-des fichier-s:
PRINT "

FOR k% = 1 TO fichier%
    fichier$ = repertoire$ + nomfichier$(k%)
    ' Sous-répertoire
    OPEN fichier$ FOR INPUT AS #k%
    INPUT # k%, titre$(k%)
    ' La première ligne est en texte
    PRINT titre$(k%)
    IF k% = 1 THEN
        debut% = 1
        fin% = p%(k%)
    ELSEIF k% = 2 THEN
        debut% = ( p%(1) + 1 )
        fin% = p%
    END IF
    IF fiche$ = "moy" OR fiche$= "MOY" THEN
        FOR m% = debut% TO fin%
            INPUT # k%, m%, voltage!(m%), hmt!(m%),_
            enso!(m%), courant!(m%), tarr!(m%),_
            tamb!(m%), debit!(m%), ensoecart!(m%)
        NEXT m%
    ELSEIF fiche$ = "asc" OR fiche$= "ASC" THEN
        FOR m% = debut% TO fin%
            INPUT # k%, jour%(m%), mois%(m%), annee%(m%),_
            heure%(m%), minute%(m%), voltage!(m%),_
            hmt!(m%), enso!(m%), courant!(m%),_
            tarr!(m%), tamb!(m%), debit!(m%)
            '
            ' Ajustements:      (Données CÉRÉR seulement)
            ' -----
            ' 1) Enso: Mauvais calibrage du pyranomètre
            '          avec le Modas (valeur du signal, mV)
            ' 2) HMT: On doit ajouter la différence d'élé-
            '          vation entre le manomètre et le ni-
            '          veau de l'eau dans le bassin (mètre)
            '
            enso!(m%) = enso!(m%) * 9.62 / 9.81
            hmt!(m%) = hmt!(m%) + 0.55
        NEXT m%
    END IF

```

```

COLOR 6, 0
PRINT: PRINT "Les"; p$(k$); "lignes du fichier {"; nomfichier$(k$);_
      " } sont en mémoire"
CLOSE #k$
NEXT k$

COLOR 14, 0: PRINT SPC(48) "Pressez sur <c> pour continuer"
WHILE c$ <> CHR$(99): c$ = INKEY$: WEND          ' petit c

END SUB

```

```

'
'
'   Ouvre le fichier des scénarios d'ensoleillement et aussi celui des
'   caractéristiques du générateur. (*.SCE et FP_CERER.GEN)
'

```

```

SUB OuvreFichier2(repertoire$,f$,fiche$,type$)

```

```

SHARED      heur!(), ens!(), volt!(), cour!(), e!(), t!(), s!(), p$,_
            fichier$, titre$(), prem$(), ta!(), tf!()
LOCAL      fichier$, c$, shunt!, m$, n$, nomb$()
DIM DYNAMIC titre$(1:1), prem$(1:1), nomb$(1:1)

```

```

fichier$ = 1
nomb$(fichier$) = 1
premier$(fichier$) = 1

```

```

COLOR 3, 0: PRINT

```

```

PRINT "
PRINT "   Lecture du-des fichier-s:
PRINT "

```

```

fichier$ = repertoire$ + f$

```

```

COLOR 5, 0

```

```

OPEN fichier$ FOR INPUT AS # 1

```

```

INPUT # 1, titre$(fichier$)
PRINT titre$(fichier$)

```

```

IF fiche$ = "sce" OR fiche$= "SCE" THEN
  IF type$ = "10" THEN p$ = 24 * 6
  IF type$ = "60" THEN p$ = 24
  DIM heur$(1:p$), ens!(1:6,1:p$)

```

```

ELSEIF fiche$ = "gen" OR fiche$= "GEN" THEN
  shunt! = VAL(type$) / 100          ' valeur du shunt
  INPUT # 1, c$, p$                 ' Nomb. de lect.
  INPUT # 1, c$, e!(1), e!(2), e!(3), e!(4), e!(5)  ' Ensoleillement
  INPUT # 1, c$, t!(1), t!(2), t!(3), t!(4), t!(5)  ' Temp. face arr.
  DIM volt!(1:p$), cour!(1:5,1:p$)  ' Possibilité de 5 courbes
END IF

```

```

INPUT # 1, c$, s!(1), s!(2), s!(3), s!(4), s!(5)          ' scénarios ou Vc

IF fiche$ = "sce" OR fiche$= "SCE" THEN
  FOR m% = 1 TO p%
    INPUT # 1, heur!(m%), ens!(1,m%), ens!(2,m%), ens!(3,m%),_
    ens!(4,m%), ens!(5,m%), ens!(6,m%), ta!(m%), tf!(m%)
  NEXT m%

ELSEIF fiche$ = "gen" OR fiche$= "GEN" THEN
  FOR m% = 1 TO p%
    INPUT # 1, volt!(m%), cour!(1,m%), cour!(2,m%), cour!(3,m%),_
    cour!(4,m%), cour!(5,m%)
    FOR n% = 1 TO 5
      cour!(n%,m%) = cour!(n%,m%) * shunt!
    NEXT n%
  NEXT m%
END IF

COLOR 6, 0
PRINT: PRINT "Les"; p%; "lignes du fichier {"; f$; "} sont en mémoire"

CLOSE #k%

COLOR 14, 0
PRINT SPC(48) "Pressez sur <c> pour continuer"
WHILE c$ <> CHR$(99): c$ = INKEY$: WEND

END SUB

```

```

'
'   Ouvre le fichier contenant les paramètres du GMP, que ce soit:
'   a           : pour une équation linéaire
'   a, b, c, d : pour une équation du troisième ordre
'

```

```

SUB OuvreFichier3(repertoire$,f$,fiche$)

```

```

  SHARED hauteur%(), a!(), b!(), c!(), d!(), titre$, desc$, ordre%,_
  nombrelectures%
  LOCAL fichier$, i%

```

```

  PRINT "
  PRINT "   Lecture du fichier contenant les paramètres:
  PRINT "

```

```

  fichier$ = repertoire$ + f$ + "." + fiche$

```

```

  OPEN fichier$ FOR INPUT AS # 1
  INPUT # 1, titre$
  INPUT # 1, desc$, ordre%, nombrelectures%

```

```

  DIM hauteur%(1:nombrelectures%), a!(1:nombrelectures%),_
  b!(1:nombrelectures%), c!(1:nombrelectures%), d!(1:nombrelectures%)

```

```

FOR i% = 1 TO nombrelectures%
    INPUT # 1, hauteur%(i%), a!(i%), b!(i%), c!(i%), d!(i%)
NEXT i%

CLOSE #1

COLOR 5, 0
PRINT titre$
PRINT desc$; ordre%
PRINT: COLOR 6, 0
PRINT "Les paramètres pour"; nombrelectures%; "différentes HMT sont connus."
PRINT "Ces HMT varient de"; hauteur%(1); "mètres à";_
    hauteur%(nombrelectures%); "mètres."

END SUB

```

```

'
'  Ouvre le fichier des débits selon les différents scénarios, *.DEB .
'

```

```

SUB OuvreFichier4(repertoire$, f1$, f2$)

SHARED    titre1$, titre2$, desc1$, desc2$, desc3$, desc4$, d1%, d2%,_
          ordre%, h1%(), Q!(), h2%(), Cof!(), nomvil$()
LOCAL    fichier1$, fichier2$, s1%, s2%, s3%, s4%, s5%, i%

CLS: COLOR 3, 0

PRINT "
PRINT "  Lecture des fichiers de débits et de consommation
PRINT "

```

```

fichier1$ = repertoire$ + f1$
fichier2$ = repertoire$ + f2$

```

```

'
'  Ouverture du fichier *.DEB
'

```

```

OPEN fichier1$ FOR INPUT AS # 1

INPUT # 1, titre1$
INPUT # 1, desc1$, d1%
INPUT # 1, desc3$, ordre%
INPUT # 1, desc4$, s1%, s2%, s3%, s4%, s5%

DIM    h1%(1:24), Q!(1:6,1:24)

FOR i% = 1 TO 24
    INPUT # 1, h1%(i%), Q!(1,i%), Q!(2,i%), Q!(3,i%), Q!(4,i%), Q!(5,i%),_
        Q!(6,i%)
NEXT i%

CLOSE #1

```

```
COLOR 5, 0
PRINT titre1$
PRINT desc1$; d1$
PRINT desc3$; ordre$
```

```
COLOR 6, 0
PRINT "Les débits calculés pour la HMT de"; d1$; "mètres sont connus."
PRINT "Ces débits sont pour les scénarios"; s1$; ","; s2$; ","; s3$; ",";_
s4$; "et" ; s5$; "$, et la moyenne."
```

```
'
' 

|                            |
|----------------------------|
| Ouverture du fichier *.VIL |
|----------------------------|


'
```

```
OPEN fichier2$ FOR INPUT AS # 2
INPUT # 2, titre2$
INPUT # 2, desc2$, d2$
```

```
DIM nomvil$(1:2), h2$(1:24), Cof!(1:2,1:24)
```

```
INPUT # 2, nomvil$(1), nomvil$(2)
```

```
FOR i$ = 1 TO 24
    INPUT # 2, h2$(i$), Cof!(1,i$), Cof!(2,i$)
NEXT i$
```

```
CLOSE #2
```

```
COLOR 5, 0
PRINT
PRINT titre2$
PRINT desc2$; d2$
COLOR 6, 0
```

```
PRINT "Comportements-types de consommation journalière pour les villages de"
PRINT nomvil$(1); " et de "; nomvil$(2); " sont connus."
```

```
END SUB
```

STAT.EXE

```
STAT.BAS

OPTION No. 1

Programme qui appelle la ss-routine MoyenneEcart (voir GAUSS.BAS):

1) la MOYENNE mensuelle pour chaque heure de la journée et ce,
   pour chacune des lectures du fichier choisi (I, V, HMT...).
2) l'ÉCART-TYPE mensuel pour chaque heure de la journée,
   principalement pour l'ensoleillement.

