

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Placement optimal des moyens
de production d'un système
photovoltaïque
sur la courbe de charge journalière*

Proposé par :

**M. A. REDJAH
R & D. SONELGAZ**

Etudié par :

**K. SLIMANI
M. KHELFAOUI**

Dirigé par

**N. ABOUN
M. SARI**

PROMOTION
1994

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT *Genie Industriel*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Placement optimal des moyens
de production d'un système
photovoltaïque
sur la courbe de charge journalière*

Proposé par :

**M. A. KEDJAH
R & D. SONELGAZ**

Etudié par :

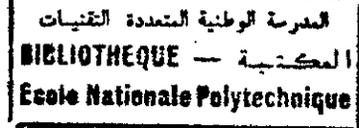
**K. SLIMANI
M. KHELFAOUI**

Dirigé par

**N. ABOUN
M. SARI**

PROMOTION
1994

Dédicaces



À la mémoire de mon oncle

À mes parents.

À mes ami(e)s.

À tous ceux qui ont su être présent quant il le fallait

Karima.

Je dédie ce travail à mes parents, mes frères et mes sœurs,

ainsi qu'à tout mes amis en pensant tout particulièrement

à la mémoire de mon très chère frère et ami *Bouaziz*

décédé le 04 Mars 1994.

Mohamed.

Remerciements

Ce travail, en plus d'être l'aboutissement d'une démarche intellectuelle, est aussi le résultat d'une véritable épreuve de persévérance. Les pages de cette présente étude ne peuvent refléter avec fidélité les nombreux obstacles et l'effort consacré à cet ouvrage. Dans cette perspective, nous voudrions profiter de ce qui n'est, trop souvent, qu'un exercice de circonstance pour exprimer sincèrement notre gratitude et nos remerciements à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Nous aimerions tout d'abord adresser notre reconnaissance à M^{lle} N.ABOUN, notre directrice, pour tout l'aide et les facilités qu'elle nous a apporté afin que notre travail se déroule dans les meilleurs conditions possibles. Sans sa connivence, ce travail n'aurait jamais été réalisé.

Nous tenons fortement à souligner que ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans l'aide de nos deux promoteurs M^{lle} N.ABOUN et M^{eur} H.SARI avec le concours de M^{eur} M.A.REDJAH de R&D de SONELGAZ qui nous a proposé ce sujet. Mais par-dessus-tout, nous avons bénéficié de leurs confiances et de leurs encouragements. Nous nous souviendrons toujours de leurs grandes perspicacités intellectuelles, de leurs sens de discernements et de leurs idées originales et pénétrantes. Nous remercions aussi toutes les personnes du département R&D de SONELGAZ qui ont collaboré avec nous depuis le début du projet.

Nous nous devons aussi de mentionner le climat de travail à l'École Nationale Polytechnique, où s'est accompli l'essentiel de notre travail. Les conditions d'étude sont exceptionnelles et là, nous tenons à signaler toute notre gratitude au corps d'enseignants qui ont contribué, de loin ou de près, à notre formation dans cette école en pensant plus spécialement à toute l'équipe du département Génie-Industriel. Nous tenons à adresser nos remerciements à nos confrères d'études pour leurs critiques constructives et à l'ensemble du personnel, plus particulièrement le groupe du centre de calcul (Hacène, Lila et Karima) et de la bibliothèque pour leur support moral et matériel.

Finalement, nous remercions vivement les membres de jury de nous avoir honoré par leur participation

TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

. INTRODUCTION.....	4
I- GENERALITES ET PROBLEMATIQUE	8
Introduction:	8
I-1- Historique des systèmes pv :	9
I-2- Impact économique et écologique :	10
I-2-1- Impact économique:	10
I-2-2- Impact écologique:	11
I-3- La Conversion directe en électricité:	12
I-4- Le pv en Algérie:.....	12
I-4-1- Intérêt du pv pour l'électrification rurale:	12
I-4-2- Production moyenne des systèmes pv dans les conditions Algériennes:	13
I-4-3- Expérience en cours:	13
I-4-4- Premiers résultats:	14
I-5- Un système pv à Bordj- El-Haouas:	14
I-5-1- Présentation du village:.....	14
I-5-2- Les variantes:	15
I-6- Problématique:.....	16
II- DEFINITION DES ENTITES.....	18
II-1- Energie et puissance:	18
II-1-1- Courbes de consommation (de charge) :	18
II-1-2- Courbes de production:	18
II-2- Description du système:.....	19
II-2-1- Le Champ pv:.....	22
II-2-2- Les Batteries d'accumulation:	22
II-2-3- Les Groupes diesel:	23
II-3- Position du problème :	23
II-4- A Propos du dispatching économique (d.e) :	27
II-4-1- Principe:.....	27
II-4-2- Buts:.....	27
II-4-3- Les méthodes d'approches:	27
III- MODELISATION DU PROBLEME	34
III-1- Variables, valeurs exogènes et hypothèses:.....	34
III-2- Les biais du modèle:	35
III-3- Enoncé du problème:	36
III-4- Formulation mathématique du modèle:	37
III-4-1- Définitions et notations:	37

III-4-2- Le modèle mathématique:	40
III-5- La nature et la complexité du modèle:.....	43
III-5-1- La nature du modèle:.....	43
III-5-1- La complexité du modèle:	44
III-6- Etat de l'art des outils de résolution :.....	46
III-6-1- Présentation:	46
III-6-2- Résultats estimatifs:	51
III-6-3-Conclusion:.....	52
III-7-Description détaillée du logiciel à utiliser (GAMS) :.....	53
III-7-1-Motivations:.....	53
III-7-2- Les caractéristiques de GAMS:	54
III-8- L'Interface Utilisateur du Modèle:	56
IV- MISE EN ŒUVRE DU MODELE	60
IV-1- Le modèle GAMS:	60
IV-2- Analyse de l'input:.....	64
IV-2-1- Courbe de charge:.....	64
IV-2-2- Données météorologiques:	66
IV-2-3- Le plan d'alimentation en fuel:	67
IV-2-4- La structure des coûts:	67
IV-2-5- Le dimensionnement du système:.....	67
IV-3- Analyse de l'output:.....	70
IV-3-1- Interprétation des résultats:	70
IV-3-2- Analyse sensitive:.....	74
IV-3-3- Intérêt des résultats:	75
. CONCLUSION.....	77
. BIBLIOGRAPHIE.....	78
.ANNEXES.....	80

INTRODUCTION

Il est quasi-certain que les besoins énergétiques augmenteront au cours des décennies à venir. Or même si les techniques évoluent, les producteurs devront faire face aussi bien à des pénuries de combustibles fossiles qu'à des problèmes d'ordre écologique: la pollution par ces combustibles fossiles ou les dangers de l'énergie nucléaire. Nous rêvons d'une source inépuisable d'énergie non polluante, mais le rêve est à notre portée: les cellules solaires, ou les photopiles, transforment en effet sans pollution l'énergie solaire en électricité. L'énergie électrique d'origine photovoltaïque reste très chère et il ne paraît pas très raisonnable de parler des compétitivités des centrales de puissance. En revanche, si l'on raisonne du point de vue socio-économique et dans le cadre d'une utilisation à faible et moyenne puissance dans des zones isolées et très ensoleillées, cette source d'énergie est une source complémentaire d'un intérêt certain et déjà compétitive dans bien des domaines, quoique l'abaissement du coût du Watt-crête ne soit pas aussi rapide que prévu. C'est pour établir un équilibre entre tous ces faits que la Société Nationale d'Electricité et de GAZ (SONELGAZ) a pensé installer un système hybride Photovoltaïque-Diesel dans une des régions Algériennes, en l'occurrence Bordj-El-Haouas (B.E.H). Ce système sera le premier de son genre en Algérie, et la SONELGAZ espère que les résultats seront satisfaisant et ouvriront d'autres perspectives plus importantes dans le domaine du solaire.

Le but de la présente étude est de concevoir un outil d'aide à la décision, celui-ci devra permettre le placement optimal des moyens de production d'un système électrique photovoltaïque (pv) sur la courbe de charge journalière. Ceci pour assurer une disponibilité continue en matière d'électricité à un coût minimum. Un tel placement est appelé par les planificateurs des systèmes électrique Le *Dispatching Economique* (d.e). Le modèle sera appliqué au système pv de B.E.H.

Le cheminement que nous avons suivi pour réaliser ce travail est présenté comme suit:

Le premier chapitre comprend des généralités traitant d'une manière sommaire la question mondiale de l'énergie et la nécessité de recourir à l'énergie solaire, un historique sur les équipements utilisés pour l' transformation de l'énergie solaire en énergie électrique ([ROD,93]), l'impact économique et écologique que pourrait engendrer l'exploitation des systèmes pv, une brève description de la manière dont se fait la conversion directe en électricité, un aperçu sur les travaux effectués en Algérie dans ce domaine et les résultats atteints pour arriver au site de notre étude (B.E.H). Après la présentation de ce dernier, nous avons expliqué la raison d'être d'un système pv là où nous découvrons la problématique de ce travail.

Dans le deuxième chapitre, nous définissons les entités qui composent notre problème à savoir: la courbe de charge, la courbe de production, le système pv ([ENE,92]), la position du problème par rapport aux problèmes de contrôle rencontrés dans les systèmes électriques ([EL-A,83]) et enfin le dispatching économique (d.e) ([PEL,71]). Ensuite, nous parcourons les différentes méthodes d'approches recueillies de la revue de littérature.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du problème. Inspirés en particulier des travaux de D.Hébert ([HEB,92]) qui s'est intéressé à un parc d'équipements d'une firme de production d'énergie électrique comprenant des centrales hydroélectriques, des centrales thermiques, des turbines à gaz, des centrales pompées en plus des centrales de stockage. Son problème est un " *Generation Planning Problem* ", (voir [EL-A,83]) qui consiste à établir un modèle mathématique dont la solution décide du plan optimal de l'expansion du parc à long terme (20 ans), ainsi qu'un sous problème de production qui s'étale sur tout l'horizon de planification. Par contre, notre problème consiste en un placement optimal des moyens de production - qui sont tout à fait différents de ceux considérés par [HEB,92] des points de vues technologique et économique - sur la courbe de charge journalière (court terme). Toutefois, comme [HEB,92], nous nous pencherons sur le cas d'un parc ayant des composantes de stockage d'énergie sans considérer les pertes. Ces dernières sont considérés par [HEB,92] à cause du caractère massif du stockage de l'énergie (stockage saisonnier) alors que dans notre problème, le stock sert de réserve quotidienne.

La procédure de modélisation est la suivante: après avoir défini les variables, valeurs exogènes, nous avons émis des hypothèses simplificatrices qui affectent la structure du problème et le choix de la procédure de résolution. Nous avons ensuite discuté les

hypothèses susceptibles de biaiser la solution de notre modèle. Ceci étant fait, nous avons présenté l'énoncé du problème qui explicite la fonction objectif et les contraintes ainsi que sa formulation mathématique. Une fois notre modèle établi, nous avons remarqué que sa taille nécessite un outil de résolution puissant. Nous avons donc étudié l'état de l'art des outils de résolution de programmation mathématique [EDW,89], sélectionné et présenté de manière plus détaillée l'outil choisi [BRO,87].

Le dernier chapitre traite de la validation du modèle qui est composée de l'analyse de l'input où l'on explicite la manière d'obtention des données sollicitées par le modèle pour sa résolution, et de l'analyse de l'output qui interprète les résultats obtenus et leur particularités numériques et fonctionnelles.

Enfin et pour conclure ce travail, nous proposons quelques suggestions susceptibles d'enrichir le modèle proposé en vue de le rendre le plus proche possible du modèle réel.

CHAPITRE I
Généralités et problématique

I- GENERALITES ET PROBLEMATIQUE

Introduction:

S'il y a un fait qui caractérise notre époque, des points de vue technique et économique, c'est l'extraordinaire accroissement de l'énergie, conséquence de l'évolution récente des techniques de production, de transformation et de consommation de cette énergie.

En Algérie, la consommation moyenne d'énergie brute était de 15GJ/an/habitant en 1976, actuellement, elle est de 80GJ/an/habitant et atteindrait probablement 115GJ/an/habitant en l'an 2000.

La croissance de ces chiffres et les estimations des réserves permettra de tirer des enseignements instructifs pour l'élaboration des prévisions et la confection de système électrique afin de répondre au mieux à la demande d'énergie.

Mais les réserves d'énergie fossile étant limitées et par définition épuisables, le monde cherche d'autres alternatives. Les réserves et ressources que l'on peut dégager de différentes sources sont les suivantes:

a- *Ressources non renouvelables:*

- Charbon et lignite
- Pétrole
- Gaz naturel
- Sables asphaltiques et schistes bitumineux
- Uranium.

b- *Ressources renouvelables :*

- Energie hydraulique
- Energie solaire: Il est clair que toutes les énergies sont d'origine solaire. Celles-ci se constituent encore actuellement suivant des cycles périodiques (hydraulique, éolienne, biochimique). Cette énergie est concentrée dans les régions ayant un bon ensoleillement, situées entre le 45° latitude Nord et le 45° latitude Sud et plus précisément dans les régions tropicales et subtropicales.

L'exploitation de cette énergie solaire en énergie électrique nécessite des équipements spéciaux. Ces équipements sont les systèmes photovoltaïques (pv).

I-1- Historique des systèmes pv ([ENE, 92]):

La découverte de l'effet pv revient à *Edmond Becquerel* (1820-1891), lequel, en 1839, alors qu'il n'avait que 19 ans, a présenté à l'Académie des Sciences de Paris son écrit "*Mémoire sur l'Effet Electrique Produit sous l'Influence du Rayonnement Solaire*". Becquerel effectuait des expériences sur une cellule électrique dans laquelle il immergeait des électrodes en Platine, quand il découvrit que l'intensité du courant augmentait lorsqu'il exposait la cellule à la lumière du soleil. Becquerel est aussi le premier à s'être rendu compte qu'un tel effet dépendait de la couleur de la lumière incidente. Il dut attendre jusqu'à 1876 pour lire une notice d'un effet analogue obtenu sur des dispositifs en état solide qui sont le Silicium et la jonction entre cet élément et des métaux oxydants.

De tels matériaux sont encore utilisables commercialement pour la production du Luxemètre (appareil de mesure du taux d'éclairage), mais l'idée d'exploiter l'effet pv comme source énergétique ne s'est développée jusqu'à ce qu'il ait pu être opératoire sur des matériaux qui avaient un meilleur rendement. Après plusieurs travaux théoriques et expérimentaux, la première cellule solaire commerciale fut produite par un groupe de chercheurs dirigés par *Person, Fuller et Chapin*, qui ont réalisé une jonction plane sur du silicium monocristallin produit d'une façon archétype de la cellule pv moderne.

Dès 1960, les photopiles ont alimenté en énergie électrique la plupart des satellites artificiels de la terre ([ROD,93]). Depuis 1975, elles se sont répandues dans les pays en développement en tant que sources autonomes d'électricité à petite échelle. Et c'est en 1988, qu'elles ont été considérées par des pays développés -Allemagne, Etats-unis, Suisse, Pays-Bas- comme une des sources d'énergie notables du 21ème siècle. Pendant les quatre dernières décennies, elles ont connu une expansion forte mais irrégulière, marquée par de nombreuses discontinuités tant au point de vue des filières suivies que des applications réalisées et des acteurs aux commandes de ce développement scientifique et industriel.

En effet, depuis un colloque mondial tenu en 1973 par l'UNESCO à Paris, l'énergie solaire suscite toutes les attentions des chercheurs. Les photopiles, dont la carrière spatiale continue, voient s'ouvrir une carrière terrestre beaucoup plus importante. Leur production se mesure en kilowatts-crête (Kwc): pour un rendement de conversion de 10%, 1Kwc est la puissance délivrée par un générateur de 10 m² au soleil de midi. En dix ans, la puissance produite a été multipliée par 1000, passant de 10 Kwc à 10 Mwc: un véritable décollage.

I-2- Impact économique et écologique :

I-2-1- Impact économique:

Comme exemple de comparaison, nous avons pris les pompes solaires ([SAH,90]):

Pour pomper de l'eau, les diesels produisant moins de 10kwh par jour ne sont pas rentables; les systèmes pv de puissance crête inférieure à 5 Kwc sont meilleurs (voir tableau I.1)

Application	Générateur conventionnel	Système PV et stockage associé	Coût du module compétitif (F/kwh)
irrigation (1)	4Kw(diesel)	600 Wc:170Ah.24V	28 F/ Wc
éclairage (2)	4Kw(diesel)	980 Wc:270Ah.24V	35 F/ Wc
répéteur (3)	3x4Kw(diesel)	8.7 Kwc:4200Ah.48V	42 F/ Wc
signalisation (4)	1.2 Kw(essence)	1.5 Kwc:3000Ah.12V	111 F/ Wc
eau potable (5)	4Kw(diesel)	120 Wc:120AH.24V	173 F/ Wc
récepteur télé (6)	0.4Kw(essence)	104 Wc:100Ah.24V	273F/ Wc
réfrigérateur (7)	3 x 0.4Kw(essence)	160 Wc:160Ah.24V	255 F/ Wc

Coût du module en 1990, pour comparaison : 30 à 70 F/ Wc

(1) Maraîchage arrosé à partir d'un puits peu profond (charge: 200 watts)
 (2) Pour 13 familles, 2 lampes de 25W par famille, plus éclairage de rue:charge 650 watts, fonctionnement 4 h / j.
 (3) Station pour transmission d'ondes hertziennes (charge 950W) fonctionnant 24h / 24h
 (4) Pour chemin de fer : charge 96 W en permanence
 (5) Charge 40W, fonctionnement 8 h / j
 (6) Charge 65W, fonctionnement 4 h / j
 (7) réfrigérateur médical: charge 25 W, en permanence

TABLEAU I.1: Comparaison diesel-photovoltaïque

Un autre exemple aussi illustratif est le programme initié par le commissariat à l'énergie atomique de France qui a permis l'électrification de nombreux villages, tantôt par

l'équipement de maisons individuelles, tantôt par la construction de 'centrales' desservant un hameau, par exemple 40 maisons ([ROD,93]).

A cette échelle, le photovoltaïque supporte la comparaison avec les petits diesels, dont l'approvisionnement en fuel est de toute façon une corvée dispendieuse aux résultats aléatoires. Des acquis sociaux de grande valeur ont déjà été engrangés en France: une industrie locale fabriquant des composants spécialisés commence à prospérer; des îlots éloignés ont pu garder leur population qui, sans l'amélioration de leurs conditions de vie apportée par une petite consommation d'électricité, les aurait quittés pour bénéficier des lumières de la ville. Un autre exemple est le programme que lance le Maroc pour équiper des villages du Sud; l'originalité de ce programme est qu'il est financé pour moitié par les collectivités locales, l'autre moitié étant fournie par le gouvernement Français.

Puisque jusqu'à présent le pv ne donne de très bons résultats qu'à de faibles puissances et le coût de transport du fuel est très onéreux, la SONELGAZ a pensé à construire un système hybride et essayer de maximiser la disponibilité en électricité tout en diminuant les coûts.

I-2-2- Impact écologique:

Le dynamisme du photovoltaïque résulte d'une conjonction de motivations à court terme et à long terme. Dans l'immédiat, le marché est porteur pour les télécommunications, l'éclairage et les pompes solaires. A long terme, pour éviter les catastrophes écologiques que pourrait entraîner l'usage immodéré des combustibles fossiles et du nucléaire, les énergies renouvelables sont regardées comme indispensables à une bonne gestion énergétique de la planète. En effet, l'évolution démographique du monde impose, au siècle prochain, une forte croissance de la demande d'énergie.

Les économies d'énergie dans les pays du Nord, le développement accru du nucléaire dans les pays du Nord et certains pays du Sud, si indispensables qu'ils soient, ne sauront suffire à tout car il y a des limites aux déchets (CO₂ atmosphérique, déchets nucléaires) que le monde peut se permettre de fabriquer. Là est le souci écologique réaliste et générateur de progrès: à moins de 30% d'énergies renouvelables dans l'éventail des sources d'énergie utilisées dans 100 ans, la gestion des déchets devient problématique bien avant 2100. Il en résulte que si le coût des photopiles peut encore décroître à l'avenir, elles ont une chance de s'imposer à grande échelle. D'où l'idée d'un certain retour à la recherche pour améliorer les photopiles, en vue d'en faire une utilisation plus large.

Penchons nous maintenant sur la manière dont se fait la conversion en électricité .

I-3- La Conversion directe en électricité:

Dans une jonction P-N de monocristal dopé de silicium, arséniure de gallium, éclairé par la lumière solaire apparaît une tension électrique.

On procède ainsi à une conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique avec un rendement théorique de 20%. En pratique, le rendement excède rarement les 10%. Les jonctions sont regroupées en panneaux disposés de manière fixe suivant un angle supérieur de 15% à la valeur de la latitude (déterminée par l'expérience), permettant ainsi une production optimale pour toute l'année. Les panneaux sont ensuite couplés en série et en parallèle pour obtenir la puissance et la tension désirées.

Nous pourrions obtenir davantage d'énergie pour une même surface de panneaux (et par conséquent se rapprocher le plus possible du rendement théorique) en orientant les panneaux vers le soleil grâce à un héliostat.

La conversion directe se heurte actuellement à quelques difficultés importantes:

1- L'énergie électrique produite est de forme continue: son utilisation en masse nécessitera des moyens importants de conversion en courant alternatif.

2- Elle est tributaire de la lumière solaire, il est donc nécessaire de prévoir le stockage de l'électricité, ce qui pose beaucoup plus de problèmes qu'un stockage de chaleur. On peut cependant envisager trois possibilités de stockage:

- Utilisation d'accumulateurs
- Electrolyse de l'eau produisant de l'hydrogène qui sera stocké pour une utilisation future
- Pompage et stockage d'eau.

I-4- Le pv en Algérie ([HAK,93]):

I-4-1- Intérêt du pv pour l'électrification rurale:

L'un des points forts du pv réside dans l'intérêt d'une utilisation décentralisée avec absence des coûts de transport de l'énergie produite. Ceci est particulièrement indiqué pour desservir les usagers isolés dans les territoires à faible densité et dont la demande consiste essentiellement à satisfaire les besoins énergétiques de base (lumière, réfrigération, pompage, télévision, radio).