Notes:
Les valeurs de la HMT sont considérées comme ne nécessitant
aucun ajustement, le manomètre étant au début de la boucle.
```

```
$INCLUDE "ouvertur.bas"
$INCLUDE "gauss.bas"
SSTACK &H800 ' car beaucoup de variables locales
```

```
L'utilisateur définit la période d'analyse. Le fichier est trouvé.
```

```
CLS
COLOR 7, 0
PRINT "
PRINT " Période d'analyse: CALCULS DES MOYENNES - Option #1 "
PRINT "
COLOR 10, 0
INPUT "Quel est le répertoire du fichier *.ASC? (d:\ascii\)...: ", repertoire$
INPUT "Pour quel mois? (mm)...: ", mois$
INPUT "Pour quelle année? (aa)...: ", annee$
INPUT "Avec quel pas de temps? (10 ou 60 minutes)...: ", type$
INPUT "Quelle est la première journée? (jj)...: ", jour$
INPUT "Combien de jours dans le mois? (pp)...: ", periode$

fiche$ = "asc" ' puisque ce sera toujours un fichier *.ASC

IF repertoire$ = "" THEN repertoire$ = "d:\ascii\"
IF type$ = "60" THEN lectures% = 24 ELSE lectures% = 144

CALL TrouveFichier(fiche$, jour$, mois$, annee$, periode$, type$)

CALL OuvreFichier(repertoire$, nomfichier$(), fiche$, mois$, fichier%, type$)

CALL MoyenneEcart(lectures%, p%, voltage!(), hmt!(), enso!(), courant!(), _
tarr!(), tamb!(), debit!(), nomfichier$(), fichier%, repertoire$)

END
```

SCENARIO.EXE

SCENARIO.BAS

OPTION No. 2

Programme qui appelle la ss-routine Disponibilité

Pour différents niveaux d'ensoleillement, la DISPONIBILITÉ (en %) est déterminée. L'ensoleillement pour différents scénarios (100%, 95%, 90%, 85%, 70%) est trouvé. L'utilisateur aura le loisir de modifier ces derniers.

\$INCLUDE "ouvertur.bas"

\$INCLUDE "gauss.bas"

\$STACK &H800 ' car beaucoup de variables locales

L'utilisateur définit la période d'analyse. Le fichier est trouvé.

CLS

COLOR 4, 0

PRINT "
Période d'analyse: CALCULS DES DISPONIBILITÉS - Option # 2
"

COLOR 11, 0

INPUT "Répertoire de données du fichier *.MOY (d:\ascii\)...: ", repertoire\$

IF repertoire\$ = "" THEN repertoire\$ = "d:\ascii\"

INPUT "Pour quel mois? (mm)...: ", mois\$

INPUT "Pour quelle année? (aa)...: ", annee\$

INPUT "Avec quel pas de temps? (10 ou 60 minutes)...: ", type\$

fiche\$ = "moy"

jour\$ = "1"

periode\$ = "mensuelle"

IF type\$ = "60" THEN lectures% = 24 ELSE lectures% = 144 ' Nombre de lectures par jour

CALL TrouveFichier(fiche\$, jour\$, mois\$, annee\$, periode\$, type\$)

CALL OuvreFichier(repertoire\$, nomfichier\$, fiche\$, mois\$, fichier%, type\$)

COLOR 4, 0

PRINT "
Exécution des calculs: ensoleillement selon les divers scénarios.
"

DELAY 3

CALL Disponibilite(lectures%, enso!(), debit!(), ensoecart!(), nomfichier\$, _
fichier%, repertoire\$, tamb!(), tarr!())

END

GAUSS.BAS

GAUSS.BAS

Inclu dans STAT.BAS et SCENARIO.BAS

Sous-routines qui calculent:

- 1) dans un premier temps les moyennes et l'écart-type de l'ensoleillement. Possibilité de sauvegarde dans un fichier séquentiel *.MOY pour lecture avec GRAPHIK.BAS. »» appelée par STAT.BAS
- 2) La disponibilité de l'ensoleillement est ensuite trouvée grâce à la méthode de Gauss (distribution normale). »» appelée par SCENARIO.BAS

ss-routine qui calcule la moyenne et l'écart-type. Création d'un fichier.

```

SUB MoyenneEcart(lectures$,p%,voltage!(1),hmt!(1),enso!(1),courant!(1),_
    tarr!(1),tamb!(1),debit!(1),nomfichier$(1),fichier$,repertoire$)

SHARED    voltagemoy!(), hmtmoy!(), ensomoy!(), courantmoy!(), tarrmoy!()_
    tambmoy!(), debitmoy!(), ensocart!()
LOCAL    i$, j$, k$, voltagetot!(), hmttot!(), ensotot!(), couranttot!()_
    tarrtot!(), tambtot!(), debittot!(), ensocarree!(), n$, s$, _
    d$, k1$, k2$, rep1$, rep2$, racine$, nouveau$, complet$, desc$
DIM      voltagetot!(1:lectures$), hmttot!(1:lectures$), ensotot!(1:lectures$),_
    couranttot!(1:lectures$), tarrtot!(1:lectures$), tambtot!(1:lectures$),_
    debittot!(1:lectures$), voltagemoy!(1:lectures$), hmtmoy!(1:lectures$),_
    ensomoy!(1:lectures$), courantmoy!(1:lectures$), tarrmoy!(1:lectures$),_
    tambmoy!(1:lectures$), debitmoy!(1:lectures$), ensocarree!(1:lectures$),_
    ensocart!(1:lectures$)
    
```

Sommations

"p%" (variable SHARED) est le nombre total de lignes.

```

i$ = 0
DO
    FOR j$ = 1 TO lectures$
        voltagetot!(j$) = voltagetot!(j$) + voltage!(i$+j$)
        hmttot!(j$)     = hmttot!(j$) + hmt!(i$+j$)
        ensotot!(j$)   = ensotot!(j$) + enso!(i$+j$)
        couranttot!(j$) = couranttot!(j$) + courant!(i$+j$)
        tarrtot!(j$)   = tarrtot!(j$) + tarr!(i$+j$)
        tambtot!(j$)   = tambtot!(j$) + tamb!(i$+j$)
        debittot!(j$)  = debittot!(j$) + debit!(i$+j$)
        ensocarree!(j$) = ensocarree!(j$) + enso!(i$+j$)^2
    NEXT j$
    i$ = i$ + lectures$
LOOP UNTIL i$ = p$
    
```

```

'
' Moyennes "p%/lectures%" équivaut au nombre de jours dans le mois.
'

```

```

n% = p%/lectures%
FOR k% = 1 TO lectures%
    voltagemoy!(k%) = voltagetot!(k%) / n%
    hmtmoy!(k%) = hmttot!(k%) / n%
    ensomoy!(k%) = ensotot!(k%) / n%
    courantmoy!(k%) = couranttot!(k%) / n%
    tarrmoy!(k%) = tarrtot!(k%) / n%
    tambmoy!(k%) = tambtot!(k%) / n%
    debitmoy!(k%) = debittot!(k%) / n%
NEXT k%

```

```

'
' Écart-type Pour l'enselement seulement.
'

```

```

FOR k% = 1 TO lectures%
    ensocart!(k%) = SQR ( (ensocarree!(k%) - n%*ensomoy!(k%)^2) / (n%-1) )
NEXT k%

```

```

ERASE voltagetot!, hmttot!, ensotot!, couranttot!, tarrtot!, tambtot!,_
    debittot!, ensocarree!

```

```

'
' Résultats Pour l'affichage et/ou l'impression.
'

```

```

COLOR 6, 0
LOCATE 4,1: INPUT "Voulez-vous afficher les résultats? (o/n).....:", repl$

```

```

IF repl$ = "o" OR repl$ = "O" THEN

```

```

    CLS
    COLOR 1, 7
    LOCATE 1,1
    PRINT " _____"
    LOCATE 2,1
    PRINT "| Présentation des moyennes horaires et de l'écart-type de_
    l'enselement |"
    LOCATE 3,1
    PRINT " _____"
    COLOR 2, 0
    LOCATE 5,14: PRINT STRING$(52,196)

```

```

    COLOR 3, 0
    LOCATE 6,14: PRINT " h V HMT Enso I Tf Ta Q Ec"

```

```

    COLOR 2, 0
    LOCATE 7,14: PRINT STRING$(52,196)
    LOCATE 20,14: PRINT STRING$(52,196)
    COLOR 5, 0
    LOCATE 21,14: PRINT SPC(11) "Appuyez sur <c> pour continuer"
    COLOR 1, 7

```

```

LOCATE 22,1
PRINT " _____"
LOCATE 23,1
PRINT "|";SPC(13);"Résultats obtenus à partir du fichier: ";_
nomfichier$(fichier$);SPC(11);"|"
LOCATE 24,1
PRINT " _____";

s$ = "## ##.# ##.# ####.# ##.# ##.# ##.# ##.# ##.# ##.#"
k1$ = 0
COLOR 14, 0

DO UNTIL k2$ = lectures$
  FOR k$ = 1 TO 12
    LOCATE (k$+7),15: PRINT USING s$;(k$+k2$),_
    voltagemoy!(k$+k2$), hmtmoy!(k$+k2$), ensomoy!(k$+k2$),_
    courantmoy!(k$+k2$), tarrmoy!(k$+k2$), tambmoy!(k$+k2$),_
    debitmoy!(k$+k2$), ensoecart!(k$+k2$)
  NEXT k$
  WHILE d$ <> CHR$(99) ' petit c
    d$ = INKEY$
  WEND
  k1$ = k1$ + 1
  k2$ = k1$ * 12
LOOP

END IF

COLOR 5, 0
LOCATE 21,14: PRINT SPC(50)
LOCATE 4,1: PRINT SPC(55)
LOCATE 4,1: INPUT "Voulez-vous sauvegarder les résultats? (o/n).....:", rep2$
COLOR 15, 7

IF rep2$ = "o" OR rep2$ = "O" THEN
  LOCATE 12,8: PRINT CHR$(201);STRING$(62,205);CHR$(187)
  LOCATE 13,8: PRINT CHR$(186);SPC(62);CHR$(186)
  LOCATE 14,8: PRINT CHR$(186);SPC(62);CHR$(186)
  LOCATE 15,8: PRINT CHR$(200);STRING$(62,205);CHR$(188)
  LOCATE 13,10: PRINT "Entrez une ligne descriptive pour le fichier:"
  LOCATE 14,14: INPUT "", desc$
  racine$ = LEFT$(nomfichier$(fichier$),8)
  nouveau$ = racine$ + ".MOY" ' nom du fichier des moyennes
  complet$ = repertoire$ + nouveau$
  COLOR 4, 8
  LOCATE 22,1
  PRINT " _____"
  LOCATE 23,1
  PRINT "|"; SPC(14); "Sauvegarde sous le nom de fichier: ";_
nouveau$; SPC(14); "|"
  LOCATE 24,1
  PRINT " _____";

```

```

OPEN complet$ FOR OUTPUT AS #1
WRITE # 1, desc$

FOR k% = 1 TO lectures%
    WRITE #1, (k%), voltagemoy!(k%), hmtmoy!(k%),_
        ensomoy!(k%), courantmoy!(k%), tarmoy!(k%),_
        tambmoy!(k%), debitmoy!(k%), ensoecart!(k%)
NEXT k%

CLOSE #1
END IF

END SUB

'
' ss-routine Dispons: distribution normale
' Disponibilité moyenne de l'enseleillement pour un système PV.
'
SUB Disponibilite(lectures%,ensomoy!(1),debitmoy!(1),ensoecart!(1),_
    nomfichier$(1),fichier%,repertoire$,tambmoy!(1),tarmoy!(1))

LOCAL    n%,debut!,fin!,enso!,dispo!,dispo1!,dispo2!,cas!,em!,_
        dm!,ee!,z%,k%,pas%,pas2%,p%,p2%,delta%,d$,lignet!,_
        ensostat!(),scenario!(),desc$,racine$,nouveau$,complet$,_
        rep$,repon$,y%
DIM DYNAMIC scenario!(1:5),ensostat!(1:lectures%,1:6)

'
' Scénarios d'enseleillement                               Ces scénarios pourront varier
'
scenario!(1) = 100 : scenario!(2) = 95 : scenario!(3) = 90
scenario!(4) = 80 : scenario!(5) = 75

CLS: COLOR 13, 0
LOCATE 4, 18: PRINT "
LOCATE 5, 18: PRINT "
LOCATE 6, 18: PRINT "
LOCATE 12,18: PRINT "
FOR y% = 1 TO 5
    LOCATE 6+y%, 18: PRINT "Scénario #"; y%; ": "; scenario!(y%); "%"
NEXT y%
COLOR 14, 0
LOCATE 13,20: PRINT "Voulez-vous changer ces scénarios? (o/n) ";; INPUT "","_
    repon$

IF repon$ = "o" THEN
    LOCATE 13,20: PRINT SPC(44)
    COLOR 5, 0
    FOR y% = 1 TO 5
        LOCATE 6+y%,42:PRINT "est remplacé par: ";; INPUT "","_
            scenario!(y%)
    NEXT y%
END IF

```

Impression des tableaux

```
CLS: COLOR 7, 0
LOCATE 1,1
PRINT "
LOCATE 2,1
PRINT " | Disponibilité moyenne de l'ensoleillement | "
LOCATE 3,1
PRINT "
COLOR 14, 0
LOCATE 2,50: PRINT "Pressez <c> pour la suite"
COLOR 2, 0

FOR pas% = 1 TO 3
  LOCATE 4, (1+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(201);STRING$(24,205);CHR$(187)
  LOCATE 5, (1+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(186);SPC(7);"Heure: "
  LOCATE 5, (26+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(186)
  LOCATE 6, (1+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(204);STRING$(12,205);CHR$(209);_
    STRING$(11,205);CHR$(185)
  LOCATE 7, (1+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(186);" Enso(W/m";CHR$(253);" " ;_
    CHR$(179);" D (%)" ;CHR$(186)
  LOCATE 8, (1+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(199);STRING$(12,196);_
    CHR$(197);STRING$(11,196);CHR$(182)
  FOR pas2% = 9 TO 23
    LOCATE pas2%, (1+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(186);SPC(12);_
      CHR$(179);SPC(11);CHR$(186)
  NEXT pas2%
  LOCATE 24, (1+(pas%-1)*26): PRINT CHR$(200);STRING$(12,205);CHR$(207);_
    STRING$(11,205);CHR$(188);
NEXT pas%
```

Méga-boucle qui s'effectue pour chaque heure de la journée moyenne

```
pas% = 1

FOR z% = 1 TO lectures%
  n% = 1
  delta% = 0
  ligne% = 0
  em! = ensomoy!(z%)
  dm! = debitmoy!(z%)
  ee! = ensoecart!(z%)
  IF em! < 25 THEN GOTO ici          ' analyse les heures <intéressantes>
```

Limites de l'analyse

```
dispo! = 100
enso! = 100
```

```

DO WHILE dispo! > 99.9      ' trouve la limite supérieure de l'analyse
  dispo! = FNintegrale!(em!,ee!,enso!) * 100
  debut! = enso! - 50
  enso! = enso! + 50
LOOP

dispo! = 30
enso! = 1300

DO UNTIL dispo! > 70      ' trouve la limite inférieure de l'analyse
  dispo! = FNintegrale!(em!,ee!,enso!) * 100
  fin! = enso! + 50
  enso! = enso! - 50
LOOP

'
' 

|         |
|---------|
| ANALYSE |
|---------|


' raffiner l'analyse à 25 W/m2
' si on veut.
LOCATE 5, (16+(pas%-1)*26): PRINT z%;      ' imprime l'heure
FOR enso! = debut! TO fin! STEP 50
  dispo! = FNintegrale!(em!,ee!,enso!) * 100
  dispo2! = dispo!

'
' 

|            |
|------------|
| Impression |
|------------|


DO WHILE dispo! < scenario!(n%)
  cas! = scenario!(n%)
  ensostat!(z%,n%) = FNinterpolation!(cas!,enso!,dispo2!,_
    dispo1!)
  LOCATE (9 + ligne%), (2+(pas%-1)*26): PRINT USING_
    "#) ####.# " + CHR$(179) + "   ## ";_
    n%; ensostat!(z%,n%); scenario!(n%)
  n% = n% + 1
  delta% = delta% + 1
  ligne% = ligne% + 1

  IF delta% = 15 THEN
    delta% = 0
    ligne% = 0
    WHILE NOT INSTAT: WEND
    LOCATE 2,75:PRINT INKEY$:LOCATE 2,75:PRINT " "
  END IF
LOOP

dispo1! = dispo!
LOCATE (9 + ligne%), (2+(pas%-1)*26):PRINT USING_
  "   #### " + CHR$(179) + "   ##.#";_
  enso!; dispo!
delta% = delta% + 1
ligne% = ligne% + 1

```

```

IF delta% = 15 THEN
    delta% = 0
    ligne% = 0
    WHILE NOT INSTAT: WEND
        LOCATE 2,75: PRINT INKEY$: LOCATE 2,75: PRINT " "
    END IF

NEXT enso!

FOR pas2% = (9+delta%) TO 23          ' finition du tableau en blanc
    LOCATE pas2%, (2+(pas%-1)*26): PRINT SPC(12);CHR$(179);SPC(11)
NEXT pas2%

pas% = pas% + 1          ' passe au tableau suivant à droite

IF pas% = 4 THEN
    WHILE NOT INSTAT: WEND
        LOCATE 2,75: PRINT INKEY$: LOCATE 2,75: PRINT " "

        FOR p% = 1 TO 3          ' efface tout l'écran
            LOCATE 5, (16+(p%-1)*26): PRINT " ";
            FOR p2% = 9 TO 23
                LOCATE p2%, (2+(p%-1)*26):PRINT SPC(12); CHR$(179);
                SPC(11)
            NEXT p2%
        NEXT p%

        pas% = 1
    END IF

```

ici:

NEXT z%

Sauvegarde des résultats	fichiers *.SCE
--------------------------	----------------

```

WHILE NOT INSTAT: WEND
LOCATE 2,75: PRINT INKEY$: LOCATE 2,75: PRINT " "

```

```

COLOR 7, 0
LOCATE 19,1
PRINT " [ "
LOCATE 20,1
PRINT " | "
LOCATE 21,1
PRINT " [ "

```

```

COLOR 9, 0
LOCATE 20,14: INPUT "Voulez-vous sauvegarder les résultats? (o/n)....:", rep$
COLOR 3, 0

```


Fonction de Gauss

```

Fonction Integrale:
  Intégration de la fonction f(x) définie plus bas
      x0%      ; borne inférieure de l'intervalle
      x1%      ; borne supérieure de l'intervalle
      part%    ; nombre des partitions de l'intervalle
      integrale! ; contiendra la valeur de l'intégrale
    
```

```

DEF FNintegrale!(em!,ee!,enso!)
  LOCAL part%, x0%, x1%, h!, x!, k!, i%, integralepartielle!
  part% = 10
  x0% = -5
  x1% = 5
  h! = (x1% - x0%) / (2 * part%)
  x! = x0% ' Évalue la fonction à une borne
  integralepartielle! = FNfx!(x!,em!,ee!,enso!)
  x! = x1% ' Évalue la fonction à une borne
  integralepartielle! = integralepartielle! + FNfx!(x!,em!,ee!,enso!)
  FOR i% = 1 TO 2*part% - 1
    x! = x0% + i%*h!
    k! = 2*(1 + i% MOD 2)
    integralepartielle! = integralepartielle! + k!*FNfx!(x!,em!,ee!,enso!)
  NEXT i%
  FNintegrale! = integralepartielle! * h! / 3
END DEF
    
```

Fonction f(x)

```

DEF FNfx!(x!,em!,ee!,enso!)
  LOCAL d!
  d! = (x!*ee! + em!)/enso!
  IF d! > 1 THEN d! = 1
  FNfx! = d! * 0.398942 * EXP(-x!^2/2)
END DEF
    
```

Sous-programme d'interpolation linéaire

```

DEF FNinterpolation(cas!,enso!,dispo2!,dispo1!)
  LOCAL enso2!, enso1!, pente!
  IF cas! = 100 THEN
    FNinterpolation = enso!
    EXIT DEF
  END IF
  enso2! = enso!
  enso1! = enso! - 50
  pente! = ( enso2! - enso1! ) / ( dispo2! - dispo1! )
  FNinterpolation = -1 * ( pente! * ( dispo2! - cas! ) - enso2! )
END DEF
    
```

SYSTEME.EXE

SYSTEME.BAS

OPTION No. 3

Programme qui calcule la puissance électrique et le débit du GMP théoriques, et ce pour les différents scénarios d'ensoleillement. Ces calculs sont exécutés à chaque mois.

Permet aussi de comparer les résultats théorique et empirique.
Cette routine valide donc le modèle théorique et les paramètres choisis.

```
$INCLUDE "ouvertur.bas"  
$INCLUDE "panneau.bas"  
$INCLUDE "pompe.bas"
```

L'utilisateur définit la période d'analyse. Le fichier est trouvé.