Les autres caractéristiques marquantes du pv sont:

- La conception modulaire permettant les extensions adaptées aux besoins
- La possibilité de développement des petites activités dans les localités à faible développement économique
- La protection de l'environnement
- La limitation des capitaux, utilisables d'une manière souple et décentralisée, et mobilisables sur des périodes de temps plus longues.

Il en résulte que le terme compétitif utilisé pour le pv se réfère à la valeur du service rendu et fait abstraction de la capacité effective des abonnés à s'autofinancer.

I-4-2- Production moyenne des systèmes pv dans les conditions Algériennes:

Le tableau I.2 montre que les conditions Algériennes sont favorables pour l'installation des systèmes pv surtout dans les régions du Sud. Les données sont exprimées en kwh/jour.

régions	systèmes		
	360wc	720wc	1 440wc
Alger	1.9	3.8	7.6
Bechar	2.4	4.8	9.6
Tindouf	2.4	4.8	9.6
Tamanrasset	2.5	5.0	10.0
Djanet	2.6	5.2	10.4

TABLEAU I.2 Production moyenne des systèmes pv dans les conditions Algériennes

I-4-3- Expérience en cours:

Actuellement, deux prototypes de puissance unitaire de 720wc ont été installés et sont en service dans le sud du pays. Ces prototypes sont destinés d'une part à se familiariser avec ces systèmes et d'autre part à:

- Tester ces installations dans des conditions sévères (milieu désertique et aride).

- Tester l'option du fonctionnement en courant alternatif avec des équipements de fabrication nationale.
- Acquérir des paramètres des sites à l'aide des systèmes d'acquisition de données, en vue de dimensionner les futures installations.

I-4-4- Premiers résultats:

Les premiers résultats de l'expérimentation montrent que:

- Le fonctionnement de l'équipement dans des conditions extrêmes de température et d'environnement donne un résultat particulièrement positif. Le fonctionnement des batteries n'a pas révélé de problèmes particuliers. Le service de charge est garanti à 100%.
- L'utilisation de deux systèmes d'acquisition de données:
 - . le 1er à compteurs électromécaniques totaliseurs pour les différentes mesures d'énergie.
 - . le 2ème de type programmable (GRANT) permettant d'enregistrer 7 paramètres (courant, tension ...) toutes les 10 mn a permis de confirmer la fiabilité des compteurs (GMF) employés sur les petits systèmes, et dont l'exploitation est facile et ne nécessite pas de personnel spécialisé.
- Le fonctionnement normal de toute la partie alternative (onduleurs, appareils d'utilisation à courant alternatif) infirme l'idée préconçue de l'utilisation des systèmes pv uniquement en courant continu.
- La bonne tenue de l'équipement de fabrication nationale (réfrigérateurs).

I-5- Un système pv à Bordj- El-Haouas:

I-5-1- Présentation du village:

Bordj-El-Haouas est un village isolé situé à environ 130 km au nord-ouest de la ville de Djannet et accessible uniquement par piste. Il est actuellement alimenté par une petite centrale diesel (3x100 kva). Cette centrale dispose d'une capacité de stockage de 20 m³ de fuel. En raison des difficultés d'approvisionnement, elle ne fonctionne que 8h/jour. Afin

d'assurer une continuité de service, nous nous proposons d'étudier l'intérêt d'utiliser un système pv.

En effet, le choix est tout à fait justifié car l'idée même de penser à raccorder cette zone au réseau Nord est aberrante: le coût du raccordement très élevé par rapport à la charge à alimenter qui est très faible.

I-5-2- Les variantes:

On peut présenter 3 variantes:

1/Diesel-Photovoltaïque:

Dans ce cas de figure, le système pv est à dimensionner de manière qu'en période d'ensoleillement l'énergie produite puisse couvrir l'énergie appelée. Le diesel servirait à couvrir la charge nocturne et éventuellement la charge diurne en cas d'ensoleillement insuffisant.

2/Diesel-Photovoltaïque-batteries:

Dans ce cas, l'énergie produite par le pv devrait garantir en période d'ensoleillement la charge appelée et assurer en même temps une charge convenable des batteries. Ces dernières sont à dimensionner de manière à pouvoir faire face à la charge nocturne et aux aléas d'ensoleillement, le diesel n'intervenant qu'en cas d'appoint pendant la nuit.

3/Diesel-Photovoltaïque-Batteries auto-pilotées:

Le principe de fonctionnement est identique au schéma de la variante 2. Le système pv couvre l'énergie pendant la période d'ensoleillement et assure la charge de la batterie de jour comme de nuit. Pour ce faire, un système auto-pilotage pour le démarrage et le couplage du diesel sur le réseau est nécessaire. De même, il faut prévoir le dimensionnement de la batterie et son nombre d'heures d'utilisation pendant la nuit qui précède une journée à conditions météorologiques défavorables.

I-6- Problématique:

Notre problème consiste en l'exploitation d'un parc d'équipements de production d'énergie électrique dans un contexte où le parc est à forte prédominance photovoltaïque. C'est un problème de dispatching économique (d.e) qui s'étend sur un horizon d'une journée.

Le cas particulier qui nous intéresse considère un parc de production comprenant des moyens classiques (groupes diesels), de l'énergie électrique d'origine solaire et des moyens de stockage. La particularité de ce problème est qu'aussi bien l'énergie électrique d'origine solaire que le stockage se définissent en termes d'énergie (comparable à l'hydraulique) et non de puissance (énergie instantanée).

CHAPTRE II

Définitions des entités

II- DEFINITION DES ENTITES

II-1- Energie et puissance:

II-1-1- Courbes de consommation (de charge) :

Pour caractériser la consommation d'un type d'énergie, il importe de connaître l'énergie totale consommée en un laps déterminé, ainsi que la manière dont cette énergie est consommée, c'est à dire l'appel instantané d'énergie dit puissance, à chaque instant de ce laps de temps.

Ceci se traduit par une courbe de puissance, ou courbe de consommation, dont l'intégration donne l'énergie totale consommée.

L'allure de cette courbe appelle à trois remarques :

A- La puissance est la fraction de dimensionnement d'une installation de production d'énergie. Il faut dimensionner ces installations pour répondre à la demande maximale de puissance.

B- L'énergie consommée totale est le facteur important pour le dimensionnement des installations de collecte de l'énergie.

C- Pendant les heures creuses, nous avons une sous-utilisation des installations.

II-1-2- Courbes de production:

Il n'y a pas en général une adéquation parfaite entre le moment où une énergie est disponible et le moment où elle est consommée.

C'est une lapalissade de dire que le soleil fait défaut quand on a besoin d'un appoint de chauffage. Il ne saurait en être autrement qu'en stockant l'énergie du soleil.

On peut dire que :

- Stocker l'énergie est donc nécessaire pour pouvoir l'utiliser à des moments autres que ceux où elle est disponible.

- Ce stockage implique un surcoût d'investissement et en général, à long terme, une déperdition d'une partie de l'énergie stockée.

- Pour l'énergie électrique, le stockage s'effectue au niveau de la source primaire, le combustible, mais l'adéquation de la production à la consommation se fait au détriment du rendement des installations.

II-2- Description du système:

Les éléments constituant notre modèle sont:

- a- La centrale photovoltaïque (pv)
- b- Les batteries d'accumulation (stock)
- c- Les groupes diesel

Le système électrique de l'installation est représenté dans la figure II.1

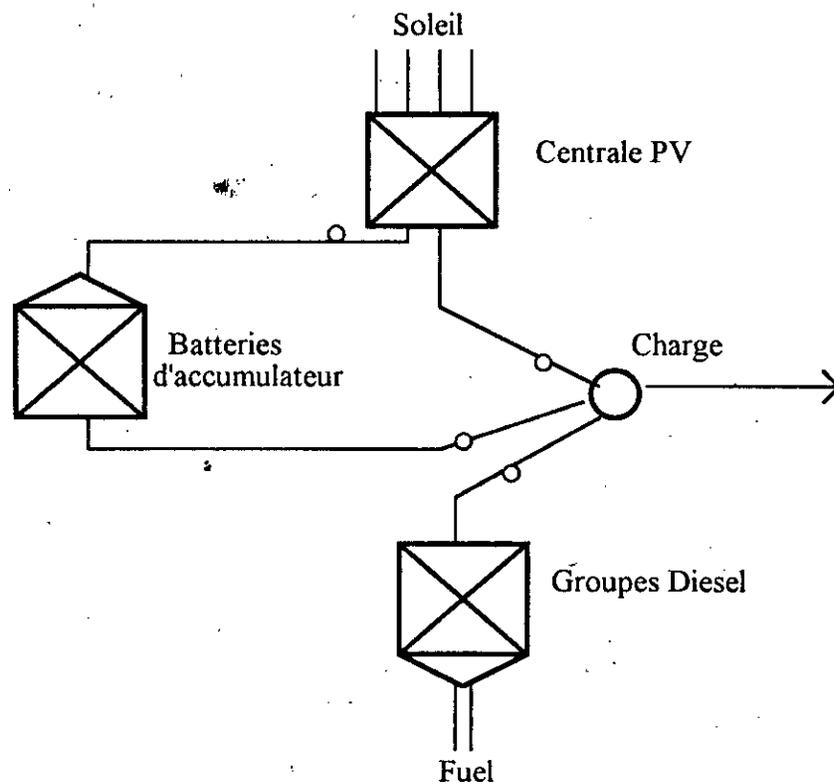


FIGURE II.1 Schéma synoptique du parc de production

Le système PV est un ensemble de composantes mécaniques, électriques et électroniques qui concourent au captage et à la transformation de l'énergie solaire disponible pour la rendre utilisable sous forme d'énergie électrique. La structure d'un système PV peut être représentée sous plusieurs variantes. Dans une forme plus générale, le schéma d'un système PV est représenté en figure II.2 Néanmoins, la majeure partie de la réalisation pratiquement engagée n'est que celle des composantes indiquées en figure II.3 [ENE,92].

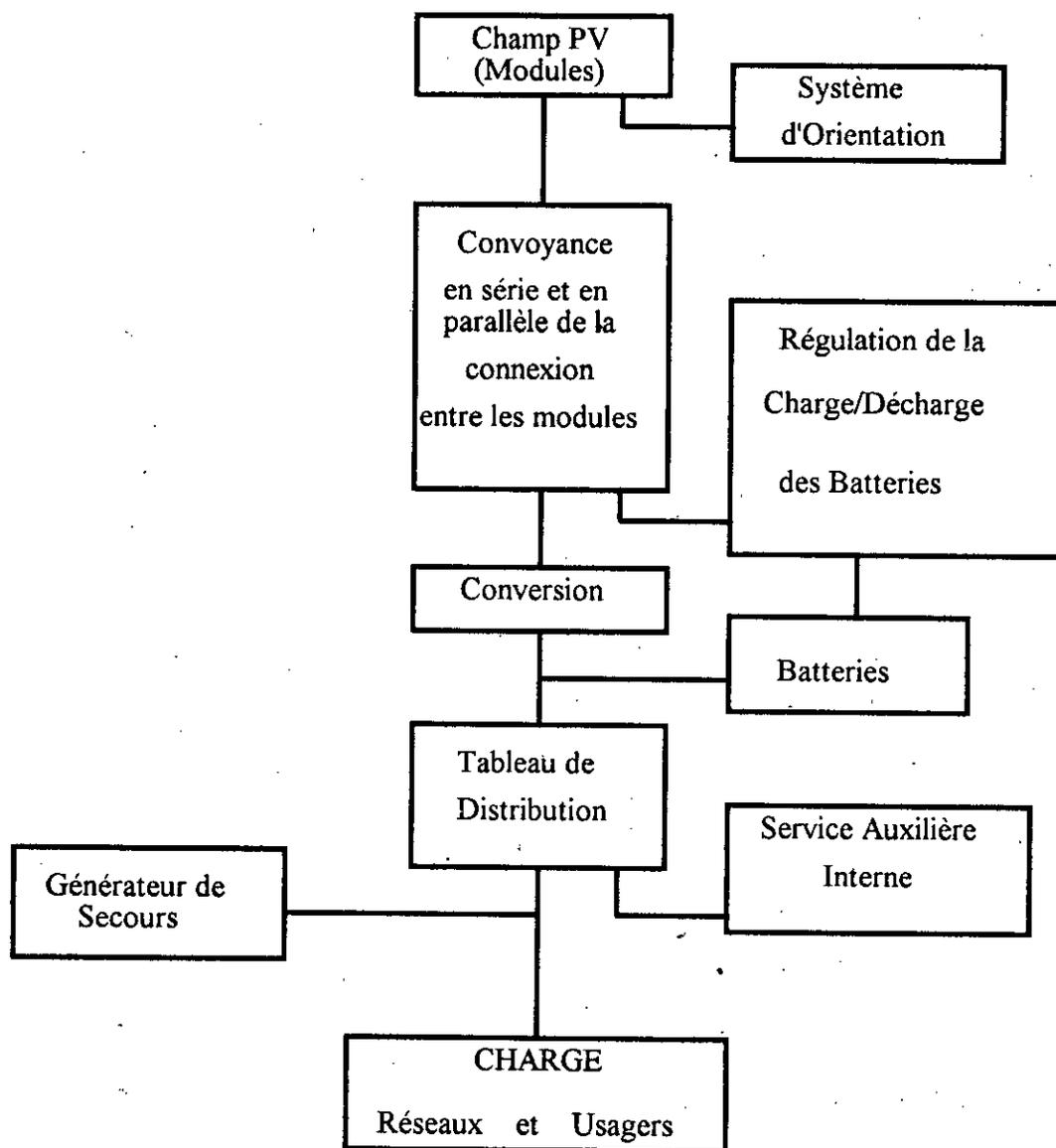
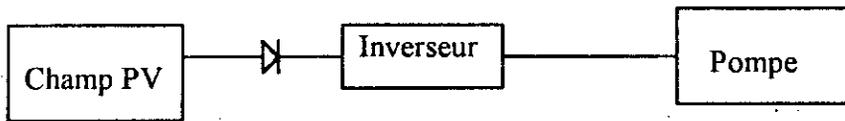
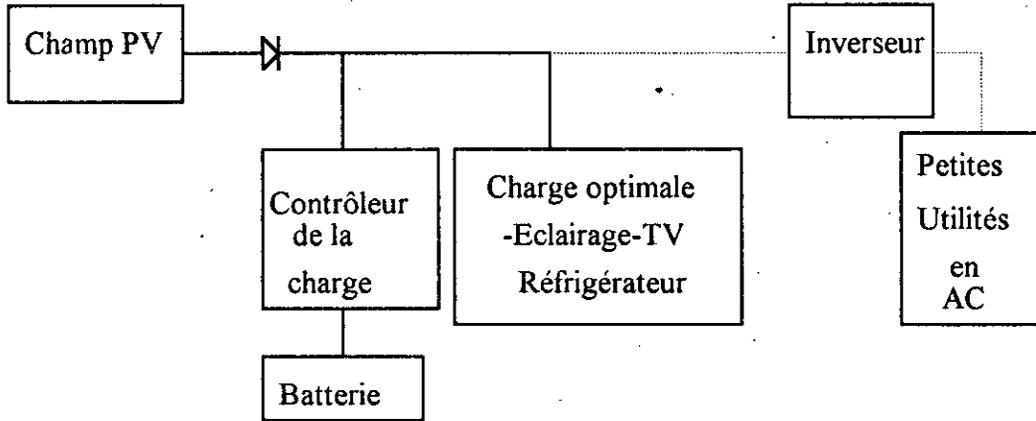


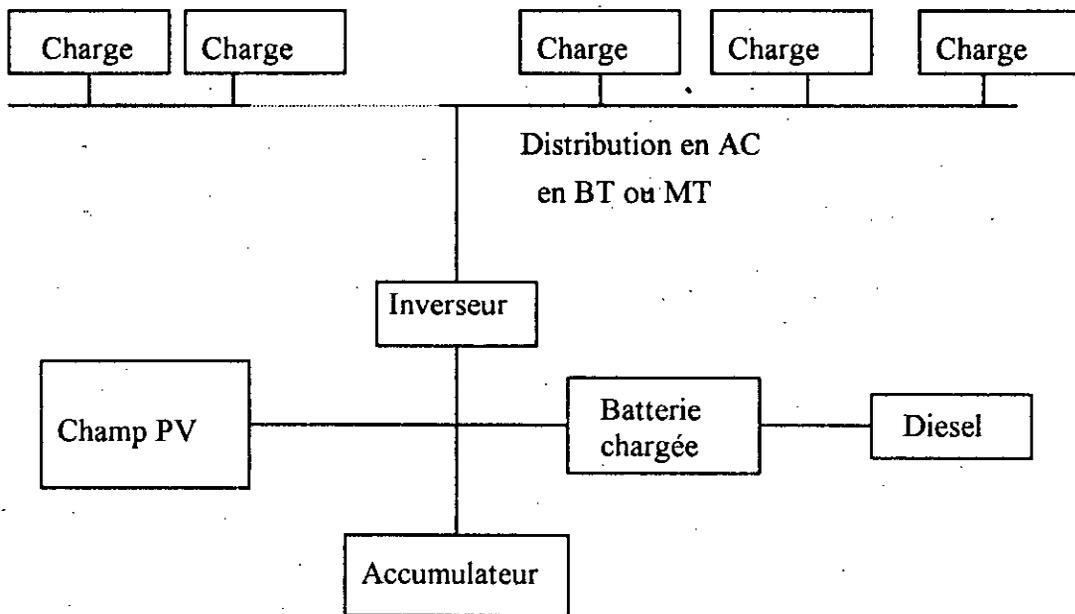
FIGURE II.2 Schéma général d'un parc pv



POMPAGE



MAISONS ISOLEES



Village isolé (système hybride PV+diesel)

AC: courant alternatif BT: basse tension MT: moyenne tension

FIGURE II.3 Schéma particulier de quelques applications communes de la conversion pv

II-2-1- Le Champ pv:

Le champ pv est un ensemble de modules pv opportunément raccordés en série ou en parallèle de façon à obtenir les conditions opératoires désirées. Plusieurs modules assemblés mécaniquement entre eux forment le panneau. Les panneaux connectés électriquement en série pour obtenir la tension nominale de génération forment le lacet. Enfin, la connexion électrique en parallèle de plusieurs lacets constitue le champ pv.

Dans la phase de l'étude d'un champ pv, il devrait être effectué quelques choix qui conditionnent le fonctionnement. Un choix fondamental est sûrement celui de la configuration série-parallèle des modules qui composent le champ pv. En effet, ce choix détermine la caractéristique électrique du champ pv et augmente sa fiabilité tout en limitant les causes et effets des pannes de chaque module.

Un point important de l'étude est relatif au choix de la tension nominale de l'exercice. En effet, une tension basse implique des courants élevés qui impliquent à leur tour une moyenne section de câblage et un organe de manoeuvre très coûteux et réciproquement, une tension élevée nécessite des soins et des coûts élevés.

Un autre choix de la phase d'étude est le type de structure de l'appui de modules (coûts, fiabilité).

II-2-2- Les Batteries d'accumulation:

Un accumulateur, pour être apte à l'utilisation dans un système pv, doit posséder les qualités suivantes:

- Longue durée en régime de fréquence des cycles charge/décharge
- Résistance élevée aux grandes amplitudes thermiques (0-50°C)
- Auto décharge réduite
- Rapport capacité/volume réduit
- Charge manutentionnée.

Les batteries qui sont utilisées actuellement dans la construction des systèmes pv et qui, en quelque mesure, correspondent aux caractéristiques indiquées ci-dessus, sont les batteries Plombo-Acide. Le développement technologique en ce secteur, lié à l'industrie des automobiles, nous promet d'obtenir des accumulateurs Plombo-Acide à plus basse auto décharge, longue durée de vie (moyenne de six ans) et à manutention réduite (ou carrément nulle).

A la différence de la batterie fabriquée dans l'industrie des automobiles, les batteries pour les installations pv sont réalisées avec des électrodes positifs tubolisés à basse teneur en antimoine, ce qui présente l'avantage d'une auto décharge limitée. En outre, ces batteries sont dotées d'un bouchon récombinatoire qui permet la récupération de l'Hydrogène et de l'Oxygène qui se forment durant la charge, réduisant ainsi la consommation de l'eau distillée.

II-2-3- Les Groupes diesel:

Le groupe diesel est constitué principalement de deux parties:

- un moteur diesel
- un moteur triphasé

Le moteur diesel, comme son nom l'indique, est un moteur à explosion classique à quatre temps transformant l'énergie fossile (fuel) en énergie mécanique. A ce moteur diesel est couplé sur le même arbre un alternateur triphasé dont le rôle est de transformer cette énergie mécanique en énergie électrique.

II-3- Position du problème ([EL-A,83]):

L'approche du problème de contrôle peut être clarifiée à l'aide du diagramme (figure II.4) montrant les objectifs opératoires et l'impact des tâches de contrôle sur l'état du système que l'ingénieur de contrôle doit considérer dans le but de concevoir des stratégies effectives.

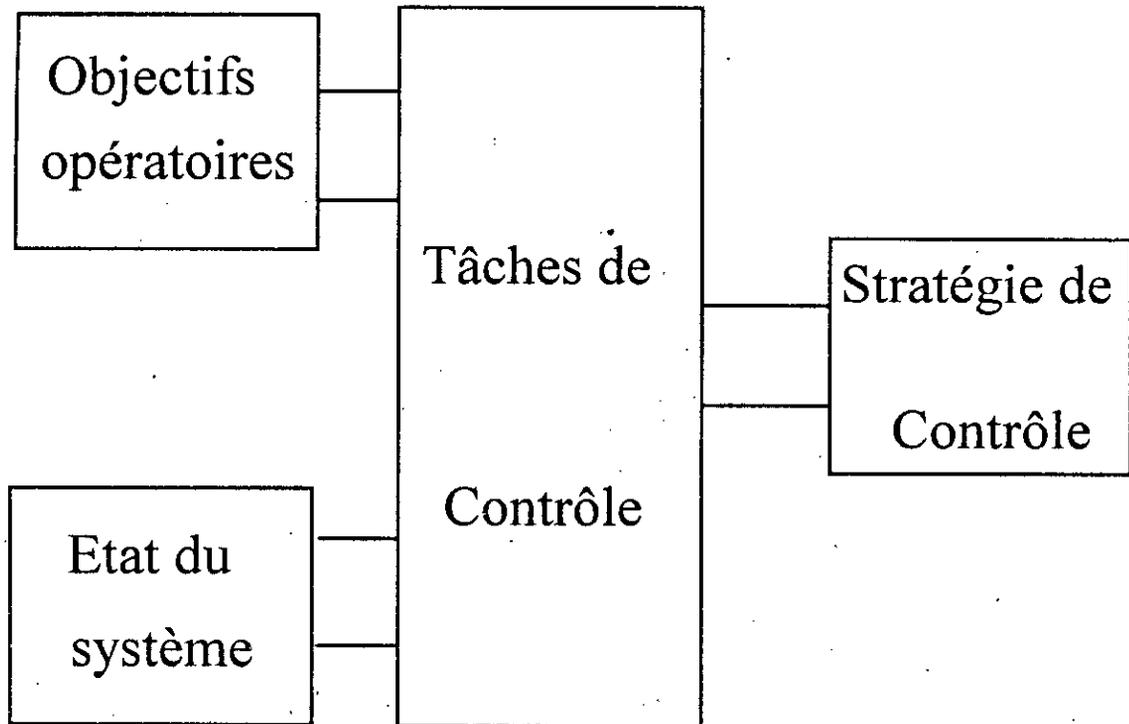


Figure II.4 Faces du problème opératoire

Le tableau II.1 présente en détail les éléments respectifs de ce diagramme.