```
CLS  
COLOR 3, 0  
PRINT "  
PRINT " Période d'analyse:          CALCULS DES PUISSANCES - Option # 3 "  
PRINT "  
COLOR 11, 0  
INPUT "Répertoire de données du fichier *.SCE (d:\ascii\)...: ", repertoire$  
IF repertoire$ = "" THEN repertoire$ = "d:\ascii\  
INPUT "Pour quel mois? (mm)...: ", mois$  
INPUT "Pour quelle année? (aa)...: ", annee$  
INPUT "Avec quel pas de temps? (10 ou 60 minutes)...: ", type$  
  
COLOR 3, 0  
LOCATE 9, 8  
PRINT "  
LOCATE 10, 8  
PRINT " Voulez-vous d'abord valider le modèle théorique? (o/n) "  
LOCATE 11, 8  
PRINT "  
LOCATE 10, 67: INPUT "", reponse$
```

Comparaison entre puissances théorique et empirique

```
IF reponse$ = "o" THEN  
    partie$ = 2  
    fiche$ = "moy"  
    jour$ = "1"  
    periode$ = "mensuelle"  
    IF type$ = "60" THEN lectures$ = 24 ELSE lectures$ = 144
```

```

CALL TrouveFichier(fiche$,jour$,mois$,annee$,periode$,type$)

CALL OuvreFichier(repertoire$,nomfichier$(),fiche$,mois$,fichier$,type$)

CALL Valide1(lectures$,enso!(),tamb!(),courant!(),voltage!(),_
            titre$(),repertoire$)

END IF

COLOR 13, 0
LOCATE 20, 9
PRINT "┌───────────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┐"
LOCATE 21, 9
PRINT "│                Pour l'évaluation de la puissance...                │"
LOCATE 22, 9
PRINT "└───────────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┘"
COLOR 9, 0
PRINT SPC(48) "Pressez sur <C> pour continuer"
WHILE c$ <> CHR$(99): c$ = INKEY$: WEND
CLS

' ┌───────────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┐
' │ Évaluation de la puissance électrique selon scénarios │
' └───────────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┘

fiche$ = "sce"
jour$ = "1"
periode$ = "scénarios"
IF type$ = "60" THEN lectures$ = 24 ELSE lectures$ = 144

CALL TrouveFichier(fiche$,jour$,mois$,annee$,periode$,type$)

IF partie$ = 2 THEN ERASE titre$, prem$

CALL OuvreFichier2(repertoire$,f$,fiche$,type$)

CALL Modelejpl(lectures$,heur!(),ens!(),ta!(),tf!(),partie$,repertoire$)

COLOR 7, 0
LOCATE 19,1
PRINT "┌───────────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┐"
LOCATE 20,1
PRINT "│                .                │"
LOCATE 21,1
PRINT "└───────────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┘";
COLOR 9, 0
LOCATE 20,14: INPUT "Voulez-vous sauvegarder les résultats? (o/n).....:", rep$
CLOSE
COLOR 3, 0

```

```

'
' Sauvegarde dans un fichier *.PEL (Puissance Électrique)
'
IF ((rep$ = "o" OR rep$ = "O") AND partie$ = 2) THEN
  LOCATE 12,7: PRINT CHR$(201);STRING$(62,205);CHR$(187)
  LOCATE 13,7: PRINT CHR$(186);SPC(62);CHR$(186)
  LOCATE 14,7: PRINT CHR$(186);SPC(62);CHR$(186)
  LOCATE 15,7: PRINT CHR$(200);STRING$(62,205);CHR$(188)
  LOCATE 13,10: PRINT "Entrez une ligne descriptive pour le fichier:"
  LOCATE 14,14: INPUT "", desc$
  nouveau$ = LEFT$(f$,8) + ".PEL"
  complet$ = repertoire$ + nouveau$
  COLOR 15, 5
  LOCATE 22,1
  PRINT " _____"
  LOCATE 23,1
  PRINT "| "; SPC(14); "Sauvegarde sous le nom de fichier: ";_
  nouveau$; SPC(14); "| "
  LOCATE 24,1
  PRINT " _____";
  OPEN complet$ FOR OUTPUT AS #1
  WRITE # 1, desc$
  WRITE # 1, "Les % des scénarios sont: ", 100, 95, 90, 80, 75

  FOR k% = 1 TO lectures%
    WRITE #1, (k%), puissance!(1,k%), puissance!(2,k%),_
    puissance!(3,k%), puissance!(4,k%), puissance!(5,k%),_
    puissance!(6,k%), pemp!(k%), diff!(k%)
  NEXT k%

  CLOSE #1

ELSEIF (rep$ = "o" OR rep$ = "O") THEN
  COLOR 15, 3
  LOCATE 22,1
  PRINT " _____"
  LOCATE 23,1
  PRINT "| >> Sauvegarde refusée << Faire le processus d'évaluation ET
  de scénarios | "
  LOCATE 24,1
  PRINT " _____";
END IF

```

```

'
' Le calcul du débit à partir de la puissance électrique. Ce calcul se
' fait pour une équation comprenant de 1 à 4 paramètres.
' 1. Équation du premier degré, de la forme P = cQ
' (Le paramètre -a- se retrouve dans le fichier TED_ORD1.GMP)
' 2. Équation du troisième degré, forme P = aQ3 + bQ2 + cQ + d
' (Les paramètres -a,b,c,d- sont dans le fichier TED_ORD3.GMP)
'

```



```

OPEN complet$ FOR OUTPUT AS #1
WRITE # 1, desc$
WRITE # 1, "Hauteur manométrique totale: ", h$
WRITE # 1, "Ordre de l'équation P=f(Q) : ", ordret
WRITE # 1, "Les % des scénarios sont: ", 100, 95, 90, 80, 75
FOR k% = 1 TO lectures$
    WRITE #1, (k%), Q!(1,k%), Q!(2,k%), Q!(3,k%), Q!(4,k%),_
        Q!(5,k%), Q!(6,k%)
NEXT k%
CLOSE #1

```

END IF

END

PANNEAU.BAS

```

PANNEAU.BAS

```

Inclu dans SYSTEME.BAS

Ce modèle permet d'obtenir les expressions de courant et de voltage pour les cellules photovoltaïques sous des conditions de température et d'ensoleillement autres que celles de référence.

Le Pmax pour les différents scénarios d'ensoleillement est trouvé. On cherche le Pmax car le générateur fonctionne à ce point. réf.[6]

```

Modèle du Jet Propulsion Laboratory

```

```

SUB Modelejpl(lectures$,heur!(1),ens!(2),ta!(1),tf!(1),partie$,reper$)

```

```

SHARED titre$, airegen!, airecell!, Sr!, Tr!, Np$, Ns$, Ev!, Ep!, Ec!,_
alpha!, beta!, Vr!, Ir!, Isc!, Rs!, m!, puissance!()
LOCAL h$, s$, s$, fichiers$
DIM puissance!(1:6,1:24)

```

Quelques caractéristiques du générateur FrancePhoton du CÉRÉR:
36 cellules / panneau ; 4 panneaux / module ; 8 modules / série
2 séries en parallèle. Chaque cellule fait 8.2 cm de diamètre.

airegen! = 12.6175 m ²	airecell! = 52.81 cm ²	
Sr! = 1000 W/m ²	Tr! = 25 °C	
Np\$ = 1	Ns\$ = 1152	
Ev! = 0.90	Ep! = 0.80	Ec! = 0.90
alpha! = 1.32.e-3 A/°C	beta! = 2.2e-3 A/°C	
Vr! = 0.48 V	Ir! = 2.174 A	
Isc! = 2.47 A	Rs! = 0.050 ohm	m! = 0.02

```

IF partiet <> 2 THEN
  CLOSE
  fichier$ = "fp_param.gen"
  fichier$ = repert$ + fichier$
  OPEN fichier$ FOR INPUT AS # 1
  INPUT # 1, titre$
  INPUT # 1, airegen!, airecell!
  INPUT # 1, Sr!, Tr!
  INPUT # 1, Np%, Ns%
  INPUT # 1, Ev!, Ep!, Ec!
  INPUT # 1, alpha!, beta!
  INPUT # 1, Vr!, Ir!
  INPUT # 1, Isc!, Rs!, m!
  CLOSE
END IF

```

Pour les différents scénarios d'ensoleillement et la température moyenne ambiante pour chaque heure de la journée représentant le mois, on calcule la puissance électrique du générateur.

```

CLS
COLOR 7, 0
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
COLOR 6, 0
LOCATE 2, 3: PRINT "Scénarios d'ensoleillement"
COLOR 10, 0

LOCATE 3,2
PRINT " heure      100      95      90      80      75      Moy"
s$ = "  ##      ####.#      ####.#      ####.#      ####.#      ####.#      ####.#"
COLOR 3, 0
LOCATE 5,1

FOR h% = 1 TO lectures%
  IF ens!(1,h%) = 0 THEN GOTO marrakech
  FOR s% = 1 TO 6
    puissance!(s%,h%) = FNpet!(ens!(s%,h%),ta!(h%))
    IF puissance!(s%,h%) < 0 THEN puissance!(s%,h%) = 0
  NEXT s%

  PRINT USING s$; h%: puissance!(1,h%), puissance!(2,h%),_
    puissance!(3,h%), puissance!(4,h%), puissance!(5,h%),_
    puissance!(6,h%)

marrakech:

NEXT h%
COLOR 7, 0

```

```
PRINT "
PRINT " Puissance du générateur (W) pour les différents scénarios_
et la moyenne "
PRINT "
```

```
END SUB
```

```
'
' Équation empirique pour la puissance électrique.
'
```

```
SUB Validel(lectures%,enso!(1),tamb!(1),courant!(1),voltage!(1),_
titre$(1),repert$)
```

```
SHARED pthe!(), pemp!(), diff!(), titre$, airegen!, airecell!, Sr!,_
Tr!, Np%, Ns%, Ev!, Ep!, Ec!, alpha!, beta!, Vr!, Ir!, Isc!,_
Rs!, m!
```

```
LOCAL z%, d$, fichiers$
```

```
DIM pthe!(1:24), pemp!(1:24), diff!(1:24)
```

```
'
' Paramètres obtenus d'un fichier de données.
'
```

```
fichier$ = "fp_param.gen"
fichier$ = repert$ + fichier$
OPEN fichier$ FOR INPUT AS # 2
INPUT # 2, titre$
INPUT # 2, airegen!, airecell!
INPUT # 2, Sr!, Tr!
INPUT # 2, Np%, Ns%
INPUT # 2, Ev!, Ep!, Ec!
INPUT # 2, alpha!, beta!
INPUT # 2, Vr!, Ir!
INPUT # 2, Isc!, Rs!, m!
CLOSE
```

```
CLS
```

```
COLOR 8, 0
```

```
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
```

```
COLOR 5, 0
```

```
LOCATE 2,3: PRINT "Procédure de validation: "; titre$(1)
```

```
COLOR 2, 0
```

```
LOCATE 3,2
```

```
PRINT " heure Puissance théorique Puissance empirique Différence"
d$ = " ## #####.## #####.## ###.##"
```

```
COLOR 7, 0
```

```
LOCATE 5,1
```

```

FOR z% = 1 TO lectures%
  IF enso!(z%) < 120 THEN GOTO denver
  pthe!(z%) = FNpet!(enso!(z%),tamb!(z%))
  pemp!(z%) = FNpee!(courant!(z%),voltage!(z%))
  diff!(z%) = (pemp!(z%)-pthe!(z%)) * 100 / pthe!(z%)
  PRINT USING d$; z%, pthe!(z%), pemp!(z%), diff!(z%)

```

```
denver:
```

```
NEXT z%
```

```
COLOR 8, 0
```

```

PRINT "
PRINT "          Puissance du générateur en W          Différence en %
PRINT "

```

```
END SUB
```

```

/
/  Fonction qui calcule la Puissance Électrique Théorique du générateur
/

```

```
DEF FNpet!(S!,Ta!)
```

```

LOCAL T!, deltaT!, divisS!, deltaI!, deltaV!, V!, I!, P! Et!
T! = Ta! + ( m! * S! )
deltaT! = T! - Tr!
divisS! = S! / Sr!
deltaI! = ( alpha! * divisS! * deltaT! ) + ( Isc! * (divisS! - 1) )
deltaV! = ( -1 * beta! * deltaT! ) - ( Rs! * deltaI! )
Vc! = Vr! + deltaV!
Ic! = Ir! + deltaI!
V! = Ns% * Vc!
I! = Np% * Ic!
P! = I! * V!
Et! = Ev! * Ep! * Ec!

FNpet! = P! * Et!

```

```
END DEF
```

```

/
/  Fonction qui calcule la Puissance Électrique Empirique du générateur
/

```

```
DEF FNpee!(I!,V!) = I! * V!
```

POMPE.BAS

```
POMPE.BAS
```

```
Inclu dans SYSTEME.BAS
```

```
Calcul du débit à partir de la puissance électrique et des paramètres a, b, c et d.
```

```
SUB CalculDebit(puissance!(2), lectures%, hauteur%(1), nombrelectures%,_  
ordre%, a!(1), b!(1), c!(1), d!(1))
```

```
SHARED Q!(), h%
```

```
LOCAL i%, j%, a!, b!, c!, d!, st, s$, q!, pente!, Phaut!, Pbas!,  
Qbas!, Qhaut!, Qpas!
```

```
DIM Q!(1:6,1:24)
```

```
COLOR 10, 0
```

```
PRINT
```

```
INPUT "A quelle HMT voulez-vous simuler le système? ( entier ) ", h%
```

```
PRINT
```

```
COLOR 3, 0
```

```
PRINT "
```

```
PRINT " Un petit moment s'il-vous-plaît... "
```

```
PRINT "
```

```
Trouver la série de paramètres a, b, c, d.
```

```
FOR j% = 1 TO nombrelectures%  
IF h% = hauteur%(j%) THEN  
a! = a!(j%)  
b! = b!(j%)  
c! = c!(j%)  
d! = d!(j%)  
EXIT FOR  
END IF  
NEXT j%
```

```
Ensuite pour chaque heure et chaque scénario, trouver le débit. Ce dernier est interpolé linéairement entre deux valeurs de q!.
```

```
Qbas! = 0.00
```

```
Qhaut! = 6.00
```

```
Qpas! = 0.01
```

```
' Ces valeurs pourront être changées par l'utilisateur
```

```

FOR s% = 1 TO 6
  FOR i% = 1 TO lectures%
    Pbas! = 0
    FOR q! = Qbas! TO Qhaut! STEP Qpas!
      Phaut! = FNexpression!(a!,b!,c!,d!,q!)
      IF Phaut! > puissance!(s%,i%) THEN
        pente! = (Phaut! - Pbas!) / Qpas!
        Q!(s%,i%) = q! - ((Phaut! - puissance!(s%,i%)) / _
                                                                    pente! )
        IF Q!(s%,i%) < 0.01 THEN Q!(s%,i%) = 0.00
      EXIT FOR
    END IF
    Pbas! = FNexpression!(a!,b!,c!,d!,q!)
  NEXT q!
NEXT i%
NEXT s%

```

```

CLS: COLOR 1, 7
PRINT " Puissance disponible et débit produit pour différents scénarios "
PRINT " "

```

```

COLOR 14, 7
PRINT CHR$(218); STRING$(2,196); CHR$(194); STRING$(11,196); CHR$(194);_
STRING$(12,196); CHR$(194); STRING$(12,196); CHR$(194);_
STRING$(12,196); CHR$(194); STRING$(12,196); CHR$(194);_
STRING$(10,196); CHR$(191)

```

```

PRINT " |h | Scé.: 100% | Scé.: 95% | Scé.: 90% | Scé.: 80% | Scé.: 75% | _
Moyenne | "
PRINT " | | P Q | P Q | P Q | P Q | P Q | _
P Q | "
s$ = " |##|###.# #.## | ###.# #.## | ###.# #.## | ###.# #.## | ###.# #.## | _
###.# #.## | "

```

```

PRINT CHR$(195); STRING$(2,196); CHR$(197); STRING$(11,196); CHR$(197);_
STRING$(12,196); CHR$(197); STRING$(12,196); CHR$(197);_
STRING$(12,196); CHR$(197); STRING$(12,196); CHR$(197);_
STRING$(10,196); CHR$(180)

```

```

FOR i% = 1 TO lectures%
  IF puissance!(5,i%) = 0 THEN GOTO vermont
  PRINT USING s$; i%, puissance!(1,i%), Q!(1,i%), puissance!(2,i%),_
Q!(2,i%), puissance!(3,i%), Q!(3,i%), puissance!(4,i%),_
Q!(4,i%), puissance!(5,i%), Q!(5,i%), puissance!(6,i%),_
Q!(6,i%)

```

```

vermont:
NEXT i%

```

```

PRINT CHR$(192); STRING$(2,196); CHR$(193); STRING$(11,196); CHR$(193);_
STRING$(12,196); CHR$(193); STRING$(12,196); CHR$(193);_
STRING$(12,196); CHR$(193); STRING$(12,196); CHR$(193);_
STRING$(10,196); CHR$(217)

```

```

END SUB

```

Expression $P = f(Q)$ du troisième ordre. On a qu'a remplacer un ou plusieurs des paramètres (a, b, c ou d) pour avoir une expression d'un ordre inférieur.

```
DEF FNexpression!(a!,b!,c!,d!,q!) = a! * q! * q! * q! + b! * q! * q! +
                                     c! * q! + d!
```

RESERVE.EXE

RESERVE.BAS

OPTION No. 4

Programme qui calcule le volume du réservoir requis selon la HMT, le scénario d'ensoleillement choisi et le comportement des utilisateurs au cour d'une journée typique.

Analyse aussi les relations coûts/risques.

```
$INCLUDE "ouvertur.bas"
```

```
$INCLUDE "volume.bas"
```

L'utilisateur défini la période d'analyse. Le fichier est trouvé.

```
CLS
```

```
COLOR 3, 0
```

```
PRINT "
```

```
PRINT "
```

CALCUL DU VOLUME

Option # 4

```
PRINT "
```

```
COLOR 11, 0
```

```
INPUT "Répertoire de données (d:\ascii\)...: ", repertoire$
```

```
IF repertoire$ = "" THEN repertoire$ = "d:\ascii\"
```

Questions sur le fichier contenant les débits.

```
PRINT
```

```
PRINT STRING$(10,220); " Fichier des débits, *.DEB "; STRING$(30,220)
```

```
INPUT "Pour quel mois? (mm)...: ", mois$
```

```
INPUT "Pour quelle année? (aa)...: ", annee$
```

```
INPUT "Avec quel pas de temps? (10 ou 60 minutes)...: ", type$
```

```
fiche$ = "DEB"
```

```
jour$ = "1"
```

```
periode$ = "débits"
```

```
IF type$ = "60" THEN lectures% = 24 ELSE lectures% = 144
```

Questions sur le fichier des info. sur la conso.

```
PRINT  
PRINT STRING$(10,220); " Fichier de consommation, *.VIL "; STRING$(25,220)  
INPUT "Quel est le nom du fichier (8 caractères).....: ", fparam$  
INPUT "Quelle est l'extension (3 caractères).....: ", ext$  
IF ext$ = "" THEN fiche$ = "VIL"
```

Appel des sous-routines

```
CALL TrouveFichier(fiche$,jour$,mois$,annee$,periode$,type$)  
  
f1$ = nomfichier$(1)  
f2$ = fparam$ + "." + ext$  
  
CALL OuvreFichier4(repertoire$,f1$,f2$)  
  
CALL Volume(Q!(),Cof!(),nomvil$(),repertoire$,f1$,titre1$)  
  
END
```

VOLUME.BAS

VOLUME.BAS

Inclu dans RESERVE.BAS

Calcule le volume du réservoir avec la méthode volumétrique.

Calcul le volume du réservoir (en m3) selon les scénarios grâce à la méthode analytique développée dans "Water Supply Engineering Design", de Al-Layla, Ahmad et Middlebrooks.

```

SUB Volume(Q!(2),C!(2),nomvil$(1),repertoire$,fl$,titre1$)

LOCAL      vil%, i%, j%, j0%, j1%, k%, l%, r$, s$, lsum!, sd!, sq!, Vmin!,_
           Vmax!, rep$, rep2$, nouv$, e$
SHARED     pop%, bet%, consol%, conso2%
DIM        D!(1:24), diff!(1:6,1:24), variation!(1:6,1:24), mes$(1:6),_
           sumD!(1:6), sumQ!(1:6), vol!(1:6)

INPUT "Quel est la population du village?.....: ", pop%
INPUT "La demande quotidienne per capita? (20 l).....: ", consol%
IF consol% = 0 THEN consol% = 20
INPUT "Combien de têtes de bétail?.....: ", bet%
INPUT "Leur consommation moyenne est de? (35 l).....: ", conso2%
IF conso2% = 0 THEN conso2% = 35
PRINT "Type de comportement des utilisateurs:"
PRINT "  1. Collecte de l'eau en après-midi seulement ("; nomvil$(1); ")"
PRINT "  2. Collecte de l'eau le matin et l'après-midi ("; nomvil$(2); ")"
INPUT "                               Choix (1 ou 2).....: ", vil%
besoin! = (pop% * consol% + bet% * conso2%) / 1000
e$ = "Les besoins quotidiens en eau sont évalués à: ###.## m3."
PRINT USING e$; besoin!