Objectifs
<ul style="list-style-type: none"> -satisfaction de la demande -sécurité du système -protection de l'environnement -conservation du fuel -minimisation des coûts
Etats
<ul style="list-style-type: none"> -normal -vulnérable -en urgence -dans les extrémités restauratives
Tâches
<p>contrôle :</p> <ul style="list-style-type: none"> les réserves (génération et stockage) la demande (charge) la distribution (flux de puissance) l'état du système
Stratégies
<ul style="list-style-type: none"> contrôle de fréquence dispatching économique flux optimal d'énergie contrôle de tension reprogrammation (calendrier) corrective contrôle urgent remplacement protectif

Tableau II.1: Détails du problème opératoire

Les éléments retenus pour notre problème sont :

- Objectifs:

Comme indiqué dans le tableau II.1, nous pouvons identifier cinq objectifs généraux: satisfaction de la demande, assurance d'un fonctionnement continu du système, minimisation des coûts de production et de distribution, minimisation de l'impact écologique et enfin usage stratégique du fuel et des autres ressources. Parmi ceux-ci, les deux premiers ont la précedence historique, le troisième est le plus sérieusement étudié et les deux derniers sont de la plus récente vendange.

Notre problème se fixe deux objectifs:

- minimisation des coûts
- satisfaction de la demande.

- Etats:

L'état dans lequel se situe notre problème est l'état normal, i.e: toutes les contraintes sont satisfaites, indiquant que la généralisation est adéquate pour approvisionner la demande de charge totale existante et qu'aucun équipement n'est surchargé. Dans cet état, les marges de réserve (la transmission aussi bien que la génération) sont suffisantes pour fournir un niveau convenable de sécurité avec le respect des contraintes auxquelles le système est soumis.

-Tâches:

Les tâches de contrôle indiquées dans le tableau II.1 sont données en terme de ce qui doit être contrôlé, mais puisque c'est l'état du système et ses objectifs qui définissent les tâches, l'état de notre système nous indique que ceux qui doivent être contrôlés sont les réserves (génération et stockage).

- Stratégies:

Parmi toutes les stratégies de contrôle, celle qui assure les tâches définies par l'état de notre système et les objectifs fixés au préalable est le dispatching économique.

II-4- A Propos du dispatching économique (d.e) ([PEL,71]):

II-4-1- Principe:

Le principe du d.e est:

- L'optimisation instantanée de la production par ajustement des puissances des groupes démarrés en respectant les contraintes du réseau.
- La recherche de la répartition économique des charges entre les groupes en service compte tenu des pertes dans le réseau.

II-4-2- Buts:

- Contrôler les variations du coût total de production de façon à le rendre minimal ou tout au moins aussi proche que possible du minimum, les consommations du moment étant supposées données et les contraintes imposées au réseau et aux groupes de production étant prises en compte.
- Faire face aux écarts aléatoires par rapport à un programme prévu de production. Ces écarts peuvent être dûs soit à la mise hors service d'un équipement, soit à un écart avec la consommation prévue. De plus, il doit agir en quelques minutes et il ne peut donc faire appel qu'aux équipements en service à l'instant considéré.

Les programmes journaliers et hebdomadaires sont dits programmes en "avenir certain", car les prévisions de consommation d'énergie et météorologiques ont une précision bien suffisante lorsqu'elles sont faites du jour au lendemain et même d'une semaine à l'autre.

II-4-3- Les méthodes d'approches:

En dehors des difficultés de prévision, l'étude simultanée de la gestion d'un grand nombre d'unités d'équipement nécessite la résolution de problèmes ayant un très grand nombre de variables et de paramètres. Ceci conduit à des méthodes de résolution plus ou moins simplifiées, parmi lesquelles les plus utilisées sont:

- a- la méthode empirique basée sur la répartition périodique de situations voisines, ce qui permet d'établir un programme à partir d'une situation passée à laquelle il suffit d'apporter quelques corrections.

b- la simulation, qui est un perfectionnement de la méthode empirique:

Un exemple illustratif sur ce sujet a été étudié par [KHA,88], le modèle présenté dans cet article est une combinaison de l'analyse du long et du court terme pour évaluer la capacité des systèmes PV. Le but est de tester si la capacité obtenue par ce scénario (LOLE ANALYSIS: Overall Loss of Load Expectation) est acceptable pour un scénario opérationnel de jour en jour. En plus, il est montré comment l'inclusion du fuel peut augmenter l'acceptabilité des systèmes connectés en PV.

Nous allons nous pencher de plus près sur le court terme.

b-1- L'étude de fonctionnement:

Le cadre d'étude du temps de fonctionnement est restreint à 24 heures à cause de la variation de l'ensoleillement et de la demande. La succession des opérations à l'intérieur de ce cadre de temps peut être résumée comme suit:

1- Au début du cycle d'opérations journalières, l'unité de charge est déterminée pour les 24 heures suivantes. La fonction "Unit-Commitment" (U.C) fournit un horaire d'unité linéaire disponible. Le programme spécifique est "Unit-Commitment et coût du programme de production" développé par les services Boeing Computer pour l'Institut de Recherche d'Energie Electrique (EPRI) aux Etats-Unis [KHA,88].

2- A des intervalles fixes (pouvant varier de 2 à 10 minutes), les unités disponibles de la production chargée sont dispatchées pour que le système de charge soit à coût minimum. Le programme de dispatching économique est fourni avec le niveau de charge désiré des unités chargées pour un intervalle suggéré.

Les étapes suivantes décrivent la méthode utilisée dans l'étude de fonctionnement. Le plan de procédure est présenté dans la figure II.5.

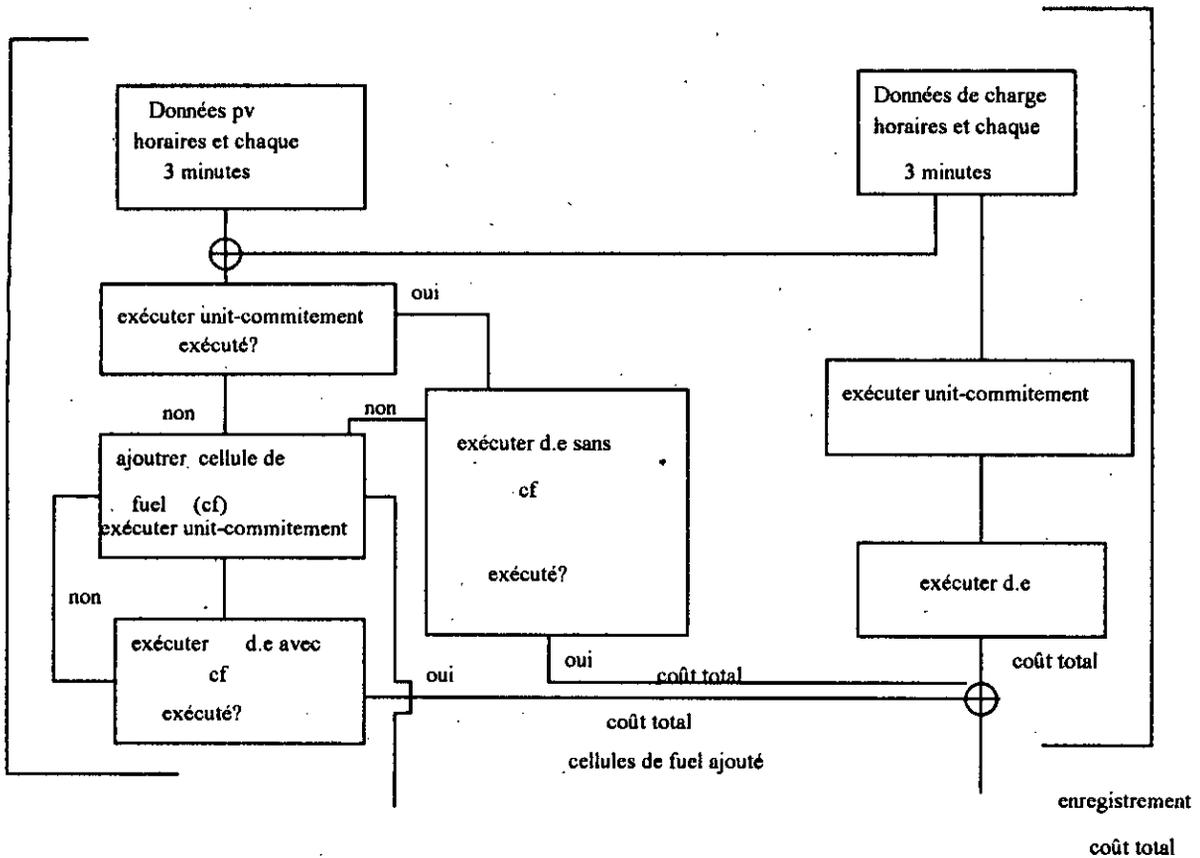


Figure II.5 Carte de l'étude de fonctionnement

- obtenir la courbe de charge restante par soustraction de l'espérance du système de charge.
- compiler le Unit-Commitment en utilisant cette charge restante et le groupe de générateurs disponibles comme déterminés dans l'étude du plan. Si le Unit-Commitment n'est pas réussi, ajouter le fuel nécessaire. S'il est réussi passer au (d.e).
- compiler le d.e dans 2 à 10 minutes d'intervalle en utilisant la charge restante et le groupe de générateurs disponibles. Si le (d.e) n'est pas réussi, rajouter l'unité de fuel nécessaire. S'il est réussi, calculer le coût de production économique.

Il devra être assuré que toutes les contraintes de fonctionnement (exemple:balance d'énergie, limite des générateurs, pente des prix) soient croisées.

b-2- La méthode d'analyse:

La méthode d'analyse présentée permet de calculer les coûts de fonctionnement économiques et les exigences en fuel. L'analyse du processus est complétée en trois étapes:

- 1- processus de modification de la charge pour associer le système pv
- 2- l'analyse opérationnelle pour déterminer le montant des exigences en fuel
- 3- le coût de fonctionnement économique de chaque niveau de pénétration du pv est calculé.

b- 3- Développement des charges journalières:

Ce procédé résoud ce qui suit:

- choisir des données de charge pour un jour à hautes fluctuations où la production en PV a eu des variations élevées. Ce jour est appelé jour intermittent. Ce sera le mauvais cas;
- choisir des données de charge pour un jour qui a eu-une forme de charge moyenne et un taux d'ensoleillement moyen. Ce sera un jour normal;
- entrer les données horaires en pv;
- entrer les données chaque 3 minutes;
- obtenir les données de charge horaires restantes en substituant l'espérance horaire des données de charge. Cette donnée de charge restante est utilisée dans le programme Unit-Commitment;
- obtenir les données de charge restantes en 3 minutes en utilisant la même procédure que ci-dessus. Ces données seront utilisées par le programme de (d.e).

b-4- Calcul des coûts opérationnels et des exigences en fuel:

Le scénario de référence commence par entrer les données de charge horaires [(GPUC): Unit Commitment and Production Costing Program] et les données en 3 minutes au (d.e) programme.

Le pv aura à être exécuté comme suit:

a- modifier le système de production pour inclure la capacité du pv

b- exécuter GPUC avec les entrées suivantes:

1- données de charges horaires restantes

2- Unit commitment horaire comme déterminé pour la même journée.

Il est important de contrôler si le modèle de fonctionnement s'exécute ou pas. S'il n'est pas exécuté, le fuel doit être rajouté au système de production GPUC jusqu'à l'exécution.

Il est possible que le d.e ne s'exécute pas, dans ce cas, le fuel doit être rajouté à la liste de la capacité de production de GPUC jusqu'à ce qu'il modifie le Unit-Commitment horaire qui pourra exécuter le d.e.

Le montant de la capacité du fuel requis pour qu'il y ait une convergence est noté (FCR).

La production de ce scénario peut être résumée en ce qui suit:

1. la différence entre le coût d'opération de référence (ROC) et le coût de fonctionnement opérationnel du PV (OC) représente le coût opérationnel économique. Le coût opérationnel économique nous permet de juger si le scénario est avantageux ou pénalisant. En d'autres termes, il nous permet de savoir si nous avons des gains (coût de référence supérieur au coût opérationnel) ou des pertes (dans le cas contraire).

si $ROC-OC=0$ non crédible

si $ROC-OC<0$ pénalité

si $ROC-OC>0$ crédible

2. la différence entre la capacité crédit et la capacité requise en fuel détermine la capacité actuelle crédit disponible pour la source PV La capacité actuelle crédit pour la

source pv joue le même rôle que le coût opérationnel ci-dessus. Si la capacité crédit est inférieure aux exigences en fuel, nous serons dans une situation où il est impossible de satisfaire les besoins, ce qui induirait une pénalité. Dans le cas contraire, le système est crédible.

si $CC-FCR=0$ non crédible

si $CC-FCR<0$ pénalité

si $CC-FCR>0$ crédible

où CC représente la capacité crédit

b-5- Résultats opérationnels:

Le simulateur ainsi réalisé donne, selon son auteur des résultats pertinents (voir annexe 1 pour plus de détails).

c- La programmation mathématique, permet l'étude de nombreuses situations d'où l'on déduit une solution optimale ou assez voisine de l'optimum. De nos jours, la programmation mathématique est la méthode d'approche la plus fréquemment utilisée vu la disponibilité de logiciels de résolution puissants et la précision des solutions fournies par ces algorithmes.

CHAPITRE III
Modélisation du problème

III- MODELISATION DU PROBLEME

Le système étant personnalisé, la méthode d'approche choisie, nous allons maintenant identifier tous les paramètres susceptibles d'être liés directement ou indirectement à l'élaboration de notre modèle.

III-1- Variables, valeurs exogènes et hypothèses:

La solution de notre problème devra produire les résultats suivants:

- . Le plan de production journalier pour les centrales pv, les groupes diesel et les centrales de stockage.
- . Le plan de stockage pour les batteries d'accumulation.

Le problème dépend d'un certain nombre de données exogènes:

- . Le nombre de périodes considérées
- . La demande d'énergie électrique (l'allure de la courbe de charge)
- . L'apport en soleil dans les capteurs pv et l'apport en fuel dans les groupes diesel
- . La capacité de puissance et de stockage des centrales.

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses qui suivent et qui affectent la structure du problème et le choix de la procédure de résolution:

1- La nature de notre problème est stochastique vu le nombre de variables aléatoires dépendant en grande partie des conditions climatiques telles que le taux d'ensoleillement et la demande en énergie. Néanmoins, Nous nous placerons dans un contexte déterministe où toutes les quantités exogènes sont connues avec certitude, en particulier les apports naturels en soleil et en fuel, la demande d'énergie électrique et les capacités installées pour chaque centrale, car le projet doit être réalisé dans un village précis où toutes les données ont été estimées avec une bonne précision.

Nous tenons à préciser que nous nous intéressons à la structure du problème (ou son modèle), et notamment à développer un instrument d'analyse pour l'étude des propriétés systémiques des centrales de stockage de l'énergie sur la structure de la courbe de charge journalière.

2- Le temps est discrétisé. La demande, l'état des centrales, les apports, la production, sont donc définis sur une succession de périodes de temps.

- 3- L'état du système à la fin du jour qui précède la journée étudiée est assimilé à la fin de la journée courante. L'utilité de cette hypothèse sera explicitée par la suite.
- 4- La charge électrique est représentée en un point car la topologie du réseau n'a aucune influence sur le placement des moyens de production mais sur les injections des puissances instantanées dans les noeuds du réseau. Notre problématique est limitée seulement au le placement optimal des moyens de production.
- 5- Puisque le contrôle de la production est généralement exprimé en énergie active, le système est écrit en énergie active seule.
- 6- Par mesure d'homogénéité, la production des centrales pv est exprimée en Kwh et non en kwhc (Kilo watt-heure crête).

III-2- Les biais du modèle:

Dans cette partie, nous essayons de discuter les facteurs qui peuvent biaiser la solution optimale de ce modèle.

1- La discrétisation du temps:

Nous avons émis l'hypothèse que le temps est discrétisé (hypothèse n° 2). La journée allant de 00h.00m.00s jusqu'à 23h.59m.59s est discrétisée en 24 tranches de même longueur, cela veut dire que notre placement va nous donner des énergies électriques apportées, stockées ou consommées dans un laps de temps qui est une heure. Soit y_t une de ces variables. Dire que l'énergie à la période t est y_t kwh signifie qu'il y a eu passage entre deux puissances: de $y_t + \Delta y_t$ kw à $y_t - \Delta y_t$ kw ou réciproquement. Cette discrétisation ne nous donne aucune information sur l'écart absolu Δy_t ni sur l'écart

relatif $\frac{\Delta y_t}{y_t}$ pour justifier la signification de cette discrétisation. Si cet écart est "trop

petit", cela voudrait dire que notre discrétisation est sélective, et si cet écart est "trop grand" cela signifie que notre discrétisation est très grossière. Néanmoins, nous n'avons aucun point de repère pour localiser nos "trop petit" et "trop grand" et juger correctement la qualité de notre discrétisation. En effet, le choix de cette discrétisation est tributaire de la disponibilité de données (charge, apport énergétique) dans des laps de temps d'une heure sur une journée de 24 heures.

2- Le raccordement du cycle:

Cette hypothèse nous permet de considérer que l'allure des courbes de charge et d'ensoleillement du jour j est exactement la même que celles du jour $j+1$. En réalité, le mot "exactement" doit être remplacé par "relativement" et de ce fait la solution optimale donnée par le modèle est "relativement" égale à la solution optimale qui correspond à la réalité. L'écart entre les deux solutions est tributaire de l'impact de cette hypothèse sur la journée considérée, en d'autres termes, du degré de similitude entre les jours j et $j+1$.

3- La nature déterministe attribuée au modèle:

Cette hypothèse n'est pas une limite majeure sur la valeur du modèle. Il y a bien sûr les contingences relatives aux apports en soleil dans les capteurs pv, l'incertitude associée à la puissance de pointe ainsi qu'à la fiabilité des équipements. Toutefois, ces considérations ne sont pas centrales à l'étude de l'effet de la structure des coûts et de la demande sur le plan de production journalier. Ensuite, il y a la difficulté d'estimer les coûts et les autres paramètres exogènes qui eux biaisent la solution. Dans la pratique, les ingénieurs en planification conçoivent la sécurité d'approvisionnement en termes de "marge de capacité supplémentaire" au dessus de ce qui est requis pour satisfaire la demande. Avec ces précautions, l'usage des représentations déterministes du problème de d.e est très fréquent. Notons que notre recherche bibliographique n'a abouti à aucun modèle stochastique déjà élaboré ou qui exprime une préoccupation à l'égard de la nature aléatoire du problème.

II-3- Enoncé du problème:

Le problème peut être énoncé comme suit:

Minimiser un objectif Z tel que :

Z = La somme des coûts de production de l'énergie
sous certaines contraintes développées ci-après:

1- Contraintes de conservation de l'énergie des centrales pv:

La production de l'énergie de la centrale pv destinée directement à la charge, plus la production acheminée aux centrales de stockage doit être égale à l'apport énergétique en soleil (multiplié bien sûr par un certain rendement).

2- Contraintes de conservation de l'énergie des centrales de stockage et des groupes diesel:

Pour chaque intervalle de temps, l'état final du réservoir agrégé est égal à son état initial auquel nous ajoutons le total des apports moins le total des sorties.

3- Contraintes de capacité de production:

Pour chaque centrale et à chaque instant, la production d'énergie électrique doit être inférieure ou égale à la capacité installée.

4- Contraintes de la demande d'énergie:

La somme des productions des centrales à chaque instant doit être égale à la demande d'énergie prioritaire.

5- Contraintes de limitation du nombre d'arrêts-démarrages des groupes diesel

le nombre d'arrêts-démarrages d'un groupe diesel ne doit pas dépasser un nombre limite fixé au préalable.

III-4- Formulation mathématique du modèle:**III-4-1- Définitions et notations:****a- Notations des ensembles:**

- PV: ensemble de centrales photovoltaïques mises en oeuvre tel que $|PV|=K_{pv}$

- S: ensemble de centrales de stockage mises en oeuvre tel que $|S|=K_s$

- D: ensemble de groupes diesel mis en oeuvre (marche-arrêt) tel que $|D|=Kd$

b-Notation des valeurs exogènes:

- ku: nombre de centrales de production ou de stockage existantes

- AES(t): l'apport énergétique en soleil à l'instant t exprimé par l'énergie électrique qu'il doit générer

- AEF(t): l'apport en fuel à l'instant t exprimé en énergie électrique qu'il doit générer

- DEM(t): la demande d'énergie électrique à l'instant t

c- Notation des variables:

- $Y(Uku[Ti], Vkv[Tj])$: variable de production ou de stockage de l'énergie, correspondant à un arc dans une représentation sous forme de réseau (figure III.1).

Les couples $(Uku[Ti], Vkv[Tj])$ qui apparaîtront en indice dans les contraintes du réseau pourront avoir par exemple, les symboles suivants pour désigner les noeuds associés aux classes d'équipements à un temps T_i (T_j): PV la centrale de production photovoltaïque, D les groupes diesel, S les centrales de stockage, Con la demande d'énergie, Sf source à flot fixe, Pf1 et Pf2 puits à flot fixe.