FOR i% = 1 TO 24
    D!(i%) = C!(vil%,i%) * besoin! / 100
NEXT i%

FOR j% = 1 TO 24
    FOR k% = 1 TO 6
        diff!(k%,j%) = Q!(k%,j%) - D!(j%)
        lsum! = 0
        FOR l% = 1 TO j%
            lsum! = lsum! + diff!(k%,l%)
        NEXT l%
        variation!(k%,j%) = lsum!
    NEXT k%
NEXT j%

```

```

FOR k% = 1 TO 6
  sD! = 0
  sQ! = 0
  Vmin! = 0
  Vmax! = 0
  FOR j% = 1 TO 24
    sD! = sD! + D!(j%)
    sQ! = sQ! + Q!(k%,j%)
    IF variation!(k%,j%) < Vmin! THEN Vmin! = variation!(k%,j%)
    IF variation!(k%,j%) > Vmax! THEN Vmax! = variation!(k%,j%)
  NEXT j%
  sumD!(k%) = sD!
  sumQ!(k%) = sQ!
  vol!(k%) = ABS(Vmin!) + ABS(Vmax!)
NEXT k%

```

```

r$ = "  ##      ##.##      ##.##      ##.##      ####.##"
s$ = "Somme=  ###.##      ###.##      Volume=  ###.##"
mes$(1) = "Scénario de 100% d'ensoleillement  "
mes$(2) = "Scénario de 95% d'ensoleillement  "
mes$(3) = "Scénario de 90% d'ensoleillement  "
mes$(4) = "Scénario de 80% d'ensoleillement  "
mes$(5) = "Scénario de 75% d'ensoleillement  "
mes$(6) = "Pour l'ensoleillement moyen        "

```

```

FOR k% = 1 TO 6
  LOCATE 21,15: PRINT SPC(50)
  j0% = 0: j1% = 0
  DO UNTIL j1% = 24
    COLOR k%+9, 0
    LOCATE 4,15: PRINT mes$(k%)
    COLOR 12, 0
    LOCATE 5 ,15: PRINT "-----"
    LOCATE 6 ,15: PRINT "heure Demande Débit Différence Variation"
    LOCATE 7 ,15: PRINT "-----"
    LOCATE 20,15: PRINT "-----"
    LOCATE 22,15: PRINT "-----"
    COLOR 3, 0
    FOR j% = 1 TO 12
      LOCATE 7+j%, 15: PRINT USING r$; (j%+j1%), D!(j%+j1%),_
      Q!(k%,j%+j1%), diff!(k%,j%+j1%), variation!(k%,j%+j1%)
    NEXT j%
    WHILE NOT INSTAT: WEND
    LOCATE 3,76: PRINT INKEY$: LOCATE 3,76: PRINT "  "
    j0% = j0% + 1
    j1% = j0% * 12
  LOOP
  COLOR k%+9, 0
  LOCATE 21,15: PRINT USING s$; sumD!(k%), sumQ!(k%), vol!(k%)
  WHILE NOT INSTAT: WEND
  LOCATE 3,76: PRINT INKEY$: LOCATE 3,76: PRINT "  "
NEXT k%

```

```

COLOR 14, 0
INPUT "Voulez-vous imprimer les résultats? (préparez l'imprimante) ", rep$

IF rep$ = "o" THEN
  FOR k% = 1 TO 6
    LPRINT mes$(k%)
    LPRINT "-----"
    LPRINT "heure   Demande   Debit   Difference   Variation"
    LPRINT "-----"
    FOR j% = 1 TO 24
      LPRINT USING r$; (j%), D!(j%), Q!(k%,j%), diff!(k%,j%),_
                                variation!(k%,j%)
    NEXT j%
    LPRINT "-----"
    LPRINT USING s$; sumD!(k%), sumQ!(k%), vol!(k%)
    LPRINT "-----"
    LPRINT: LPRINT
    WHILE NOT INSTAT: WEND
    LOCATE 3,76: PRINT INKEY$: LOCATE 3,76: PRINT " "
  NEXT k%
END IF

COLOR 14, 0
INPUT "Voulez-vous sauvegarder dans un fichier *.VOL ?           ", rep2$

IF rep2$ = "o" THEN
  nouv$ = repertoire$ + LEFT$(f1$,8) + ".VOL"
  OPEN nouv$ FOR OUTPUT AS #1

  WRITE #1, titre1$
  WRITE #1, "Les besoins quotidiens en eau sont de (m3)", besoin!

  FOR k% = 1 TO 6
    WRITE #1, mes$(k%)
    FOR j% = 1 TO 24
      WRITE #1, (j%), D!(j%), Q!(k%,j%), diff!(k%,j%),_
                                variation!(k%,j%)
    NEXT j%
    WRITE #1, sumD!(k%), sumQ!(k%), vol!(k%)
  NEXT k%

  CLOSE #1

END IF

END SUB

```

GRAPHIK.EXE

```

GRAPHIK.BAS:

```

OPTION No. 5

```

Sélection des données à présenter et impression à l'écran de
ces mêmes données, qui se trouvent dans les fichiers Modas (*.ASC).

Peut aussi tracer les fichiers de moyennes (*.MOY), les fichiers
contenant les différents scénarios d'ensoleillement (*.SCE) et aussi
les fichiers contenant les caractéristiques I-V de générateurs (*.GEN).

```

```

$INCLUDE "d:ouvertur.bas"      ' Trouve et ouvre le-s fichier-s
$INCLUDE "d:koordone.bas"     ' Crée les échelles et les coordonnées
$INCLUDE "d:diagram.bas"     ' Selection et affichage des paramètres

```

CLS

COLOR 3, 0

```

PRINT "
PRINT "   Période d'analyse:          PRÉSENTATION GRAPHIQUE - Option #5
PRINT "

```

INPUT " Quel est le répertoire de fichiers? (d:\ascii\): ", repert\$

```

PRINT "      Fichier *.ASC : les données horaires collectées sur site"
PRINT "      Fichier *.MOY : les moyennes mensuelles, la journée-type"
PRINT "      Fichier *.SCE : les scénarios de disponibilité d'ensoleillement"
PRINT "      Fichier *.GEN : caractéristiques I-V du générateur"

```

INPUT " Quel type de fichier? (ASC, MOY, SCE ou GEN)...: ", fiche\$

If repert\$ = "" THEN repert\$ = "d:\ascii\"

SELECT CASE fiche\$

CASE "moy", "MOY"

INPUT " Pour quel mois? (mm).....: ", mois\$

INPUT " Pour quelle année? (aa).....: ", annee\$

INPUT " Avec quel pas de temps? (10 ou 60 minutes).....: ", type\$

jour\$ = "1"

periode\$ = "MENSUELLE"

CALL TrouveFichier(fiche\$,jour\$,mois\$,annee\$,periode\$,type\$)

CALL OuvreFichier(repert\$,nomfichier(),fiche\$,mois\$,fichier\$,type\$)

CALL SelectParametre(fiche\$,e!(),t!(),s!())

CALL Cadre(fiche\$)

CALL AfficheLegende(choix(),param\$,fiche\$)

CALL CreeCoordonnees(choix(),echelle(),param\$,t\$,voltage!(),hmt!(),_
enso!(),courant!(),tarr!(),tamb!(),debit!(),p\$,fichier\$)

CALL AfficheCourbe(fiche\$,x!(),y!(),jpm\$,premt\$,titre\$,fichier\$,_
periode\$,jour\$,mois\$,annee\$,moisfin\$,anneefin\$,param\$,t\$)

```

CASE "asc", "ASC"
  INPUT " À partir de quel jour? (jj.mm.aa).....: ", debut$
  INPUT " Pour quel période de temps? (jours).....: ", periode$
  INPUT " Avec quel pas de temps? (10 ou 60 minutes).....: ", type$
  jour$ = LEFT$(debut$,2)
  mois$ = MID$(debut$,4,2)
  annee$ = RIGHT$(debut$,2)
  CALL TrouveFichier(fiche$,jour$,mois$,annee$,periode$,type$)
  CALL OuvreFichier(repert$,nomfichier$,fiche$,mois$,fichier$,type$)
  CALL SelectParametre(fiche$,e!(),t!(),s!())
  CALL Cadre(fiche$)
  CALL AfficheLegende(choix!(),param!,fiche$)
  CALL CreeCoordonnees(choix!(),echelle!(),param!,t!,voltage!(),hmt!(),_
    ens!(),courant!(),tarr!(),tamb!(),debit!(),p!,fichier$)
  CALL AfficheCourbe(fiche$,x!(),y!(),jpm!(),prem!(),titre$(),fichier$,_
    periode$,jour$,mois$,annee$,moisfin!,anneefin$,param!,t!)

CASE "sce", "SCE"
  INPUT " Pour quel mois? (mm).....: ", mois$
  INPUT " Pour quelle année? (aa).....: ", annee$
  INPUT " Avec quel pas de temps? (10 ou 60 minutes).....: ", type$
  jour$ = "1"
  periode$ = "SCÉNARIOS"
  CALL TrouveFichier(fiche$,jour$,mois$,annee$,periode$,type$)
  CALL OuvreFichier2(repert$,f$,fiche$,type$)
  CALL SelectParametre(fiche$,e!(),t!(),s!())
  CALL Cadre(fiche$)
  CALL AfficheLegende(choix!(),param!,fiche$)
  CALL CreeCoordonnees2(choix!(),echelle!(),heur!(),ens!(),_
    param!,t!,p!,fiche$)
  CALL AfficheCourbe(fiche$,x!(),y!(),jpm!(),prem!(),titre$(),fichier$,_
    periode$,jour$,mois$,annee$,moisfin!,anneefin$,param!,t!)

CASE "gen", "GEN"
  INPUT " Nom du fichier? (8lettres).....: ", f$
  INPUT " Valeur du shunt? (x A = 100 mV).....: ", type$
  periode$ = "GENERATEUR": jourfin! = 7: jour$ = "7": mois$ = "3"
  moisfin! = 3: anneeefin$ = "91": annee$ = "91": fichier! = 1
  jpm!(VAL(mois$)) = 31
  f$ = f$ + "." + fiche$
  CALL OuvreFichier2(repert$,f$,fiche$,type$)
  CALL SelectParametre(fiche$,e!(),t!(),s!())
  CALL Cadre(fiche$)
  CALL AfficheLegende(choix!(),param!,fiche$)
  CALL CreeCoordonnees2(choix!(),echelle!(),volt!(),cour!(),_
    param!,t!,p!,fiche$)
  CALL AfficheCourbe(fiche$,x!(),y!(),jpm!(),prem!(),titre$(),fichier$,_
    periode$,jour$,mois$,annee$,moisfin!,anneefin$,param!,p!)

END SELECT

END

```

KOORDONE.BAS

KOORDONE.BAS

Inclu dans GRAPHIK.BAS

Création des légendes et des coordonnées.

Selon le nombre de paramètres choisis, les coordonnées sont déterminés: $x!()$, selon le pas de temps, et $y!(,)$ selon l'échelle adéquate. La date est $j\#()$, $m\#()$ et $a\#()$ est déterminée pour chaque série.

```
SUB CreeCoordonnees(choix%(1),echelle%(1),param%,t%,voltage!(1),hmt!(1),_
    enso!(1),courant!(1),tarr!(1),tamb!(1),debit!(1),p%(1),fichier%)

LOCAL      g#, h#, i#, j#, k#, l#, m#, n#, debut#, fin#
SHARED    x!(), y!()
DIM       x!(1:t#+1), y!(1:param%,1:p%(fichier#))
          ' (t# + 1) car il y a 1 journée + 1 donnée à minuit

FOR k# = 1 TO fichier#
    IF k# = 1 THEN                                ' Ajustement selon le fichier
        debut# = 1
        fin# = p%(1)
    ELSEIF k# = 2 THEN
        debut# = ( p%(1) + 1 )
        fin# = p%(2)
    END IF
    FOR i# = 1 TO param#                          ' données selon l'AXE DES Y
        FOR j# = debut# TO fin#
            SELECT CASE choix%(i#)
            CASE 1
                y!(i#,j#) = voltage!(j#) * 150 / echelle%(i#)
            CASE 2
                y!(i#,j#) = hmt!(j#) * 150 / echelle%(i#)
            CASE 3
                y!(i#,j#) = enso!(j#) * 150 / echelle%(i#)
            CASE 4
                y!(i#,j#) = courant!(j#) * 150 / echelle%(i#)
            CASE 5
                y!(i#,j#) = tarr!(j#) * 150 / echelle%(i#)
            CASE 6
                y!(i#,j#) = tamb!(j#) * 150 / echelle%(i#)
            CASE 7
                y!(i#,j#) = debit!(j#) * 150 / echelle%(i#)
            END SELECT
        NEXT j#
    NEXT i#
NEXT k#
```


Allocation des échelles et impression à l'écran

SUB AfficheLegende(choix%(1),param%,fiche\$)

LOCAL i%

SHARED echelle%()

DIM echelle%(param%)

SELECT CASE fiche\$

CASE "asc","ASC","moy","MOY"

 FOR i% = 1 TO param%

 COLOR (i%+9) ' pour les 7 courbes remplacer par (i%+8)

 SELECT CASE choix%(i%)

 CASE 1

 echelle%(i%) = 200

 LOCATE (3*i% + 2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+" 200 V"

 LOCATE (3*i% + 3),3: PRINT "Tension";

 CASE 2

 echelle%(i%) = 50

 LOCATE (3*i% + 2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+" 50 m"

 LOCATE (3*i% + 3),3: PRINT " HMT";

 CASE 3

 echelle%(i%) = 1000

 LOCATE (3*i% + 2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+" 1kW/m²"

 LOCATE (3*i% + 3),3: PRINT " Enso";

 CASE 4

 echelle%(i%) = 10

 LOCATE (3*i% + 2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+" 10 A"

 LOCATE (3*i% + 3),3: PRINT "Courant";

 CASE 5

 echelle%(i%) = 100

 LOCATE (3*i% + 2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+" 100 °C"

 LOCATE (3*i% + 3),3: PRINT "Tfacearr";

 CASE 6

 echelle%(i%) = 100

 LOCATE (3*i% + 2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+" 100 °C"

 LOCATE (3*i% + 3),3: PRINT " T amb.";

 CASE 7

 echelle%(i%) = 10

 LOCATE (3*i% + 2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+"10 m³/h"

 LOCATE (3*i% + 3),3: PRINT " Débit";

 END SELECT

 NEXT i%

CASE "sce","SCE"

 FOR i% = 1 TO param%

 COLOR (i%+9)

 SELECT CASE choix%(i%)

 CASE 1

 echelle%(i%) = 1000

 LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR\$(223)+CHR\$(223)+" 1)100%"

```

CASE 2
  echelle%(i%) = 1000
  LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 2) 95%"
CASE 3
  echelle%(i%) = 1000
  LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 3) 90%"
CASE 4
  echelle%(i%) = 1000
  LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 4) 80%"
CASE 5
  echelle%(i%) = 1000
  LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 5) 75%"
CASE 6
  echelle%(i%) = 1000
  LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 6) MOY"
END SELECT
NEXT i%

CASE "gen","GEN"
  FOR i% = 1 TO param%
    COLOR (i%+9)
    SELECT CASE choix%(i%)
    CASE 1
      echelle%(i%) = 12
      LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 1) 196"
      LOCATE (3*i%+3),3: PRINT "    W/m2 ";
    CASE 2
      echelle%(i%) = 12
      LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 2) 346"
      LOCATE (3*i%+3),3: PRINT "    W/m2 ";
    CASE 3
      echelle%(i%) = 12
      LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 3) 647"
      LOCATE (3*i%+3),3: PRINT "    W/m2 ";
    CASE 4
      echelle%(i%) = 12
      LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 4) 811"
      LOCATE (3*i%+3),3: PRINT "    W/m2 ";
    CASE 5
      echelle%(i%) = 12
      LOCATE (3*i%+2),2: PRINT CHR$(223)+CHR$(223)+" 5) 989"
      LOCATE (3*i%+3),3: PRINT "    W/m2 ";
    END SELECT
  NEXT i%

END SELECT

END .SUB

```

DIAGRAM.BAS

DIAGRAM.BAS

Inclu dans GRAPHIK.BAS

- 1) sous-routine qui sélectionne les paramètres à afficher.
- 2) sous-routine imprime l'«environnement» d'affichage.
- 3) sous-routine qui finalement affiche les courbes.

La sélection des paramètres à présenter est faite ici.

```
SUB SelectParametre(fiche$,e!(1),t!(1),s!(1))
```

```

SHARED    choix$( ), param#
LOCAL    correc$, i$, xx$, a$, b$, c$, d$, e$, f$, g$, h$, i$, j$
xx$ = 2
DIM      choix$(1:xx$)

```

```
SELECT CASE fiche$
```

```
CASE "asc", "ASC", "moy", "MOY"
```

```
CLS
```

```
COLOR 7, 0
```

```
PRINT "
```

```
PRINT "
```

```
PRINT "
```

```
PRINT " 1. Voltage          0 - 200 V
```

```
PRINT " 2. HMT              0 - 50 m
```

```
PRINT " 3. Ensoleillement 0 - 1000 W/m²
```

```
PRINT " 4. Courant          0 - 10 A
```

```
PRINT " 5. T face arrière  0 - 100 °C
```

```
PRINT " 6. T ambiante     0 - 100 °C
```

```
PRINT " 7. Débit           0 - 10 m³/h
```

```
PRINT "
```

```
PRINT "
```

```
COLOR 4, 0
```

```
DO UNTIL correc$ = "n" OR correc$ = "N"
```

```
ERASE choix$
```

```
FOR i$ = 5 TO 9 STEP 2
```

```
LOCATE i$,65: PRINT " "
```

```
NEXT i$
```

```
LOCATE 7,57: PRINT " "
```

```
FOR i$ = 4 TO 10
```

```
LOCATE i$,2: PRINT " "
```

```
NEXT i$
```

```
LOCATE 5,65: INPUT "", param#
```

Nombre de paramètres:

Paramètre no.: :

Corrections? (O/N):

' Pour redimensionner choix\$()

' Effacement des champs

' Sélection

```

DIM choix%(1:param%)
FOR i% = 1 TO param%
    LOCATE 7,58: PRINT i%
    LOCATE 7,65: PRINT " "
    LOCATE 7,65: INPUT "", choix%(i%)
    LOCATE (3+choix%(i%)),2: PRINT CHR$(251)
NEXT i%
LOCATE 9,65: INPUT "", correc$
LOOP

```

CASE "sce", "SCE"

```

CLS
COLOR 2, 0
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT " 1° scénario: 100 %   Échelle de   Nombre de paramètres:
PRINT " 2° scénario: 95 %   l'ensoll.
PRINT " 3° scénario: 90 %
PRINT " 4° scénario: 80 %   0-1000 W/m²
PRINT " 5° scénario: 75 %
PRINT " 6° moyenne mensuelle
PRINT "
PRINT "
COLOR 4, 0

```

```

DO UNTIL correc$ = "n" OR correc$ = "N"
    ERASE choix%
    FOR i% = 5 TO 9 STEP 2
        LOCATE i%,65: PRINT " "
    NEXT i%
    LOCATE 7,57: PRINT " "
    FOR i% = 5 TO 10
        LOCATE i%,2: PRINT " "
    NEXT i%
    LOCATE 5,65: INPUT "", param%
    DIM choix%(1:param%)
    FOR i% = 1 TO param%
        LOCATE 7,58: PRINT i%
        LOCATE 7,65: PRINT " "
        LOCATE 7,65: INPUT "", choix%(i%)
        LOCATE (4+choix%(i%)),2: PRINT CHR$(251)
    NEXT i%
    LOCATE 9,65: INPUT "", correc$
LOOP

```


La présentation du graphique est faite ici.

SUB Cadre(fiche\$)

LOCAL i%

CLS

KEY off

SCREEN 9

VIEW (100,20) - (630,345), 0, 6

' cadre principal

IF fiche\$ = "gen" OR fiche\$ = "GEN" THEN

FOR i% = 31 TO 289 STEP 43
LINE (30,i%) - (40,i%)
NEXT i%

' échelle du courant

LOCATE 4,14: PRINT " 12";
LOCATE 7,14: PRINT " 10";
LOCATE 10,14: PRINT " 8";
LOCATE 13,14: PRINT " 6";
LOCATE 16,14: PRINT " 4";
LOCATE 19,14: PRINT " 2";
LOCATE 23,14: PRINT " 0";

FOR i% = 40 TO 520 STEP 30
LINE (i%,290) - (i%,295)
LINE (i%+1,290) - (i%+1,295)

' échelle du voltage

NEXT i%
FOR i% = 40 TO 520 STEP 60
LINE (i%,295) - (i%,300)
LINE (i%+1,295) - (i%+1,300)

NEXT i%
LOCATE 24, 18: PRINT "0";SPC(6);"20";SPC(6);"40";SPC(5);"60";SPC(5);_
"80";SPC(6);"100";SPC(4);"120";SPC(4);"140";SPC(4);"150";

ELSE

FOR i% = 30 TO 290 STEP 26
LINE (35,i%) - (40,i%)
NEXT i%

' échelle des pourcentages

FOR i% = 30 TO 290 STEP 52
LINE (30,i%) - (35,i%)
NEXT i%

LOCATE 4,14: PRINT " 1";
LOCATE 8,14: PRINT "0.8";
LOCATE 11,14: PRINT "0.6";
LOCATE 15,14: PRINT "0.4";
LOCATE 19,14: PRINT "0.2";
LOCATE 23,14: PRINT " 0";

```

FOR i% = 40 TO 520 STEP 20
    LINE (i%,290) - (i%,295)
    LINE (i%+1,290) - (i%+1,295)
NEXT i%

FOR i% = 40 TO 520 STEP 60
    LINE (i%,295) - (i%,300)
    LINE (i%+1,295) - (i%+1,300)
NEXT i%

LOCATE 24, 18: PRINT "0";SPC(6);"3";SPC(7);"6";SPC(7);"9";SPC(6);"12";_
    SPC(5);"15";SPC(6);"18";SPC(5);"21";SPC(5);"24";

END IF

VIEW (5,20) - (85,345), 0, 3

LOCATE 4.3: PRINT "Légende";

END SUB

```

Impression de l'écran de présentation graphique. On appelle ensuite des routines qui graphent les données et la légende.