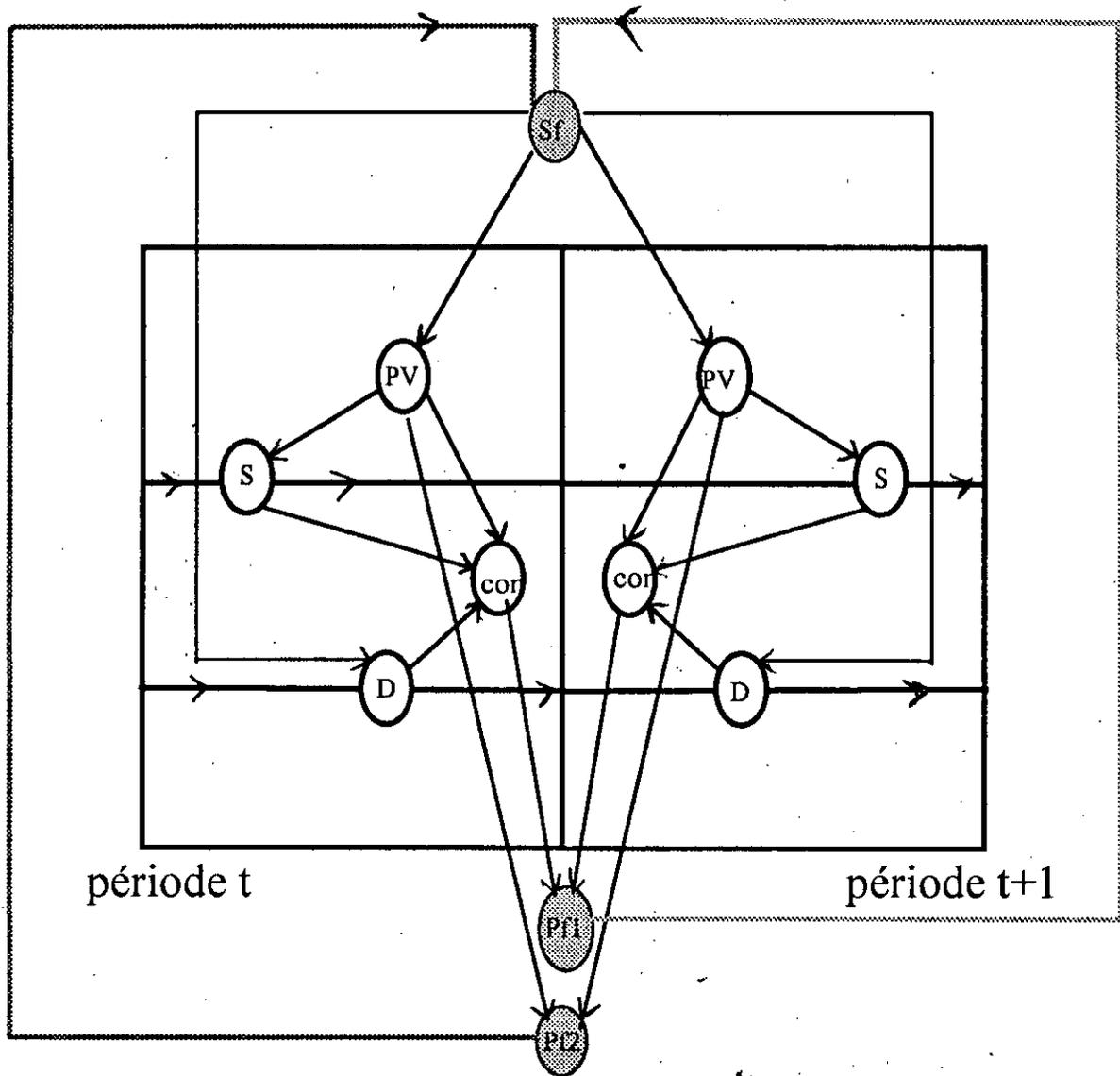


FIGURE III.1 Réseau du plan de production

$X_{k_d,t}$ une variable binaire telle que:

$X_{k_d,t}=1$ si le groupe diesel k_d est en marche à la période t

$X_{k_d,t}=0$ si le groupe diesel k_d est à l'arrêt à la période t

d- Les fonctions de coûts:

$$\text{MIN } Z = \sum_{ij} C_{i,j}(Y_{ij})$$

$C_{ij}(Y_{ij})$:fonction coût de transfert de la charge Y_{ij} du sommet i vers le sommet j . On distingue les coûts suivants:

- C: D ----->Con: coût de production des groupes diesel
- C: PV----->Con: coût de production des systèmes pv
- C: S----->Con: coût de production des batteries.

Pour donner plus de flexibilité à notre modèle, la fonction des coûts sera comme paramètre à introduire dans les inputs. Pour les autres arcs, nous leur associons un coût nul et ceci en considérant que les coûts de production cumulent tous les coûts les précédant (transport, stockage).

III-4-2- Le modèle mathématique:

-Le but de ce programme mathématique est de minimiser la fonction objectif suivante:

$$\text{Min } Z = \sum_{ku} \sum_{kv} \sum_{t,i,j} C_{uv} \left(Y \left(U_{ku} [t_i], V_{ku} [t_j] \right) \right)$$

sous les contraintes suivantes:

1. contraintes de conservation de l'énergie des centrales pv:

La somme de l'énergie électrique produite par les centrales pv (destinée à la consommation et au stockage) et l'énergie électrique non produite par ces même centrales (couverture des panneaux en cas de faible demande) doit être égale à l'apport en soleil exprimé en énergie électrique qu'il doit générer à la période t :

$$Y(PV_{kpV}[t], Con[t]) + \sum_{K_s} Y(PV_{kpV}[t], Sks[t]) + Y(PV_{kpV}[t], pf2) = AES(t)$$

$$t=1.T \quad , \quad k_{PV}=1.K_{PV} \quad , \quad k_S=1.K_S$$

2- Contraintes de conservation de l'énergie des centrales de stockage et des groupes diesel:

a- Contraintes de conservation de l'énergie des centrales de stockage:

La somme de l'énergie électrique restante en fin de période t-1 dans les batteries d'accumulation pour la période t et l'énergie fournie par les centrales pv à ces batteries à la même période doit être égale à la somme de l'énergie restante en fin de période t pour la période t+1 et de l'énergie consommée (ou produite par les centrales de stockage) à la période t:

$$Y(S_{ks}[t-1], S_{ks}[t]) + \sum_{K_p} Y(PV_{kpv}[t], S_{ks}[t]) = Y(S_{ks}[t], S_{ks}[t+1]) + Y(S_{ks}[t], Con[t])$$

$$t = 2 \dots T - 1 \quad k_s = 1 \dots K_s$$

$$Y(S_{ks}[T], S_{ks}[1]) + \sum_{K_p} Y(PV_{kpv}[1], S_{ks}[1]) = Y(S_{ks}[1], S_{ks}[2]) + Y(S_{ks}[1], Con[1])$$

si t = 1

$$Y(S_{ks}[T-1], S_{ks}[T]) + \sum_{K_p} Y(PV_{kpv}[T], S_{ks}[T]) = Y(S_{ks}[T], S_{ks}[1]) + Y(S_{ks}[T], Con[T])$$

si t = T

b- Contraintes de conservation de l'énergie des groupes diesel:

La somme de l'apport énergétique en fuel à la période t exprimé en énergie électrique et du potentiel électrique qui restait à la période t doit être égal à la somme de la production d'énergie électrique des groupes diesel pour la charge à la période t et du potentiel électrique (sous forme de fuel) qui reste en fin de période t pour la période t+1 dans les groupes diesel:

$$Y(D_{kd}[t-1], D_{kd}[t]) + AEF(t) = Y(D_{kd}[t], D_{kd}[t+1]) + Y(D_{kd}[t], Con[t])$$

$$t = 2 \dots T - 1 \quad k_d = 1 \dots K_d$$

$$Y(D_{kd}[T], D_{kd}[1]) + AEF(1) = Y(D_{kd}[1], D_{kd}[2]) + Y(D_{kd}[1], Con[1])$$

si $t = 1$

$$Y(D_{kd}[T-1], D_{kd}[T]) + AEF(T) = Y(D_{kd}[T], D_{kd}[1]) + Y(D_{kd}[T], Con[T])$$

si $t = T$

3- Contraintes de capacité de production:

a- Pour la centrale PV:

Pour chaque centrale PV et à chaque période t , l'énergie produite pour la charge et les batteries d'accumulateurs plus l'énergie non produite à la suite de la couverture des panneaux (en cas de faible charge) doit être comprise entre 0 et PV_{max} (les bornes minimales et maximales):

$$0 \leq Y(PV_{kpv}[t], pf2) + Y(PV_{kpv}[t], CON[t]) + \sum_{K_s} Y(PV_{kpv}[t], S_{ks}[t]) \leq PV_{max}$$

$$t = 1..T, \quad k_{pv} = 1..K_{pv}, \quad k_s = 1..K_s$$

où PV_{max} : puissance maximale des centrales pv

b- Pour la centrale de stockage:

Pour chaque centrale de stockage et à chaque période t , la somme de l'énergie électrique fournie par les centrales PV et le potentiel électrique restant de la période précédente doit être compris entre des bornes de charge inférieures et supérieures:

$$CH_{min} \leq Y(S_{ks}[t-1], S_{ks}[t]) + \sum_{K_s} Y(PV_{kpv}[t], S_{ks}[t]) \leq CH_{max}$$

$$t = 2..T, \quad k_{pv} = 1..K_{pv}, \quad k_s = 1..K_s$$

$$CH_{min} \leq Y(S_{ks}[T], S_{ks}[1]) + \sum_{K_s} Y(PV_{kpv}[1], S_{ks}[1]) \leq CH_{max}$$

si $t = 1$

où CH_{min} : seuil de décharge des batteries

CH_{max} : capacité maximale de charge des batteries

c -Pour le groupe diesel:

Pour chaque groupe diesel et à chaque période t, la production de l'énergie électrique destinée à la charge doit être comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale si le groupe est en marche et nulle sinon:

$$X_{kd}[t] \cdot D_{\min} \leq Y(D_{kd}[t], CON[t]) \leq X_{kd}[t] \cdot D_{\max}$$

$$t = 1..T \quad k_d = 1..K_d$$

où D_{\min} : capacité minimale du groupe diesel

D_{\max} : capacité maximale du groupe diesel

4- Les contraintes de la demande d'énergie:

La somme de l'énergie électrique produite à la période t par les centrales photovoltaïques, les centrales de stockage et les groupes diesel doit être égale à la charge:

$$\sum_{K_p} Y(PV_{kpv}[t], CON[t]) + \sum_{K_s} Y(S_{ks}[t], CON[t]) + \sum_{K_d} Y(D_{kd}[t], CON[t]) = DEM(t)$$

$$t = 1..T$$

5-Contrainte de limite de nombre d'arrêt- démarrage:

Comme plusieurs arrêts consécutifs d'un même groupe au cours d'une même journée provoquent une fatigue importante du matériel, on le contraint à s'arrêter N fois au plus:

$$\sum_{t=1}^T (X_{kd}[t+1] - X_{kd}[t])^2 \leq N$$

III-5- La nature et la complexité du modèle:

III-5-1- La nature du modèle:

Ainsi posé, le problème est non linéaire aux moins par rapport à ses contraintes (la fonction objectif peut être linéaire ou non linéaire). Il se formule en variables mixtes (variables continues et variables bivalentes).

III-5-1- La complexité du modèle:

Notre modèle appartient à la famille des problèmes de grande taille. Mais qu'est ce qu'un modèle de grande taille? La réponse varie. C'est un modèle qui:

- prend beaucoup de temps (donc d'argent) pour être résolu
 - occupe beaucoup de mémoire disponible dans notre machine
 - a plus de quelques centaines de lignes lors de sa formulation avec un logiciel.
- Brièvement, tout modèle qui coûte cher pour être résolu, difficile à manier et à maîtriser pour la majorité, est un modèle de grande taille.

Nous pouvons citer ci-dessous quatre bonnes raisons d'éviter les modèles de grande taille:

- 1- Ils sont très coûteux à mettre en pratique et à résoudre.
- 2- Il est difficile de les déboguer, et beaucoup plus difficile de vérifier s'ils se comportent exactement comme ils sont conçus.
- 3- Il est souvent difficile et dangereux d'effectuer des changements dans ces modèles, à cause de tous les effets secondaires qui en résultent et qui doivent être présents en mémoire.

Pour le cas de notre problème, nous avons:

Nombre de variables:

$$Y(PV_{kpv}[t], CON[t]) = K_{pv} \times T$$

$$Y(PV_{kpv}[t], S_{ks}[t]) = K_{pv} \times K_s \times T$$

$$Y(S_{ks}[t], CON[t]) = K_s \times T$$

$$Y(D_{kd}[t], CON[t]) = K_d \times T$$

$$Y(S_{ks}[t], S_{ks}[t+1]) = K_s \times T$$

$$Y(D_{kd}[t], D_{kd}[t+1]) = K_d \times T$$

$$Y(PV_{kpv}[t], pf2) = Kpv \times T$$

$$X_{kd}[t] = Kd \times T$$

Nombre de contraintes:

a- contraintes de la conservation de l'énergie des centrales PV: $Kpv \times T$

b- contraintes de conservation des centrales de stockage: $Ks \times T$

c- contraintes de conservation de l'énergie des groupes diesel: $Kd \times T$

d- contraintes de la demande d'énergie: T

e- contraintes de capacité de production:

e-1- capacité maximale des centrales PV: $Kpv \times T$

e-2- capacité maximale des centrales de stockage: $Ks \times T$

e-3- capacité minimale des centrales de stockage: $Ks \times T$

e-4- capacité maximale des groupes diesel: $Kd \times T$

e-5- capacité minimale des groupes diesel: $Kd \times T$

e-6- limite des arrêts-démarrages des groupes diesel: Kd

Total des variables:

$$(2Kpv + 2Ks + 3Kd + Kpv \times Ks) \times T$$

Total des contraintes:

$$(3Kd + 3Ks + 2Kpv + 1) \times T + Kd$$

Exemple:

1- $Kpv=1$ $Ks=1$ $Kd=1$ $T=24$

nombre de variables: 192 variables

nombre de contraintes: 217 contraintes

2- $Kpv=1$ $Ks=1$ $Kd=2$ $T=24$

nombre de variables: 264 variables

nombre de contraintes: 290 contraintes.

b- Avantages:

- Disponibilité des versions éducative et professionnelle.
- Capacité d'importer des modèles créés par des éditeurs de texte comme EDLIN.
- Production d'un écho visible du modèle i.e.: l'utilisateur peut appeler un modèle après l'avoir sauvegardé et le revoir directement sur l'écran.
- Facilité de rajout ou de suppression de contraintes.
- Autorisation à l'utilisateur de spécifier des points de départ faisables ou non faisables.
- Formulation du modèle sous sa forme naturelle (facilité en programmation).

c- Inconvénients:

- L'utilisateur a un contrôle limité sur l'apparence du rapport final et/ou sur la somme des informations que contient ce rapport.

B- EUREKA: THE SOLVER**a- Fiche Technique de la Version 1.0:**

- Distributeur: Borland international.
- Mémoire minimum: 384 K.
- Type de problèmes: GP et SN.
- Machines: IBM AT avec DOS 3.1, version disponible pour Macintosh.
- Dimensions maximales: lignes 20
 colonnes 20.
- Algorithme utilisé: Variables métriques [SCH, 84].

b- Avantages:

- EUREKA contient un large champ d'autres outils puissants pour tracer les graphes de fonctions directement sur écran, trouver les zéros d'une dérivée, calculer une intégrale définie, résoudre une équation à racines complexes et générer un rapport qui contient les données du problème, la solution et les schémas des fonctions.
- EUREKA accepte les inputs en code ASCII.
- Comme SUPER GINO, il produit un écho visible du modèle.

- Il ne dispose que de quatre fonctions qui sont : EXP, LOG, SIN et TAN.

D- MP6-NLPROG:

a-Fiche Technique de la Version 3,0:

- Distributeur: SCICOM.
- Mémoire minimum: 256K.
- Machine: IBM AT avec DOS 3.1.
- Type de problèmes: GP.
- Dimensions maximales:
 - Mode interpréteur avec 256K : $N+M \leq 25$.
 - Mode en lots (Batch mode) avec 256K : $N+M \leq 50$.
 - Mode en lots alternés (Batch alternate mode) avec 256K : $N+M \leq 140$:
- N: Nombre de variables.
- M: Nombre de contraintes.
- Algorithme utilisé: Le point fixe [SAI, 79].

b- Avantages:

- Il fait partie d'un système d'optimisation connu sous le nom d'OPTPAK, les autres modules isolés peuvent résoudre les PL, les problèmes quadratiques convexes et les problèmes de données accessoires (data fitting problems).
- Ce package a un mode interpréteur facilement utilisable disposant d'une interface avec un fichier de données extérieurement fourni par l'utilisateur et qui contient le problème.
- Formulation du problème sous sa forme naturelle.

c- Inconvénients:

- Dans le mode alterné en lots (Batch Alternate Mode), l'utilisateur a besoin de créer et de compiler un fichier source en FORTRAN contenant les données du problème et les sous-programmes appropriés.
- Ne permet pas à l'utilisateur de désigner les noms de variables.

- GAMS/MINOS peut manipuler les problèmes de grande taille (Un bulletin d'information distribué par "The Scientific Press" donne des détails additionnels à propos de la taille des problèmes; GAMS/MINOS peut manipuler au maximum 32767 lignes, 32767 colonnes et 32767 nonzéro nonlinéaires)
- Production d'un rapport détaillé contenant le modèle initial et les valeurs de départ pour les variables de décision.
- Possibilité d'utilisation d'un éditeur extérieur et séparé pour créer le modèle.
- Formulation du modèle sous sa forme compactée.

c- Inconvénients:

- Produit un écho imprimé de l'input qui est seulement visible dans un fichier output sur disque.
- L'écho est produit automatiquement et ne peut être supprimé par l'utilisateur.
- Les capacités d'output les plus limitées par rapport aux autres systèmes, il émet seulement les résultats finaux à l'utilisateur.

III-6-2- Résultats estimatifs:

Dans cette section, nous montrons la capacité de chaque package à résoudre les PNL. Ces derniers sont sélectionnés par [EDW, 89] de [HOC, 81]. Les problèmes choisis sont supposés de la même classe dans l'espoir de créer un "champ de niveau de compétition" dans lequel sont testés les différents packages. Il s'agit de 27 problèmes dont le plus large contient dix variables. Aucun problème ne viole le dimensionnement maximal des packages, soit en nombre de variables soit en nombre de contraintes. Tous les systèmes sont installés sur IBM PC/AT avec un coprocesseur mathématique. Pour chaque problème, des variables de décision sont initialisées en utilisant les points de départ suggérés par [HOC, 81].

Le temps limite de résolution est fixé à 60 minutes, à la fin de ce temps, l'exécution est interrompue. Le temps d'exécution est enregistré à la solution finale pour chaque problème à travers les six packages.

Le message final pour chaque package et pour chaque problème peut être : erreur et fin d'exécution, solution réalisable, solution non réalisable ou solution optimale. Les résultats finaux sont résumés dans le tableau III.1.

Type de solution	EUREKA	GAMS/MINOS	MP6-NLPROG	NLPSOLVER	OPTISLVE	SUPER-GINO
Optimale	20	18	15	17	23	23
Réalisable	5	8	2	7	2	4

Non réalisable	2	0	6	0	1	0
Erreur	0	1	4	3	1	0

Tableau-III.1- résultats sommaires

De ce tableau, nous remarquons que OPTISOLVE et SUPER-GINO résolvent le plus grand nombre de problèmes (dans le sens de donner des solutions optimales), suivis de près par EUREKA. De plus, SUPER-GINO a été le seul à ne se tromper sur aucun des 27 problèmes, suivi de GAMS/MINOS avec 26 problèmes.

Pour donner une idée sur l'efficacité de chaque package, nous considérons l'ensemble des six problèmes qui ont été résolus par tous les packages et donnons leur temps d'exécution correspondant.

N°du problème*	EUREKA	GAMS/MINOS	MP6-NLPROG	NLPSOLVER	OPTISOLVE	SUPER-GINO
4	2.80	9.34	0.11	0.37	2.36	3.57
45	16.26	11.86	1.97	1.96	17.85	5.6
48	2.20	10.10	7.63	1.49	2.63	4.72
51	1.98	10.11	9.66	1.25	2.47	7.68
52	1.97	10.05	12.86	2.20	2.58	5.98
86	19.33	16.47	423.43	5.78	23.35	14.12
MOYENNE	7.42	11.32	75.94	2.18	8.54	6.95

Tableau III.2 Temps d'exécution en secondes.

*: Numérotation selon [HOC,81].

Bien que [EDW, 89] ait espéré avoir un "champ de niveau de compétition", nous ne pouvons pas nous baser sur les tableaux III.1 et III.2 pour juger correctement entre les six packages. Nous n'avons aucune assurance sur la représentativité des problèmes testés. Les six packages utilisent des algorithmes différents et nous ne pouvons pas comparer un logiciel qui manipule des PNL avec au maximum 20 lignes et 20 colonnes et un autre qui traite des problèmes allant jusqu'à 300 lignes et 500 colonnes en utilisant le même exemple. La corrélation qui existe entre le temps d'exécution et la taille des problèmes est différente pour chaque package, cela rend notre comparaison loin de la situation idéale.

III-6-3-Conclusion:

Le GAMS/MINOS est le seul package dont nous disposons et pouvant supporter la taille de notre problème, en plus des avantages offerts par ce logiciel.

III-7-Description détaillée du logiciel à utiliser (GAMS) [BRO,87]:

Le GAMS (General Algebraic Modeling System) est conçu pour l'élaboration et la résolution des modèles de programmation mathématique larges et complexes de manière plus accessible aux programmeurs et plus compréhensible pour les utilisateurs de ces modèles. Ces derniers rencontraient beaucoup de problèmes en écrivant leur programme en FORTRAN. Parmi ces difficultés:

- 1- Le programmeur est la seule personne pouvant faire fonctionner le modèle
- 2- La présentation du modèle est très compliquée
- 3- Les erreurs sont difficiles à détecter
- 4- Le temps requis pour maîtriser le modèle est très long.

Ainsi, GAMS a été élaboré pour améliorer cette situation en fournissant un système de structure et un langage de programmation dans lequel la clarté de l'expression et la portabilité sont facilement maintenues.

III-7-1-Motivations:

Des progrès substantiels ont été enregistrés pendant les années 1950 et 1960 avec le développement des algorithmes et des codes des ordinateurs pour résoudre de larges problèmes de programmation mathématique. Cependant, le nombre d'application de ces outils en 1970 était en dessous des espérances car la solution des procédures ne formait qu'une petite partie des efforts généraux de modélisation.

Une large partie du temps exigé pour développer un modèle était consacrée à la préparation des données, leur transformation et le rapport des préparations. Chaque modèle exigeait plusieurs heures d'analyse et un temps de programmation important pour organiser les données et écrire les programmes qui transformeraient les données selon la forme requise en optimisant par la programmation mathématique.

En outre, il était difficile de détecter et d'éliminer les erreurs car les programmes qui réalisaient les opérations des données étaient seulement accessibles pour les spécialistes les ayant écrits et non pour les analystes chargés du projet. GAMS a été développé pour améliorer cette situation en:

- fournissant un langage de haut niveau pour les représentations compactes des modèles larges et complexes;
- permettant des changements pouvant être utilisés dans les spécifications du modèle avec simplicité et sans risque;
- admettant des formulations claires des relations algébriques;
- autorisant des descriptions du modèle qui sont indépendantes de la solution des algorithmes.

III-7-2- Les caractéristiques de GAMS:

a- Les principes généraux:

La conception de GAMS a incorporé des idées inspirées de la théorie des bases de données et la programmation mathématique et a essayé de les combiner pour répondre aux besoins stratégiques des programmeurs.

La relation de base de données améliore les structures de plan de travail pour développer une organisation de données générale et celle de la programmation mathématique améliore la manière de décrire un problème et de développer les méthodes de sa résolution.

Les principes suivants sont désignés pour enrichir le système:

. Toutes les méthodes algorithmiques existantes doivent être disponibles sans changer la

représentation du modèle de l'utilisateur.

L'introduction de nouvelles méthodes, ou de nouvelles implémentations pour des méthodes existantes, doit être possible sans avoir recours à des changements sur les modèles existants.

Les optimisations linéaire, non linéaire, en nombres entiers peuvent actuellement être accomodées.

. Le problème d'optimisation doit être exprimé indépendamment des données qu'il utilise.

Cette séparation de logique et de données permet aux problèmes d'être de grande taille sans causer une augmentation dans la complexité de la représentation

. L'utilisation d'un modèle de données rationnel nécessite que l'allocation des ressources de l'ordinateur soit automatisée, cela veut dire que des modèles grands et complexes peuvent être construits sans que l'utilisateur n'ait à se soucier des détails comme la taille des tableaux.

b- Documentation:

La représentation de GAMS est sous une forme qui peut être lue par les utilisateurs et les ordinateurs; ceci veut dire que le programme GAMS lui-même est la documentation du modèle, et que la description séparée exigée par le passé n'a plus lieu d'être. De plus, la conception de GAMS contient les caractéristiques suivantes qui s'adressent aux spécifications des usagers:

- La représentation du modèle GAMS est brève et permet une utilisation complète de l'élégance de la représentation mathématique.
- Les transformations de données sont spécifiées brièvement et algébriquement. Ceci veut dire que toutes les données peuvent être entrées sous leur forme élémentaire et que toutes les transformations faites lors de la construction du modèle et dans le compte rendu sont disponibles pour inspection ou vérification.
- Le texte explicatif contient la définition de tous les symboles et il est reproduit lorsque les valeurs associées sont affichées.
- Toute information voulue pour comprendre le modèle est dans un même document. Bien sûr, certaines disciplines sont nécessaires pour rendre plus avantageuses les caractéristiques de conception, mais le but est de concevoir des modèles plus accessibles, plus compréhensibles et plus crédibles.

c- La portabilité:

Le système GAMS est conçu de manière à ce qu'il puisse être utilisé sur différents types d'ordinateurs sans aucune modification.

- Un modèle développé sur un petit ordinateur personnel peut être résolu sur les grands systèmes.
- Une personne peut développer un modèle qui peut être utilisé par la suite par d'autres personnes distantes physiquement du programmeur original.

d- L'interface de l'utilisateur:

Le système de base de GAMS est orienté de façon à pouvoir travailler avec n'importe quel éditeur. Plutôt que de forcer l'utilisateur à apprendre d'autres commandes d'édition, GAMS offre une architecture ouverte dans laquelle chaque usager peut utiliser l'éditeur de son choix. Cette interface facilite l'intégration de GAMS avec une variété d'utilisateurs.

e- Les solvers de GAMS:

GAMS est un package qui contient plusieurs solvers, associés à différents types de problèmes. Le tableau III.3 illustre les classes de problèmes pouvant être résolus avec GAMS, les solvers de ce logiciel et les affectations types de problème/solver possibles.

Solvers	Types de problèmes *						
	LP	RMIP	MIP	NLP	DNLP	RMINLP	MINLP
BDMLP	X	X					
ZOOM	X	X	X				
CONOPT	X	X	X			X	
OSL	X	X	X				
DICOPT	X	X	X	X	X		X
MPSWRITE	X	X	X	X	X	X	X
MINOS	X	X		X	X	X	X

Tableau III.3 Affectation type de problème/solver

- * - LP: problème de programmation linéaire.
- RMIP: problème de programmation en nombres entiers relaxés.
- MIP: problème de programmation en nombres entiers.
- NLP: problème de programmation non linéaire.
- DNLP: problème de programmation non linéaire à dérivée discontinue.
- RMINLP: problème de programmation non linéaire mixte relaxé.
- MINLP: problème de programmation non linéaire mixte.

III-8- L'Interface Utilisateur du Modèle:

Malgré tous les avantages d'utilisation offerts par GAMS et dans le but d'avoir un outil d'aide à la décision complet, nous avons eu l'idée de concevoir une interface utilisateur d'entrée des données et de sortie des résultats qui permet à n'importe quel utilisateur d'exploiter notre modèle sans avoir besoin de connaître le modèle mathématique et encore moins l'outil de résolution (GAMS). En utilisant le Turbo Pascal, la première idée est de programmer le module destiné à appeler les programmes choisis par l'utilisateur. Erreur presque fatale, l'application devient très volumineuse, et il ne reste plus de mémoire pour lancer des programmes secondaires à partir de l'application de base en utilisant la procédure EXEC de Turbo Pascal. La solution est d'inventer une nouvelle procédure EXEC dont le rôle sera de retirer complètement de la mémoire centrale le programme Turbo Pascal pour le stocker dans un fichier ou en mémoire paginée. La mémoire centrale se trouve ainsi libérée pour recevoir le programme secondaire appelé. Quand ce dernier se termine, Turbo Pascal est rechargé en mémoire centrale et l'exécution du programme principal se poursuit. Pour plus de détails sur la mise en œuvre de cette idée, nous référons le lecteur aux travaux de [TIS,90].

Le masque réalisé est une interface utilisateur aux normes S.A.A, une application de la Programmation Orientée Objet (POO) et de la Turbo Vision. L'interface permet de modifier le fichier entrée du programme GAMS, le compiler et lire les résultats du fichier sortie et cela de manière à la fois souple et totalement transparente. Dans le haut de l'écran de l'interface, vous retrouvez la barre des menus suivants:

a- Menu "—":

a-1- La commande "About": vous donne des renseignements sur l'auteur de l'interface, son adresse et la date de sa mise en œuvre.

b- Menu "Fichier":

b-1- La commande "Charger modèle": permet de charger un modèle existant ou un nouveau modèle i.e: créer le fichier entrée du programme GAMS.

b-2- La commande "Editer résultats": fournit les résultats produits par GAMS et récupérés à partir des fichiers sortie du programme GAMS.

b-3- La commande "Changer nom": permet de donner un nouveau nom à un fichier déjà existant ou lui indiquer un nouveau chemin d'accès.

b-4- La commande "Détruire fichier": permet d'effacer un fichier existant dans n'importe quel répertoire

b-5- La commande "Sortie temporaire DOS": permet de sortir de l'interface pour accéder à une application sous DOS et revenir ensuite à l'interface en question.

b-6- La commande "Aide": fournit des informations sur l'utilisation du menu fichier.

c- Menu "Söolver":

c-1- La commande "Modèle/Solver": permet de spécifier un solver à un type de problème.

c-2- La commande "Aide": fournit des instructions sur l'utilisation du menu "Solver".

d- Menu "Contraintes":

d-1- La commande "Sélection": permet d'activer ou de relaxer une ou plusieurs contraintes ou classes de contraintes.

d-2- La commande "Aide": apprend l'utilisateur à utiliser le menu "Contraintes".

e- Menu "Option":

e-1- La commande "Ressources/ Listing": permet d'utiliser directement quelques options de GAMS par exemple changer le nombre de ressources limite ou le nombre d'itérations limite

e-2- La commande "Aide": donne plus d'informations sur l'utilité du menu "Option".

f- Menu "Paramètres": C'est le menu qui lit les données exogènes du problème. Il est constitué des commandes suivantes:

f-1- La commande "Pas" : par laquelle, vous pouvez spécifier le pas de discrétisation discuté dans le paragraphe III-1.

f-2- La commande "Demande" : lit les données de charge selon la discrétisation fixée par l'utilisateur au préalable.

f-3- La commande "AES" : lit les apports énergétiques en soleil pour chaque laps de temps.

f-4- La commande "AEF" : lit le plan d'alimentation des groupes diesel en fuel.

f-5- La commande "Dimensions" : affecte les données sur le dimensionnement du système à savoir: la surface des panneaux, les capacités minimale et maximale de production et de stockage.

f-6- La commande "Coûts" : lit l'expression de la fonction des coûts pour chaque moyen de production.

f-7- La commande "Aide" : donne des instructions sur l'utilisation du menu "Paramètres".

g- Le menu "Util": Il contient quelques applications parfois utiles et que vous retrouvez dans:

g-1- La commande "Calculatrice" : fournit une calculatrice simple qui permet d'effectuer des calculs de sommation, de soustraction, de multiplication ou de division.

g-2- La commande "Calendrier" : Fournit un calendrier du mois avec une spécification de la date et de l'heure de manipulation.

g-1- La commande "Musique" : produit une musique aléatoire.

CHAPITRE IV
Mise en œuvre du modèle

IV- MISE EN ŒUVRE DU MODELE

IV-1- Le modèle GAMS:

Afin de montrer la puissance de l'outil de résolution, nous donnons ci après la transcription de notre modèle sous le formalisme GAMS. Il faut bien noter que ce formalisme ne s'écarte guère de celui habituellement utilisé par les concepteurs de modèles, ce qui est une garantie de simplicité de traduction et de compréhension.

\$OFFUPPER

\$OFFSYMXREF OFFSYMLIST OFFUELLIST OFFUELXREF

\$TITLE DISPATCHING

* Placement Optimal des Moyens de Production sur la Courbe de Charge Tournaliere

* REFERENCE: M KHELFAOUI et K SLIMANI: Placement Optimal des Moyens de Production sur la Courbe de Charge Tournaliere.

* These de FIN d'Etude, Departement Genie Industriel

* ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, El-Harrach, Alger, ALGERIE, JUIN 1994.

Option Reslim = 100000000;

Option Iterlim = 100000;

Option LimRow = 0, LimCol = 0;

SCALAR SURFPAI SURFACE TOTALE DES PANNEAUX (m2) /240/

SETS G Generateurs / PV, Batterie, Diesel /

Kd Groupe Diesel / 1 /

T PALIERS DE CHARGE /0h-1h, 1h-2h, 2h-3h, 3h-4h, 4h-5h, 5h-6h, 6h-7h, 7h-8h, 8h-9h, 9h-10h, 10h-11h, 11h-12h,

12h-13h, 13h-14h, 14h-15h, 15h-16h, 16h-17h, 17h-18h, 18h-19h, 19h-20h, 20h-21h, 21h-22h, 22h-23h, 23h-0h /;

* Apport Energetique en Soleil(Wh/m2) est note AESU1(T)

PARAMETERS DEM1(T) Demande(Wh) /0h-1h 75, 1h-2h 55, 2h-3h 40, 3h-4h 35, 4h-5h 35, 5h-6h 40, 6h-7h 40, 7h-8h 45, 8h-9h 50, 9h-10h 45, 10h-11h 40, 11h-12h 60, 12h-13h 110, 13h-14h 140, 14h-15h 140, 15h-16h 135, 16h-17h 130, 17h-18h 125, 18h-19h 120, 19h-20h 125, 20h-21h 130, 21h-22h 115, 22h-23h 85, 23h-0h 70/

AESU1(T) / 6h-7h 118, 7h-8h 346, 8h-9h 575, 9h-10h 77, 10h-11h 922, 11h-12h 999, 12h-13h 999, 13h-14h 14h-15h

4,

5h-16h 575, 16h-17h 346, 17h-18h 118 /

AEF(T) Apport Energétique en Fuel(KWh) / 9h-10h 50, 10h-11h 70, 11h-12h 90, 12h-13h 160, 13h-14h 90, 14h-15h 70, 15h-16h 45, 18h-19h 50, 19h-20h 90, 20h-21h 140, 21h-22h 50 /;

TABLE DATA(G,*) Donnees sur les Generateurs

	PUI-MIN	PUI-MAX	C
*	(KW)	(KW)	(KDA)
PV	0	250	20
Batterie	250	1200	22
Diesel	40	160	100

PARAMETERS surfpa

AES(T) apport energetique en soleil (KWh)

COFF(T) Temoin d'un apport solaire

DEM(T) la demande d'energie electrique;

surfpa = surfpa1;

AES(T) = AESU1(T)*SURFPA/1000;

DEM(T) = DEM1(T);

COFF(T) = 1\$(AESU1(T) GT 0);

DISPLAY AES, COFF,DEM

\$eject

VARIABLES

- Ypv_c(T) Energie distribuee par le generateur PV aux consommateurs
- Ypv_s(T) Energie distribuee par le generateur PV aux batteries
- Ypv_pf2(T) Energie non produite par le generateur PV
- Ys_c(T) Energie distribuee par les batteries aux consommateurs
- Yd_c(Kd,T) Energie distribuee par les groupes diesel aux consommateurs
- Ys_s(T) Potentiel energetique non consomme dans les batteries
- Yssj_1 Potentiel energetique restant dans les batteries de la journee precedente
- Yddj_1(Kd) Potentiel energetique restant dans les reservoir diesel de la journee precedente
- Yd_d(Kd,T) Potentiel energetique non consomme dans les reservoirs des groupes diesel
- Xd(Kd,T) etat du groupe diesel
- COUT Cout total de production

POSITIVE VARIABLES Y_{pv_c} , Y_{pv_s} , Y_{pv_pf2} , Y_{s_c} , Y_{d_c} , Y_{s_s} , Y_{d_d} ,
 Y_{ssj_1} , Y_{ddj_1} ;
BINARY VARIABLE X_d ;
FREE VARIABLE $cout$

EQUATIONS

CONPV(T)	Conservations de l'energie dans les generateurs PV
CONSE(T)	Conservation de l'energie dans les batterie
CONSLIM	Conservation de l'energie dans les batteries a la limite
CONDE(Kd,T)	Conservation de l'energie dans les groupes diesel
CONDLIM(Kd)	Conservation de l'energie dans les groupes diesel au debut
SATDEM(T)	Satisfaction de la demande
MAX_PV(T)	limite maximale de la production PV
MAX_D(Kd,T)	Limite maximale de la production des groupes diesel
MIN_D(Kd,T)	Limite minimale de la production des groupes diesel
MAXLIM_CS	charge maximale des batteries d'accumulateurs au debut
MAX_CS(T)	charge maximale des batteries d'accumulateurs
DOD(T)	Dept of Discharge
simplif	L'hypothese simplificatrice batteries
LAD(Kd)	Limitation des arrêts-demarrages des groupes diesel
DEFC	Definition du cout;
CONPV(T).. AES(T)	$COFF(T)*Y_{pv_c}(T)+COFF(T)*Y_{pv_s}(T)+COFF(T)*Y_{pv_pf2}(T)-$ $=E=$
CONSE(T) $\$(ord(T) ne 1)..$	$COFF(T)*Y_{pv_s}(T)+Y_{s_s}(T-1)-Y_{s_c}(T)-Y_{s_s}(T) =E=$ $0;$
CONSLIM..	$COFF("1")* Y_{pv_s}("1")+Y_{ssj_1} =E= Y_{s_c}("1")+Y_{s_s}("1");$
CONDE(Kd,T) $\$(ord(T) ne 1)..$	$Y_{d_d}(Kd,T-1)+AEF(T) - Y_{d_c}(Kd,T)-Y_{d_d}(Kd,T)$ $=E= 0;$

```

CONDLIM(Kd).. Yddj_1(Kd) =E= Yd_c(Kd, "1")+Yd_d(Kd, "1");

SATDEM(T).. COFF(T)*Ypv_c(T)+Ys_c(T)+SUM(Kd, Yd_c(Kd,T)) =E=
DEM(T);

MAX_PV(T).. COFF(T)*Ypv_c(T)+COFF(T)*Ypv_pf2(T)+COFF(T)*Ypv_s(T)
=L= DATA("PV", "PUI-MAX");

MAX_D(Kd,T).. Yd_c(Kd,T)-Xd(Kd,T)*DATA("Diesel", "PUI-MAX") =L= 0;

MIN_D(Kd,T).. Yd_c(Kd,T)-Xd(Kd,T)*DATA("Diesel", "PUI-MIN") =G= 0;

MAX_CS(T)$ (ord(T) ne 1).. COFF(T)*Ypv_s(T)+Ys_s(T--1) =L=
DATA("Batterie", "PUI-MAX");

MAXLIM_CS.. COFF("1")*Ypv_s("1")+Yssj_1 =L= DATA("Batterie", "PUI-
MAX");

DOD(T).. Ys_s(T) =G= DATA("Batterie", "PUI-MIN");

LAD(Kd).. SUM(T$(ord(T) ne 1), ABS(Xd(Kd,T--1)-
Xd(Kd,T)))+ABS(Xd(Kd,"24")-Xd(Kd,"1"))) =L= 3;

simplifs.. Yssj_1-Ys_s("24") =E= 0;

DEFC..
COUT=E=SUM((T,Kd),data("PV","C")*Ypv_c(T)+data("batterie","c")*Ys_c(T)+data
("diesel","c")*Yd_c(Kd,T)+500*Xd(Kd,T));

MODEL B.E.H / ALL /;

option RMINLP =MINOS5;

Option Iterlim = 100000;

SOLVE B.E.H USING RMINLP MINIMIZING cout;

DISPLAY Ypv_c.L;
DISPLAY Ypv_s.L;
DISPLAY Ys_c.L;
DISPLAY Yd_c.L;

```

Remarque: Ce modèle est compilé par GAMS, à la manière d'un programme écrit en langage de programmation classique (en vérité très proche du FORTRAN). GAMS génère alors un ensemble d'informations souvent fort utiles, surtout lors du débogage. Le listing complet des résultats du modèle est donné en annexe 2.

IV-2- Analyse de l'input:

Dans ce qui suit, nous rapportons les résultats numériques après la validation du modèle sur le cas qui a été à l'origine du présent travail, en l'occurrence Bordj-El-Houas (B.E.H). Pour cela, il est nécessaire de disposer des données suivantes:

- La courbe de charge
- La courbe d'ensoleillement
- Le plan d'alimentation en fuel
- La structure des coûts
- Les capacités installées pour chaque centrale (dimensionnement des centrales).

Nous allons présenter dans le détail comment chacune de ces données a été introduite.

IV-2-1- Courbe de charge:

Nous savons déjà que Bordj-El-Houas est alimenté en énergie électrique par une micro centrale diesel (3 x 70 kw). En raison de son isolement et sa difficulté d'accès, l'alimentation des usagers se fait entre 8h -12h et 17h-22h. La discontinuité de l'alimentation qualifie l'allure de la courbe de charge de non significative.

Vue la proximité de Djanet, la courbe de charge utilisée pour valider notre modèle aura:

- la forme des enveloppes saisonnières de Djanet faites par le service de Recherche et Développement (R.D) de SONELGAZ en 1991
- la puissance maximale prévisible de B.E.H conforme aux prévisions du point diesel.

Les courbes de charges de Djanet ont été classées en 3 périodes :

- 26/12/90 au 25/02/91
- 26/02/91 au 01/10/91
- 01/10/91 au 31/12/91

(voir figure IV.1)

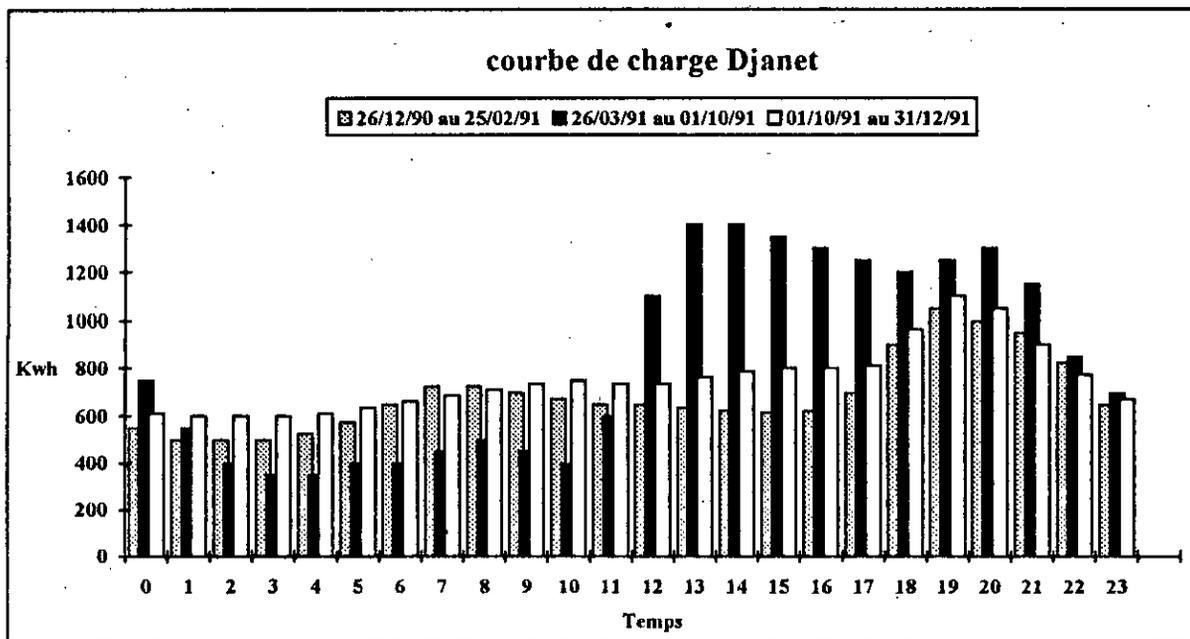


Figure IV.1

La puissance maximale prévisible de B.E.H conforme aux prévisions du point de vue diesel est de 140 kw.

De ce fait, la courbe de charge de référence aura l'allure représentée à la figure IV.2

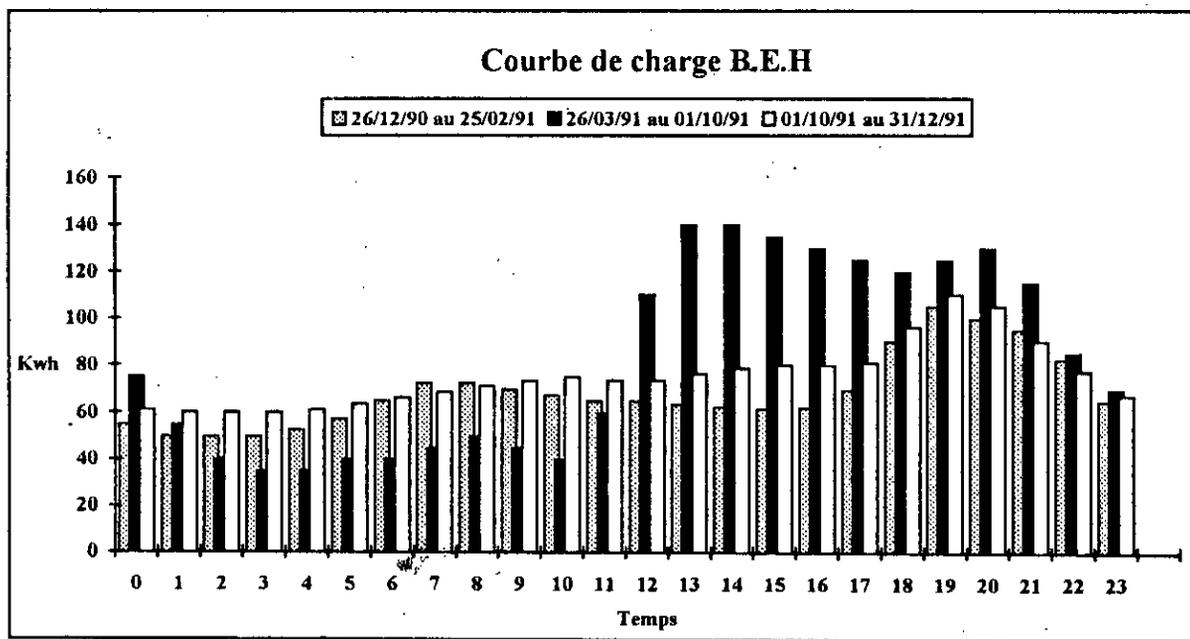


Figure IV.2

IV-2-2- Données météorologiques:

Ces données sont recueillies des abaques de [CAP,85]. Ces tableaux ont été obtenus à partir du programme "chams 01" réalisé par l'auteur Michel CAPEDE ROU de l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU). Ils donnent la puissance d'un rayonnement choisi sur un plan récepteur quelconque, pour une date et un lieu quelconques. Ils sont relatifs à 37 sites Algériens bien répartis sur tout le territoire, numérotés de 1 à 37. Parmi ces sites, figure le site n° 36, celui de Djanet. L'auteur indique que si un site ne figure pas parmi les 37 présentés, on pourra à l'aide des cartes de l'Atlas Solaire de l'Algérie (ASA), choisir un site proche ou semblable ou procéder par interpolation.

Donc, pour notre cas, et vue la proximité de Djanet, nous avons choisi les données d'ensoleillement de ce dernier. Pour chaque site, les tableaux sont donnés sur sept plans récepteurs; Horizontal, Vertical Sud, Vertical Sud-Ouest, Vertical Ouest, Vertical Nord-Ouest, Vertical Nord et sur un plan Sud avec inclinaison variable avec la latitude.

Nous avons opté pour la dernière variante pour maximiser l'apport énergétique en soleil par tranche horaire, par jour ou durant toute l'année en orientant les panneaux aux angles optimums à chaque période.

Pour être compatibles avec les courbes de charges, nous avons regroupé ces données météorologiques selon les mêmes classes que ces dernières. Ceci est représenté dans la figure IV.3.

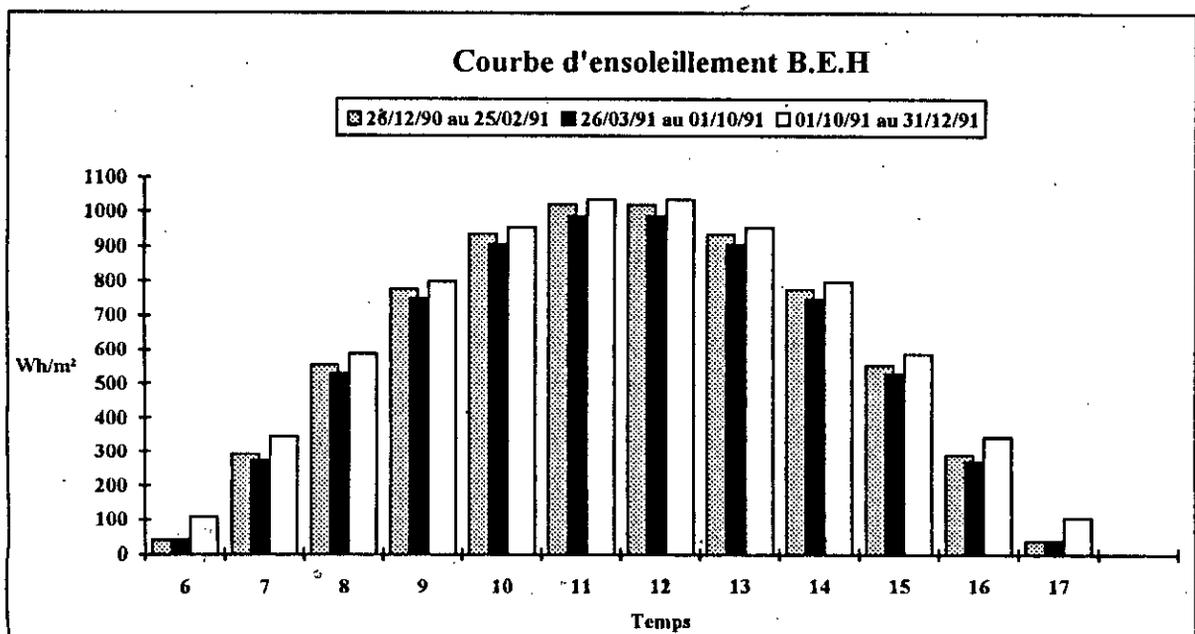


Figure IV.3

IV-2-3- Le plan d'alimentation en fuel:

Selon les renseignements fournis par R&D de SONELGAZ, B.E.H est alimenté en fuel chaque semestre, le fuel est stocké dans des réservoirs. Bien que la quantité de fuel soit insuffisante pour permettre au groupe diesel de satisfaire la charge électrique à eux seuls, nous pouvons considérer qu'à court terme et avec la connexion des centrales pv et des batteries d'accumulation, le fuel sera disponible en abondance. Cela voudrait dire que la plan d'alimentation journalier en fuel permet au groupe diesel de générer la quantité d'énergie électrique demandée, en considérant que ses réservoirs du groupe diesel sont maintenus pleins à chaque instant.

IV-2-4- La structure des coûts:

Pour valider notre modèle, nous considérons que les coûts de production sont tous linéaires. Nous pénaliserons le coût de production des groupes diesel sur les autres coûts car celui-ci intègre le coût de transport qui est très élevé.

- Le coût de production pv est le plus faible puisque une fois le coût des investissements amorti, l'énergie sera presque gratuite.
- Le coût de production des batteries d'accumulation viendra juste après celui de pv car il englobe le coût de stockage qui est au moins égal au coût de production pv.
- Le coût de production des groupes diesel viendra en dernier et sera constitué d'un coût fixe de démarrage et d'un coût de production variable.

IV-2-5- Le dimensionnement du système:

Le dimensionnement du système PV est établi sur la base du bilan de :

- L'énergie solaire incidente sur les modules
- L'énergie électrique convertie par le système
- Les absorptions attachées à la charge et au rendement des différents composants de l'installation.

Un tel bilan peut être interprété sur une base annuelle, mensuelle, journalière ou horaire selon le niveau de précision souhaité en accordant une importance aux coûts d'acquisition et à la qualité et la quantité des données disponibles.

Pour le dimensionnement des installations pv, les étapes suivantes sont nécessaires:

- La détermination de la charge électrique
- Le choix de l'orientation des panneaux solaires
- Le calcul de la radiation solaire disponible.

Toutes ces étapes ont été traitées précédemment. Pour le dimensionnement de l'installation nous procédons comme suit:

a- Les générateurs pv:

Le dimensionnement des générateurs pv est effectué en supposant que l'énergie journalière ou mensuelle produite par ces derniers E_{pv} [wh/m²] doit être supérieure ou égale à l'énergie journalière moyenne requise de la charge électrique E_c [wh/jour]

$$E_{pv} \geq E_c$$

où $E_{pv} = \eta_0 \cdot S_{pv} \cdot H\theta$ tel que:

η_0 : le rendement de conversion de l'installation électrique. C'est le rapport entre l'énergie fournie par l'installation électrique à la charge et l'énergie solaire incidente sur la superficie des modules (Il est égal au rendement des convertisseurs AC/DC (0.6 à 0.7)).

η_{mod} : rendement de conversion des modules pv. Il est égal au rapport entre l'énergie générée par le module et l'énergie solaire incidente sur la superficie du module.

S_{pv} : la superficie totale des modules [m²].

$H\theta$: l'énergie quotidienne reçue par unité de surface sur un plan sud d'inclinaison θ [Kwh/m²/Jour].

Comme dans notre système à trois moyens de production, le pv est réservé pour couvrir la charge diurne, les batteries pour la charge nocturne et le diesel comme générateur de secours, nous pouvons admettre que :

$$E_c = E_{cd} + E_{cn} / \eta_{bat} \quad \text{tel que:}$$

E_{cd} : charge diurne journalière moyenne

E_{cn} : charge nocturne journalière moyenne

η_{bat} : rendement de charge et décharge de la batterie.

- Détermination de la surface minimale des panneaux solaires:

Pour que la surface soit minimale, il faudrait que:

$$E_{pv} = E_c \quad \text{d'où } S_{pv_{min}} = (E_{cd} + (E_{cn} / \eta_{bat})) / \eta_0 \times H\theta$$

- Détermination du potentiel de pointe des générateurs pv:

Le potentiel de pointe (PV_{max} [Wc]) est calculé comme suit:

$$PV_{max} = S_{pv_{min}} \cdot 1000$$

b- La capacité des batteries d'accumulation (C_{bat}):

Elle est calculée de manière à garantir un certain nombre de jours d'autonomie N_{ja} (période pendant laquelle les batteries fournissent de l'énergie électrique à la charge sans aucun apport énergétique des générateurs pv, en cas de maintenance, de panne de ces derniers ou en cas de faible irradiation solaire).

Par conséquent, la capacité des batteries est obtenue de l'expression suivante:

$$C_{bat} = (E_{C_{max}} \cdot N_{ja}) / \eta_{bat} \cdot DOD \quad \text{tel que:}$$

$E_{C_{max}}$: valeur maximale de l'énergie journalière moyenne requise à la charge.

DOD (Dept Of Discharge): la profondeur maximale de décharge de la batterie d'accumulation afin qu'elle ne subisse aucun endommagement (en général égale à 80%).

En considérant cette manière de calculer, le dimensionnement des batteries serait très important donc difficile à contrôler et très coûteux, d'un côté, et le recours au diesel sera presque absent d'un autre. Donc, pour remédier à cet inconvénient, nous pouvons songer à une autre approche plus simple mais un peu grossière qui serait la suivante:

Puisque nous avons réservé le diesel pour le secours, il s'ensuit que les batteries doivent essayer d'assurer la charge nocturne. Donc, le calcul pourra se faire comme suit:

$$C_{bat} = E_{cn} / (\eta_{bat} \times DOD).$$

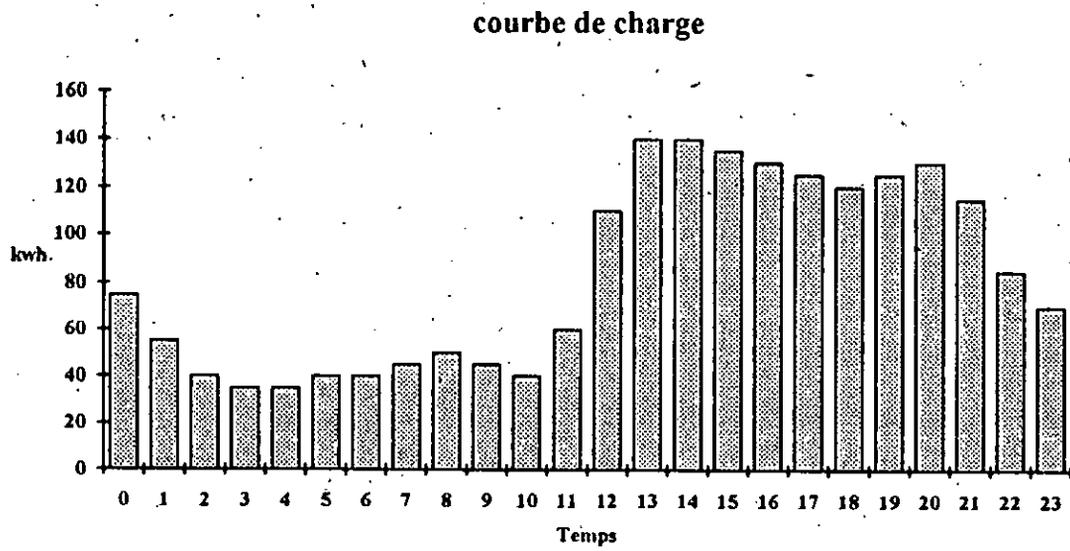
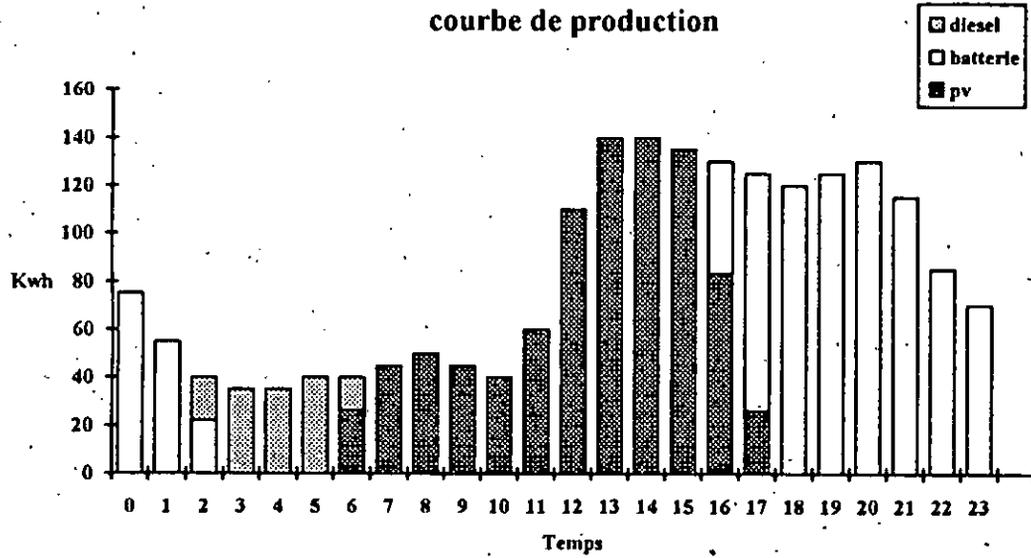
Nous tenons à préciser que les données en ce qui concerne les apports énergétiques en soleil et en fuel sont exprimées -dans le cas de notre problème- en ce que les générateurs pv et groupes diesel respectivement doivent générer en énergie électrique. Les calculs sont effectués à la base de cette hypothèse.

Pour analyser le comportement de notre modèle, nous allons tester les trois périodes pour lesquelles nous avons les données de charge et d'ensoleillement. Pour cela, nous considérons trois scénarios:

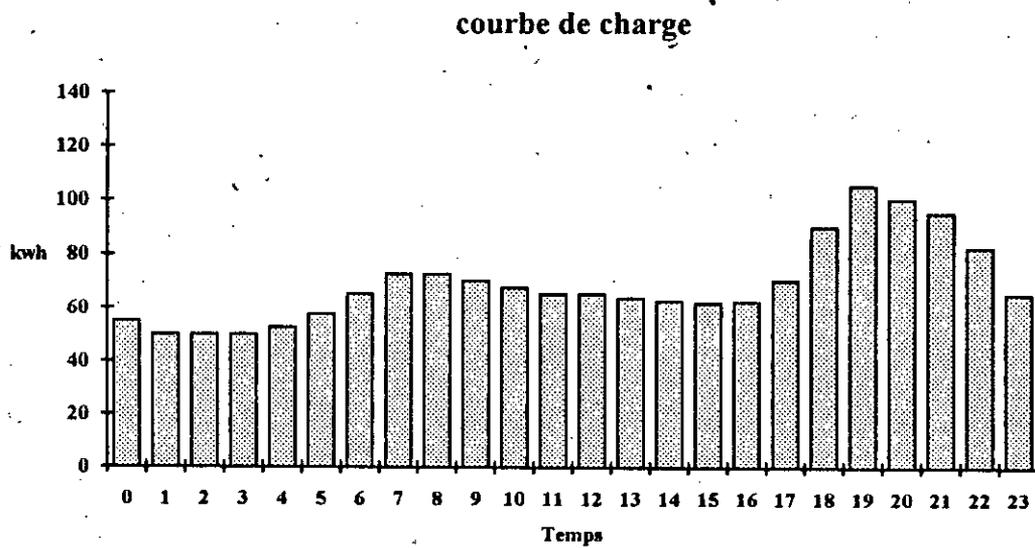
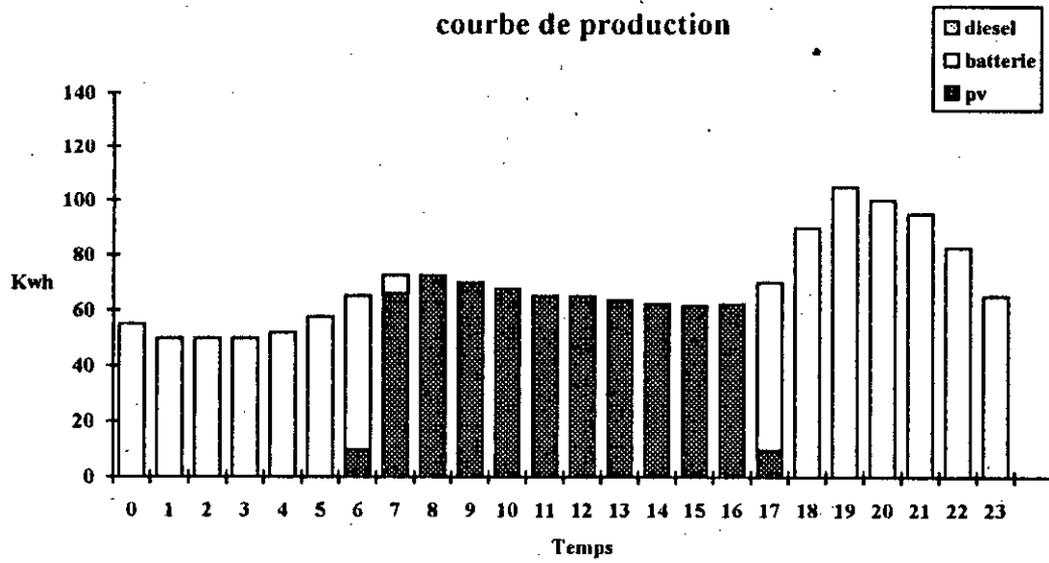
- le premier scénario du 26/02/91 au 01/10/91
- le deuxième scénario du 26/12/90 au 25/02/91
- le troisième scénario du 01/10/91 au 31/12/91

IV-3- Analyse de l'output:**IV-3-1- Interprétation des résultats:**

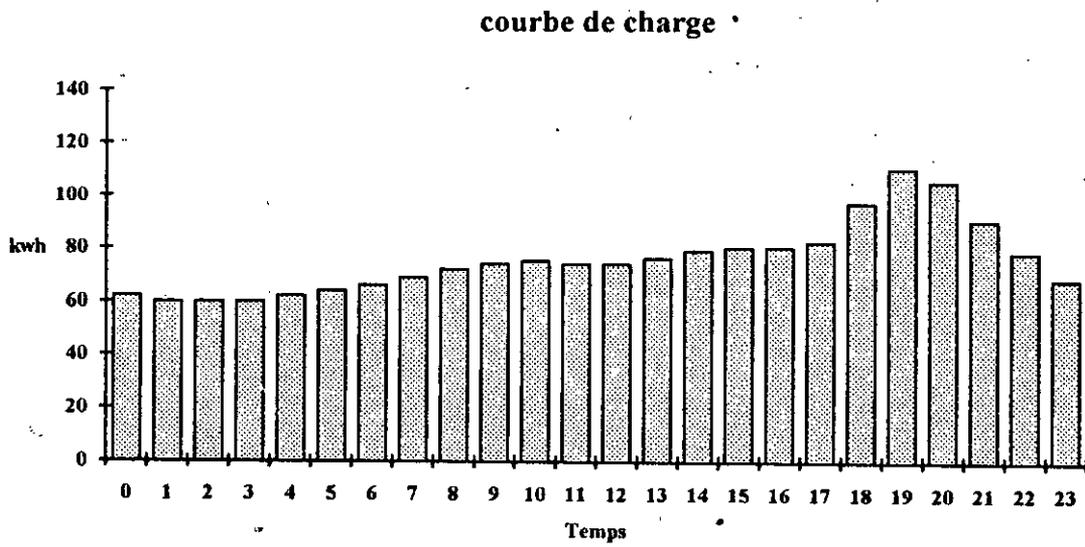
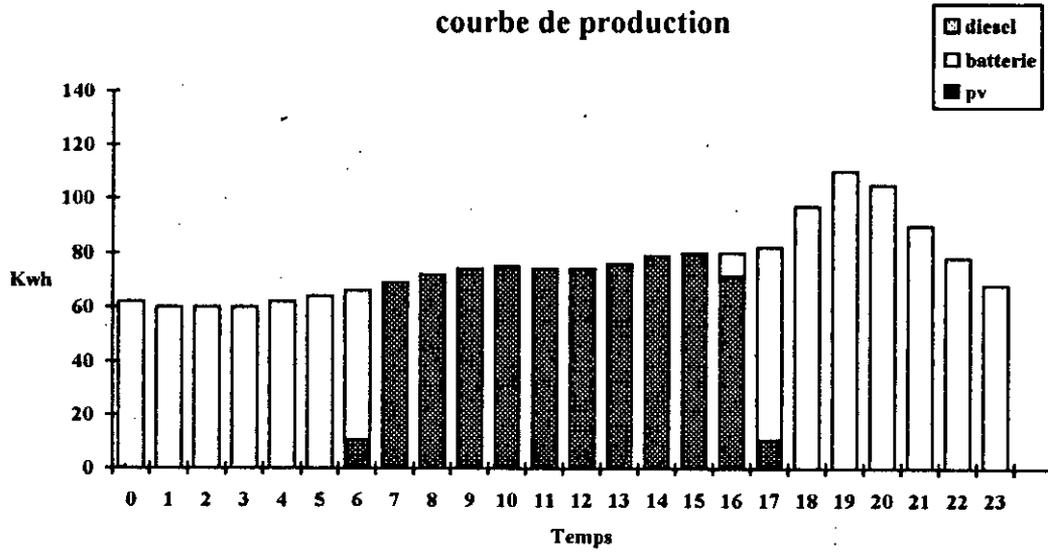
Les résultats sont représentés sous forme d'une comparaison entre la courbe de charge qui est une donnée exogène et la courbe de production fournie par la solution optimale du modèle. Vu la discrétisation du temps, les courbes sont présentées en histogrammes cumulés, donnant le plan de production journalier des trois moyens de production. La forme cumulée donnée aux histogrammes vient pour vérifier d'une manière très claire le placement sur la courbe de charge journalière qui attend que la courbe de production l'épouse à chaque instant.



Scénario 1: 26/02/91 au 01/10/91



Scénario 2: 26/12/90 au 25/02/91



Scénario 3: 01/10/91 au 31/12/91

IV-3-2- Analyse sensitive:

En plus des trois scénarios testés et qui montrent, l'aspect journalier de la solution optimale, en d'autres termes sa dépendance de l'allure de la courbe de charge et de la courbe d'ensoleillement, nous nous proposons de tester avec le même scénario (soit le scénario 1 par exemple) d'autres variantes des points de vue: surface des panneaux solaires, capacité maximale de stockage pour les batteries d'accumulation et du solver utilisé lors de la validation. Les différentes remarques sont rapportées et résumées dans les tableaux qui suivent:

surface des panneaux (m ²)	100	200	250	300	0	400	500
niveau de pénétration solaire (%)	38.69	77.38	93.51	94.94	0	97.16	100
niveau de pénétration diesel (%)	61.31	22.62	6.49	5.06	100	2.84	0

Tableau IV.1 Variantes du scénario 1 avec différentes surfaces des panneaux solaires

taille de la batterie (Kwh)	0	100	500	1000	1250	2000
niveau de pénétration solaire (%)	45.37	49.40	65.52	85.67	92.86	92.86
niveau de pénétration diesel (%)	54.63	50.60	34.48	14.33	7.14	7.14

Tableau IV.2 variantes du scénario 1 avec différentes tailles de batterie

en ce qui concerne le solver à utiliser, le modèle écrit avec GAMS est un RMINLP et trois solvers sont disponibles pour la résolution des problèmes de telle nature; MINOS5, CONOPT et MPSWRITE. Les deux derniers s'arrêtent au mode de démonstration (DEMO MODE) et sans donner de solution i.e: avec des points de départ spécifiés tous nuls par défaut; tandis que MINOS5 arrive en 120 itérations à la solution optimale. Nous avons alors, réexécuté le modèle avec CONOPT et MPSWRITE, mais cette fois-ci en partant de la solution optimale donnée par MINOS5. Les deux solvers arrivent bien sur à la solution optimale dès la première itération. Néanmoins, nous notons les différences de performance suivantes:

	temps de génération (s CPU)	temps d'exécution (s CPU)	espace de travail (M.Byte)
MINOS5	1.65	1.98	0.12
CONOPT	1.76	1.87	0.23
MPSWRITE	1.77	0.82	0.04

Tableau IV.3 variantes du scénario 1 avec différents solvers

IV-3-3- Intérêt des résultats:

Ces résultats nous permettent aussi d'émettre quelques remarques concernant le comportement de notre modèle et son intérêt:

- Cette solution provient du fait d'avoir considéré que les apports des centrales pv et de stockage sont pratiquement gratuits alors que l'apport en fuel est cher. En intégrant les coûts d'installations pour le pv et les batteries qui sont très onéreux par rapport aux groupes diesel, les résultats favoriseront peut être une couverture importante de la charge par les groupes diesel.

- Le dimensionnement des centrales: de production (pv) et de stockage (batteries) influe d'une manière très importante sur la solution de notre problème. Notre modèle peut représenter un simulateur d'une manière plus ou moins grossière du système qui nous permet de tester plusieurs variantes en terme de son dimensionnement .

- Les résultats obtenus montrent que les trois moyens de production sont combinés pour assurer la charge en une seule période et en toutes les périodes. Ceci révèle un aspect combinatoire non seulement vertical (en terme de production) mais aussi horizontal (en terme de temps) du système du fait

- Les valeurs marginales associées aux contraintes de la satisfaction de la demande nous donnent un indice sur la tarification des prix du Kwh produit par l'ensemble des trois moyens de production.

CONCLUSION

La problématique posée dans la présente étude est une extension naturelle des travaux existants sur le dispatching économique des systèmes de production d'énergie électrique. Elle tient compte de l'arrivée de nouveaux moyens de production avec de nouvelles caractéristiques technologiques et économiques, telles que les systèmes photovoltaïques hybrides. Nous avons retenu une formulation mathématique du problème qui respecte dans sa forme générale ce qui a déjà été fait pour les autres systèmes. Par contre, nous avons introduit un nouvel aspect pour l'élaboration de tels modèles qui consiste en la représentation graphique du système (figure III.1). Cette représentation nous permet:

- d'identifier toutes les variables et les contraintes et vérifier leur compatibilité avec le bon fonctionnement du système et cela, sans une connaissance approfondie de ce dernier
- de donner une grande flexibilité au modèle en lui permettant de s'adapter à d'autres systèmes avec des caractéristiques technologiques et économiques différentes et pouvant être représentés par un réseau similaire. La technique peut donc déboucher sur de nombreuses applications; la limiter à notre problème uniquement serait regrettable
- de laisser des portes ouvertes à la théorie des graphes pour la conception d'algorithmes pouvant résoudre de tels problèmes.

Nous pensons que les résultats obtenus à partir de notre modèle ont atteint les objectifs que nous nous sommes fixés au début de l'étude à savoir permettre une exploitation journalière importante de l'énergie solaire et cela au détriment du recours au fuel - ressource rare, non renouvelable et très coûteuse-. Cette exploitation se faisant en respectant les contraintes du système et en gardant comme critère d'optimalité la minimisation des coûts de production.

Néanmoins et vu sa flexibilité, les extensions suivantes pourraient être intégrées dans notre travail et cela sans effectuer aucun changement dans le corps de notre modèle :

- Tenir compte de l'aspect stochastique et continu du problème
- Elaborer l'expression de la fonction des coûts de manière précise et rigoureuse
- Rechercher un meilleur dimensionnement du système qui tient compte des coûts d'acquisitions, d'installation et d'entretien et des prévisions de charge à l'égard de l'accroissement de la consommation de l'énergie électrique dans les années à venir
- Prendre en considération les pertes dans le système dues à l'autoconsommation des équipements et leur rendement de production

[ABA, 78] : J. Abadie, " *The GRG Method for Nonlinear Programming*", In Design and Implementation of Optimization Software, H. Greenberg, pp 335-362. Sifhoff, The Netherlands, 1978.

[BRO, 87] : A. Brooke, D. Kendrick et A. Meeraus, " *GAMS, a user's guide*", The Scientific Press, Stanford University, 1987.

[CAP, 85] : M. Capderou, " *Atlas Solaire de l'Algérie* ", Tome 2 : Aspects énergétiques, EPAU, OPU, 1985

[EDW,89]: Edward Wassil, Bruce Golden et Li Liu, " *State-of-the-Art in Nonlinear Optimization Software for the Microcomputer*", Computer Opns Res. Vol 16, No. 6, pp.497-512, 1989.

[EL-A, 83] : A.H.El-Abiad, " *Power Systems Analysis and Planning*", Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

[ENE,92] : ENEL, " *L'Energia Fotovoltaica*", I Quaderni dell'Energia 21, Giugno 1992

[GOL, 83] : D. Goldfarb and A. Indani, " *A Numerically Stable Dual Method for Solving Strictly Convex Quadratic Programs*", Mathemat. Programm. 27, 1-33, 1983.

[HAK, 93] : Z. Hakmi et S. Guezane, " *Contribution de l'Energie Solaire à l'Electrification Rurale* ", Recueil de Communication dans les Congrès, Colloques, Conférences et Séminaires, SONELGAZ, 3eme trimestre, 1993.

[HEB, 92] : D.Hebert, "*Investissement et Production de l'Energie Hydroélectriques avec Stockage Massif de l'Energie sous forme d'Hydrogène*", Centre de Recherche sur les Transports, Publication # 862, Montréal, 1992.

[HOC, 81]: W.Hock et K.Schittkowski, "*Test Exampels for Nonlinear Programming code*", Lecture Note in Economics and Mathematical Systems. N°. 187.Spriger.Verlag, New York, 1981.

[KHA, 88] : M.A.Khallat et S.Rahman, "*A Model for Credit Evaluation of Grid-Connected PV Systems with Fuel Cell Support*", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.3, No.3, August 1988.

[MUR, 82] : B.Murtagh et M.Saunders, "*A Projected Lagrangien Algorithm and its Implemrntation for Sparse Nonlinear Constrants*", Mathemat.Programm.Study.16, pp 84-117, 1982.

[PEL, 71] : R.Pélissier, "*Les Réseaux d'Energie Electrique*", Tome II-b, DUNOD, 1971.

[ROD, 93] : M.Rodot, "*Production de l'Electricité par les Photopiles*", Revue de l'Energie, n° 449, mai 1993.

[SAI, 79] : R.Saigal, "*The Fixed Point Approach to Nonlinear Programming*", Mathemat.Programm.Study. 10, pp 142-157, 1979.

[SCH, 84] : R.Schlafly, "*Variable Metric Methods on Microcomputers*", Presented at SIAM Confernce of Numerical Optimization, Boulder, Colo, 1984.

[TIS, 90] : M.Tischer, "*La Bible Turbo Pascal ; Version 5.0 et 5.5*", Edition Micro Application, Paris 1990.

ANNEXES

Les résultats opérationnels selon [KHA,88]:

Le modèle opérationnel est utilisé afin d'étudier le nombre de scénario simulés pour chercher les effets des différents niveaux de pénétration du pv, les exigences en fuel et le coût économique.

Deux cas sont présents:

- Le premier cas, les données de charge et de pv pour le jour de mauvais cas sont étudiés. Le seuil de charge de ce jour était de 4685Mw. Le coût de production, le coût de fonctionnement économique et les exigences en fuel pour différents niveaux de pénétrations du pv sont regroupés dans le tableau II.2.

niveau de pénétration en pv		coût opérationnel	coût économique	fuel requis
Mw	%	\$	\$	Mw
0	0.00	1 146 291	00 000	00
250	5.33	1 106 964	39 327	00
500	10.67	1 069 769	76 522	00
750	16.01	1 070 066	76 225	00
1000	21.34	1 079 567	66 724	00
1250	26.68	1 080 000	66 291	00

Tableau I Résultats du jour correspondant au mauvais cas

Comme le pv a une production moyenne et des petites fluctuations qui sont traitées par des unités conventionnelles, les exigences en fuel sont regroupées dans des classes. En d'autres termes, le système de production a assez de turbines de combustion qui ont la capacité de traiter la pente des prix de la charge modifiée.

Il peut être observé dans ce tableau qu'il y a des coûts de fonctionnement économiques dus à l'intersection du système pv à la charge (sans ajouter le fuel). Cependant, les économies ont diminué jusqu'à 500MW (10.67%) de pénétration.

-Dans le deuxième cas, les données de PV et de charge pour le jour intermittent sont utilisées. Le seuil de charge ce jour était de 5952MW. Le tableau II.3 résume les coûts opérationnels, les coûts économiques et les exigences en fuel pour chaque niveau de pénétration du pv.

niveau de pénétration en pv		coût opérationnel	coût économique	fuel requis	capacité crédit
Mw	%	\$	\$	Mw	Mw
0	0.00	1 541447	00 000	00	00
250	4.20	1 479819	61 628	38	52
500	8.40	1 425864	115 583	72	102
750	12.60	1 382382	159 065	48	134
1000	16.80	1 343588	197 859	88	182
1250	21.00	1 360479	180 968	188	152

Tableau II Résultats du jour intermittent

GAMS 2.25.064 386/486 DOS
DISPATCHING

06/13/94 01:40:00 PAGE 1

4 * Placement Optimal des Moyens de Production sur la Courbe de Charge

Journaliere

5 * REFERENCE: M KHELFAOUI et K SLIMANI: Placement Optimal des Moyens de
Production sur la Courbe de Charge Journaliere.

6 * These de FIN d'Etude, Departement Genie Industriel

7 * ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, El-Harrach, Alger, ALGERIE,
JUN 1994.

8 Option Reslim = 1000000000;

9

10 Option LimRow = 0, LimCol = 0;

11

12

13 SCALAR SURFPA1 SURFACE TOTALE DES PANNEAUX (m2)/240/

14

15

16

17

18 SETS G Generateurs / PV, Batterie, Diesel /

19 Kd Groupe Diesel / 1 /

20 T PALIERS DE CHARGE /0h-1h, 1h-2h, 2h-3h, 3h-4h, 4h-5h, 5h-6h,
6h-7h, 7h-8h, 8h-9h, 9h-10h, 10h-11h, 11h-12h,
21 12h-13h, 13h-14h, 14h-15h, 15h-16h, 16h-17h,
17h-18h, 18h-19h, 19h-20h, 20h-21h, 21h-22h
22 , 22h-23h, 23h-0h /;

23

24

25 * Apport Energetique en Soleil(Wh/m2) est note AESU1(T)

26 PARAMETERS DEM1(T) Demande(Wh) /0h-1h 75, 1h-2h 55, 2h-3h 40, 3h-4h 35,
4h-5h 35, 5h-6h 40, 6h-7h 40, 7h-8h 45

27 8h-9h 50, 9h-10h 45, 10h-11h 40, 11h-12h 60,

12h-13h 110, 13h-14h 140, 14h-15h 140,

28 15h-16h 135, 16h-17h 130, 17h-18h 125,

18h-19h 120, 19h-20h 125, 20h-21h 130, 21h-22h 115,

29 22h-23h 85, 23h-0h 70/

30 AESU1(T) / 6h-7h 109, 7h-8h 347, 8h-9h 590, 9h-10h 800

31 , 10h-11h 956, 11h-12h 1038, 12h-13h 1038, 13h-14h 956

32 , 14h-15h 800, 15h-16h 590, 16h-17h 347, 17h-18h 109 /

33

34 AEF(T) Apport Energetique en Fuel(KWh) / 10h-11h 70,

11h-12h 72, 12h-13h 160, 13h-14h 90,

35 14h-15h 70,

15h-16h 45, 18h-19h 50, 19h-20h 90, 20h-21h 140

36 /;

37

38

39

40	TABLE	DATA(G,*) Donnees sur les Generateurs		
41		PUI-MIN	PUI-MAX	C
42	*	(KW)	(KW)	(KDA)
43	PV	0	250	20
44	Batterie	250	1200	22
45	Diesel	40	160	100
46	PARAMETERS	surfpa		

GAMS 2.25.064 386/486 DOS
DISPATCHING

06/13/94 01:40:00 PAGE 2

```

47
48     AES(T)      apport energetique en soleil (KWh)
49
50     COFF(T)     Temoin d'un apport solaire
51     DEM(T)     la demande d'energie electrique;
52     surfpa = surfpa1;
53
54     AES(T) = AESU1(T)*SURFPA/1000;
55     DEM(T) = DEM1(T);
56     COFF(T) = 1$(AESU1(T) GT 0);
57
58
59
60     DISPLAY AES, COFF,DEM
61
62
63
64     VARIABLES  Ypv_c(T)      Energie distribuee par le generateur PV aux
65                                     consommateurs
66     Ypv_s(T)   Energie distribuee par le generateur PV aux
67                                     batteries
68     Ypv_pf2(T) Energie non produite par le generateur PV
69     Ys_c(T)    Energie distribuee par les batteries aux
70                                     consommateurs
71     Yd_c(Kd,T) Energie distribuee par les groupes diesel
72                                     aux consommateurs
73     Ys_s(T)    Potentiel energetique non consomme dans les
74                                     batteries
75     Yssj_1     Potentiel energetique restant dans les
76                                     batteries de la journee precedante
77     Yddj_1(Kd) Potentiel energetique restant dans les
78                                     reservoir diesel de la journee precedante
79     Yd_d(Kd,T) Potentiel energetique non consomme dans les
80                                     reservoirs des groupes diesel
81     Xd(Kd,T)   etat du groupe diesel
82     COUT       Cout total de production

```

76
 77 **POSITIVE VARIABLES** Y_{pv_c} , Y_{pv_s} , Y_{pv_pf2} , Y_{s_c} , Y_{d_c} , Y_{s_s} ,
 Y_{d_d} , Y_{ssj_1} , Y_{ddj_1} ;
 78 **BINARY VARIABLE** X_d ;
 79 **FREE VARIABLE** $cout$
 80
 81 **EQUATIONS CONPV(T)** Conservations de l'energie dans les
 generateurs PV
 82
 83 **CONS(T)** Conservation de l'energie dans les
 batterie
 84
 85 **CONSLIM** Conservation de l'energie dans les
 batteries a la limite
 86
 87 **COND(Kd,T)** Conservation de l'energie dans les groupes

GAMS 2.25.064 386/486 DOS
 DISPATCHING

06/13/94 01:40:00 PAGE 3

diesel

88
 89 **CONDLIM(Kd)** Conservation de l'energie dans les groupes
 diesel au debut
 90
 91 **SATDEM(T)** Satisfaction de la demande
 92
 93 **MAX_PV(T)** limite maximale de la production PV
 94
 95 **MAX_D(Kd,T)** Limite maximale de la production des
 groupes diesel
 96
 97 **MIN_D(Kd,T)** Limite minimale de la production des
 groupes diesel
 98
 99 **MAXLIM_CS** charge maximale des batteries
 d'accumulateurs au debut
 100
 101 **MAX_CS(T)** charge maximale des batteries
 d'accumulateurs
 102
 103 **DOD(T)** Dept of Discharge
 104
 105 **simplifs** L'hypothese simplificatrice batteries
 106
 107 **LAD(Kd)** Limitation des arrêts-demarrages des
 groupes diesel
 108

109 DEFC Definition du cout;
 110
 111 CONPV(T).. $\text{COFF}(T) * Y_{pv_c}(T) + \text{COFF}(T) * Y_{pv_s}(T) + \text{COFF}(T) * Y_{pv_pf2}(T) - \text{AES}(T) = E = 0;$
 112
 113 $\text{CONS}(T) \$(\text{ord}(T) \text{ ne } 1).. \text{COFF}(T) * Y_{pv_s}(T) + Y_{s_s}(T-1) - Y_{s_c}(T) - Y_{s_s}(T) = E = 0;$
 114
 115 $\text{CONSLIM}.. \text{COFF}("0h-1h") * Y_{pv_s}("0h-1h") + Y_{ssj_1} = E = Y_{s_c}("0h-1h") + Y_{s_s}("0h-1h");$
 116
 117 $\text{COND}(Kd, T) \$(\text{ord}(T) \text{ ne } 1).. Y_{d_d}(Kd, T-1) + \text{AEF}(T) - Y_{d_c}(Kd, T) - Y_{d_d}(Kd, T) = E = 0;$
 118
 119
 120 $\text{CONDLIM}(Kd).. Y_{ddj_1}(Kd) = E = Y_{d_c}(Kd, "0h-1h") + Y_{d_d}(Kd, "0h-1h");$
 121
 122 $\text{SATDEM}(T).. \text{COFF}(T) * Y_{pv_c}(T) + Y_{s_c}(T) + \text{SUM}(Kd, Y_{d_c}(Kd, T)) = E = \text{DEM}(T)$
 123
 124 $\text{MAX_PV}(T).. \text{COFF}(T) * Y_{pv_c}(T) + \text{COFF}(T) * Y_{pv_pf2}(T) + \text{COFF}(T) * Y_{pv_s}(T) = L = \text{DATA}("PV", "PUI-MAX");$
 125
 126 $\text{MAX_D}(Kd, T).. Y_{d_c}(Kd, T) - X_{d}(Kd, T) * \text{DATA}("Diesel", "PUI-MAX") = L = 0;$
 127

 GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 4
 DISPATCHING

 128 $\text{MIN_D}(Kd, T).. Y_{d_c}(Kd, T) - X_{d}(Kd, T) * \text{DATA}("Diesel", "PUI-MIN") = G = 0;$
 129
 130 $\text{MAX_CS}(T) \$(\text{ord}(T) \text{ ne } 1).. \text{COFF}(T) * Y_{pv_s}(T) + Y_{s_s}(T-1) = L = \text{DATA}("Batterie", "PUI-MAX");$
 131
 132 $\text{MAXLIM_CS}.. \text{COFF}("0h-1h") * Y_{pv_s}("0h-1h") + Y_{ssj_1} = L = \text{DATA}("Batterie", "PUI-MAX");$
 133
 134 $\text{DOD}(T).. Y_{s_s}(T) = G = \text{DATA}("Batterie", "PUI-MIN");$
 135
 136 $\text{LAD}(Kd).. \text{SUM}(T \$(\text{ord}(T) \text{ ne } 1), \text{ABS}(X_{d}(Kd, T-1) - X_{d}(Kd, T))) + \text{ABS}(X_{d}(Kd, "23h-0h") - X_{d}(Kd, "0h-1h")) = L = 3;$
 137
 138 $\text{simplifs}.. Y_{ssj_1} - Y_{s_s}("23h-0h") = E = 0;$
 139
 140 $\text{DEFC}.. \text{COUT} = E = \text{SUM}((T, Kd), \text{data}("PV", "C") * Y_{pv_c}(T) + \text{data}("batterie", "c") * Y_{s_c}(T) + \text{data}("diesel", "c") * Y_{d_c}(Kd, T) + 500 * X_{d}(Kd, T));$
 141

```

142 MODEL B.E.H / ALL /;
143
144 option RMINLP =MINOS5;
145
146 Option Iterlim = 100000;
147
148 SOLVE B.E.H USING RMINLP MINIMIZING cout;
149 DISPLAY Ypv_c.L;
150 DISPLAY Ypv_s.L;
151 DISPLAY Ys_c.L;
152 DISPLAY Yd_c.L;
153
154
155
156

```

```

COMPILATION TIME = 0.710 SECONDS VERID MW2-00-064
GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 5
DISPATCHING
Execution

```

---- 60 PARAMETER AES apport energetique en soleil (KWh)

```

6H-7H 26.160, 7H-8H 83.280, 8H-9H 141.600, 9H-10H 192.000
10H-11H 229.440, 11H-12H 249.120, 12H-13H 249.120, 13H-14H 229.440
14H-15H 192.000, 15H-16H 141.600, 16H-17H 83.280, 17H-18H 26.160

```

---- 60 PARAMETER COFF Temoin d'un apport solaire

```

6H-7H 1.000, 7H-8H 1.000, 8H-9H 1.000, 9H-10H 1.000
10H-11H 1.000, 11H-12H 1.000, 12H-13H 1.000, 13H-14H 1.000
14H-15H 1.000, 15H-16H 1.000, 16H-17H 1.000, 17H-18H 1.000

```

---- 60 PARAMETER DEM la demande d'energie electrique

```

0H-1H 75.000, 1H-2H 55.000, 2H-3H 40.000, 3H-4H 35.000
4H-5H 35.000, 5H-6H 40.000, 6H-7H 40.000, 7H-8H 45.000
8H-9H 50.000, 9H-10H 45.000, 10H-11H 40.000, 11H-12H 60.000
12H-13H 110.000, 13H-14H 140.000, 14H-15H 140.000, 15H-16H 135.000
16H-17H 130.000, 17H-18H 125.000, 18H-19H 120.000, 19H-20H 125.000
20H-21H 130.000, 21H-22H 115.000, 22H-23H 85.000, 23H-0H 70.000

```

```

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 6
DISPATCHING
Model Statistics SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

```

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	15	SINGLE EQUATIONS	195
BLOCKS OF VARIABLES	11	SINGLE VARIABLES	171
NON ZERO ELEMENTS	567	NON LINEAR N-Z	24
DERIVATIVE POOL	29	CONSTANT POOL	8
CODE LENGTH	362	DISCRETE VARIABLES	24

GENERATION TIME = 1.710 SECONDS

EXECUTION TIME = 1.980 SECONDS VERID MW2-00-064

GAMS 2.25.064 386/486 DOS . 06/13/94 01:40:00 PAGE 7
DISPATCHING

Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

SOLVE SUMMARY

MODEL B.E.H	OBJECTIVE COUT
TYPE RMINLP	DIRECTION MINIMIZE
SOLVER MINOS5	FROM LINE 148

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 53372.3250

RESOURCE USAGE, LIMIT	8.180	1000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	120	100000
EVALUATION ERRORS	0	0

MINOS 5.3 (Nov 1990) Ver: 225-386-02
=====

B. A. Murtagh, University of New South Wales
and
P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright
Systems Optimization Laboratory, Stanford University.

Work space allocated -- 0.12 Mb

EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND

MAJOR ITNS, LIMIT	6	200
FUNOBJ, FUNCON CALLS	0	75
SUPERBASICS	0	
INTERPRETER USAGE	0.16	
NORM RG / NORM PI	0.000E+00	

---- EQU CONPV Conservations de l'energie dans les generateurs PV

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
6H-7H	26.160	26.160	26.160	-83.125
7H-8H	83.280	83.280	83.280	-81.125
8H-9H	141.600	141.600	141.600	-81.125
9H-10H	192.000	192.000	192.000	-81.125
10H-11H	229.440	229.440	229.440	-81.125
11H-12H	249.120	249.120	249.120	-81.125
12H-13H	249.120	249.120	249.120	-81.125
13H-14H	229.440	229.440	229.440	-81.125
14H-15H	192.000	192.000	192.000	-81.125
15H-16H	141.600	141.600	141.600	-81.125
16H-17H	83.280	83.280	83.280	-83.125
17H-18H	26.160	26.160	26.160	-83.125

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 8
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

---- EQU CONS Conservation de l'energie dans les batterie

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1H-2H				81.125
2H-3H				81.125
3H-4H				81.125
4H-5H				81.125
5H-6H				81.125
6H-7H				81.125
7H-8H				81.125
8H-9H				81.125
9H-10H				81.125
10H-11H				81.125
11H-12H				81.125
12H-13H				81.125
13H-14H				81.125
14H-15H				81.125
15H-16H				81.125
16H-17H				81.125
17H-18H				81.125
18H-19H				81.125
19H-20H				81.125
20H-21H				81.125
21H-22H				81.125
22H-23H				81.125
23H-0H				81.125

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU CONSLIM 81.125

CONSLIM Conservation de l'energie dans les batteries a la limite

---- EQU COND Conservation de l'energie dans les groupes diesel

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1.1H-2H				EPS
1.2H-3H				EPS
1.3H-4H				EPS
1.4H-5H				EPS
1.5H-6H				EPS
1.6H-7H				EPS
1.7H-8H				EPS
1.8H-9H				EPS
1.9H-10H				EPS
1.10H-11H	-70.000	-70.000	-70.000	EPS
1.11H-12H	-72.000	-72.000	-72.000	EPS
1.12H-13H	-160.000	-160.000	-160.000	EPS
1.13H-14H	-90.000	-90.000	-90.000	EPS
1.14H-15H	-70.000	-70.000	-70.000	EPS

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 9

DISPATCHING

Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

EQU COND Conservation de l'energie dans les groupes diesel

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1.15H-16H	-45.000	-45.000	-45.000	EPS
1.16H-17H				EPS
1.17H-18H				EPS
1.18H-19H	-50.000	-50.000	-50.000	EPS
1.19H-20H	-90.000	-90.000	-90.000	EPS
1.20H-21H	-140.000	-140.000	-140.000	EPS
1.21H-22H				EPS
1.22H-23H				EPS
1.23H-0H				EPS

---- EQU CONDLIM Conservation de l'energie dans les groupes diesel au debut

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1

EPS

---- EQU SATDEM Satisfaction de la demande

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
0H-1H	75.000	75.000	75.000	103.125
1H-2H	55.000	55.000	55.000	103.125
2H-3H	40.000	40.000	40.000	103.125
3H-4H	35.000	35.000	35.000	103.125
4H-5H	35.000	35.000	35.000	103.125
5H-6H	40.000	40.000	40.000	103.125
6H-7H	40.000	40.000	40.000	103.125
7H-8H	45.000	45.000	45.000	101.125
8H-9H	50.000	50.000	50.000	101.125
9H-10H	45.000	45.000	45.000	101.125
10H-11H	40.000	40.000	40.000	101.125
11H-12H	60.000	60.000	60.000	101.125
12H-13H	110.000	110.000	110.000	101.125
13H-14H	140.000	140.000	140.000	101.125
14H-15H	140.000	140.000	140.000	101.125
15H-16H	135.000	135.000	135.000	101.125
16H-17H	130.000	130.000	130.000	103.125
17H-18H	125.000	125.000	125.000	103.125
18H-19H	120.000	120.000	120.000	103.125
19H-20H	125.000	125.000	125.000	103.125
20H-21H	130.000	130.000	130.000	103.125
21H-22H	115.000	115.000	115.000	103.125
22H-23H	85.000	85.000	85.000	103.125
23H-0H	70.000	70.000	70.000	103.125

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 10
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

---- EQU MAX_PV limite maximale de la production PV

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
6H-7H	-INF	26.160	250.000	
7H-8H	-INF	83.280	250.000	
8H-9H	-INF	141.600	250.000	
9H-10H	-INF	192.000	250.000	
10H-11H	-INF	229.440	250.000	
11H-12H	-INF	249.120	250.000	
12H-13H	-INF	249.120	250.000	
13H-14H	-INF	229.440	250.000	
14H-15H	-INF	192.000	250.000	

15H-16H	-INF	141.600	250.000
16H-17H	-INF	83.280	250.000
17H-18H	-INF	26.160	250.000

---- EQU MAX_D Limite maximale de la production des groupes diesel

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1.0H-1H	-INF			-3.125
1.1H-2H	-INF			-3.125
1.2H-3H	-INF			-3.125
1.3H-4H	-INF			-3.125
1.4H-5H	-INF			-3.125
1.5H-6H	-INF			-3.125
1.6H-7H	-INF			-3.125
1.7H-8H	-INF			-3.125
1.8H-9H	-INF			-3.125
1.9H-10H	-INF			-3.125
1.10H-11H	-INF			-3.125
1.11H-12H	-INF			-3.125
1.12H-13H	-INF			-3.125
1.13H-14H	-INF			-3.125
1.14H-15H	-INF			-3.125
1.15H-16H	-INF			-3.792
1.16H-17H	-INF			-3.125
1.17H-18H	-INF			-3.125
1.18H-19H	-INF			-3.125
1.19H-20H	-INF			-3.125
1.20H-21H	-INF			-3.125
1.21H-22H	-INF			-3.125
1.22H-23H	-INF			-3.125
1.23H-0H	-INF			-3.125

GAMS 2.25.064 386/486 DOS

06/13/94 01:40:00 PAGE 11

DISPATCHING

Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

---- EQU MIN_D Limite minimale de la production des groupes diesel

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1.0H-1H			+INF	
1.1H-2H			+INF	
1.2H-3H		13.470	+INF	
1.3H-4H		26.250	+INF	
1.4H-5H		26.250	+INF	
1.5H-6H		30.000	+INF	
1.6H-7H		10.380	+INF	
1.7H-8H			+INF	

1.8H-9H	+INF	
1.9H-10H	+INF	
1.10H-11H	+INF	
1.11H-12H	+INF	
1.12H-13H	+INF	
1.13H-14H	+INF	
1.14H-15H	+INF	
1.15H-16H	+INF	2.667
1.16H-17H	+INF	
1.17H-18H	+INF	
1.18H-19H	+INF	
1.19H-20H	+INF	
1.20H-21H	+INF	
1.21H-22H	+INF	
1.22H-23H	+INF	
1.23H-0H	+INF	

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU MAXLIM_CS -INF 402.040 1200.000

MAXLIM_CS charge maximale des batteries d'accumulateurs au debut

---- EQU MAX_CS charge maximale des batteries d'accumulateurs

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1H-2H	-INF	327.040	1200.000
2H-3H	-INF	272.040	1200.000
3H-4H	-INF	250.000	1200.000
4H-5H	-INF	250.000	1200.000
5H-6H	-INF	250.000	1200.000
6H-7H	-INF	250.000	1200.000
7H-8H	-INF	288.280	1200.000
8H-9H	-INF	379.880	1200.000
9H-10H	-INF	526.880	1200.000
10H-11H	-INF	716.320	1200.000
11H-12H	-INF	905.440	1200.000
12H-13H	-INF	1044.560	1200.000
13H-14H	-INF	1134.000	1200.000

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 12

DISPATCHING

Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

EQU.MAX_CS charge maximale des batteries d'accumulateurs

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

14H-15H	-INF	1186.000	1200.000
15H-16H	-INF	1192.600	1200.000
16H-17H	-INF	1192.600	1200.000
17H-18H	-INF	1145.880	1200.000
18H-19H	-INF	1047.040	1200.000
19H-20H	-INF	927.040	1200.000
20H-21H	-INF	802.040	1200.000
21H-22H	-INF	672.040	1200.000
22H-23H	-INF	557.040	1200.000
23H-0H	-INF	472.040	1200.000

---- EQU DOD Deept of Discharge

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
0H-1H	250.000	327.040	+INF	
1H-2H	250.000	272.040	+INF	
2H-3H	250.000	250.000	+INF	EPS
3H-4H	250.000	250.000	+INF	
4H-5H	250.000	250.000	+INF	EPS
5H-6H	250.000	250.000	+INF	
6H-7H	250.000	250.000	+INF	EPS
7H-8H	250.000	288.280	+INF	
8H-9H	250.000	379.880	+INF	
9H-10H	250.000	526.880	+INF	
10H-11H	250.000	716.320	+INF	
11H-12H	250.000	905.440	+INF	
12H-13H	250.000	1044.560	+INF	
13H-14H	250.000	1134.000	+INF	
14H-15H	250.000	1186.000	+INF	
15H-16H	250.000	1192.600	+INF	
16H-17H	250.000	1145.880	+INF	
17H-18H	250.000	1047.040	+INF	
18H-19H	250.000	927.040	+INF	
19H-20H	250.000	802.040	+INF	
20H-21H	250.000	672.040	+INF	
21H-22H	250.000	557.040	+INF	
22H-23H	250.000	472.040	+INF	
23H-0H	250.000	402.040	+INF	

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU SIMPLIFS

-81.125

SIMPLIFS L'hypothese simplificatrice batteries

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 13
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

9H-10H	147.000	+INF
10H-11H	189.440	+INF
11H-12H	189.120	+INF

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 14
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

VAR YPV_S Energie distribuee par le generateur PV aux batteries

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
12H-13H		139.120	+INF	
13H-14H		89.440	+INF	
14H-15H		52.000	+INF	
15H-16H		6.600	+INF	
16H-17H			+INF	2.000
17H-18H			+INF	2.000

---- VAR YPV_PF2 Energie non produite par le generateur PV

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
6H-7H			+INF	83.125
7H-8H			+INF	81.125
8H-9H			+INF	81.125
9H-10H			+INF	81.125
10H-11H			+INF	81.125
11H-12H			+INF	81.125
12H-13H			+INF	81.125
13H-14H			+INF	81.125
14H-15H			+INF	81.125
15H-16H			+INF	81.125
16H-17H			+INF	83.125
17H-18H			+INF	83.125

---- VAR YS_C Energie distribuee par les batteries aux consommateurs

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
0H-1H		75.000	+INF	
1H-2H		55.000	+INF	
2H-3H		22.040	+INF	
3H-4H			+INF	EPS
4H-5H			+INF	
5H-6H			+INF	EPS
6H-7H			+INF	
7H-8H			+INF	2.000

8H-9H		+INF	2.000
9H-10H		+INF	2.000
10H-11H		+INF	2.000
11H-12H		+INF	2.000
12H-13H		+INF	2.000
13H-14H		+INF	2.000
14H-15H		+INF	2.000
15H-16H		+INF	2.000
16H-17H	46.720	+INF	
17H-18H	98.840	+INF	
18H-19H	120.000	+INF	

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 15
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

VAR YS_C Energie distribuee par les batteries aux consommateurs

	LOWER	LEVEL*	UPPER	MARGINAL
19H-20H		125.000	+INF	
20H-21H		130.000	+INF	
21H-22H		115.000	+INF	
22H-23H		85.000	+INF	
23H-0H		70.000	+INF	

---- VAR YD_C Energie distribuee par les groupes dièsel aux consommateurs

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1.0H-1H			+INF	EPS
1.1H-2H			+INF	EPS
1.2H-3H		17.960	+INF	
1.3H-4H		35.000	+INF	
1.4H-5H		35.000	+INF	
1.5H-6H		40.000	+INF	
1.6H-7H		13.840	+INF	
1.7H-8H			+INF	2.000
1.8H-9H			+INF	2.000
1.9H-10H			+INF	2.000
1.10H-11H			+INF	2.000
1.11H-12H			+INF	2.000
1.12H-13H			+INF	2.000
1.13H-14H			+INF	2.000
1.14H-15H			+INF	2.000
1.15H-16H			+INF	
1.16H-17H			+INF	EPS
1.17H-18H			+INF	EPS

1.18H-19H	+INF	EPS
1.19H-20H	+INF	EPS
1.20H-21H	+INF	EPS
1.21H-22H	+INF	EPS
1.22H-23H	+INF	EPS
1.23H-0H	+INF	EPS

---- VAR YS_S Potentiel energetique non consomme dans les batteries

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
0H-1H	327.040	+INF	
1H-2H	272.040	+INF	
2H-3H	250.000	+INF	
3H-4H	250.000	+INF	
4H-5H	250.000	+INF	
5H-6H	250.000	+INF	
6H-7H	250.000	+INF	

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 16
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

VAR YS_S Potentiel energetique non consomme dans les batteries

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
7H-8H	288.280	+INF	
8H-9H	379.880	+INF	
9H-10H	526.880	+INF	
10H-11H	716.320	+INF	
11H-12H	905.440	+INF	
12H-13H	1044.560	+INF	
13H-14H	1134.000	+INF	
14H-15H	1186.000	+INF	
15H-16H	1192.600	+INF	
16H-17H	1145.880	+INF	
17H-18H	1047.040	+INF	
18H-19H	927.040	+INF	
19H-20H	802.040	+INF	
20H-21H	672.040	+INF	
21H-22H	557.040	+INF	
22H-23H	472.040	+INF	
23H-0H	402.040	+INF	

---- VAR YSSJ_1	402.040	+INF
-----------------	---------	------

YSSJ_1 Potentiel energetique restant dans les batteries de la journee
precedante

---- VAR YDDJ_1 Potentiel energetique restant dans les reservoir diesel
de la journee precedante

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	141.800	+INF	

---- VAR YD_D Potentiel energetique non consomme dans les reservoirs
des groupes diesel

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1.0H-1H	141.800	+INF	
1.1H-2H	141.800	+INF	
1.2H-3H	123.840	+INF	
1.3H-4H	88.840	+INF	
1.4H-5H	53.840	+INF	
1.5H-6H	13.840	+INF	
1.6H-7H		+INF	EPS
1.7H-8H		+INF	
1.8H-9H		+INF	
1.9H-10H		+INF	

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 17
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

VAR YD_D Potentiel energetique non consomme dans les reservoirs
des groupes diesel

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1.10H-11H	70.000	+INF	
1.11H-12H	142.000	+INF	
1.12H-13H	302.000	+INF	
1.13H-14H	392.000	+INF	
1.14H-15H	462.000	+INF	
1.15H-16H	507.000	+INF	
1.16H-17H	507.000	+INF	
1.17H-18H	507.000	+INF	
1.18H-19H	557.000	+INF	
1.19H-20H	647.000	+INF	
1.20H-21H	787.000	+INF	
1.21H-22H	787.000	+INF	
1.22H-23H	787.000	+INF	
1.23H-0H	787.000	+INF	

---- VAR XD etat du groupe diesel

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1.0H-1H			1.000	
1.1H-2H			1.000	
1.2H-3H		0.112	1.000	
1.3H-4H		0.219	1.000	
1.4H-5H		0.219	1.000	
1.5H-6H		0.250	1.000	
1.6H-7H		0.086	1.000	
1.7H-8H			1.000	
1.8H-9H			1.000	
1.9H-10H			1.000	
1.10H-11H			1.000	
1.11H-12H			1.000	
1.12H-13H			1.000	
1.13H-14H			1.000	
1.14H-15H			1.000	
1.15H-16H			1.000	
1.16H-17H			1.000	
1.17H-18H			1.000	
1.18H-19H			1.000	
1.19H-20H			1.000	
1.20H-21H			1.000	
1.21H-22H			1.000	
1.22H-23H			1.000	
1.23H-0H			1.000	

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 18
DISPATCHING
Solution Report SOLVE B.E.H USING RMINLP FROM LINE 148

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR COUT		-INF 53372.325		+INF

COUT Cout total de production

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 06/13/94 01:40:00 PAGE 19
DISPATCHING
Execution

---- 149 VARIABLE YPV_C.L Energie distribuee par le generateur PV
aux consommateurs

6H-7H 26.160, 7H-8H 45.000, 8H-9H 50.000, 9H-10H 45.000
10H-11H 40.000, 11H-12H 60.000, 12H-13H 110.000, 13H-14H 140.000
14H-15H 140.000, 15H-16H 135.000, 16H-17H 83.280, 17H-18H 26.160

---- 150 VARIABLE YPV_S.L Energie distribuee par le generateur PV
aux batteries

7H-8H 38.280, 8H-9H 91.600, 9H-10H 147.000, 10H-11H 189.440
11H-12H 189.120, 12H-13H 139.120, 13H-14H 89.440, 14H-15H 52.000
15H-16H 6.600

---- 151 VARIABLE YS_C.L Energie distribuee par les batteries aux
consommateurs

0H-1H 75.000, 1H-2H 55.000, 2H-3H 22.040, 16H-17H 46.720
17H-18H 98.840, 18H-19H 120.000, 19H-20H 125.000, 20H-21H 130.000
21H-22H 115.000, 22H-23H 85.000, 23H-0H 70.000

---- 152 VARIABLE YD_C.L Energie distribuee par les groupes diesel
aux consommateurs

	2H-3H	3H-4H	4H-5H	5H-6H	6H-7H
1	17.960	35.000	35.000	40.000	13.840

EXECUTION TIME = * 2.030 SECONDS VERID MW2-00-064

USER: Catherine Lecomte
ENSIA - CEPAL, MASSY, France

G931125-1828A -MW2

**** FILE SUMMARY

INPUT E:\GAMS\DISPO1.GMS
OUTPUT E:\GAMS\DISPO1.LST
SAVE E:\GAMS\DISPO2.G0?