```

SUB AfficheCourbe(fiche$,x!(1),y!(2),jpm%(1),prem%(1),titre$(1),fichier%,_
    periode$,jour$,mois$,annee$,moisfin%,anneefin$,param%,t%)

LOCAL    i%, k%, l%, m%, n%, a%, c%, ti$, jj%, mm%, aa%, fm%

SELECT CASE fiche$

CASE "moy", "MOY", "sce", "SCE", "gen", "GEN"
    a% = 1
    c% = 1
    k% = 1
    ti$ = " "

CASE "asc", "ASC"
    a% = VAL(jour$)
    c% = a% + VAL(periode$) - 1
    k% = 1
    ti$ = " - "

END SELECT

COLOR 14, 0
LOCATE 3,54: PRINT "DATE:"
COLOR 11, 0

```

```

FOR l% = a% TO c%
  jj% = l%
  mm$ = mois$
  aa$ = annee$

  IF l% > jpm%(VAL(mois$)) THEN
    k% = 2 ' i.e. on est dans le deuxième fichier
    prem%(2) = prem%(1)
    jj% = l% - jpm%(VAL(mois$))
    mm$ = STR$(moisfin%)
    aa$ = annee$fin%
  END IF

  fm% = l% - prem%(k%) ' Facteur multiplicatif.

  LOCATE 1,5: PRINT titre$(k%)
  LOCATE 3,60: PRINT USING "## & \ & \":jj%,ti$,mm$,ti$,aa$

  VIEW (140,50) - (620,310), 8, 15 ' 480 de large (24 heures),
  WINDOW (0,150) - (480,0) ' 150 pixels de haut (de 0 à 1)

  FOR m% = 1 TO param% ' (m%+8) pour avoir les 7 courbes
    SELECT CASE fiche$

      CASE "asc", "ASC", "moy", "MOY", "sce", "SCE"
        PSET ( x!(1),y!(m%,1) )
        FOR n% = 1 TO t%
          LINE -( x!(n%),y!(m%,(n%+t%*fm%)) ), m% + 9
          PSET ( x!(n%),y!(m%,(n%+t%*fm%)) )
        NEXT n%
        LINE -( x!(t%+1),y!(m%,1) ), m% + 9 ' Presque correct

      CASE "gen", "GEN"
        PSET ( x!(1),y!(m%,1) )
        FOR n% = 1 TO t%
          LINE -( x!(n%),y!(m%,(n%+t%*fm%)) ), m% + 9
          PSET ( x!(n%),y!(m%,(n%+t%*fm%)) )
        NEXT n%
        LINE -( x!(t%),0 ), m% + 9 ' à Vco, I = 0

    END SELECT
  NEXT m%

  WHILE NOT INSTAT: WEND ' Attends la frappe d'une clé.
  LOCATE 3,4: PRINT INKEY$: LOCATE 3,4: PRINT " "
  CLS

NEXT l%

END SUB

```

ROUTINE SAS

Programme SAS (version 6.04) sur PC.

On remarquera le peu de paramètres de départ, ce qui peut faire que l'on converge vers un minimum local. Les paramètres pour les autres HMT ont été trouvés avec des routines similaires à celle-ci.

Puissance et débit de départ

```
DATA HMT25;  
  INPUT P Q @@;  
  CARDS;  
  597.5 2.81 636.8 3.04;
```

Méthode de Marquardt et
affichage des 3 meilleures
estimations

```
PROC NLIN   BEST = 3  
           METHOD = MARQUARDT;
```

Domaine de recherche

```
PARMS A = -30 to -25 by 1  
      B = 75 to 85 by 1  
      C = 405 to 415 by 1  
      D = -585 to -575 by 1;
```

L'équation et ses dérivées

```
MODEL P = A*Q**3 + B*Q**2 + C*Q + D;
```

```
DER.A = Q**3;  
DER.B = Q**2;  
DER.C = Q;  
DER.D = 1;
```

Extrants

```
OUTPUT OUT=h25 P=predict;  
RUN;
```

FICHIERS *.GEN

FP_CERER.GEN

```
"Courbes I-V du générateur FrancePhoton {shunt: 25 A = 100 mV} date: 7-III-91"
"nombre de lectures", 32
"enso",196, 346, 647, 811, 989
"Tfa",22.2, 26.9, 38.0, 39.2, 43.4
"Vc",141.8,147.3,150.0,150.0,148.3
  0, 6.3, 13.8, 31.8, 41.0, 46.6
 10, 6.1, 13.0, 31.4, 40.2, 46.3
 15, 6.0, 12.7, 31.0, 39.8, 45.8
 20, 5.8, 12.4, 30.6, 39.4, 45.2
 25, 5.7, 12.2, 30.2, 38.6, 44.4
 30, 5.5, 12.0, 29.7, 37.9, 43.5
 35, 5.3, 11.9, 29.1, 37.3, 42.2
 40, 5.0, 11.8, 28.5, 36.7, 41.0
 45, 4.8, 11.7, 27.6, 35.2, 38.8
 50, 4.6, 11.6, 26.8, 33.7, 36.5
 55, 4.5, 11.4, 25.8, 32.8, 36.2
55.9, 4.4, 11.2, 24.8, 31.8, 35.8
 60,  0, 11.2, 24.8, 31.8, 35.8
 70,  0, 11.0, 23.9, 30.7, 34.9
 75,  0, 10.9, 23.7, 30.3, 34.7
 80,  0, 10.7, 23.6, 30.3, 34.3
 85,  0, 10.5, 23.4, 30.0, 34.1
 90,  0, 10.3, 23.2, 29.7, 33.6
 95,  0, 10.1, 22.9, 29.4, 32.8
100,  0,  9.7, 22.6, 28.6, 31.9
105,  0,  9.3, 22.1, 27.7, 30.4
110,  0,  8.7, 21.0, 26.2, 28.6
115,  0,  0, 19.7, 24.4, 25.8
120,  0,  0, 18.0, 22.0, 23.6
125,  0,  0, 16.4, 20.2, 20.2
130,  0,  0, 14.4, 17.1, 16.9
135,  0,  0, 11.7, 13.5, 12.8
136.2,  0,  0, 10.8, 13.3, 11.8
137.2,  0,  0,  9.0, 13.1, 10.9
138.1,  0,  0,  8.0, 13.0,  9.0
148.3,  0,  0,  3.0,  2.0,  0
150 ,  0,  0,  0,  0,  0
```

FP_PARAM.GEN

```
"Paramètres décrivant le générateur FrancePhoton du CÉRÉR"
12.6175 , 52.81
1000 , 25
1 , 1152
0.90 , 0.80 , 0.90
1.32e-3 , 2.2e-3
0.48 , 2.174
2.47 , 0.050 , 0.02
```

FICHIERS *.GMP

TED_ORD1.GMP

"Facteur - a - pour l'équation caractéristique du GMP du CÉRÉR"

"ordre de l'équation: " , 1, 26

10 , 0 , 0 , 160.8 , 0
11 , 0 , 0 , 164.5 , 0
12 , 0 , 0 , 166.0 , 0
13 , 0 , 0 , 167.0 , 0
14 , 0 , 0 , 168.0 , 0
15 , 0 , 0 , 169.0 , 0
16 , 0 , 0 , 172.9 , 0
17 , 0 , 0 , 175.0 , 0
18 , 0 , 0 , 178.2 , 0
19 , 0 , 0 , 181.2 , 0
20 , 0 , 0 , 182.0 , 0
21 , 0 , 0 , 186.5 , 0
22 , 0 , 0 , 190.0 , 0
23 , 0 , 0 , 193.7 , 0
24 , 0 , 0 , 202.9 , 0
25 , 0 , 0 , 209.5 , 0
26 , 0 , 0 , 212.0 , 0
27 , 0 , 0 , 216.1 , 0
28 , 0 , 0 , 221.0 , 0
29 , 0 , 0 , 226.5 , 0
30 , 0 , 0 , 232.8 , 0
31 , 0 , 0 , 235.0 , 0
32 , 0 , 0 , 239.4 , 0
33 , 0 , 0 , 243.9 , 0
34 , 0 , 0 , 246.0 , 0
35 , 0 , 0 , 249.3 , 0

TED_ORD1.GMP

"Facteurs <a, b, c et d> pour l'équation $P = f(Q)$ du GMP du CÉRÉR"

"ordre de l'équation: " , 3, 5

15 , 33.1270738 , -178.1222131 , 405 , 3.8108988
20 , -22.7922711 , 64.3873432 , 391 , -591
25 , -27.8684094 , 81.6295905 , 409 , -578
30 , -77.0234444 , 208.0489549 , 415 , -575
35 , -135.0675356 , 291 , 544.4656118 , -559

FICHER *.VIL

CONSO.VIL

"Comportement des utilisateurs, en % de la consommation quotidienne"

"Nombre de comportement-type: ", 2

"Mérina-Dakhar", "N'diné"

1,	0,	0
2,	0,	0
3,	0,	0
4,	0,	0
5,	0,	0
6,	0,	0
7,	0,	0
8,	0,	8
9,	0,	12
10,	0,	15
11,	0,	11
12,	0,	4
13,	0,	0
14,	0,	0
15,	0,	0
16,	30,	13
17,	42,	15
18,	16,	12
19,	12,	10
20,	0,	0
21,	0,	0
22,	0,	0
23,	0,	0
24,	0,	0

Annexe III

Organigramme décisionnel

**ORGANIGRAMME DÉCISIONNEL
POUR L'UTILISATION DE CITERNE**

Préparation des données:

Campagne de mesures sur le terrain: I, V, Enso, Pression, Q.
 Paramètres des équipements: générateur et groupe moto-pompe.
 Données sur le comportement au puisage: volume puisé par heure.

Tâches à exécuter selon le type d'étude:

