

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Gm. 0043

Ecole Supérieure Polytechnique
Centre de Thiés

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION EN
ELECTROMECHANIQUE

Titre :

**Production d'eau chaude sanitaire solaire dans la
résidence hôtelière Mouna Ndayane. Conception et
optimisation.**

Auteur : Diané DIAGNE

Professeurs encadreur : Banda NDOYE
 Paul DEMBA

Année académique : 2002/2003

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Ecole Supérieure Polytechnique
Centre de Thiés

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION EN
ELECTROMECHANIQUE

Titre :

**Production d'eau chaude sanitaire solaire dans la
résidence hôtelière Mouna Ndayane. Conception et
optimisation.**

Auteur : Diané DIAGNE

Professeurs encadreur : Banda NDOYE
Paul DEMBA

Année académique : 2002/2003

DEDICACES

Par la grâce du tout puissant, nous dédions de modeste travail à notre prophète Mouhamed (PSL)

A mon père,
A ma mère,
A mes oncles et tantes,
A mes frères et sœurs,
A ndèye nguénar Ndao
A moctar Kâne,
A mes amis

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude :

- Messieurs Banda NDOYE et Paul DEMBA, professeurs au Département Génie mécanique, pour leur sollicitude constante quant à l'encadrement de ce projet ;
- Monsieur Ousmane NDOYE, directeur d'exploitation de la SAPCO ;
- Monsieur Youssoupha LEYE, architecte cabinet ARCHI 3D ;
- Enfin je remercie le corps professoral du Département Génie mécanique pour leur abnégation discrète mais tout aussi efficace pour notre formation, ainsi qu'à tous les camarades de promotion pour leur soutien moral et leur sympathique compagnie à la recherche du savoir.

Merci à vous tous.

SOMMAIRE

Ce présent rapport sanctionne le travail accompli dans le cadre du projet de fin d'études intitulé : conception et optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire dans la résidence hôtelière Mouna Ndayane.

L'objectif de ce projet est de présenter une solution permettant de réaliser des économies substantielles au niveau du poste eau chaude sanitaire et de réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de permettre à l'hôtel d'être compétitif et d'avoir une bonne image.

Le premier chapitre présente le situe et décrit les objectifs du système de production d'eau chaude sanitaire.

Une étude de systèmes de production d'eau chaude sanitaire fait l'objet du deuxième chapitre.

Le chapitre trois traite le processus de chauffage de l'eau par l'énergie solaire en parlant des sous-ensembles constitutifs du système de production.

Une étude préalable permettant la connaissance des paramètres des équipements est effectuée au niveau du chapitre quatre.

Le chapitre cinq a pour objet l'étude détaillée de dimensionnement du système de production.

L'analyse des résultats de dimensionnement et des recommandations sont faites dans le chapitre six.

L'aspect télécontrôle des systèmes est relaté dans le chapitre sept.

Dans le huitième et dernier chapitre on évalue le projet du point de vue économique et environnementale.

Table des matières	pages
Dédicaces	I
Remerciements	II
Sommaire	III
Table des matières	IV
Liste des annexes	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des schémas	VIII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU SITE ET OBJECTIFS DU SYSTEME	3
1.1 SITUATION.....	3
1.2 DESCRIPTION.....	4
1.3 OBJECTIF PRINCIPAL DU SYSTEME.....	4
1.4 LES OBJECTIFS SECONDAIRES DU SYSTEME.....	5
CHAPITRE 2 : ETUDE DE SYSTEMES DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE	6
2.1 COMPOSITION DES SYSTEMES.....	6
2.2 CLASSIFICATION DES SYSTEMES.....	7
2.3 SYSTEMES DE PRODUCTION COLLECTIVE.....	11
CHAPITRE 3 : LE CHAUFFAGE DE L'EAU PAR L'ENERGIE SOLAIRE	19
3.1 LES SOUS-ENSEMBLES DU SYSTEME DE PRODUCTION.....	19
3.2 LE CAPTAGE.....	19
3.3 LE TRANSFERT DE L'ENERGIE ET LE STOCKAGE.....	22
CHAPITRE 4 : ETUDE PREALABLE	28
4.1 L'EVALUATION DES BESOINS EN EAU CHAUDE.....	28
4.2 L'EXPOSITION ENERGETIQUE SOLAIRE DU SITE.....	30
4.3 L'ETUDE D'IMPLANTATION DES CAPTEURS.....	31

4.4 LES LIAISONS ENTRE LES CAPTEURS.....	32
4.5 LES TUYAUTEREIS.....	34
4.6 LE STOCKAGE.....	35
CHAPITRE 5 : ETUDE DETAILLEE.....	36
5.1 LE PRINCIPE DU DIMENSIONNEMENT.....	36
5.2 EVALUATION DES PERFORMANCES DU SYSTEME.....	37
5.3 OUTILS DE CALCUL DES PERFORMANCES DU SYSTEME.....	42
5.4 METHODOLOGIE DE DEFINITION ET DE DIMENSIONNEMENT.....	46
5.5 PRE-DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME.....	49
5.6 AJUSTEMENT DES DONNEES RELATIVES AUX CAPTEURS ET AU STOCK.....	53
5.7 DIMENSIONNEMENT DE LA TUYAUTERIE ET DE LA POMPE.....	55
5.8 DIMENSIONNEMENT DES ACCESSOIRES DE SECURITE.....	58
CHAPITRE 6 : ANALYSE DES RESULTATS DE DIMENSIONNEMENT ET RECOMMANDATIONS.....	61
6.1 ANALYSE DES RESULTATS POUR LES CAPTEURS.....	61
6.2 ANALYSE DES RESULTATS POUR LE STOCK.....	65
6.3 RECOMMANDATIONS.....	67
CHAPITRE 7 : LE TELECONTRÔLE.....	69
7.1 OBJECTIFS DU TELECONTRÔLE.....	69
7.2 COÛT DU TELECONTRÔLE.....	69
7.3 DESCRIPTION DU TELECONTRÔLE.....	69
CHAPITRE 8 : EVALUATION ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.....	74
8.1 EVALUATION ECONOMIQUE.....	74
8.2 EVALUATION ENVIRONNEMENTALE.....	78
CONCLUSION.....	80

Listes des annexes

Annexe 1 :figures
Annexe 2 :tableaux
Annexe 3 :schémas

Liste des figures

Figures.....	pages
Fig 1.1 : situation du site.....	3
Fig 3.1 : les variations du rendement instantané pour plusieurs capteurs.....	21
Fig A1.1 : évolution du taux de couverture solaire en fonction de la surface des capteurs (cellule).....	annexe 1
Fig A1.2 : productivité en fonction de la surface des capteurs (cellule).....	//
Fig A1.3 : productivité en fonction du volume du stock(cellule).....	//
Fig A1.4 : taux de couverture solaire en fonction du volume du stock (cellule).....	//
Fig A1.5 : influence de l'inclinaison sur la productivité (cellule).....	//
Fig A1.6 : influence de l'inclinaison sur le rendement et les taux de couvertures (cellule)	//
Fig A1.7 : profil de production solaire et de consommation pour une belle Décembre (cellule).....	//
Fig A1.8 : consommation d'énergie journalière en moyenne mensuelle (cellule).....	//
Fig A1.9 : évolution du taux de couverture solaire en fonction de la surface des capteurs (restaurant).....	//

Fig A1.10 : productivité en fonction de la surface des capteurs(restaurant).....annexe 1

Fig A1.11 : productivité en fonction du volume du stock (restaurant).....//

Fig A1.12 : taux de couverture solaire en fonction du volume du stock (restaurant).....//

Fig A1.13 : influence de l'inclinaison sur la productivité (restaurant).....//

Fig A1.14 : influence de l'inclinaison sur le rendement et les taux de couvertures (restaurant)//

Fig A1.15 : consommation d'énergie journalière en moyenne mensuelle (restaurant).....//

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : réglages des différentiels.....	26
Tableau 3.2 : plages de réglage des différentiels.....	26
Tableau 3.3 : fonction du régulateur différentiel plus vanne de Commutation.....	27
Tableau 4.1 : Développement de la bactérie.....	29
Tableau 4.2 : Les besoins par bâtiment considéré.....	30
Tableau 4.3 : Rayonnement global au sol (kWh/m ²).....	31
Tableau 4.4 : Température air sec (°C).....	31
Tableau 4.5 : Température minimum air (°C).....	31
Tableau 5.1 : La consommation journalière en moyenne mensuelle (litre/jour) pour une cellule.....	47
Tableau 5.2 : Epaisseur de l'isolant $\lambda = 0,04 \text{ W /m}^2/\text{°C}$ suivant le diamètre.....	57
Tableau 5.3 : conductivité thermique de quelques isolants.....	58
Tableau 8.1 : Quantité de CO ₂ évité par kWh fonction de la source d'énergie.....	79
Tableau A2.1 : évaluation des performances énergétiques du système/cellule.....	annexe 2
Tableau A2.2 : évaluation des performances énergétiques du système/restaurant.....	//
Tableau A2.3 : évaluation des performances énergétiques du système/ villas R2A et R2B.....	//
Tableau A2.4 : évaluation des performances énergétiques du système/ villas R3B.....	/
Tableau A2.5 : évaluation des performances énergétiques du système/ villas R4.....	//
Tableau A2.6 : évaluation des performances énergétiques du système/infirmierie.....	annexe 2
Tableau A2.7 : résultats du dimensionnement/cellule.....	//
Tableau A2.8 : résultats du dimensionnement/restaurant.....	//

Tableau A2.9 : résultats du dimensionnement/villas.....//
Tableau A2.10 : résultats du dimensionnement/infirmierie.....//
Tableau A2.11 : résultats d'évaluation économique.....//

Liste des schémas

Schéma A3.1 : principe du système/restaurant (2 fois pour 13800l/j).....	annexe 3
Schéma A3.2 : principe du système/pour chaque cellule.....//	
Schéma A3.3 : principe du système/pour chaque villa et l'infirmierie.....//	
Schéma A3.4 : principe du télécontrôle/cellule-restaurant.....//	
Schéma A3.5 : Raccordement en boucle de Tickelman.....//	
Schéma A3.6 : implantation des capteurs sur terrasse.....//	
Schéma A3.7 : implantation des capteurs, intégration en toiture inclinée.//	
Schéma A3.8 : ballon de stockage solaire type vertical.....//	

INTRODUCTION

Jamais l'énergie solaire n'avait fait autant parler d'elle. Les raisons de ce boom sont vraisemblablement à trouver dans les consciences des populations lentement mais sûrement minées par des signes de dégradations de l'environnement.

Chaque semaine, comme une perfusion minutieusement administrée, l'actualité nous distille les dysfonctionnements d'un monde trop souvent souillé.

Ces dysfonctionnements, les problèmes d'agroalimentaire, de changement climatique ou d'érosion de la couche d'ozone sont dans une large mesure, plus débattus publiquement dans les pays industrialisés.

Dans ce contexte, les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire trouvent des échos favorables au sein de l'opinion publique et des décideurs.

Les populations de ces pays, étant très sensibles à la protection de l'environnement, beaucoup de vacanciers quittent la pollution de leurs villes pour des pays comme le Sénégal afin de retrouver un cadre meilleur.

A cet effet, les gérants des hôtels en plus du besoin de réaliser des économies substantielles sur le volet énergétique de leur infrastructure, se sont rendu compte que l'installation d'un système solaire était un atout incomparable pour l'image de l'hôtel. C'est dans cette perspective que s'inscrit cette étude de conception d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire dans la résidence hôtelière Mouna Ndayane.

Ce présent rapport porte sur la conception et l'optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire dans la dite résidence.

Dans l'hôtellerie, l'usage de l'énergie solaire dont la technologie est aujourd'hui sans faille, est d'une efficacité avérée pour la production d'eau chaude sanitaire grâce à la garantie de résultats solaires.

Par conséquent la méthode SOLO, méthode d'évaluation des performances énergétiques sera utilisée. Elle a ses résultats validés par l'expérience après dix ans d'utilisation en Garantie de résultats solaires.

Nous procéderons par une présentation du site et une fixation des objectifs du système dans l'optique de saisir l'envergure du projet.

L'étude de systèmes de production d'eau chaude sanitaire est une nécessité pour le choix de notre système. Connaître les interactions entre les composants d'un système et ses possibilités par rapport à d'autres de production d'eau chaude sanitaire favorisent sa maîtrise.

Le processus de chauffage de l'eau par l'énergie solaire permettra de fixer les équipements de notre système de production d'eau chaude sanitaire.

Cependant la connaissance des paramètres de ce dernier au profit d'une étude détaillée de dimensionnement nécessite un préalable.

On fera suivre l'étude détaillée de dimensionnement une analyse des résultats et des recommandations.

Le système étant défini et dimensionné, on fera appel au télécontrôle dans une perspective de facilitation de la détection et le diagnostic des dysfonctionnements éventuels et ce faisant améliorer le rendement du système et le sécuriser.

On terminera par une évaluation économique et environnementale afin d'estimer un coût global du projet sur une période donnée et la quantité de gaz carbonique évitée.

CHAPITRE 1

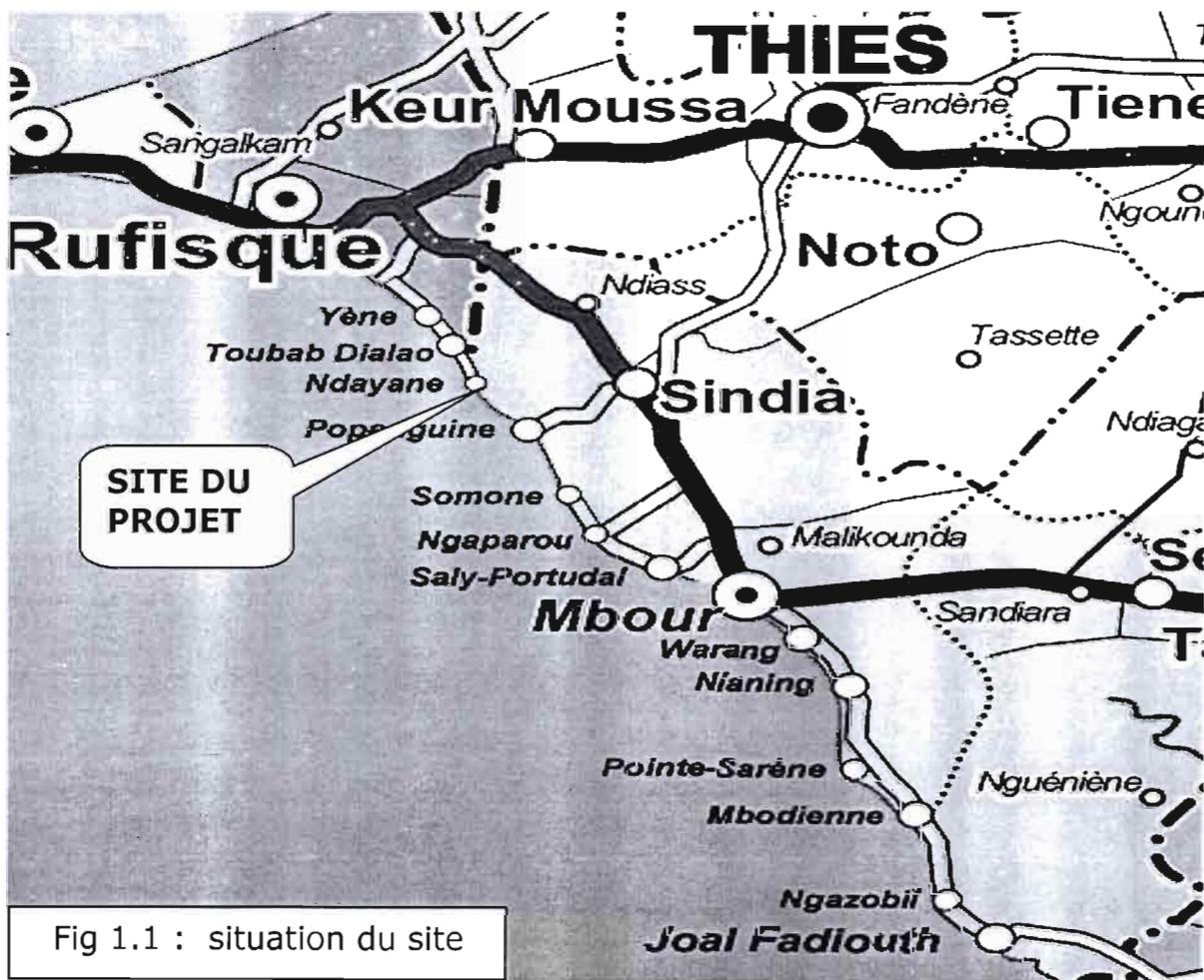
PRESENTATION DU SITE ET OBJECTIFS DU SYSTEME

1.1 SITUATION

Le site se trouve sur la petite côte dans le village de NDAYANE, localité de la communauté rurale de NDIASS dans le Département de MBOUR.

Il est localisé sur la latitude 14°25 nord et sur la longitude 16° 58 Est. Son altitude est d'environ 12 mètres. La station météorologique la plus proche est celle de Dakar Yoff.

La zone lisse de NDAYANE a un climat tropical et est bien ensoleillée avec une insolation moyenne annuelle de 7,2 KWh/m² et une température moyenne annuelle de 24,1°C.



1.2 DESCRIPTION

Le site abrite un complexe hôtelier et un time shire (un village de vacances), il a pour objectif, de jouer un grand rôle dans le secteur économique du village de NDAYANE. En effet, ce projet vise à développer le tourisme dans cette partie de la petite côte dont le potentiel sur ce domaine n'est pas bien exploité. Un ensemble d'activités sera ainsi proposé à une clientèle dont le profil est du type européen, dans lequel le volet culturel occupera une place importante.

La résidence hôtelière MOUNA NDAYANE se compose de quatre cellules de 20 chambres chacune, d'un restaurant, d'une salle polyvalente, d'une piscine, d'une salle de gymnastique, d'un bâtiment administratif et d'un time shire de 28 villas de type R2A, R2B, R3B et R4 également repartis.

1.3 OBJECTIF PRINCIPAL DU SYSTEME

Dans le secteur tertiaire, en particulier dans l'hôtellerie, le volet énergétique représente la partie la plus exigeante vis à vis de la qualité de service offert et la plus onéreuse.

En effet l'instabilité de la distribution d'électricité qui est jusqu'ici la principale source d'énergie utilisée dans ce secteur obligeait les hôteliers à trouver des solutions palliatives par exemple le groupe électrogène.

Dans nos pays, le coût de la production d'électricité est très élevé. Si à ce coût on y ajoute ceux des solutions palliatives, la clientèle de l'hôtel serait dans l'obligation de supporter ces coûts pour bénéficier de la qualité de service offert par l'hôtel.

Par conséquent ce dernier verrait sa compétitivité baissée au profit d'autres hôtels.

Pour contribuer à la compétitivité de l'hôtel, le système de production d'eau chaude sanitaire doit avoir des objectifs secondaires fixés.

1.4 LES OBJECTIFS SECONDAIRES DU SYSTEME

Le concepteur du système de production d'eau chaude doit tout d'abord viser à assurer à l'utilisateur un service satisfaisant. Il doit faire appel au respect de plusieurs principes généraux communs.

- La qualité de l'eau chaude produite doit être irréprochable.
- Sa température doit être stable et réglable ; l'utilisateur supporte mal des variations en cours de puisage ; les risques de surchauffe accidentelle doivent être en tout cas totalement écartés.
- La mise à disposition de l'eau chaude doit être aussi immédiate que possible ; l'utilisateur accepte mal un retard dans l'obtention d'une eau à température satisfaisante, retard qui entraîne par ailleurs un gaspillage d'énergie et d'eau, donc un surcoût.
- La fréquence des pannes ou anomalies de fonctionnement doit être aussi réduite que possible, ce qui exige :
 - La limitation des risques de détérioration des installations, par entartrage ou corrosion,
 - Une conduite simple ou entièrement automatique mais facile à dépanner ou régler.
- Le coût d'exploitation doit être limité.

Naturellement plusieurs de ces objectifs sont contradictoires (coût d'installation/coût d'exploitation, coût/qualité de service), et le concepteur doit choisir le meilleur compromis selon le contexte de son intervention.

CHAPITRE 2

ETUDE DE SYSTEMES DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

2.1 COMPOSITION DES SYSTEMES

Une installation de production d'ECS comprend plusieurs constituants aux fonctions bien définies, dont chacun contribue à satisfaire les besoins des usagers en matière de consommation d'ECS.

Les fonctions essentielles d'une installation d'ECS sont les suivantes :

- la production proprement dite,
- la distribution,
- la fourniture.

2.1.1 LA PRODUCTION

Elle recouvre les équipements permettant le chauffage de l'eau froide à une température au moins égale à celle d'utilisation ; la production peut incorporer facultativement des dispositifs de stockage qui assurent un rôle de tampon permettant de dissocier la production du puisage.

Ses éléments constitutifs sont :

- la source d'énergie, qui peut être un combustible traditionnel (fuel, gaz, charbon, bois), l'électricité, le fluide caloporteur d'un réseau de chaleur, l'énergie solaire ou une énergie de récupération (condenseur d'un groupe frigorifique par exemple),
- le dispositif de transfert de chaleur, qui peut être directement intégré à l'appareil de production d'ECS (générateur d'eau chaude, échangeurs directs dans le cas des réseaux, résistances électriques) ou qui peut faire

appel à des chaudières traditionnelles ou des échangeurs, réchauffant un fluide intermédiaire, le plus souvent de l'eau chaude à 90°C,
- un système facultatif de stockage de l'eau chaude produite, qui peut être directement constitué par l'ensemble de réchauffage de l'eau ou séparé physiquement de celui-ci.

2.1.2 LA DISTRIBUTION

Elle assure le transport de l'eau chaude des lieux de production aux points d'utilisation.

Elle est assurée par un réseau en ligne ou en boucle. L'eau transite à travers le circuit jusqu'au point de soutirage ; l'eau chaude puisée est alors remplacée à l'amont du dispositif de production d'ECS par de l'eau froide en provenance du réseau général d'eau de ville.

2.1.3 LA FOURNITURE

Elle regroupe l'ensembles des équipements assurant la mise à la disposition de l'ECS aux points de puisage.

Elle représente la partie visible de l'installation pour les utilisateurs. Elle est constituée des appareils sanitaires traditionnels (lavabos, douches, baignoires, bidets, éviers, machines à laver) et en particulier de la robinetterie de ces appareils.

2.2 CLASSIFICATION DES SYSTEMES

Les critères de classification des systèmes de production d'ECS sont nombreux. On peut citer :

- le type d'énergie,
- le type d'échangeur, direct ou indirect,

- la nature instantanée ou à accumulation de la production,
- la nature individuelle ou collective de l'installation,

2.2.1 TYPE D'ENERGIE

Tout type d'énergie est susceptible d'être utilisé pour produire l'ECS. on peut citer :

- le charbon,
- le fuel,
- le gaz naturel,
- les gaz de pétrole liquéfiés (GPL),
- le bois,
- l'électricité,
- l'énergie récupérée,
- l'énergie solaire.

Toutes ces énergies, ainsi que les ordures ménagères et l'énergie géothermale, peuvent être transformées en chaleur sensible et éventuellement latente de fluide caloporteur d'un réseau de chaleur (à eau chaude ou à vapeur).

Les énergies les plus fréquemment employées sont le gaz et l'électricité pour les installations de type spécifique (production d'ECS seulement).

La place qu'occupent l'énergie solaire et la récupération est particulière du fait que ces sources nécessitent pratiquement toujours une énergie d'appoint.

2.2.2 TYPE D'ECHANGEUR

La production d'ECS est dite directe si le chauffage de l'eau intervient directement au contact des parois d'une surface d'échange parcourue par des produits de combustion ou le fluide caloporteur primaire (cas des réseaux de chaleur) ou au contact de résistances électriques.

Dans le cas contraire, la production est dite indirecte. L'échange de la chaleur intervient alors entre l'ECS et un fluide intermédiaire (eau chaude ou vapeur), qui transfère l'énergie entre le générateur de chaleur (ou échangeur primaire) et un échangeur qui alimente le circuit distributeur d'ECS (dit secondaire).

Un appareil qui contient un faisceau tubulaire, un serpentin ou des résistances électriques chauffant l'ECS est appelé « préparateur » ou chauffe-eau. Il constitue par construction une capacité de stockage. Une capacité de stockage ne contenant aucun dispositif de réchauffage est dénommé ballon.

2.2.3 PRODUCTION INSTANTANEE OU A ACCUMULATION

Un système de production instantanée assure le chauffage de l'eau à l'instant précis où celle-ci doit être consommée, au temps de transit près. Cette technique conduit à la nécessité de disposer d'une puissance de production importante qui n'est utilisée que sur de très courtes périodes.

Par opposition, une installation à accumulation chauffe en permanence l'ECS qu'elle conserve à la disposition des utilisateurs dans un ou plusieurs ballons de stockage (ou préparateur ou chauffe-eau).

Le ballon de stockage constitue un tampon permettant de dissocier le rythme de la production des variations brusques de la demande.

Il effectue un écrêtage des pointes de consommation et un lissage des besoins d'énergie au cours de la journée. Il réduit donc le coût de la puissance.

En contre-partie de cet avantage le ballon de stockage présente deux inconvénients :

- son existence même c'est à dire un montant d'investissement supplémentaire (coût direct, et coût du volume qu'il occupe),
- une perte d'énergie sous forme de déperditions thermiques par les parois.

2.2.4 PRODUCTION INDIVIDUELLE OU COLLECTIVE

Dans le domaine du logement, une installation de production d'ECS peut être caractérisée par le fait qu'elle intéresse un seul logement ou un groupe de plusieurs logements.

Dans le premier cas, l'installation est dite de type « individuel » et est localisée dans l'emprise même du logement desservi ; son exploitation est directement assuré par l'occupant du logement.

Dans le deuxième cas, l'installation est dite de type « collectif » ; elle est alors centralisée en chaufferie ou en sous-station.

En général, une installation collective présente un coût d'installation inférieur à la somme des coûts des installations individuelles qu'elle remplace, elle dure plus longtemps et coûte aussi moins cher en entretien. Une installation de production collective conduit à des rendements de production souvent supérieurs à ceux obtenus avec des systèmes individuels.

Cet avantage est cependant compensé par l'obligation de mise en œuvre d'un réseau de distribution avec boucle de recyclage ou traçage dont le rendement moyen annuel dépend évidemment de la qualité du calorifugeage, mais dépasse rarement 70%. [1]

Dans le tertiaire les systèmes collectifs sont plus représentés par conséquent on se limitera dans la suite à leur description.

2.3 SYSTEMES DE PRODUCTION COLLECTIVE

2.3.1 PRODUCTION INSTANTANEE PAR L'ELECTRICITE

Un système de production d'ECS instantanée électrique pour une installation collective est réalisé par l'association d'une chaudière électrique et d'un préparateur d'ECS instantané.

Un préparateur d'ECS instantané est un préparateur d'ECS dont le volume de stockage est inférieur aux besoins maximaux susceptibles d'être appelés en une heure.

La nature de l'énergie (électricité) et le caractère instantané de la production d'ECS limitent l'intérêt de ce type d'installation, si elle doit être autonome.

Ce principe n'est généralement mis en œuvre que sur une installation existante fonctionnant avec des chaudières à combustible sur le principe de la relève. L'électricité peut alors être utilisée comme source d'énergie durant les périodes tarifaires favorables à cette énergie par rapport au combustible initial.

La chaudière électrique est placée sur le primaire du préparateur existant. Cette position lui permet d'assurer la production de l'ECS ainsi que le maintien en température de la boucle de distribution.

Une régulation permet, en fonction de la demande, d'enclencher tout ou partie de la puissance électrique pour maintenir la température de la boucle de distribution à la valeur de consigne fixée (60°C par exemple.) Pendant les heures à tarification favorable, la chaudière électrique fonctionne seule. La chaudière à combustion est arrêtée.

Pendant les heures à tarification défavorable, la chaudière électrique s'éteint, la chaudière à combustion prend la relève.

Ce type d'installation permet de substituer l'énergie électrique à un combustible traditionnel lorsque les conditions tarifaires sont avantageuses en minimisant l'investissement.

Toutefois, le principe de la production instantanée peut conduire à installer une puissance électrique importante, avec l'incidence sur le montant de la prime fixe que cela représente.

2.3.2 PRODUCTION INSTANTANEE A COMBUSTIBLE

Une installation de production d'ECS instantanée à combustible comprend un échangeur pour la production d'ECS qui assure le chauffage de l'eau chaude simultanément au soutirage.

L'échangeur est alimenté au primaire par une boucle de réchauffage en provenance du système de production de chaleur (chaudière à combustible ou réseau de chauffage primaire).

Les avantages d'un tel système sont les suivants :

- absence de stockage d'ECS, et donc limitation des pertes thermiques et des risques de corrosion du réservoir,
- possibilité de puisage illimité dans la mesure où les charges thermiques induites ne dépassent pas les possibilités du système de production de chaleur,
- faible coût d'investissement du fait de l'absence du ballon de stockage lié aux autres types d'installation.

Ce principe de production d'ECS est cependant de moins en moins exploité du fait des inconvénients présentés :

- température élevée au niveau des surfaces d'échange, conduisant à la création rapide de tartre (inconvenient limité par l'action de la vanne trois voies qui évite que la température au primaire de l'échangeur soit en permanence à la valeur maximale),
- débit instantané maximal dépendant directement de la puissance du système de production de chaleur et de l'échangeur,
- mauvaise exploitation de l'investissement consenti pour la production de chaleur : les puissances importantes nécessaires pour la production de chaleur ne sont utilisées qu'une très faible partie du temps. C'est aussi pourquoi la production instantanée est déconseillée quand la source de chaleur est un réseau.

2.3.3 PRODUCTION A ACCUMULATION PAR L'ELECTRICITE

Un système de production d'ECS à accumulation électrique est constitué d'un ou de plusieurs appareils de stockage de forte capacité équipés de résistances électriques pour le chauffage et le maintien en température de l'ECS.

Ce système de production trouve son intérêt dans la possibilité qu'il offre d'utiliser l'énergie électrique pendant les heures creuses de la tarification.

Les appareils de production d'ECS sont montés en série sur le circuit hydraulique.

Ils doivent stocker la quantité d'eau chaude nécessaire à la totalité des besoins maximaux journaliers.

L'alimentation en électricité des thermoplongeurs doit être rigoureusement pilotée et programmée en fonction des signaux tarifaires afin d'optimiser le coût d'exploitation du système de production d'ECS.

L'installation comporte d'amont en aval :

- l'arrivée d'eau froide avec ses équipements de contrôle et de sécurité,
- le dispositif de sécurité hydraulique (groupe de sécurité : un par appareil),
- les capacités de stockage, équipées des résistances électriques pour le chauffage de l'eau.

Les capacités sont normalement montées en série avec, un by-pass permettant d'isoler indépendamment chacune le cas échéant.

La température de stockage est en général prise égale à la température de distribution, soit inférieure ou égale à 60°C. [1]

On peut aussi exploiter la chaleur du stockage pour maintenir en température la boucle de distribution, ce qui revient à réduire la puissance souscrite en heures pleines au prix d'un surcoût des capacités de stockage.

Il est possible de réduire le volume du stockage (implantation matérielle difficile à réaliser) en choisissant une température de stock supérieure à 60°C. Il est alors nécessaire de prévoir entre le stockage et la distribution d'ECS un mitigeur thermostatique qui règle la température de distribution par mélange de l'eau chaude sortant des préparateurs avec de l'eau froide.

Les qualités de ce système de production d'ECS sont les suivantes :

- bonne tenue en face des pointes importantes de soutirage liées au volume de stockage important,
- grande stabilité de la température de puisage,
- faiblesse relative de la puissance à mettre en œuvre pour le réchauffage de l'eau,
- bonne adaptation à l'exploitation des heures creuses de la tarification.

Les inconvénients sont les suivants :

- coût des capacités de stockage,
- encombrement de l'installation (difficulté d'implantation),
- pertes thermiques liées aux déperditions des préparateurs à la température de distribution ou au-dessus.

2.3.4 PRODUCTION A ACCUMULATION PAR COMBUSTIBLE

Un système de production d'ECS à accumulation à combustible reprend le même schéma général que celui décrit au paragraphe précédent ; toutefois, l'élément chauffant est ici constitué d'une épingle de réchauffage alimentée par de l'eau chaude en provenance d'une installation de production de chaleur à combustible (fuel, gaz ou charbon).

Le fait d'utiliser un combustible stockable ou à tarification unique (même tarif la nuit que le jour pour le gaz naturel) pour la production de chaleur efface l'intérêt de limiter le chauffage de l'ECS à la période nocturne et conduit à étendre le temps de fonctionnement des réchauffeurs 24 heures sur 24 en fonction des besoins.

L'incidence de ce type de fonctionnement se traduit par la possibilité de réduire le volume du stockage du fait de l'allongement de la période de chauffe journalière. Le critère principal de détermination du volume de

stockage devient le passage des pointes de soutirage de la journée la plus chargée de l'année.

On rencontre des installations de production d'ECS à accumulation de type bi-énergie. Les ballons de stockage sont alors équipés d'un réchauffeur à eau chaude d'une part et de résistances électriques d'autre part.

2.3.5 PRODUCTION PAR ENERGIE SOLAIRE

Le chauffage de l'eau constitue une utilisation rationnelle de l'énergie solaire.

En effet, les niveaux de température obtenus à l'aide d'un capteur solaire plan sont compatibles avec les températures recherchées pour l'ECS.

D'autre part, le réchauffage de l'eau froide (eau de ville entre 10 et 25°C suivant les régions et les saisons) jusqu'à la température d'utilisation ou uniquement en préchauffage permet d'obtenir des rendements d'échange corrects entre le circuit solaire et le circuit d'ECS.

On tient compte dans la décision de réaliser une installation de production d'ECS solaire de la diversité des flux solaires suivant les régions.

Le réseau de captation est constitué d'une boucle alimentant le champ de capteurs et ou non d'un échangeur de chaleur. Cette boucle est mise en circulation par une pompe. Elle constitue le circuit primaire (si échangeur.)

Le fluide employé peut être de l'eau additionnée d'un antigel (glycol) ou tout autre fluide thermique.

Le circuit secondaire de l'échangeur est placé sur le circuit d'alimentation en eau froide de l'installation de production d'ECS.

Un bouclage sur un stockage purement solaire est une solution intéressante.

Un système d'appoint en aval du stockage solaire permet de garantir le niveau de la température de distribution quelles que soient les conditions d'ensoleillement. Cet appoint peut être centralisé ou réparti au niveau des points d'utilisation.

Un dispositif de régulation contrôle le fonctionnement de la boucle de récupération par action sur une vanne à trois voies placée sur le circuit primaire de l'échangeur solaire. La vanne de régulation, qui fonctionne en tout ou rien, by-passe l'échangeur sitôt que l'écart de température entre le secondaire de l'échangeur solaire et la température du fluide caloporteur à la sortie du champ de capteurs ne permet plus de garantir l'efficacité de la récupération d'énergie.

L'intérêt d'une installation solaire réside dans l'utilisation d'une énergie « gratuite », permettant de réduire le coût annuel de la production d'ECS.

Le mot gratuit a été placé entre guillemets, car si le coût du kWh solaire capté ne se trouve effectivement pas facturé à l'utilisateur, l'amortissement des surcoûts (installation et exploitation) d'une installation solaire par rapport à une installation traditionnelle constitue le coût réel de l'énergie solaire.

Les contraintes liées aux installations de production d'ECS solaire de type collective sont :

- l'implantation du champ de capteurs dont la surface devient vite importante et qui doit nécessairement être bien insolée (orientation sud et absence de masque),

- les servitudes de nettoyage des capteurs,
- le volume du stockage nécessaire, dont la localisation peut poser des problèmes,
- l'éloignement entre le champ de capteurs, le stockage solaire et les points d'utilisation, qui crée des pertes thermiques parasites venant dégrader la performance énergétique de l'ensemble,
- l'investissement assez lourd.

On admet en général que pour deux systèmes de même coût global, celui qui met en œuvre le moins de technique et le moins de matériel doit être préféré.

En effet, c'est le système le moins compliqué qui présente le coût d'investissement le plus bas (il privilégie le court terme), qui propose la meilleure garantie contre les risques de pannes et qui en somme évite le mieux les aléas techniques et tarifaires.

Notre choix portera sur le système de production d'eau chaude sanitaire par énergie solaire.

CHAPITRE 3

LE CHAUFFAGE DE L'EAU PAR L'ENERGIE SOLAIRE

3.1 LES SOUS-ENSEMBLES DU SYSTEME DE PRODUCTION

Le système de production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire comportera trois sous-ensembles : (annexe 3 : A3.1 à A3.3)

- un sous-ensemble de captage,
- un sous-ensemble de transfert,
- un sous-ensemble de stockage,

La réduction des consommations d'énergie par rapport à un système classique, dépend du climat, du lieu d'implantation des capteurs solaires, du dimensionnement et de la conception du système, ainsi que du choix des composants et de leur maintenance.

Il est donc nécessaire, de rechercher le meilleur ajustement économique de la taille des équipements solaires aux besoins à satisfaire, ainsi qu'une conception optimale des sous-systèmes, de manière à :

- optimiser le captage et le stockage de l'énergie solaire,
- consommer en priorité l'énergie solaire,

3.2 LE CAPTAGE

Une installation de production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire est généralement constituée de capteurs solaires plans à circulation de liquide qui effectuent la conversion du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, en chaleur et permettent le transfert de cette énergie calorifique en la cédant à un fluide caloporteur.

3.2.1 BILAN ENERGETIQUE GLOBAL

L'équilibre thermique à un instant donné, entre le flux énergétique solaire reçu par le capteur, le flux d'énergie utile que l'on peut en extraire et ses pertes thermiques propres, permet d'écrire l'expression suivante du rendement instantané :

$$\eta = \eta_0 - U (T_m - T_a) / G$$

Selon les principes retenus par la normalisation internationale (ISO) et européenne (CEN), le rendement d'un capteur plan peut être caractérisé par trois coefficients indépendants de la température :

$$\eta = \eta_0 - a_1 T^* - a_2 G (T^*)^2$$

avec :

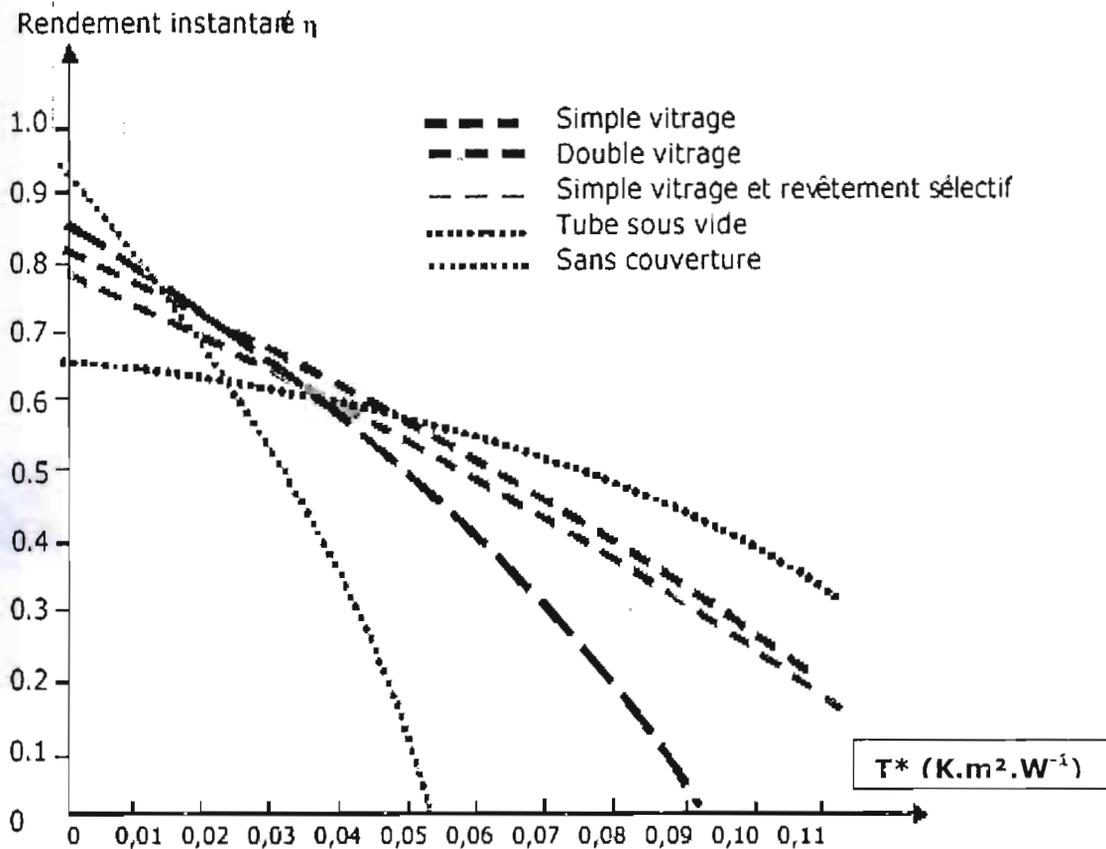
- η_0 : coefficient de conversion optique (%)
- a_1 : coefficient de déperditions thermiques par conduction ($W/m^2 K$)
- a_2 : coefficient de déperditions thermiques par convection ($W/m^2 K^2$)

La figure suivante présente les variations du rendement instantané en fonction de la température réduite $T^* = (T_m - T_a) / G$ pour plusieurs types de capteurs.

T_m : température moyenne du capteur.

T_a : température de l'ambiance.

Fig. 3.1 : les variations du rendement instantané pour plusieurs capteurs.



Pour des valeurs de T^* inférieures à 0,07, on peut raisonnablement représenter ces variations par des relations linéaires.

Le rendement s'écrit alors :

$$\eta = \eta' - a' T^*$$

Dans la norme française NF P50-501, les coefficients η' et a' sont nommés **respectivement** :

- Facteur optique du capteur (B)
- Conductance thermique totale des pertes (K)

3.3 LE TRANSFERT DE L'ENERGIE ET LE STOCKAGE

3.3.1 LE STOCKAGE

Le stockage de l'énergie captée permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température.

Pour apprécier l'efficacité d'un système de stockage, il faut rappeler que le rendement d'un capteur dépend essentiellement de la température moyenne du fluide qui le traverse, donc de la température du fluide au retour du stockage. L'une des caractéristiques essentielles de l'aptitude à l'emploi du stockage sera de fournir, à l'entrée des capteurs, un fluide dont la température sera la plus basse possible.

Le transfert de chaleur des capteurs vers le ballon s'effectue de deux façons différentes :

- par circulation forcée avec une pompe commandée par un dispositif de régulation,
- par circulation naturelle ou thermosiphon.

Les systèmes fonctionnant par thermosiphon présentent l'avantage par rapport aux systèmes habituels avec circulateurs de ne nécessiter aucun dispositif de régulation des apports solaires, ni pompes de mise en circulation du fluide caloporteur. Cependant, dans les faits, les installations en thermosiphon ne concernent généralement que certaines fabrications de chauffe-eau individuels et restent l'exception pour les installations collectives.

En raison des problèmes hydrauliques posés par les champs de capteurs de grandes dimensions, et des contraintes architecturales posées par la disposition des capteurs sous le stockage, la circulation du fluide caloporteur par thermosiphon est, sauf cas particulier, mal adaptée aux installations collectives.

3.3.2 LES ECHANGEURS DE CHALEUR

En zone froide, il est nécessaire de protéger les équipements solaires contre les risques de gel. Dans la plupart des cas, les capteurs sont protégés par un fluide non gélif, ce qui implique la présence d'un échangeur. Cependant pour les pays tropicaux l'emploi d'échangeur semble ne pas être justifié.

En effet la présence de cet échangeur entraîne une baisse du rendement global du système car elle provoque, toutes choses étant égales par ailleurs, une augmentation de la température de l'eau dans les capteurs, et donc une augmentation des pertes thermiques des capteurs.

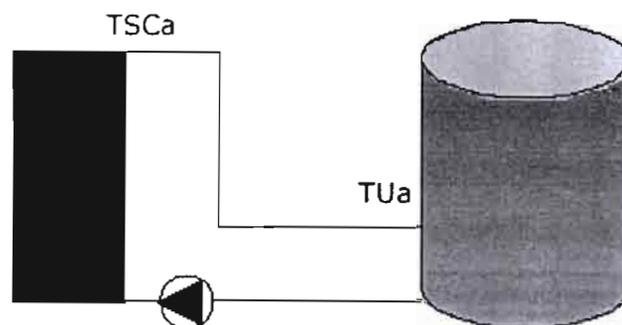
Evaluons la puissance utile P_u en sortie d'un système pour deux variantes (sans échangeur, avec échangeur) par beau temps :

- capteur : caractéristiques $B = 0,8$; $K = 5 \text{ W/m}^2/\text{°C}$.
- Pertes des circuits primaire et secondaire négligeables.
- Puissance incidente : $I = 1000 \text{ W/m}^2$ et température extérieure = 20°C .
- Température moyenne de l'eau dans le capteur : $T_m = 60\text{°C}$.
- Echangeur : coefficient d'échange unitaire $K_{\text{éch1}} = 100 \text{ W/°C}$ par m^2 de capteur.

a) Sans échangeur :

Température à l'entrée du stock $T_{Ua} = T_{SCa}$ (sortie capteur)

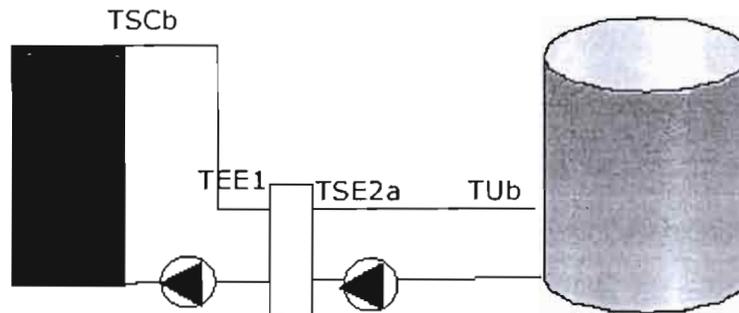
$$P_{Ua} = B \cdot I - K (T_{ma} - T_{\text{ext}}) = 0,8 \times 1000 - 5 (60 - 20) = 600 \text{ W/m}^2$$



b) Avec échangeur :

Température entrée du stock $T_{Ub} = T_{SE2a}$ (sortie secondaire)

Le transfert de la puissance utile à travers l'échangeur nécessite une différence de température $\Delta T_{éch} = T_{EE1} - T_{SE2}$ entre l'entrée côté primaire et la sortie côté secondaire.



Les pertes du primaire étant négligeables, on a :

$$T_{SCb} - T_{Ub} = T_{SCb} - T_{SE2} = T_{EE1} - T_{SE2} = \Delta T_{éch} = P_u / K_{éch1} = 700 / 100 = 7^\circ\text{C}$$

Pour avoir la même température d'entrée du stock : $T_{Ub} = T_{Ua}$, on doit avoir :

$$T_{SCb} - T_{SCa} = T_{SCb} - T_{Ua} = T_{SCb} - T_{Ub} = 7^\circ\text{C}$$

En première approximation, $T_{mb} - T_{ma} = T_{SCb} - T_{SCa}$.

L'échauffement du capteur diminue la puissance utile proportionnellement au coefficient K du capteur :

$$P_{ub} = B \cdot I - K (T_{mb} - T_{ext}) = 0,8 \times 1000 - 5 (60 + 7 - 20) = 565 \text{ W/m}^2$$

On perd 35 W/m^2 et 5% de rendement. On pourra retenir la valeur de 5 W/m^2 perdu par degré d'écart au niveau de l'échangeur.

La perte de rendement Δr par beau temps peut être évaluée, en première approximation, à $\Delta r = K / K_{éch1}$ (dans notre cas, $\Delta r = 5 / 100 = 5\%$).

Le système à concevoir ne comportera pas d'échangeur.

5.3.1 LA REGULATION DU CIRCUIT DE TRANSFERT

Principes

Le principe de base de la régulation d'une installation d'eau chaude collective est simple. Une sonde est située au niveau des capteurs solaires, une autre au niveau du ballon d'eau chaude solaire (au 1/ 9 de la hauteur de la virole). Dès que le capteur est plus chaud que le ballon solaire de quelques degrés, la pompe de circulation est mise en service ; dès que les températures s'équilibrent, la pompe s'arrête. Un simple régulateur différentiel suffit pour ces opérations.

Le rôle du dispositif de régulation est de commander le transfert de l'énergie captée, seulement si la température du fluide caloporteur dans les capteurs est supérieure à celle de l'eau contenue dans le ballon de stockage.

La régulation de type différentiel par mesure des températures dans le ballon et les capteurs sera utilisé.

Le réglage d'un régulateur différentiel

Ce mode de régulation est simple et d'un faible coût d'installation. Son bon fonctionnement dépend essentiellement des réglages des différentiels de températures.

Tableau 3.1 : réglages des différentiels

Réglages des différentiels	Conséquences
ΔT_1 grand ΔT_2 grand	Mise en service retardée le matin. Energie solaire non captée.
ΔT_1 grand ΔT_2 petit	Mise en service retardée le matin. Arrêt retardé le soir : déstockage de l'énergie captée pendant la journée.
$\Delta T_1 \approx \Delta T_2$	Phénomène de pompage

ΔT_1 : valeur ajustable du différentiel d'enclenchement du régulateur

ΔT_2 : valeur ajustable du différentiel d'arrêt du régulateur.

Le phénomène de pompage est indésirable par l'effet d'usure des pompes qu'il entraîne et la baisse du rendement de l'installation qui en résulte. Il se produit d'autant plus facilement que l'écart entre les différentiels d'enclenchement et d'arrêt est faible.

Tableau 3.2 : plages de réglage des différentiels [2]

Régulation différentielle	De manière à assurer de bonnes conditions de fonctionnement des installations, on retient en général les valeurs suivantes : $\Delta T_1 = 5 \text{ K} - 8 \text{ K}$ $\Delta T_2 = 1 \text{ K} - 3 \text{ K}$
---------------------------	--

La régulation est complétée par l'action du régulateur sur une vanne de commutation. Lorsque la température T_{Capt} des capteurs devient inférieure à la valeur $T_{\text{Stock}} + \Delta T_1$ de l'eau dans le ballon, le régulateur commande la mise en service du circulateur.

La vanne V_c est ouverte en position de recyclage du fluide caloporteur sur les capteurs (homogénéisation de la température du circuit de transfert).

Bien que ce principe de régulation soit basé sur le fonctionnement par tout ou rien de la vanne de commutation, il permet de réduire le risque de pompage du circulateur. Par ailleurs, les performances thermiques de l'installation se trouvent améliorées, du fait d'une mise en température plus rapide de la boucle primaire le matin.

Tableau 3.3 : fonction du régulateur différentiel plus vanne de commutation

<p>Régulation différentielle. Vanne de commutation</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si la température T_{capt} du circuit de transfert est supérieure à la température T_{stock} de l'eau dans le ballon ($T_{\text{capt}} > T_{\text{stock}} + \Delta T_1$), le régulateur commande l'ouverture de la vanne de commutation vers le stockage. Il y a échange de chaleur dans le ballon. ▪ Si $T_{\text{capt}} < T_{\text{stock}} + \Delta T_2$, la vanne de commutation ferme le circuit du stockage. Le fluide caloporteur circule directement vers les capteurs. <p>Dans ce cas, si $T_{\text{capt}} < T_{\text{stock}}$, le régulateur commande l'arrêt du circulateur.</p>
--	---

CHAPITRE 4

ETUDE PREALABLE

4.1 L'EVALUATION DES BESOINS EN EAU CHAUDE

Le site est un complexe hôtelier de la catégorie 3/4* et comporte entre autres 4 cellules de 20 chambres, un restaurant de 800 couverts 400 petits déjeuners, des villas R2A et R2B de type F2 et des villas R3B et R4 de type F4 et F5, et une infirmerie de besoin supposé égal à celui d'un logement de type F2.

La consommation journalière d'eau chaude est estimée à 170 litres par chambre pour les cellules, à 16 litres par couvert et 2 litres par petit déjeuner pour le restaurant, et respectivement à 100, 150, 250 litres pour les types F2, F4 et F5. [2]

Le nombre de couverts est estimé à 800 et celui de petits déjeuners à 400.

Dans l'hypothèse où l'on connaît les volumes V_{ecs} (m³/jour) d'eau chaude délivrés aux points de puisage, on peut déterminer les besoins énergétiques journaliers B_{ecs} en kWh/jour, par la relation :

$$B_{ecs} = 1,161 * V_{ecs} * \Delta T$$

Expression dans laquelle ΔT est la différence de température moyenne entre l'eau chaude délivrée aux usagers et l'eau froide du réseau.

4.1.1 LA TEMPERATURE DE L'EAU FROIDE

La consommation d'énergie pour la production de l'eau chaude sanitaire dépend doublement de la température de l'eau froide : plus l'eau est froide, plus il faut d'énergie pour la porter à une température donnée (consigne du stockage par exemple), et plus il faut d'eau chaude, en volume, pour qu'au mitigeage on assure une température constante.

La température de l'eau froide est à 22 °C sur le lieu considéré (Ndayane).

4.1.2 LA TEMPERATURE DE DISTRIBUTION DE L'EAU CHAUDE

Dans les installations de production d'eau chaude sanitaire une température de 60 °C est la limite supérieure pour la distribution.

Réduire cette valeur a pour effet la diminution des pertes en ligne, de la vitesse d'entartrage et de corrosion.

En effet, la vitesse de corrosion serait multipliée par 3 quand la température de distribution passe de 50 °C à 55 °C ; par 20 de 50 °C à 60 °C. [1]

La température de 50 °C semble être l'idéale car il n'y a pas d'antagonisme entre diminution des pertes en ligne et celle de la vitesse d'entartrage ou celle de corrosion.

Cependant l'exigence sur la qualité de l'eau inclue une condition d'hygiène de l'eau conduisant à fixer la température de distribution au-dessus de 50 °C.

En effet, les dépôts de tartre, la présence d'oxydes métalliques (corrosion de l'acier galvanisé...) sont des facteurs de développement de bactérie d'une manière générale et en particulier de la légionelle responsable chez l'homme de la maladie communément appelée « légionellose ».

Tableau 4.1 : Développement de la bactérie [3]

Ralentissement	Développement	Plage de développement maximum	Survie	Destruction
→ 25°C	25°C à 35°C	35 °C à 42 °C	45 à 60°C	60°C →

Un compromis entre la destruction de la légionelle et la diminution des pertes thermiques, de la vitesse d'entartrage et celle de corrosion se trouve être la température de 55 °C, température à laquelle la probabilité de survie de la bactérie est très faible.

On prendra 55 °C pour l'usage sanitaire et 60 °C pour la restauration et la buanderie.

Tableau 4.2 : Les besoins évalués par bâtiment considéré

	1 cellule	restaurant	1 R2A/R2B	1 R3B	1 R4
T_{ef} °C	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
T_{ec} °C	55	60	55	55	55
V_{ecs} l/j	20*170	800*16+400*2	100	150	250
B_{ecs} kwh/j	129,869	598,426	3,819	5,729	9,549

4.2 L'EXPOSITION ENERGETIQUE SOLAIRE DU SITE

Pour un site donné, la quantité d'énergie reçue par les capteurs dépend de l'exposition énergétique du site, et des conditions d'implantation.

Les données relatives au rayonnement solaire peuvent être obtenues à partir des stations météorologiques qui sont réparties sur l'ensemble du territoire.

Le site considéré ne dispose pas de station météorologie cependant sa proximité de la station de Dakar, permet de faire le rapprochement des flux solaires entre Dakar (latitude 14,73°) et le site (latitude 14,25°).

Données météorologiques du site : [4]Tableau 4.3 : Rayonnement global au sol (kWh/m²)

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moy mens	6,212	6,902	7,547	7,547	7,815	7,796	7,713	7,675	7,641	7,459	6,992	5,929
Total annuel (kWh/m ² .an) = 2628												

Tableau 4.4 : Température air sec (°C)

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moy mens	22,6	20,8	20,4	20,4	22,9	25,4	26,6	27,5	27,5	26,6	25,8	23,1

Tableau 4.5 : Température minimale air (°C)

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Moy mens	19,96	19,1	17,7	18,54	21,01	23,57	24,82	25,57	25,29	25,29	23,46	21,27

La température de l'eau froide en moyenne mensuelle est supposée égal à celle du minimum de l'air en moyenne mensuelle.

4.3 L'ETUDE D'IMPLANTATION DES CAPTEURS

Les capteurs solaires seront installés de manière à ce que les périodes durant lesquelles tout ou partie du champ n'est pas ensoleillée du fait d'obstacles environnants soient de faible durée.

On considère que cette condition est remplie si, dans le cas de journées non nuageuses, toute la surface du champ de capteurs bénéficie d'un ensoleillement direct d'au moins 4 heures par jour durant le mois de décembre et d'au moins 8 heures par jour durant le mois de juin. Sous nos latitudes, l'inclinaison normale des capteurs solaires varie en général entre 15 degrés et 30 degrés par rapport à l'horizontale pour une

utilisation annuelle. Cependant, sur des toitures inclinées, les capteurs sont généralement installés dans le plan de la toiture, pour des raisons d'esthétique et de tenue aux charges (vents).(annexe 3 : schémas 6 et 7)

4.4 LES LIAISONS ENTRE LES CAPTEURS

Une installation solaire est composée de capteurs de même marque et de même type. Dans le cas contraire, les absorbeurs doivent être constitués de matériaux de même nature pour éviter les couples métalliques, sources de corrosion interne des capteurs.

Les capteurs seront disposés sur des supports pour le restaurant et intégrés en toiture pour les cellules et les villas :

- tels que la planéité des capteurs soit respectée ; en aucun cas le montage sur les supports ne doit provoquer le gauchissement des capteurs,
- de manière à ce que le côté percé d'orifices d'évacuation des condensats soit situé en partie basse du capteur,
- capables de résister aux charges climatiques extrêmes (vents).

Tous les capteurs doivent également présenter des caractéristiques physiques voisines, notamment en ce qui concerne les pertes de charge. Ce point est particulièrement important, puisqu'il peut être à l'origine de difficultés d'équilibrage hydraulique des batteries de capteurs. Dans tous les cas, on aura avantage à respecter les indications préconisées dans la notice technique établie par le fabricant des capteurs, notamment pour le raccordement des capteurs entre eux et les problèmes de dilatation qui y sont attachés.

Une des causes des écarts fréquemment constatés entre les performances thermiques d'un système solaire mesurées sur un site et celles prévues par le calcul est souvent à attribuer à un mauvais équilibrage du champ de capteurs.

La technique la plus courante pour assurer une bonne répartition des débits consiste à régler sur le site, un jeu de vannes. Cette technique, empirique, donne des résultats aléatoires.

Quelques configurations de couplage hydraulique permettent d'éviter les erreurs de conception les plus fréquentes. Elles ont été établies à partir de logiciels de calculs et de travaux expérimentaux sur sites visant à évaluer la performance réelle d'un système solaire et optimiser le réseau hydraulique. (A. Lebru. « Comportement hydraulique et évaluation des performances thermiques réelles des champs de capteurs ». Document CSTB- Ref.MPE/411-Mai 1985). Ces recommandations ne sont pas exhaustives. Elles sont valables pour les quelques configurations de couplage présentant les meilleures garanties de fonctionnement et pour les débits de fluide couramment utilisés (débit de l'ordre de 40 à 70 l/h.m²).

En règle générale, le raccordement des capteurs et des batteries en boucles de Tickelman est envisageable. Toutefois, il convient de veiller à adapter le diamètre des collecteurs au nombre de capteurs et à la perte de charge de ceux-ci. (annexe 3 : schéma 5)

En effet, afin d'assurer une certaine égalité des débits dans les différents capteurs, il est nécessaire que le rapport :

Perte de charge dans les collecteurs/Perte de charge dans les capteurs

soit le plus faible possible, c'est à dire que le rapport :

Diamètre interne des collecteurs/Diamètre interne des circuits hydrauliques des capteurs

soit le plus faible possible (rapport compris entre 1,6 et 3,3). [2]

D'autres types de configurations peuvent également être envisagés :

- raccordement en parallèle,

- raccordement en séries parallèles.

Dans tous les cas, on évitera de raccorder plus de 5 à 6 capteurs dans une même batterie. [2]

4.5 LES TUYAUTERIES

Le choix de la nature des tuyauteries et des éléments des circuits hydrauliques doit être effectué conformément aux Règles de l'Art et de la Plomberie (norme NFP 41-201 et DTU de la série 60), et à la réglementation sanitaire en vigueur.

En particulier :

- les tubes en acier galvanisé ne doivent pas être utilisés pour véhiculer de l'eau dont la température est supérieure à 60 °C. De plus, ils ne doivent pas être placés en aval de portions de circuit en cuivre, laiton ou en bronze,
- l'emploi de tubes nus ou ayant fait l'objet d'un revêtement interne ou d'un traitement de surface est autorisé, sous réserve qu'ils soient inertes vis à vis de l'eau sanitaire.

On utilisera, sauf dispositions contraires portées dans le Cahier des Prescriptions Techniques Particulières annexé à chaque Avis Technique, les tubes en cuivre conformes à la norme NF A 51-120, d'épaisseur supérieure ou égale à 0,8 mm.

Le dimensionnement du circuit hydraulique conduit à calculer le diamètre des tuyauteries, connaissant d'autres facteurs qui interviennent dans l'écoulement :

- le débit du fluide,
- sa masse volumique et sa viscosité.

Les tuyauteries du circuit de transfert doivent être d'un diamètre suffisant pour permettre la circulation du fluide caloporteur au débit recommandé, en général 40 à 70 l/h par m² de capteur, avec une vitesse de circulation inférieure ou égale à 1m/s. [2]

Plusieurs diamètres sont envisageables. Il faut cependant remarquer que :

- si on diminue le diamètre des tuyauteries, les pertes de charges augmentent, ce qui entraîne un accroissement de la force motrice à mettre en oeuvre (pompes de circulation),
- si on augmente le diamètre, les pertes de charges et la force motrice diminuent, mais les pertes thermiques augmentent et les frais d'installation deviennent plus importants.

4.6 LE STOCKAGE

La bonne configuration consiste à positionner le ou les ballons de stockage à proximité du champ de capteur, de manière à réduire au maximum les longueurs de tuyauteries et de limiter les pertes thermiques.

La capacité unitaire des ballons sera choisie, dans la mesure du possible, parmi la gamme d'appareils du commerce, compte tenu de la place disponible pour leur implantation. Ainsi, le nombre de ballons nécessaires sera choisi pour rendre les plus aisés possibles, l'installation, l'entretien et le remplacement des équipements. Sauf prescription particulière, ce nombre sera au maximum de 2 ou 3. [2]

Les ballons de stockage seront calorifugés. Sauf cas spécifique (surface de capteurs < 20 à 30 m²), les ballons de stockage sont des ballons type « Tampon ECS » dépourvus d'échangeur de chaleur incorporé. [2]

CHAPITRE 5

ETUDE DETAILLEE

5.1 LE PRINCIPE DU DIMENSIONNEMENT

Il n'est pas réaliste de vouloir couvrir 100 % des besoins d'eau chaude sanitaire en utilisant seulement l'énergie solaire dans les zones froides.

Cependant pour les régions tropicales comme le Sénégal avec un ensoleillement notoire, une installation purement solaire semble être une solution intéressante pour la production d'eau chaude sanitaire.

Couvrir les besoins en eau chaude sanitaire avec un système purement solaire est un problème complexe qui nécessite une bonne évaluation des besoins et l'utilisation d'outils de calcul spécifiques afin de produire un maximum d'énergie solaire à un coût compétitif.

En effet, le coût du kWh produit dépend essentiellement de deux paramètres :

- le coût de l'installation par m^2 de capteur,
- la productivité de l'installation (production par m^2 de capteur et par an).

Le coût de l'installation peut être approché par une formule relativement simple. En particulier, il dépend de façon quasi-linéaire de la surface de capteur.

Par contre la productivité des capteurs n'est pas définissable de façon simple. Elle décroît quand la surface de capteurs croît : le dernier mètre carré de capteurs produit moins d'énergie que le premier.

Par conséquent, toute augmentation de la surface de capteurs au-delà de la taille optimale de l'installation entraîne une augmentation de la production solaire mais aussi une augmentation du coût du kWh produit. Le mauvais dimensionnement d'un des autres composants du système (stock, échangeur, circuits, régulation) peut pénaliser sensiblement cette productivité.

La méthode de dimensionnement présentée ici s'appuie sur une méthode de calcul des performances d'un système de production d'eau chaude sanitaire solaire simple mais fiable afin de bien prendre en compte les phénomènes exposés ci-dessus.

5.2 EVALUATION DES PERFORMANCES DU SYSTEME

5.2.1 LA PRODUCTION INSTANTANEE DU CAPTEUR SOLAIRE

Équation fondamentale

La production énergétique instantanée d'un capteur solaire peut être définie par une équation caractéristique simple dans laquelle le capteur est caractérisé par sa surface et par deux coefficients caractéristiques. Cette équation admet différentes formes suivant la température de fluide qui sert de référence.

On utilise la température moyenne du fluide dans le capteur comme servant de référence. Au niveau de la normalisation internationale, on utilise plutôt la température d'entrée du fluide.

On a ainsi les deux écritures :

$$P_u = S*(B*I - K(T_{fm} - T_e)) \quad \text{ou} \quad : P_u = S*(F_{\tau\alpha}*I - F_{rUI}(T_{fe} - T_e))$$

Avec :

P_u : puissance utile (W/m^2)

I : flux de rayonnement disponible sur le plan des capteurs (W/m^2)

T_e : température ambiante ($^{\circ}C$)

T_{fe} : température d'entrée du fluide dans les capteurs ($^{\circ}C$)

T_{fm} : température moyenne du fluide dans les capteurs ($^{\circ}C$)

S : surface des capteurs (m^2)

$B, F_{\tau\alpha}$: coefficient caractéristique des gains du capteur (sans dimension)

K, F_{rUI} : coefficient caractéristique des pertes du capteur ($W/m^2/^{\circ}C$)

Définition des coefficients caractéristiques

En toute rigueur, les coefficients caractéristiques sont des variables dépendant des conditions régnant à un moment donné. En pratique, un capteur donné peut être caractérisé par un couple unique (B, K) ou ($F_{\tau\alpha}, F_{rUI}$) déterminé par mesure dans des conditions normalisées.

On peut évaluer les performances d'une installation solaire utilisant ce type de capteur à partir de ces valeurs normalisées qui figurent, par exemple, dans les avis techniques des capteurs commercialisés.

Le coefficient B est généralement compris entre 0,7 et 0,8 pour les capteurs plans, entre 0,5 et 0,8 pour les capteurs sous vide (à incidence normale). [2]

Le coefficient K est généralement compris entre 3 et 10 $W/m^2/^{\circ}C$ pour les capteurs plans, entre 1,5 et 3 $W/m^2/^{\circ}C$ pour les capteurs sous vide.

Les valeurs de $F_{\tau\alpha}$ et F_{rUI} sont légèrement plus faibles que celles de B et K . On peut calculer assez facilement une valeur approchée des uns à partir des autres. Nous utilisons ici B et K , seuls normalisés actuellement en France.

Surface de capteur

Il existe plusieurs définitions possibles de la surface d'un capteur. Les termes les plus couramment utilisés sont ceux de "surface hors tout" et de "surface utile" :

- la surface hors tout (S_{ht}) est la surface supérieure du coffre du capteur,
- la surface utile, plus petite, est la surface d'entrée (S_e) du rayonnement (vitrage).

La surface hors tout permet de mieux prendre en considération les problèmes d'encombrement tandis que la surface utile est plus significative en terme de rendement thermique.

L'écart entre ces valeurs est faible pour les capteurs plans (5% à 10%), plus important pour les capteurs sous vide (10% à 20%). [2]

Les caractéristiques données par les constructeurs font référence à l'une ou l'autre de ces surfaces ou aux deux. Les avis techniques du CSTB donnent la surface d'entrée et la surface hors tout. En pratique, on peut utiliser l'une ou l'autre pourvu que toutes les caractéristiques fassent référence à la même définition de la surface. Dans le cas contraire, on risque de commettre des erreurs significatives sur les bilans énergétiques et économiques. En particulier dans le calcul des performances, on utilisera les paramètres caractéristiques des capteurs (coefficients B et K) définis pour la surface de référence choisie.

5.2.2 INTERACTION ENTRE CONSOMMATION, PRODUCTION ET STOCK

La production solaire et les besoins varient dans le temps de façon totalement indépendante.

En raison de l'inertie thermique, ces discordances sont sans importance à l'échelle de quelques minutes mais ne le sont plus à l'échelle d'une heure, a fortiori d'un jour ou d'un mois.

La production journalière est ainsi, par exemple, plafonnée par les besoins journaliers.

L'utilisation d'un stock approprié permet de gagner un ordre de grandeur en lissant les variations à l'échelle d'une journée. La discordance entre profils journaliers de rayonnement solaire et de consommation d'eau chaude n'a plus qu'un impact limité mais la production journalière reste plafonnée par les besoins journaliers.

Par contre, il est, actuellement, à peu près impossible de compenser les discordances sur des échelles de temps longues, en particulier celles qui sont liées aux fortes variations saisonnières du rayonnement solaire.

5.2.3 INTERACTION ENTRE DEFINITION DU SYSTEME, ETAT DU SYSTEM ET PRODUCTION

La présence d'un stock évite les surplus temporaires de production mais n'élimine pas toute influence des variations des apports solaires et de la consommation.

En effet, dans l'équation fondamentale vue plus haut, les termes $S \cdot K(T_{fm} - T_e)$ ou $F_{rUI} \cdot (T_{fe} - T_e)$ caractérisent les pertes thermiques du capteur. Ils sont proportionnels à la différence de température entre le fluide interne et l'air ambiant.

Si on a un stock à température uniforme T_S et pas d'échangeur, on a :

$T_{fe} = T_S - \varepsilon$. (ε représente le refroidissement du fluide dans le circuit entre stock et capteur).

Même dans ce cas simple, T_{fe} varie en permanence car T_s varie en fonction des apports solaire et du puisage d'eau chaude. La stratification éventuelle du stock, la présence d'un échangeur, la régulation des pompes de circulation ont aussi une influence sur T_{fe} donc sur la puissance utile P_u à l'instant t qui dépend donc :

- des caractéristiques des capteurs,
- des autres paramètres du système : schéma, échangeur, stock, régulation,
- du profil des apports solaires,
- du profil de puisage.

Les performances d'un capteur dépendent donc fortement de la température du fluide dans le capteur.

5.2.4 CONSEQUENCE SUR LA DEFINITION ET L'EVALUATION DU SYSTEME

La production utile d'une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire dépend de façon complexe de différents paramètres : données météorologiques, besoins, schéma, dimensionnement.

On ne peut donc pas définir la production journalière, mensuelle ou annuelle par une équation simple.

Le dimensionnement vise en général à obtenir un compromis acceptable entre deux objectifs contradictoires :

- un taux de couverture solaire C_s élevé, et
- un rendement élevé, car en augmentant C_s , on favorise les sources principales de pertes thermiques :
 - les surplus temporaires de production,
 - les pics de température dans les capteurs.

5.3 OUTILS DE CALCUL DES PERFORMANCES DU SYSTEME

5.3.1 LES FAMILLES D'OUTILS

Tous les outils de calcul des performances des installations solaires ECS utilisent l'équation fondamentale définissant la production instantanée d'un capteur. Ils prennent en compte les autres composants du système (modèle spatial) et l'évolution du système au cours du temps (modèle temporel) pour en déduire les performances du système.

On peut ainsi distinguer deux familles d'outils :

- Les outils détaillés calculent explicitement T_{fm} , et plus généralement l'état détaillé du système heure par heure et jour par jour et en déduisent les bilans énergétiques sur une période quelconque (exemple : TRNSYS). Les outils détaillés permettent une compréhension fine du comportement du système. Ils reposent sur des modèles physiques précis : on connaît la température en sortie de capteur le 13 juillet à 13h30. Le pas de temps du calcul varie de 1 minute à 1 heure. Une année de simulation implique donc des milliers de calculs.
- Les outils simplifiés utilisent des équations semi-empiriques qui prennent en compte les différentes données pour définir la production énergétique journalière (exemple : SOLO). Les outils simplifiés fournissent seulement des bilans énergétiques journaliers, en moyenne mensuelle. Ils reposent sur des modèles physiques simplifiés, recalés et validés à partir de modèles détaillés et d'expériences. Une année de simulation implique seulement les 12 calculs des 12 journées moyennes mensuelles.

Les outils détaillés ont longtemps été pénalisés par des temps de calcul longs. Ce n'est plus le cas aujourd'hui puisqu'une année de simulation ne nécessite que quelques secondes de calcul sur un micro-ordinateur récent.

On aurait pu penser que les outils détaillés tendraient à éliminer les outils simplifiés, a priori moins précis. Ce n'est pas le cas car le gain de précision sur les bilans n'est pas réellement significatif en matière de dimensionnement et il se paye par une certaine lourdeur d'utilisation, en raison de la quantité et de la précision des données nécessaires.

Ainsi, par exemple, un outil de calcul détaillé nécessite des données météorologiques très détaillées, au minimum, une année-type heure par heure au moins, soit 8760 valeurs par paramètre. Avec un outil simplifié, on utilise des données journalières en moyenne mensuelle, soit 12 valeurs par paramètre. Les données détaillées sont rares et il est difficile de juger leur représentativité. Comment mesurer le gain de précision s'il est impossible de juger de la précision ou de la représentativité des données ?

L'utilisation des résultats détaillés (états successifs du système) présente un grand intérêt pour la mise au point de schémas spécifiques ou l'analyse du comportement d'une régulation mais c'est une tâche lourde et disproportionnée, lorsqu'il s'agit de dimensionner une installation solaire classique reposant sur des règles validées.

Les outils simplifiés sont donc mieux adaptés au dimensionnement. Les outils détaillés, bien qu'utilisables, n'apportent rien de plus, hors installations spécifiques, tout en étant complexes et coûteux. Ils ne sont donc pas utilisés ici.

5.3.2 UN OUTIL SIMPLIFIE : SOLO

Les outils simplifiés les plus connus en France sont F-chart et SOLO. Il s'agit de méthodes anciennes, reconnues, disponibles sous forme d'outils informatiques relativement conviviaux. Ces outils fournissent les bilans énergétiques journaliers en moyenne mensuelle d'une installation solaire.

L'origine américaine de F-chart complique un peu son utilisation car les outils informatiques associés n'intègrent pas les données météorologiques de certaines zones de la Francophonie et utilisent ($F_{\tau\alpha}$, F_{rUI}) plutôt que (B , K). De plus, les performances semblent systématiquement pessimistes en hiver hors des zones les plus ensoleillées.

SOLO est une méthode de calcul développée par le CSTB. Différents outils informatiques reposent sur cette méthode (logiciels pour micro-ordinateur, serveur minitel, site Internet). Ces outils utilisent la même méthodologie de calcul à quelques différences minimales près.

Ils intègrent toute une base de données météorologiques importante et une base de composants (en particulier les caractéristiques des capteurs solaires courants en France).

Dans les différents outils basés sur SOLO, la saisie des données d'une installation ne prend que quelques minutes.

Le calcul proprement dit est quasi-instantané. Une demi-heure suffit pour tester plusieurs variantes de dimensionnement.

SOLO calcule la production solaire à l'aide d'équations semi-empiriques qui ont été établies en traitant des cas-types avec une méthode détaillée.

La démarche adoptée est la suivante. Les données nécessaires sont précisées ci-dessous.

a) On calcule les besoins énergétiques journaliers en moyenne mensuelle :

- consommation journalière et température d'eau froide en moyenne mensuelle,
- température de consigne de l'eau chaude supposée constante sur l'année.

b) On calcule le rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur le plan des capteurs par des méthodes classiques utilisant d'une part les données astronomiques et la géométrie, d'autre part des corrélations statistiques sur le rayonnement solaire :

- rayonnement global horizontal journalier en moyenne mensuelle,
- inclinaison et orientation des capteurs.

c) On calcule le taux de couverture solaire en moyenne mensuelle par une équation empirique complexe utilisant les résultats des points a) et b) :

- type de schéma,
- capteurs : surface totale S , paramètres B et K ,
- stock : volume V , constante de refroidissement C_R , intérieur ou extérieur,
- circuit primaire (coefficient de pertes K_t) et échangeur (coefficient d'échange $K_{éch}$),
- Note : plusieurs outils prédéfinissent les valeurs de K_t et $K_{éch}$.

d) On en déduit les bilans énergétiques journaliers, mensuels et annuel.

SOLO permet d'analyser rapidement les conséquences d'un choix de conception ou de dimensionnement ou d'une évolution des besoins. La saisonnalité est prise en compte.

Enfin, les résultats obtenus ont été validés par l'expérience, en particulier par son utilisation depuis plus de 10 ans en Garantie de Résultats Solaires.

5.4 METHODOLOGIE DE DEFINITION ET DE DIMENSIONNEMENT

La méthodologie de définition et de dimensionnement présentée ici est centrée sur l'évaluation des performances par la méthode SOLO et se décompose en 5 étapes :

Etape 1 - Recueil des données nécessaires

Etape 2 - Définition des principes de l'installation

Etape 3 - Pré-dimensionnement des composants principaux

Etape 4 - Optimisation du dimensionnement en calculant les bilans de variantes de l'installation initiale

Etape 5 - Finalisation de la définition et du dimensionnement de l'ensemble des composants.

5.4.1 RECUEIL DES DONNEES NECESSAIRES

Données nécessaires concernant les besoins en eau chaude (SOLO)

Ce sont :

- La température de consigne de l'eau chaude supposée constante sur l'année, elle est égale à 55 °C pour les cellules et les villas. Pour l'infirmierie et le restaurant, elle est égale à 60°C.
- La consommation journalière en moyenne mensuelle, elle peut varier suivant les périodes de l'année et selon le type de consommation.

En effet pour un usage sanitaire collectif cette consommation est plus prononcée en saison humide qu'en saison sèche qu'on appellera respectivement par la suite « l'hiver » et « l'été. »

Pour tenir compte de ces variations progressives dans le dimensionnement, on se fixe des coefficients de répartition mensuelle (C_m).

Par contre pour un usage individuel ou pour la restauration la consommation journalière en moyenne mensuelle peut être prise comme une constante. Elle est égale à :

- Restaurant 13600 litres par jour
- Villas R2A et R2B 100 litre par jour
- Villa R3B 150 litre par jour
- Villa R4 250 litre par jour.

Les coefficients de répartition mensuelle et la consommation journalière en moyenne mensuelle pour une cellule figurent dans le tableau ci-dessous

Tableau 5.1 : La consommation journalière en moyenne mensuelle (litre/jour) pour une cellule.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
C_m	1.09	1.06	1.015	1	0.97	0.926	0.897	0.912	0.956	1	1.073	1.101
cons (l/j)	3700	3600	3450	3400	3300	3150	3050	3100	3250	3400	3650	3750

Critères et contraintes

Les critères de décision sont définis avec le maître d'ouvrage. On cherche à maximiser la rentabilité économique de l'investissement, mais il complète ce critère par la contrainte suivante :

Assurer un taux de couverture solaire minimal de 90% en période de forte consommation.

Données météorologiques nécessaires (SOLO)

Les données météorologiques nécessaires à SOLO sont :

- le rayonnement global journalier dans le plan horizontal en moyenne mensuelle (tableau 4.3),
- la température moyenne mensuelle (tableau 4.4),
- la température d'eau froide en moyenne mensuelle (tableau 4.5).

Données nécessaires sur les caractéristiques des composants (SOLO)

Ce sont :

- La surface unitaire et coefficients B & K des capteurs solaires,
- Le volume et la constante de refroidissement des ballons de stockage.

L'outil utilisé intègre une base de données des caractéristiques des capteurs et des ballons.

Pour ces derniers, on peut aussi utiliser la formule :

$$C_R = 24/V_b (1,1+0,05/V_b)*h*S_b \text{ avec } 1/h=1/10+e_{iso}/k_{iso}$$

avec :

V_b : volume du ballon (m^3) ;

S_b : surface extérieure du ballon (m^2)

e_{iso} : épaisseur de l'isolant (m) ;

k_{iso} : conductivité de l'isolant (W/m/K)

5.4.2 CHOIX DES SCHEMAS DE PRINCIPE DU SYSTEME

Deux critères les différencient :

- la présence et la nature d'un échangeur éventuel entre capteur et stock
- le moteur de la circulation du circuit capteur : Thermosiphon ou pompe.

On n'utilisera pas d'échangeur entre capteurs et ballon, les circuits capteur-ballon seront directs, et la circulation sera forcée pour les cellules et le restaurant.

Pour les villas et l'infirmierie, la circulation se fera par thermosiphon et le circuit de transfert ne comportera pas d'échangeur.

5.4.3 DEFINITION DES TYPES DE COMPOSANTS

Une fois les schémas de principe déterminés, on peut limiter le choix des composants en définissant leur type.

Capteurs

Pour une application de production d'eau chaude sanitaire, on utilisera des capteurs plans. Les particularités du site peuvent guider le choix précis du type de capteur. Par exemple, on privilégiera les capteurs plans de performances élevés (B élevé et K faible) si on est dans un des deux cas définis ci-dessous :

- surface disponible limitée et recherche d'un taux de couverture élevé,
- besoins d'eau chaude à haute température et taux de couverture élevé.

A cet effet les types capteurs utilisés sont :

- des capteurs plans, Zenit Thermic ($B=0,77$ et $K=3,62 \text{ w/m}^2/\text{°C}$)
- des capteurs plans, J. Giordano Ind. C8/8S ($B=0,77$ et $K=4,49 \text{ w/m}^2/\text{°C}$).

Ballons de stockage

Le stock sera composé d'un ou plusieurs ballons équipés d'une isolation thermique.

5.5 PRE-DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME

Nous avons choisi une méthode de dimensionnement en deux temps :

- pré-dimensionnement simple en tenant compte des contraintes,
 - ajustement du pré-dimensionnement en fonction des résultats de SOLO.
- L'ajustement sera fait en effectuant plusieurs simulations avec SOLO. L'idée est de réduire progressivement les plages admissibles pour les différents paramètres du dimensionnement.

5.5.1 PROBLEMATIQUE DU PRE-DIMENSIONNEMENT

Sur la base des principes (schéma et composants) définis dans l'étape précédente, on doit définir les ensembles de valeurs des paramètres principaux qui devront être validés à l'aide d'un calcul de performances par SOLO. Un bon pré-dimensionnement permet de limiter significativement le nombre de calculs à effectuer. Il concerne essentiellement la surface de capteurs (S_c) et le volume du stock (V_s).

On définit donc d'abord un couple central (S_{c0}, V_{s0}). Sauf exception, on est certain que les valeurs optimales respectives de S_c et V_s seront comprises dans les intervalles [$S_{c0}-50\%$, $S_{c0}+50\%$], [$V_{s0}-50\%$, $V_{s0}+50\%$] dans tous les cas.

Compte tenu de l'objectif limité du pré-dimensionnement, il est généralement possible de dimensionner séparément les capteurs et le stock. Ceci ne sera plus vrai lors du dimensionnement fin.

5.5.2 PRE-DIMENSIONNEMENT DES CAPTEURS SOLAIRES

Valeur centrale

La surface de capteurs S_c est la variable essentielle car elle conditionne le coût et la production utile du système. Dans notre approche, le pré-dimensionnement de S_c se fait sur la base du volume d'eau chaude consommé quotidiennement V_j .

On définit S_{c0} de façon à avoir un ratio V_j/S_{c0} égal à 75 litres/m². [2]

Il est réducteur de ne considérer que la seule consommation d'eau chaude.

Plage autorisée

En pré-dimensionnement, l'objectif est de définir une plage de variation intégrant les bonnes valeurs.

Vouloir définir finement a priori la valeur centrale afin d'avoir une plage de variation réduite complique les calculs sans apporter la garantie exhaustive sur les paramètres à prendre en compte.

Il est donc plus simple de prendre une valeur centrale approximative et une plage de variation plus étendue.

Notons également, qu'à ce niveau d'imprécision, il est inutile de faire la différence entre la surface utile et la surface hors-tout.

La plage autorisée sera l'intervalle $[S_{cMinp}, S_{cMaxp}] = [S_{c0}-50\%, S_{c0}+50\%]$

Choix de l'inclinaison

Le choix de l'inclinaison dépend essentiellement de deux paramètres :

- la latitude,
- la saisonnalité des besoins.

Pour faciliter la définition des supports on utilisera des inclinaisons standards (15° et 30°) car une variation de quelques degrés autour de la valeur optimale a une très faible influence sur les résultats.

En conséquence, on peut appliquer les règles de pré-dimensionnement suivantes : [2]

- Si la consommation est constante ou quasi-constante sur l'année, l'angle d'inclinaison sur l'horizontale sera proche de la latitude afin qu'à l'équinoxe, l'incidence du rayonnement solaire soit normale à midi.
- Si la consommation est plutôt hivernale, on augmentera l'inclinaison de 15° afin d'avoir une incidence plus proche de la normale en hiver.

- Si la consommation est nettement estivale, on diminuera l'inclinaison de 15° afin d'avoir une incidence plus proche de la normale en été.

Pour une latitude égale à $14,25^\circ$ on prendra une inclinaison initiale, $Incl_0$ égale à 15° par rapport à l'horizontale pour le restaurant.

La consommation des cellules étant hivernale l'inclinaison des capteurs sera de 30° par rapport à l'horizontale.

5.5.3 PRE-DIMENTIONNEMENT DU STOCK

Valeur centrale

On définit le volume du stock en fonction de la consommation journalière :

$$V_{s0} = \text{Max}(V_{jr}, V_{j\text{été}})$$

avec :

- V_{jr} : consommation moyenne journalière sur la période de fonctionnement.

- $V_{j\text{été}}$: consommation moyenne journalière sur la période mai-septembre.

On veillera à tenir compte, prioritairement de la consommation d'été, car le stockage a entre autres fonctions, de limiter les surplus temporaires de production qui sont plus probables en été.

Plage autorisée

La plage autorisée est définie de manière similaire à la plage autorisée pour le dimensionnement de la surface de capteurs :

$$[V_{s\text{Min}}, V_{s\text{Max}}] = [V_{s0}-50\%, V_{s0}+50\%]$$

Contraintes liées à la méthode

La méthode SOLO n'est validée que pour un certain domaine d'utilisation (surface et volume).

Le contrôle du respect de ce domaine est généralement effectué automatiquement par les outils basés sur SOLO. On veillera, en particulier à ce que la condition suivante soit vérifiée, pour rester dans le domaine de validité de la méthode de calcul :

$$20 < V_s/S_c < 300. [2]$$

En pratique, ce ratio est toujours respecté avec les règles de pré-dimensionnement proposées.

5.5.4 DIMENSIONNEMENT DES CAPTEURS ET DU STOCK

Une fois les données nécessaires recueillies et le pré-dimensionnement effectué, la méthode SOLO est utilisée pour effectuer un dimensionnement final et calculer les performances de l'installation choisie.

La surface de capteurs S_c et le volume du stock V_s restent les paramètres essentiels du dimensionnement. Ils ne peuvent plus être considérés indépendants. On devra donc tester différents couples (S_c, V_s) et comparer les résultats obtenus sur la base des critères et des contraintes du projet. Le pré-dimensionnement a donné un couple central (S_{c0}, V_{s0}) et des valeurs extrêmes (S_{cmin}, S_{cmax}) et (V_{smin}, V_{smax}) .

On pourra utilement tester les couples suivants : (S_{c0}, V_{s0}) , (S_{c0}, V_{smin}) , (S_{c0}, V_{smax}) , (S_{cmin}, V_{s0}) , (S_{cmax}, V_{s0}) afin de bien déterminer les différentes variantes possibles de dimensionnement.

5.6 AJUSTEMENT DES DONNEES RELATIVES AUX CAPTEURS ET AU STOCK

Différentes techniques sont envisageables en fonction de l'expérience du concepteur et de la complexité du problème. Cependant, la démarche ci-dessous permet généralement d'aboutir à un résultat satisfaisant :

a) Définition d'une surface pseudo-optimale

- On utilise pour l'inclinaison des capteurs et pour le volume de stock les valeurs pré-dimensionnées V_{s0} et $Incl_0$. On effectue les calculs avec la méthode SOLO pour 3 valeurs de surface pré-dimensionnées : S_{cmin} , S_{c0} , S_{cmax} . On obtient ainsi les performances détaillées de ces installations (énergies, couverture solaire, productivité...).
- On en déduit la plage réduite (S_{cmin}, S_{c0}) , (S_{c0}, S_{cmax}) ou la plage de taille $(S_{cmax} - S_{cmin})/2$ centrée sur S_{c0} .
- On répète l'opération jusqu'à obtenir une valeur pseudo-optimale S_{c0}' . La précision cherchée sera au mieux égale à la taille unitaire du capteur.

b) Ajustement de l'inclinaison et du volume du stock

- On effectue les simulations pour les triplets $(S_{c0}', Incl_0, V_{smin})$, $(S_{c0}', Incl_0, V_{smax})$, $(S_{c0}', Incl_{Min}, V_{s0})$, $(S_{c0}', Incl_{Max}, V_{s0})$.
- Pour l'inclinaison, la meilleure valeur est en général directement choisie. Pour le volume, la plage est réduite comme pour la surface et on répète le calcul.

c) optimisation de la surface de capteurs

Si on s'est sensiblement éloigné des valeurs pré-dimensionnées de l'inclinaison et du volume du stock, on reprend l'ajustement précis de la surface de capteurs en se basant sur les valeurs finales de l'inclinaison et du volume du stock. On ne teste qu'une plage très réduite autour de la valeur pseudo-optimale S_{c0}' : au pire $[S_{c0}'-10\%, S_{c0}'+10\%]$, souvent $[S_{c0}'-5\%, S_{c0}'+5\%]$, en fonction des différences observées sur les résultats obtenus.

5.7 DIMENSIONNEMENT DE LA TUYAUTERIE ET DE LA POMPE

Le rôle du circuit de transfert est d'assurer la circulation de l'eau entre les capteurs et le stock.

Ce circuit comprend :

- des tuyauteries de circulation isolées,
- une pompe de circulation,
- des accessoires de sécurité (vannes d'isolement, clapets anti-retour, vannes de réglages du débit, purgeurs, vase d'expansion)

Dimensionnement hydraulique (annexe 2 : tableaux A2.7 et A2.7)

Les paramètres de dimensionnement sont : le débit, le diamètre des tuyauteries, la puissance des pompes.

Le débit est proportionnel à la surface de capteurs. On utilise en général des débits voisins de 50 litres par mètre carré de capteur. [2]

Les dimensionnements des tuyauteries et des pompes sont liés. En effet, il s'agit d'assurer le débit prévu dans les capteurs. En particulier, la perte de charge totale du circuit (capteurs compris) doit être inférieure à la perte de charge autorisée pour la pompe au débit prévu.

Le dimensionnement des tuyauteries sera défini pour respecter cette contrainte sur la perte de charge. La configuration et la longueur des tuyauteries étant généralement imposées, on devra jouer sur le diamètre des tuyauteries et éventuellement sur la puissance de la pompe.

On veillera à ne pas dépasser dans les tuyauteries une vitesse de 1 m/s. [2]

Si on suppose un débit de $50 \text{ l/m}^2/\text{h}$, cette condition impose une section interne des tuyauteries, exprimée en mm^2 , voisine de 14 fois la surface de capteurs (exprimée en m^2).

Par exemple, pour 51 m^2 de capteurs, on pourra avoir des collecteurs généraux de diamètre interne 30 mm (section 714 mm^2). [2]

Les pompes sont dimensionnées pour vaincre les pertes de charge du circuit sous la vitesse de circulation maximale autorisée par l'implantation du circuit hydraulique.

La perte de charge globale dépend de la configuration de l'installation. La perte de charge moyenne linéique sera typiquement de l'ordre de 10 mm de colonne d'eau par m de collecteur principal. [2]

Pour le reste du circuit de transfert, la perte de charge linéique est calculée avec la formule de Flamant : $j \cdot D = 0,00092 \cdot (7 \cdot v)^{1/4}$ avec j la perte de charge linéique, D le diamètre de la conduite et v la vitesse d'écoulement.

La puissance du moteur (en Watt) est déterminée par la relation :

$$P = (K \cdot Q \cdot H \cdot \rho \cdot g) / R$$

dans laquelle :

- Q est le débit en m^3/s ,
- H est la hauteur manométrique en mètres de colonne d'eau, calculée en tenant compte des pertes de charge du circuit et de la nature du fluide caloporteur,
- ρ est la masse volumique du fluide caloporteur en kg/m^3 ,
- g est l'accélération de la pesanteur en m/s^2 ,
- R est le rendement de l'ensemble pompe/moteur, qui devra être supérieur à 80%. [2]
- K est un coefficient de surpuissance, compris entre 1,15 et 1,25 pour s'affranchir des pertes de charge dues à l'entartrage des circuits. [2]

Isolation thermique

Une mauvaise isolation des tuyauteries peut dégrader de manière notable, les performances d'une installation solaire.

Pour limiter les pertes thermiques, les tuyauteries doivent être les plus courtes possibles.

On évitera en général de dépasser 3 m linéaires par m² de capteur solaire.[2]

L'épaisseur de l'isolant thermique des tuyauteries est choisie en fonction de ses propriétés thermiques. La résistance thermique du calorifugeage doit être au moins égale à celle d'un matériau de conductivité thermique $\lambda = 0,04 \text{ W /m}^2/\text{°C}$, dont l'épaisseur sans finition est indiquée dans le tableau suivant.

Tableau 5.2 : Epaisseur de l'isolant $\lambda = 0,04 \text{ W /m}^2/\text{°C}$ suivant le diamètre

Diamètre de la tuyauterie (mm)	Epaisseur de l'isolant $\lambda = 0,04 \text{ W /m}^2/\text{°C}$ (mm)
<60	30
70 à 114	40
139 à 250	50
>250	60

L'isolation thermique du circuit de transfert doit être assurée par un isolant protégé des agents extérieurs agressifs par une protection adéquate.

On utilisera une protection par demi-coquilles préformées, celles-ci seront posées à joints alternatifs et maintenues par cerclage en fil, bandes ou feuillards non oxydables à l'intervalle maximum de 0,50 m avec un minimum de 3 par longueur de demi-coquille.

Tableau 5.3 : conductivité thermique de quelques isolants [2]

Isolant	Conductivité thermique (W/m ² .°C)
Liège aggloméré	$\lambda = 0,048$
Liège expansé pur	$\lambda = 0,043$
Laine de verre	$\lambda = 0,041$
Polystyrène conforme à la norme NF T 56-201 Classe V	$\lambda = 0,037$
Isolant à cellules fermées (type Armaflex ou autre)	$\lambda = 0,035$
Mousse rigide de polyuréthane, conforme à la norme NFT 56-203, expansée en continu	$\lambda = 0,024$

5.8 DIMENSIONNEMENT DES ACCESSOIRES DE SECURITE

Vase d'expansion (annexe 2 : tableaux A2.7 et A2.8)

Les méthodes applicables à la protection des installations solaires relèvent du DTU 65.11.

Elles concernent essentiellement les vases fermés.

La tuyauterie d'expansion doit permettre l'écoulement du débit de fluide caloporteur correspondant à la dilatation la plus rapide, avec une vitesse inférieure à 0,1 m/s.

Le diamètre nominal d (mm) de la tuyauterie d'expansion peut être calculée par la formule approchée :

$$d = 120 (\alpha * P * C_p / \rho) [2]$$

avec :

- P : puissance maximale du champ de capteur (kW),
- C_p : capacité calorifique du fluide caloporteur (J/kg),
- α : coefficient de dilatation volumique moyen du fluide caloporteur entre 0°C et 110°C,

▪ ρ : masse volumique du fluide caloporteur à la température de 110 °C et à la pression correspondante.

$$P = S_c (B_c \cdot I_{\max} - K_c (T_m - T_{\text{ext}}))$$

S_c : aire du champ de capteur.

Capteur Zenit.Thermic: $B_c = 0,77$ et $K_c = 3,62 \text{ w/m}^2/\text{°C}$

I_{\max} : le flux énergétique solaire maximal reçu est observé en avril à 12 GMT et il est égal à 1029 w/m^2 .

$T_m = 55\text{°C}$ et $T_{\text{ext}} = 24,1\text{°C}$.

ρ (eau à 110°C) = $951,4 \text{ kg/m}^3$ et ρ (eau à 0°C) = $999,9 \text{ kg/m}^3$

α (eau 0 à 110°C) = $999,9/951,4 = 1,051$

La capacité utile du vase d'expansion doit être au moins égale au volume correspondant à la dilatation du fluide caloporteur du circuit de transfert entre 0 °C et 110 °C. (soit environ 10 % du volume du circuit de transfert)

Pour les vases fermés, cette condition doit être réalisée en respectant la pression maximale d'utilisation, en tous points de l'installation.

Lorsque le vase d'expansion comporte une membrane, celle-ci doit être compatible avec le liquide caloporteur.

Aucune vanne ne doit être installée sur les éléments de tuyauteries situés entre le vase d'expansion et le circuit de transfert.

L'expansion du liquide caloporteur dans l'installation doit être compensée par le vase. Le volume V du vase doit être légèrement plus grand que le volume d'expansion du liquide.

Il est déterminé à partir du volume total de l'installation par la relation :

$$V = V_c \cdot K_d / \eta \quad [2]$$

dans laquelle :

- V_c est le volume total du fluide caloporteur (litre),
- K_d est le coefficient de dilatation à la température maximale d'utilisation (température de stagnation des capteurs) (%),

▪ η est l'effet utile du vase ($\eta = (P_2 - P_1)/P_1$ avec P_2 : pression absolue d'ouverture des soupapes du vase et P_1 : pression absolue de gonflage du vase).

$P_2 = 2,5$ bars car elle inférieure ou égale à 3 bars pour une hauteur statique inférieure à 15 m. [5]

$P_1 = 1,5$ bars pour une hauteur statique comprise entre 5 et 15 m [5]

Purgeurs

Chaque point haut du circuit primaire doit être équipé de purgeurs (purgeurs automatiques ou bouteilles de purge). Avec des purgeurs automatiques, les pompes devront être installées de manière à maintenir l'ensemble du circuit à surpression.

Soupapes (annexe 2 : tableaux A2.7 et A2.7)

Les soupapes de sécurité doivent être conformes à la norme NFP 52-001 et être tarées à une pression inférieure à la pression maximale de service de l'installation.

Elles seront placées directement sur le collecteur de sortie des capteurs, sans organe d'obstruction entre les capteurs et la soupape.

S'il n'existe pas d'autre protection contre les surchauffes, et pour éviter toute surpression dans une installation fermée, la soupape de sécurité devra être choisie de telle manière qu'elle puisse évacuer un débit de vapeur correspondant à la pression maximum reçue par les capteurs, sans que la surpression effective par rapport à la pression nominale de service dans les absorbeurs puisse dépasser 0,5 bar. [2]

Le diamètre intérieur minimal du tube de sécurité peut être calculé en fonction de la puissance maximale P reçue par le champ de capteurs, par la relation : d (mm) = $15 + 1,4 * P$ Avec : $d > 26$ mm et P en kW. [2]

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RESULTATS DE DIMENSIONNEMENT ET RECOMMANDATIONS

6.1 ANALYSE DES RESULTATS POUR LES CAPTEURS

On analyse l'influence du dimensionnement des capteurs en considérant 4 caractéristiques : (annexe 2 : tableau A2.1 à A2.6)

1°) V_j : Consommation journalière (données des besoins : l/j)

- pour chaque cellule $V_j = 3400$ l/j
- pour le restaurant, elle est de 13600 l/j.

Cette consommation est divisée en deux ce qui permet d'atteindre le taux couverture solaire de 90% avec deux systèmes identiques pour les périodes les plus défavorables.

- pour les villas (R2A/R2B), R3B et R4 on a respectivement 100 l/j, 150 l/j et 250 l/j.
- pour l'infirmerie la consommation est estimée à 100 l/j.

2°) S_c : Surface de capteurs (paramètre de dimensionnement : m^2)

Les valeurs obtenues sont les suivantes : (annexe 2 : tableau A2.1 à A2.6)

- pour chaque cellule on aura $S_c = 51,06$ m^2 .
Capteurs utilisés : Zenit Thermic ($B=0,77$ et $K=3,62$ $w/m^2/k$)
- pour le restaurant, les deux systèmes identiques de 110,4 m^2 de surface de capteurs permettent une couverture solaire minimale de 90% alors qu'un système unique de 220,8 m^2 de capteurs ne le permet pas.
Capteurs utilisés : Zenit Thermic ($B=0,77$ et $K=3,62$ $w/m^2/k$)
- pour les villas (R2A/R2B), R3B et R4 on a respectivement 2 m^2 , 3,7 m^2 et 4,14 m^2 .

Capteurs utilisés : J. Giordano Ind. C8/S8 B=0,77 et K=4,49 w/m²/k)
 J. Giordano Ind. C2S B=0,58 et K=4,18 w/m²/k)
 Zenit Thermic B=0,77 et K=3,62 w/m²/k).

- pour l'infirmierie $S_c = 3,7 \text{ m}^2$.

Capteurs utilisés : J. Giordano Ind. C2S B=0,58 et K=4,18 w/m²/k).

3°) R : Rendement moyen du système (résultat du calcul: %.)

$R = E_1 / (365 * I_{j1})$ avec I_{j1} l'irradiation solaire moyenne journalière par m²,
 $I_{j1} = 7,2 \text{ (kWh/m}^2\text{/j.)}$

- pour chaque cellule, $E_1 = 860 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$ et donc $R = 32,7\%$.

- pour le restaurant, $E_1 = 908 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$ et donc $R = 34,55\%$.

- pour les villas (R2A/R2B), R3B et R4 on a respectivement ($E_1 = 654 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$ et donc $R = 24,9\%$), ($E_1 = 524 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$ et donc $R = 19,94\%$) et ($E_1 = 787 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$ et donc $R = 29,95\%$).

- pour l'infirmierie, $E_1 = 399 \text{ kWh/m}^2\text{/an}$ et donc $R = 15,18\%$.

4°) CS : Taux de couverture solaire (résultat du calcul : %.)

- pour chaque cellule, CS = 93%.

- pour le restaurant, CS = 92%.

- pour les villas (R2A/R2B), R3B et R4 on a respectivement CS = 94%,
 CS = 93% et CS = 94%.

- pour l'infirmierie, CS = 92%.

De ces 4 caractéristiques (V_j , S_c , R, et CS), on peut tirer deux ratios simples qui caractérisent le dimensionnement de l'installation : V_j/S_c et R/CS.

Le pré-dimensionnement fixe la valeur du premier ratio V_j/S_c (75 l/m^2) mais il peut être montré que ceci revient aussi à fixer la valeur du deuxième ratio (R/CS) pour le problème posé.

En effet :

Supposons fixées, les données (météorologie et besoins) du problème :

- I_1 : irradiation solaire annuelle par m^2 sur le plan des capteurs ($\text{kWh/m}^2/\text{an}$)
- I_{j1} : irradiation solaire moyenne journalière par m^2 ($\text{kWh/m}^2/\text{j.}$)

On a:

- $I_1 = 365 * I_{j1} = 2628 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$
- V_j : consommation journalière d'eau chaude (litres/j)
- ΔT : échauffement moyen de l'eau : $T_{ec} - T_{ef} = T_{ec} - T_e$ ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ec} : température de consigne d'eau chaude ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ef} : température moyenne d'eau froide, supposée égale à T_e ($^{\circ}\text{C}$)
- T_e : température extérieure moyenne du site ($^{\circ}\text{C}$)

Le besoin énergétique moyen journalier B_j (kWh/j) et le besoin annuel B (kWh/an) s'écrivent en fonction de V_j et ΔT , sachant que la capacité calorifique massique de l'eau est de $1,16 \text{ Wh/litre}/^{\circ}\text{C}$:

$$B_j = C_p * V_j * \Delta T = 1,16 * V_j * \Delta T / 1000 \qquad B = 365 * B_j = 0,423 * V_j * \Delta T$$

La production solaire annuelle E (kWh/an) et la productivité annuelle E_1 ($\text{kWh/m}^2/\text{an}$) du système s'écrivent :

$$E = CS * B = S_c * R * I_1 \qquad E_1 = R * I_1 = B * CS / S_c$$

La production solaire moyenne journalière E_j (kWh/j) et la productivité moyenne journalière E_{j1} ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$) s'écrivent :

$$E_j = CS \cdot B_j = S_c \cdot R \cdot I_{1j} \qquad E_{1j} = R \cdot I_{1j} = B_j \cdot CS / S_c$$

On en déduit :

$$R/CS = (B_j / I_{1j}) / S_c \text{ ou encore : } R / CS = (1,16 \cdot V_j \cdot \Delta T / I_{1j}) / (1000 \cdot S_c)$$

On constate que R/CS et V_j/S_c sont proportionnels de rapport k :

$$k = (R/CS) / (V_j/S_c) = (1,16 \cdot \Delta T) / (1000 \cdot I_{1j})$$

De la même manière, les ratios E_{1j}/CS et V_j/S_c sont proportionnels de rapport k' :

$$k' = (E_{1j}/CS) / (V_j/S_c) = 1,16 \cdot \Delta T / 1000$$

et les ratios E_1/CS et V_j/S_c sont proportionnels de rapport k'' :

$$k'' = (E_1/CS) / (V_j/S_c) = 0,423 \cdot \Delta T \qquad \text{Car } E_1 = 365 \cdot E_{1j}$$

Les coefficients de proportionnalité k' et k'' ne dépendent que de l'échauffement moyen de l'eau, l'influence du gisement solaire étant prise en compte dans E_1 et E_{1j} .

Le coefficient k ne dépend que de ΔT et du gisement solaire. Dans tous les cas, les conditions météorologiques du site et la température de consigne suffisent à définir ces coefficients.

Cette proportionnalité entre les ratios R/CS , E_1/CS et V_j/S_c montre que choisir un ratio de dimensionnement V_j/S_c déterminé, revient en fait à imposer une valeur particulière aux ratios de performances R/CS et E_1/CS .

En particulier :

- Si on diminue le ratio V_j/S_c , on augmente le taux de couverture solaire, mais parallèlement le rendement diminue, le ratio R/CS diminue donc (plus vite que le taux de couverture solaire.) (annexe 1 : fig A1.1 et A1.2)

- Si on augmente le ratio V_j/S_c , on diminue le taux de couverture solaire, mais parallèlement le rendement augmente, le ratio R/CS augmente donc (plus vite que le taux de couverture solaire.) (annexe 1 : fig A1.1 et A1.2)

On voit que le rendement (ou la productivité) et le taux de couverture solaire sont deux objectifs antagonistes du dimensionnement. On a été donc conduit à trouver un compromis entre les deux. Notons enfin que, CS et R n'étant pas indépendants, il y a un et un seul couple (CS , R) permettant d'atteindre un ratio R / CS donné.

En effet si le ratio $R/CS = 0,35$ est atteint avec le couple ($R = 32,7\%$; $CS = 93\%$), le couple (34% ; 97%) qui donnerait le même ratio est impossible à atteindre puisqu'en passant d'un taux de couverture solaire de 93% à 97% , on fait chuter le rendement.

Les ratios k , k' , k'' dépendent fortement des besoins et du site, ce qui ne fait que traduire les différences sensibles de performances des systèmes solaires suivant les sites et les besoins.

Le choix d'un ratio fixe $V_j/S_c = 75 \text{ l/m}^2$ pour le pré-dimensionnement revient, en l'absence de tout autre critère, à favoriser l'augmentation du taux de couverture solaire par rapport à l'augmentation de rendement quand on passe de conditions moins favorables à des conditions plus favorables.

6.2 ANALYSE DES RESULTATS POUR LE STOCK

Le dimensionnement du stock est moins déterminant que celui des capteurs. L'impact sur les performances n'est sensible que si le stock est fortement sous-dimensionné. Le pré-dimensionnement que nous avons défini : volume de stock équivalent à une journée de consommation, est à

peu près toujours un compromis acceptable. On a dû les réduire un peu pour diminuer le coût.

Pour chaque cellule on a un ballon de 3000 litres.

Pour le restaurant, on a deux ballons de 6600 litres.

Le stock limite les effets de plafonnement de la production par les besoins en compensant partiellement le déphasage entre le profil de production solaire et le profil de consommation. (annexe 1 : fig A1.7)

Avec les volumes de stock trouvés, on évite un effet de surproduction sur la journée tout en limitant l'élévation de température dans les capteurs qui serait préjudiciable au rendement de ceux-ci.

Il n'est pas possible, pour des applications de production d'eau chaude sanitaire, de compenser les déphasages sur des périodes de longue durée (au-delà de la journée.) (annexe 1 : fig A1.8). Il faudrait pour cela augmenter très sensiblement les volumes des stocks, ce qui entraînerait :

- Une augmentation significative du coût d'investissement, à mettre en parallèle avec des gains relativement modestes ;
- Une diminution de la température moyenne du stock et donc de la qualité de l'énergie solaire produite : l'eau froide étant à 22,1°C et la température de consigne à 55°C, si le stock est à 45°C, l'appoint devrait fournir 27,6% des besoins (chauffage 45°C à 55°C) quelle que soit la quantité d'énergie stockée. Ce faisant un système purement solaire aurait une mauvaise image.

Notons enfin deux aspects importants du dimensionnement :

- La saisonnalité joue un rôle important. L'utilité du stock dépend plus de la consommation d'été que de celle d'hiver.
- Le dimensionnement du stock dépend du dimensionnement des capteurs : pour des besoins identiques, on pourra augmenter la taille du

stock si on augmente la surface de capteurs, et la diminuer si on réduit la surface de capteurs.

6.3 RECOMMANDATIONS

6.3.1 IMPLANTATION DES CAPTEURS

Les capteurs au niveau des cellules seront intégrés en toiture et raccordés en boucle de Tickelman. En effet les toitures des cellules sont inclinées de 25° par rapport à l'horizontale et l'écart de 5° par rapport à la valeur 30° obtenue par le dimensionnement a une faible influence sur les performances énergétiques. (annexe 1 : fig A1.5 et A1.6)

Par contre au niveau du restaurant les capteurs seront sur supports métalliques toujours raccordés en boucle de Tickelman avec une inclinaison de 20° par rapport à l'horizontale.

6.3.2 ABRIS D'EQUIPEMENTS

La mise en œuvre de locaux techniques en sous-sol de chaque cellule et du restaurant est nécessaire afin d'abriter les équipements tels que les ballons de stockage, les circulateurs, les vases d'expansions et le poste local du télécontrôle. Ils seront de dimensions $4 \times 3 \times 3 \text{m}$ pour les cellules et $6 \times 4 \times 3 \text{m}$ pour le restaurant.

On recommande de prévoir $1,5 \times 1 \times 2 \text{m}$ d'espace dans la charpente des toitures des villas pour la pose des ballons. Ces derniers devront être accessibles sans gêner l'occupant et en cas de contraintes mettre en œuvre des supports de capteurs à côté des villas. On évitera le maximum possible les masques.

On veillera à ce que le bas du ballon soit à $1,5 \text{m}$ de hauteur par rapport aux capteurs.

6.3.3 OUTIL DE CALCULS DES PERFORMANCES ENERGETIQUES

La vérification des résultats obtenus avec un outil détaillé tel que TRNSYS de pas de calcul beaucoup plus réduit, heure par heure, jour par jour permettrait une compréhension fine du comportement du système et une évaluation de la pertinence de l'outil simplifié SOLO.

CHAPITRE 7

LE TELECONTRÔLE

7.1 OBJECTIFS DU TELECONTRÔLE

Le télécontrôle d'une installation solaire a deux objectifs principaux :

- Permettre l'établissement des bilans énergétiques de l'installation.
- Faciliter la détection et le diagnostic des dysfonctionnements éventuels et ce faisant, améliorer le rendement de l'installation et la sécuriser.

7.2 COÛT DU TELECONTRÔLE

Le coût du télécontrôle est scindé en deux parties :

- Coût de l'investissement initial (télécontrôleur et sondes de mesure).
- Coût de fonctionnement (transmission et traitement des données).

Ce coût est à peu près indépendant de la taille de l'installation. Il est donc acceptable pour une installation collective de grande taille cependant il serait trop important pour un chauffe-eau individuel.

Actuellement, le télécontrôle se justifie économiquement au-delà de 40 m² de capteurs.[2] (annexe 3 : A3.4)

7.3 DESCRIPTION DU TELECONTRÔLE

Le télécontrôle comprend généralement trois composantes :

- La mesure des paramètres essentiels de fonctionnement.
- Le stockage, la mise en forme et la transmission de ces paramètres.
- L'analyse des résultats.

Une station locale reliée à des sondes de mesure et équipée d'un processeur, d'une mémoire et d'un système de télétransmission (modem ou autre) gère les mesures, un stockage court, une partie des calculs et la transmission.

Une station centrale et un expert assurent le stockage à long terme, les calculs complémentaires et l'analyse des résultats.

Le choix des mesures et des traitements doit être adapté aux objectifs du télécontrôle. Il s'agit de garantir le bon fonctionnement de l'installation et de déterminer ses performances énergétiques.

Dans ce cas, le système de télécontrôle devra respecter le cahier des charges minimal suivant :

a) Paramètres mesurés (pas de temps maximal : 1 minute) :[2]

- Consommation eau chaude sanitaire.
- Température eau froide (réseau public).
- Température sortie capteurs (circuit de transfert).
- Température sortie ballons (circuit de distribution).
- Etat pompe.

b) Paramètres calculés mais non stockés (pas de temps du calcul : 1 minute) :

- Besoins énergétiques.
- Energie solaire produite.
- Temps de fonctionnement de la pompe.

Le pas de temps des mesures et calculs d'énergies doit être court en raison des variations de températures et du débit de consommation d'eau qui imposent une intégration et non un simple calcul basé sur des moyennes. Compte tenu de l'inertie thermique, un pas de temps de 1 minute est un compromis raisonnable.

c) Paramètres stockés, données détaillées (pas de temps conseillé $\Delta t = 10$ minutes) : [2]

- Consommation eau chaude sanitaire (cumul sur Δt).
- Temps de fonctionnement pompe (cumul sur Δt).
- Température eau froide (moyenne sur Δt).
- Température sortie capteurs (circuit transfert) (moyenne sur Δt).
- Température sortie ballons (circuit distribution) (moyenne sur Δt).

d) Paramètres stockés, données journalières (pas de temps $\Delta t = 1$ jour) :

- Consommation eau chaude sanitaire (cumul journalier).
- Temps de fonctionnement pompe (cumul journalier).
- Besoins énergétiques (cumul journalier).
- Energie solaire produite (cumul journalier).

e) Paramètres stockés, données statistiques et cumulées à long terme (mois, an) :

- Consommation journalière d'eau chaude sanitaire (moyenne mensuelle)
- Besoins énergétiques journaliers (moyenne mensuelle).
- Energie solaire produite par jour (moyenne mensuelle).
- Taux de couverture solaire (moyenne mensuelle et annuelle).
- Energie solaire produite (cumul annuel).
- Productivité annuelle du système par m^2 de capteur.

L'unité de télécontrôle sera de marque NAPAC de type TBC Solaire version MUC 5. Elle sera fixée dans un coffret indépendant du coffret électrique de commande. Elle sera alimentée en mono 230 V avec protection à fusibles. Le raccordement à la ligne téléphonique comportera un parafoudre.

Elle sera en outre, raccordée :

- à l'émetteur d'impulsions du compteur volumétrique au moyen de câbles 2 x 1 ou 1,5 mm² blindés,
- à trois sondes de température de type Pt 1000, fixées sur les conduites par colliers Rilsan au moyen de câbles 2 x 1 ou 1,5 mm².

Les sondes de type NAPAC ou Heraeus réf. P12 DZR0 seront appliquées sur une longueur droite, sur une surface propre. Elles seront parfaitement calorifugées. Elles comprendront :

- une sonde eau froide (TEF) à installer sur la canalisation générale d'arrivée de l'eau froide à une distance de 3 mètres minimum de l'entrée du ballon.[2]
- une sonde d'eau chaude solaire (TSB) à installer sur la canalisation de départ des ballons solaires vers la distribution à 2 mètres minimum en amont du piquage de raccordement de l'eau froide.[2]
- une sonde de sortie des capteurs (TSC) à fixer sur la canalisation principale de sortie des capteurs (circuit de transfert).

De plus, le télécontrôleur sera raccordé aux contacts auxiliaires NO du contacteur de commande de la pompe.

Les raccordements des contacts auxiliaires s'effectueront par câbles blindés 2 x 1 ou 1,5 mm².

Les données à long terme fournissent les bilans énergétiques du système. Ces données sont calculées et stockées dans la station centrale puis diffusées régulièrement, en particulier aux utilisateurs (fréquence mensuelle, annuelle).

Les données journalières permettent de détecter les dysfonctionnements éventuels. Ces données sont transférées et analysées à intervalles réguliers par exemple 1 semaine.

Les données détaillées permettent de visualiser le comportement de l'installation : profils de consommation et de production, fonctionnement de la régulation... et facilitent le diagnostic en cas de dysfonctionnement. Ces données sont transférées régulièrement en phase de démarrage, puis de temps à autre, en particulier dès que l'analyse détecte un dysfonctionnement.

CHAPITRE 8

EVALUATION ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

8.1 EVALUATION ECONOMIQUE

8.1.2 L'INVESTISSEMENT

L'investissement comprend l'ensemble des coûts relatifs à la conception de l'installation, aux équipements, à leur installation et à la formation des personnels d'exploitation et de maintenance.

$$CI = CI_0 + a * S_c + b * V_s \quad [2]$$

Le coût des capteurs étant très supérieur à celui des ballons, on supposera que :

$$CI = CI_0 + a * S_c$$

CI_0 = coût de la maîtrise d'œuvre de l'installation compris entre 10% et 16% du coût de l'installation ($a * S_c$).

On se fixe $CI_0 = 15% * a * S_c$ d'où $CI = 115% * a * S_c$.

Avec $a = 415$ euros/m² pour $S_c = 50$ m² et 430 euros/m² pour $S_c = 110$ m² et 750 euros/m² pour S_c inférieure à 10 m². (évaluer à partir d'installations réalisées et présentées dans [3])

$$CI = 139800485 \text{ Fcfa}$$

8.1.3 LE COÛT D'EXPLOITATION

Le coût d'exploitation est une grandeur difficile à estimer a priori, puisqu'il dépend largement de la performance de l'installation et des conditions réelles d'utilisation de l'eau chaude sanitaire (besoins, usages, conditions de soutirage...).

Le coût d'exploitation est calculé à partir du coût de l'énergie utilisée par le système d'appoint et les équipements auxiliaires (pompes, réchauffeurs...). Il inclut également le coût des services de maintenance et de télécontrôle, ainsi que les coûts liés au personnel d'exploitation.

Le cas échéant, le coût d'exploitation peut inclure le coût annuel des emprunts nécessaires au financement de l'investissement.

$$CE = \sum_{m=1}^{12} (C_m \cdot enr_j) + C_{add}$$

dans laquelle :

- CE : coût d'exploitation
 - m : indice du mois considéré
 - $C_{m.enrj}$: coût mensuel de l'énergie
 - C_{add} : coûts additionnels
- Le coût mensuel de l'énergie est supposé une constante pour chaque jour de l'année et est calculé en fonction de la durée de fonctionnement des pompes et des deux unités centrales du télécontrôle mais aussi de leur puissance.

Le temps de fonctionnement des pompes est estimé égal à $\frac{3}{4}$ de la durée de fonctionnement maximale qui est de 12 heures.

Cependant la durée de fonctionnement des unités centrales du télécontrôle est estimée égale à 15 heures c'est à dire de 6 heures à 21 heures avec des puissances 200 watts chacune.

$$\mathbf{Cm.enrj} = (365/12) * (9 * P_{pompe} + 15 * P_{unité\ centrale}) * \mathbf{Prix\ kWh}$$

- Les coûts additionnels sont entre autres le coût du télécontrôle et le coût du contrat de maintenance. Ces derniers sont respectivement inférieurs à 6% et 3% de l'investissement.

$$\mathbf{Cadd} = (5\% + 2\%) * 115\% * a * S_c = 8,05\% * a * S_c$$

$$\mathbf{CE} = 16474520 \text{ Fcfa}$$

8.1.4 LE COÛT GLOBAL ACTUALISE

L'analyse en coût global des solutions propose l'évaluation sur un horizon économique donné, de l'ensemble des coûts initiaux liés à l'investissement et de ceux liés à l'exploitation : coûts de fonctionnement, coûts de maintenance, frais financiers, remboursement d'emprunts..., sur une période économique définie. Elle est généralement utilisée pour affecter un budget à une opération ou pour juger de l'intérêt économique de propositions diverses.

De nombreuses formulations du Coût Global Actualisé (CGA) existent, nous avons retenu ici la formule suivante :

$$\mathbf{CGA} = \mathbf{CI} + \mathbf{na} * \mathbf{CE} \quad \text{où} \quad \mathbf{na} = \sum_{i=1}^{n_H} \frac{1}{(1 + \tau a)^i}$$

avec :

- CI : Coût d'Investissement
 - CE : Coût d'Exploitation
 - τa : Taux annuel d'actualisation
 - n_H : Durée sur laquelle est effectué le calcul du Coût Global Actualisé.
- $\tau a = 9\%$ pour des projets de ce genre et leur durée est estimée à 20 ans.
 $na = 9,129$

$$\mathbf{CGA(sur\ 20\ ans)} = 290196378 \text{ Fcfa}$$

8.1.5 LE TEMPS DE RETOUR DU COUT GLOBAL ACTUALISE

Il est le temps au bout duquel la somme des économies financières réalisée par la substitution de l'énergie solaire à l'énergie traditionnelle est égale au montant des investissements. Le temps est généralement le nombre d'années qui satisfont l'équation suivante :

$$CGA = \sum_{i=1}^n (C_{enrj})_i + CI'$$

dans laquelle :

- $(C_{enrj})_i$: le coût de l'énergie substituée pour l'année i ,
- i : indice de l'année considérée
- CI' : le coût d'investissement substitué on le supposera égal à 115% du coût annuel de l'énergie substituée.

C_{enrj} est égal à la facture d'électricité annuelle pour le besoin énergétique utile.

$C_{enrj} = B_{enrj} * \text{Prix kWh}$; ce prix est supposé égal à 500 Fcfa/kWh.

$$B_{enrj} = 365 * [1,16 * (3,4 * 4 + 0,1 * 14 + 0,15 * 7 + 0,25 * 7) * (55 - 22,1) + 1,16 * (13,6 + 0,1) * (60 - 22,1)]$$

$$B_{enrj} = 467930 \text{ kWh/an}$$

$$C_{enrj} = 46793000 \text{ Fcfa/an}$$

$$CI' = 53811950 \text{ Fcfa.}$$

$$n = (CGA - CI') / C_{enrj}$$

$$n = 5,05 \text{ ans.}$$

Le temps de retour de l'investissement est inférieur à six ans.

Par conséquent le système solaire pour les besoins spécifiés est jugé intéressant.

8.2 EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

La température moyenne de la Terre résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace.

La répartition de la température au niveau du sol dépend de la quantité de gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère.

Sans eux, la température moyenne serait de -18°C et la terre serait inhabitable. Leur présence maintient cette température à 15°C .

8.2.1 LA CONCENTRATION DE GES DANS L'ATMOSPHERE

Les gaz responsables de l'effet de serre d'origine anthropique sont le gaz carbonique (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), l'ozone troposphérique (O_3), les CFC et les HCFC gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone, ainsi que les substituts des CFC : HFC, PFC et SF_6 .

Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Mais du fait de l'activité humaine, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'est sensiblement modifiée : ainsi, la concentration en CO_2 , principal GES, a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle.

Les effets combinés de tous les GES équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% de CO_2 .

8.2.2 APPORT DU SYSTEME DE PRODUCTION D'ÉCS SOLAIRE

L'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude sanitaire permet de diminuer les rejets de gaz carbonique (CO_2) dans l'atmosphère.

Pour chaque kWh utile économisé, la quantité de CO₂ évitée, de la source de production d'énergie jusqu'à l'usage final (après transformation par les équipements de production d'ECS), est :

Tableau 8.1 : Quantité de CO₂ évité par kWh fonction de la source d'énergie

Source d'énergie	CO ₂ évité (kg/kWh)
Fioul domestique	0,35
Gaz naturel	0,28
Charbon	0,36
Electricité	0,12

(Source : Inestene/Mission Interministérielle de l'Effet de Serre)

La quantité de CO₂ évité par un kWh d'électricité est 0,26 Kg/KWh (ENDA, ministère de l'environnement 98-99)

calculons le nombre de kWh utile économisé :

Il est égal au besoin énergétique total annuel pour l'eau chaude sanitaire défalqué de l'énergie électrique inévitable pour le fonctionnement du système solaire.

$$E_{\text{iné}} = 365 * (9 * P_{\text{pompe}} + 15 * P_{\text{unité}})$$

$$E_{\text{iné}} = 365 * (9 * 0,17 + 9 * 0,212 + 2 * 15 * 0,2)$$

$$E_{\text{iné}} = 3445 \text{ kWh/an}$$

$$E_{\text{économisée}} = B_{\text{enrj}} - E_{\text{iné}}$$

$$E_{\text{économisée}} = 464485 \text{ kWh/an}$$

$$\text{Masse de CO}_2 \text{ évité} = 0,26 * E_{\text{économisée}}$$

$$\text{Masse de CO}_2 \text{ évité} = 120,766 \text{ tonnes.}$$

CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation du système solaire de production d'eau chaude sanitaire est d'une compatibilité satisfaisante vis à vis de l'envergure et les objectifs visés du projet.

Ainsi son choix permet de couvrir au minimum 90% des besoins énergétiques en eau chaude sanitaire et d'éviter un rejet par an de 120,766 tonnes de gaz carbonique dans l'environnement. Cependant ce taux de couverture solaire élevé est au détriment de la productivité du système qui conduit à un coût global exorbitant.

Bien que le coût global actualisé soit exorbitant pour une période de vingt ans, la durée de retour de ce coût qui est de six ans est acceptable.

En effet, le coût de la facture d'électricité d'un système classique pour les mêmes besoins, estimé sur vingt ans se verrait réduit à six ans de fonctionnement du système solaire de substitution.

Le télécontrôle et donc la maintenance permettent d'avoir non seulement la durée de vie des capteurs au-delà des vingt ans mais de l'ensemble du système solaire.

Annexe 1

fig A1.1: évolution du taux de couverture solaire en fonction de la surface des capteurs (cellule)

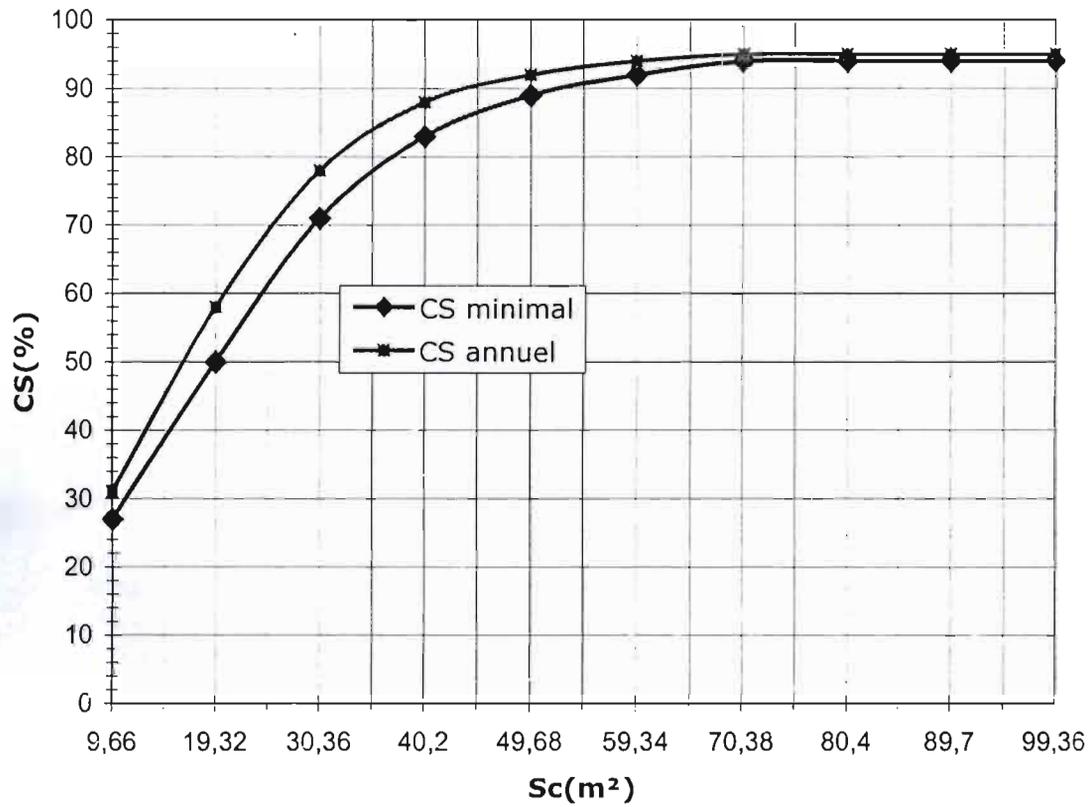
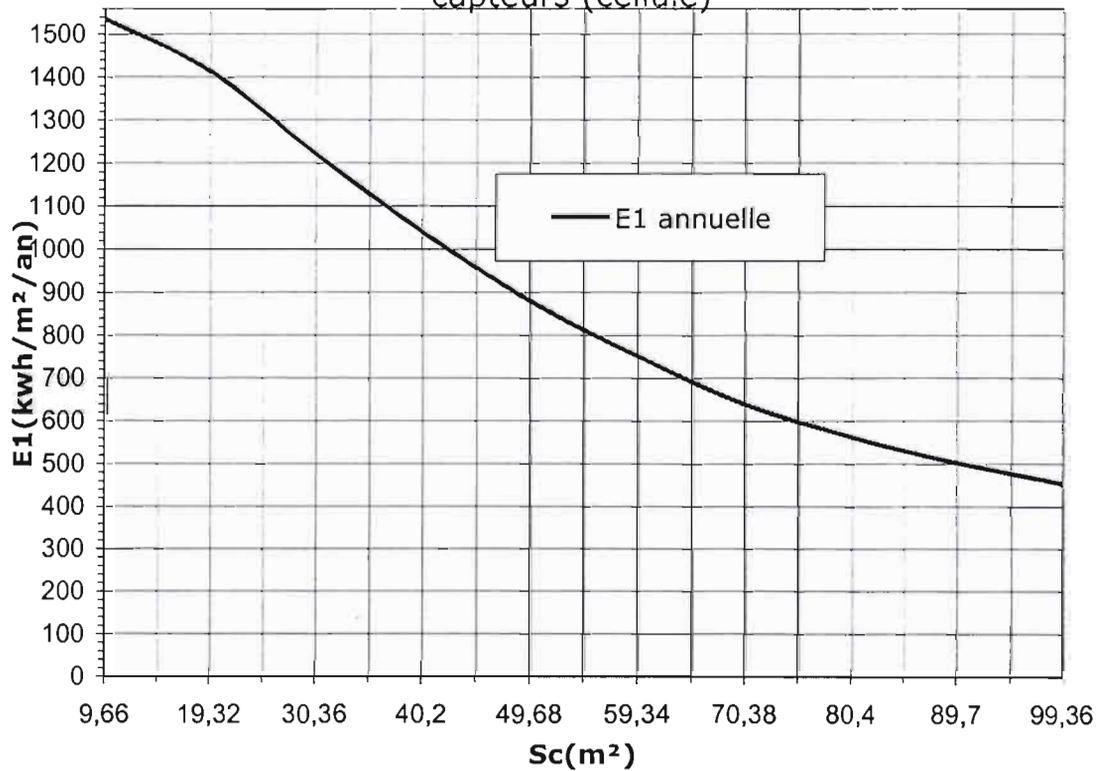


fig A1.2: productivité en fonction de la surface des capteurs (cellule)



Annexe 1

fig A1.3:productivité en fonction du volume du stock (cellule)

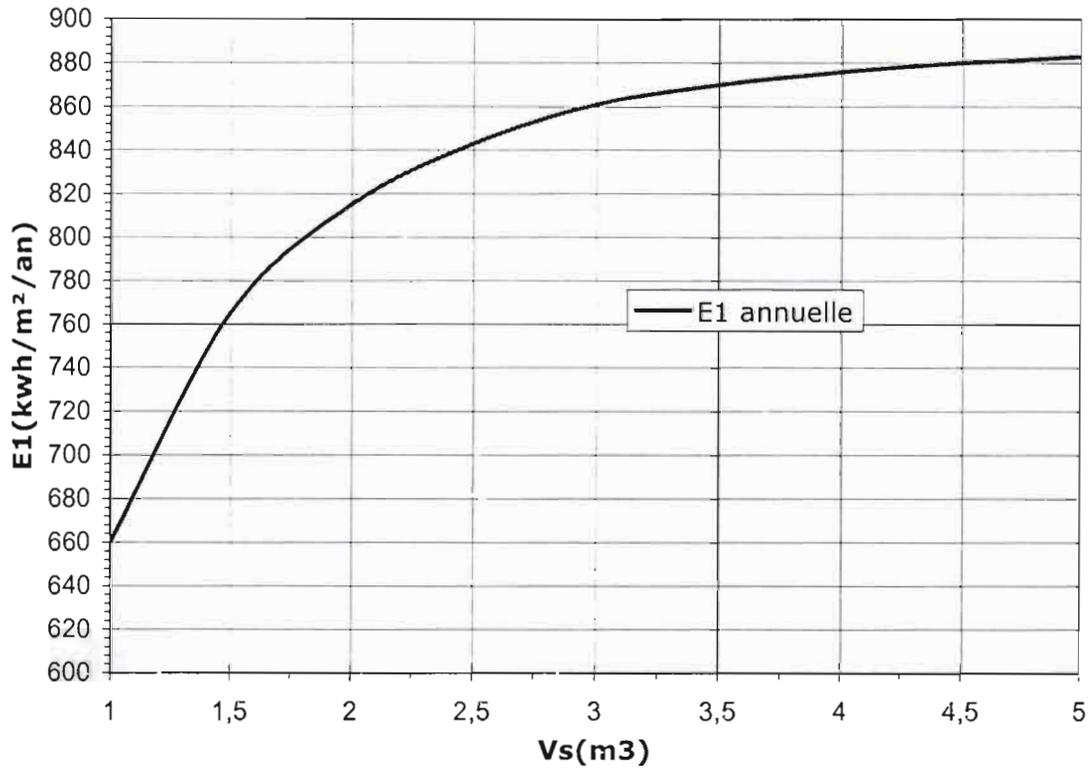
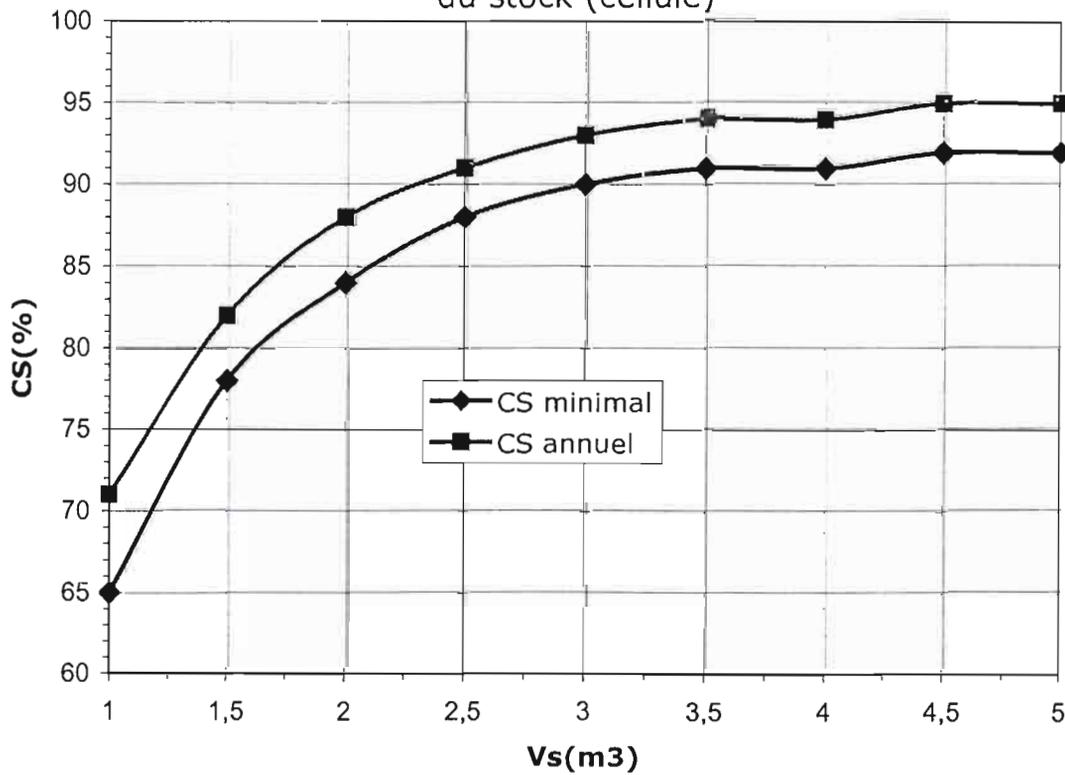


fig A1.4:taux de couverture solaire en fonction du volume du stock (cellule)



Annexe 1

fig A1.5: Influence de l'inclinaison sur la productivité (cellule)

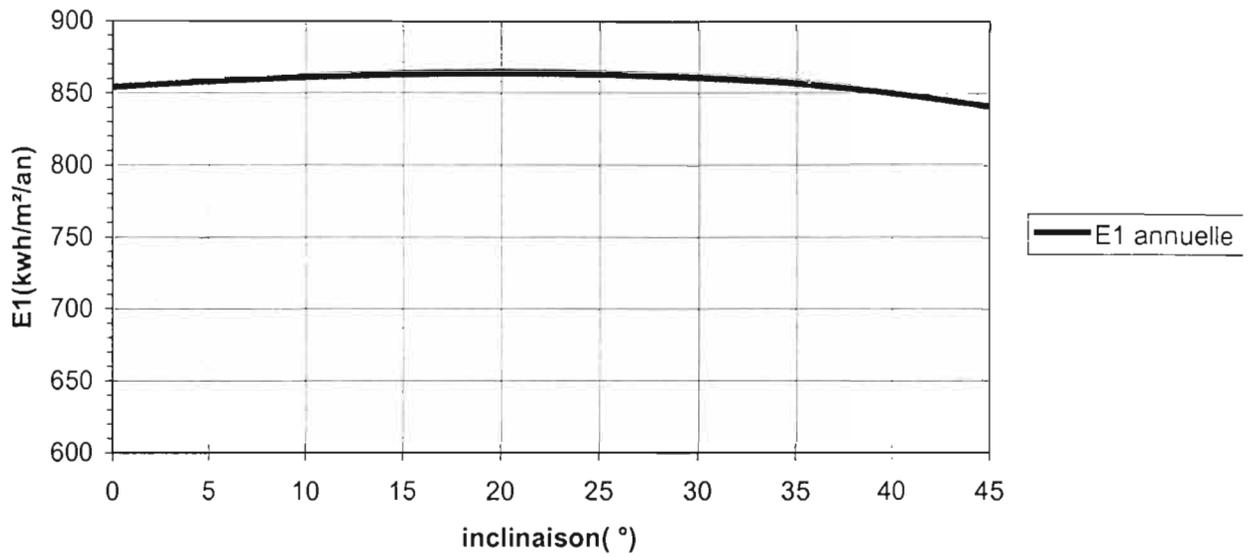
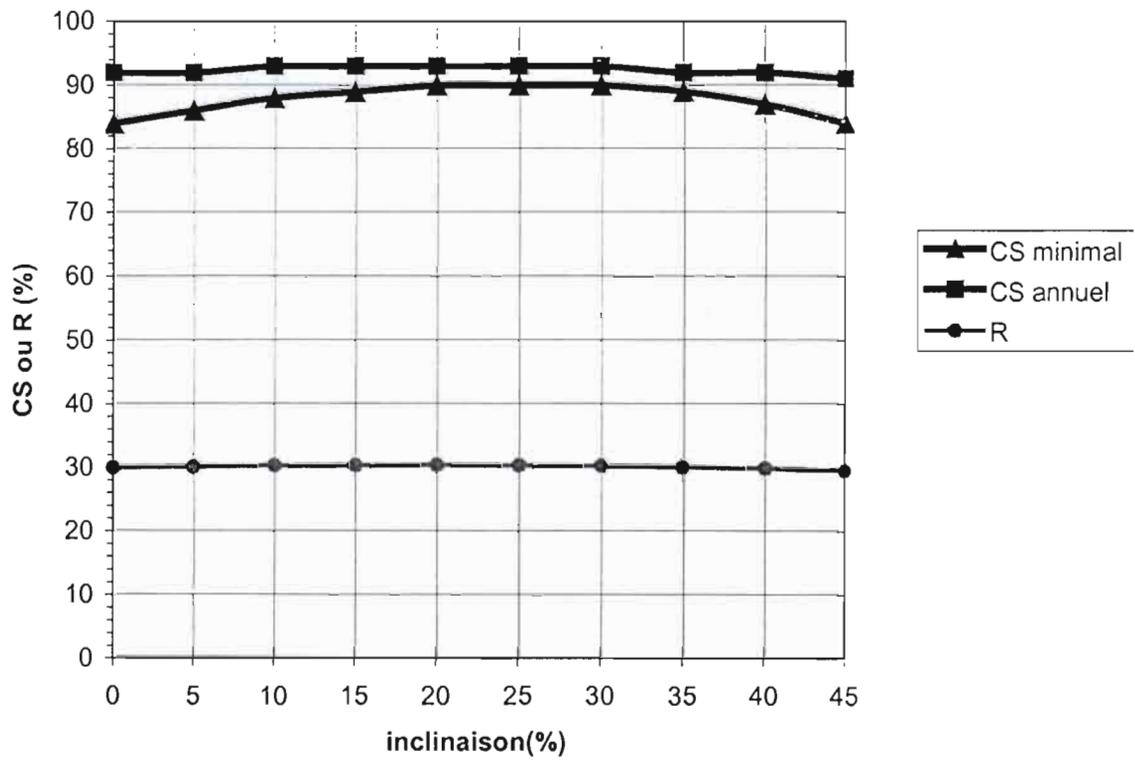


fig A1.6: influence de l'inclinaison sur le rendement et les taux de couvertures (cellule)



Annexe 1

fig A1.7: Profil de production solaire et de consommation pour une belle journée de Décembre (cellule)

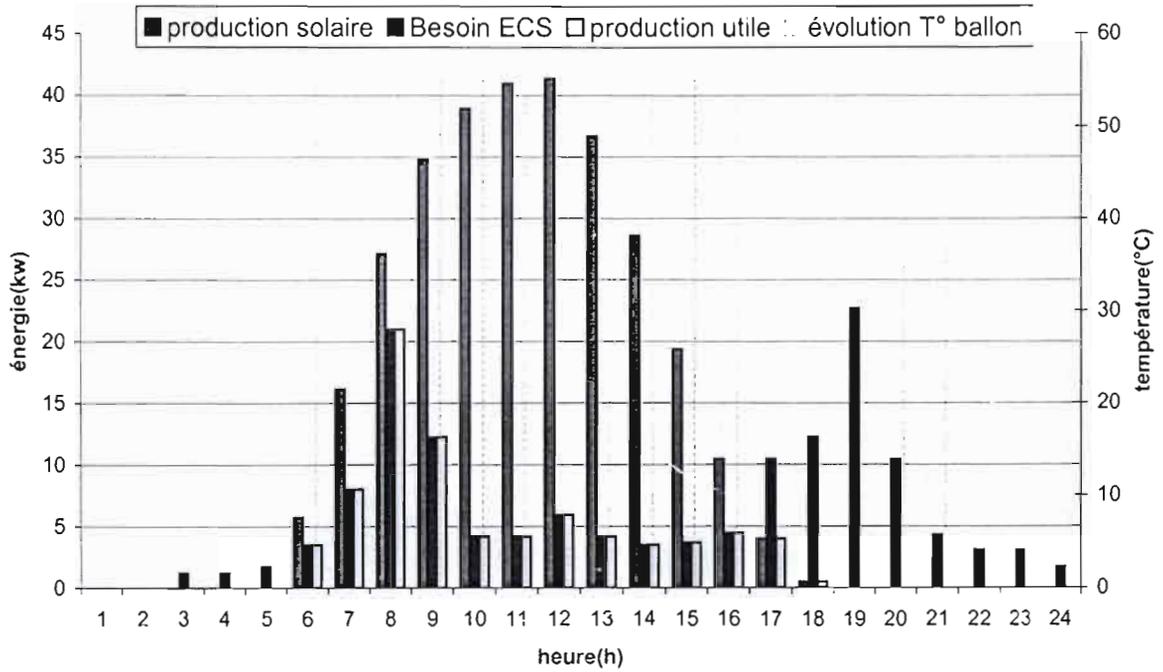
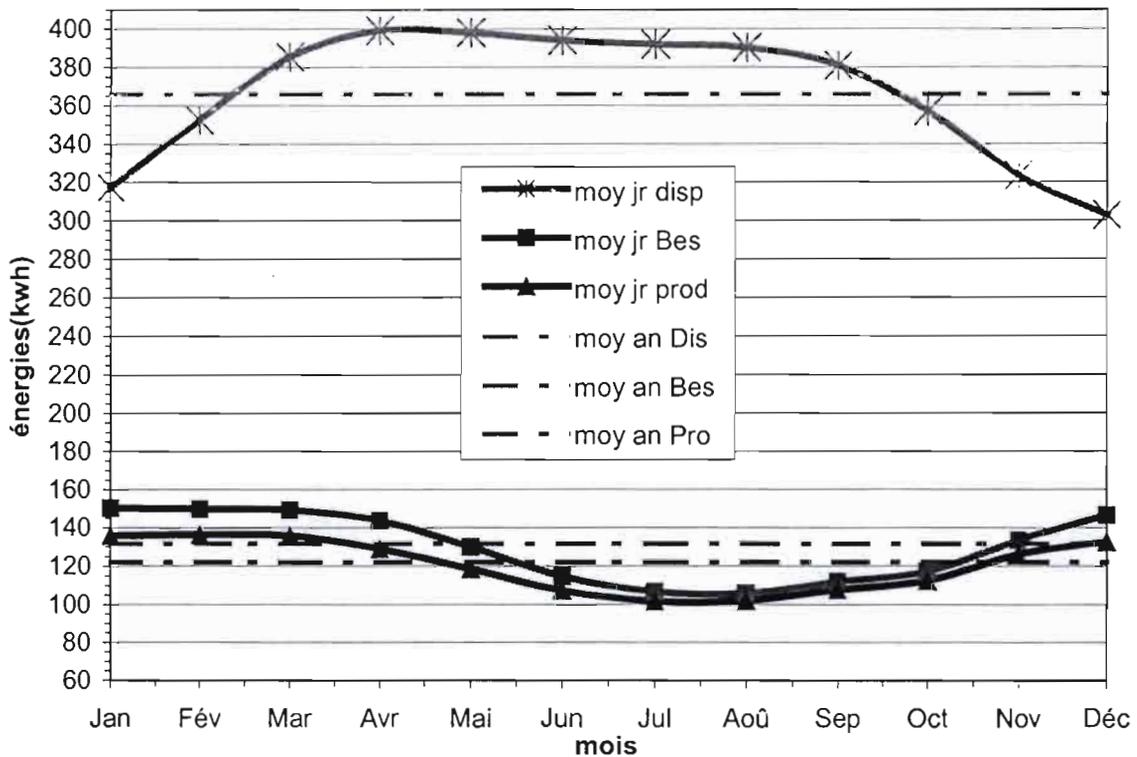


fig A1.8: consommation d'énergies journalières en moyenne mensuelle (cellule)



Annexe 1

fig A1.9: évolution du taux de couverture solaire en fonction de la surface des capteurs (Restaurant)

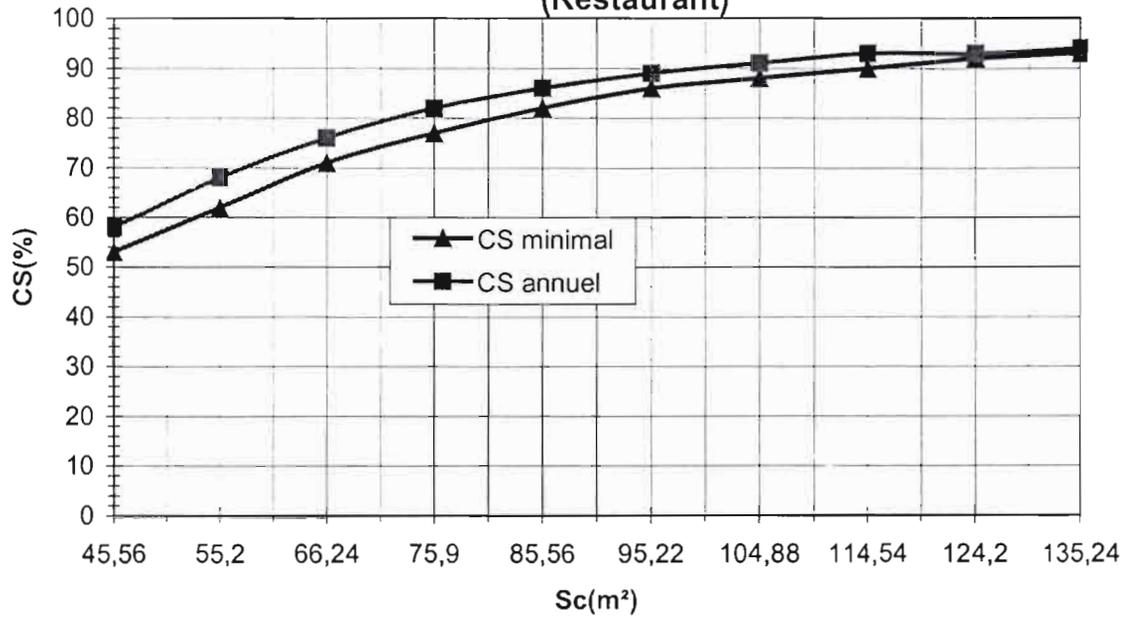
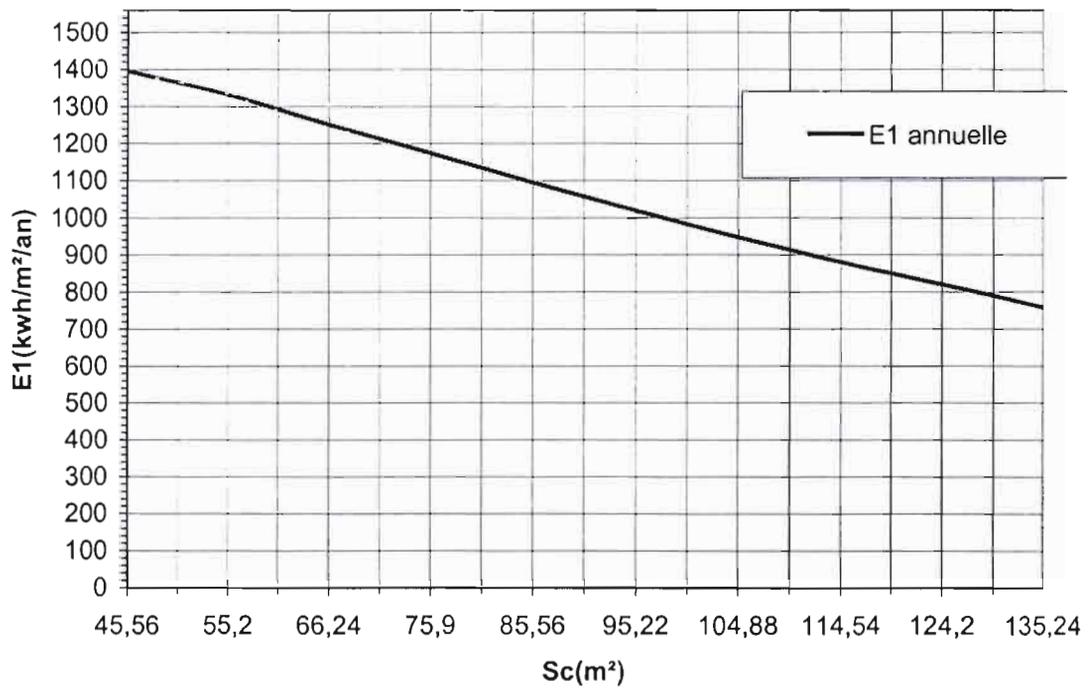
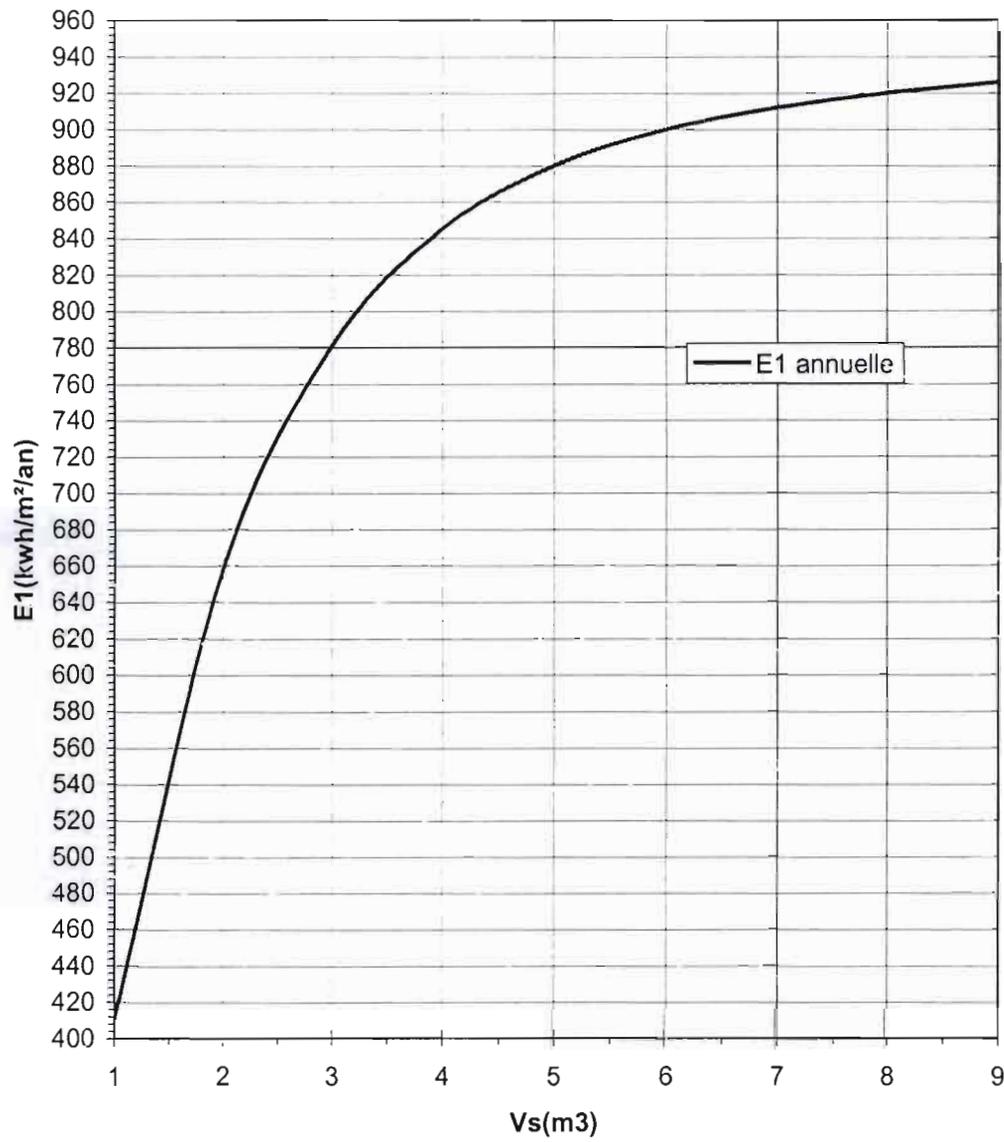


fig A1.10: productivité en fonction de la surface des capteurs (Restaurant)



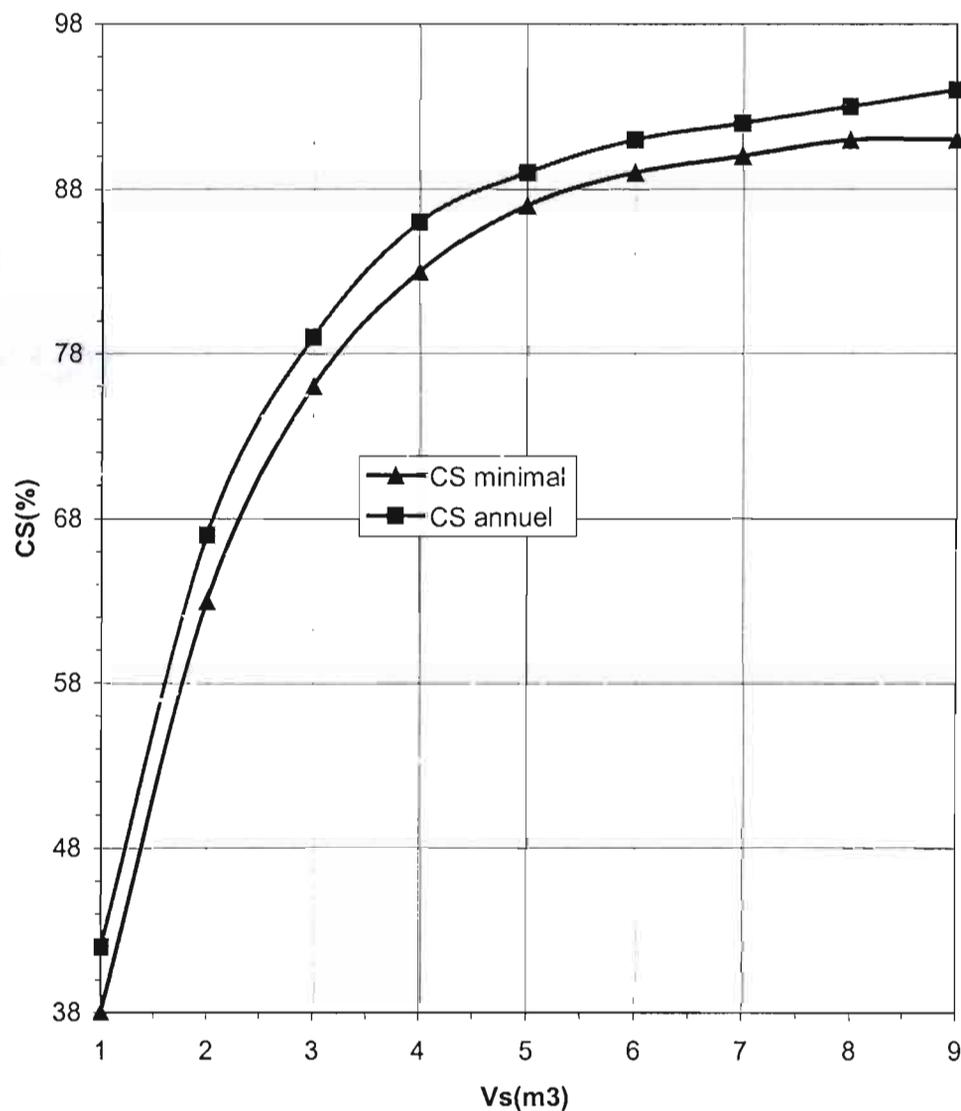
Annexe 1

fig A1.11: productivité en fonction du volume du stock (Restaurant)



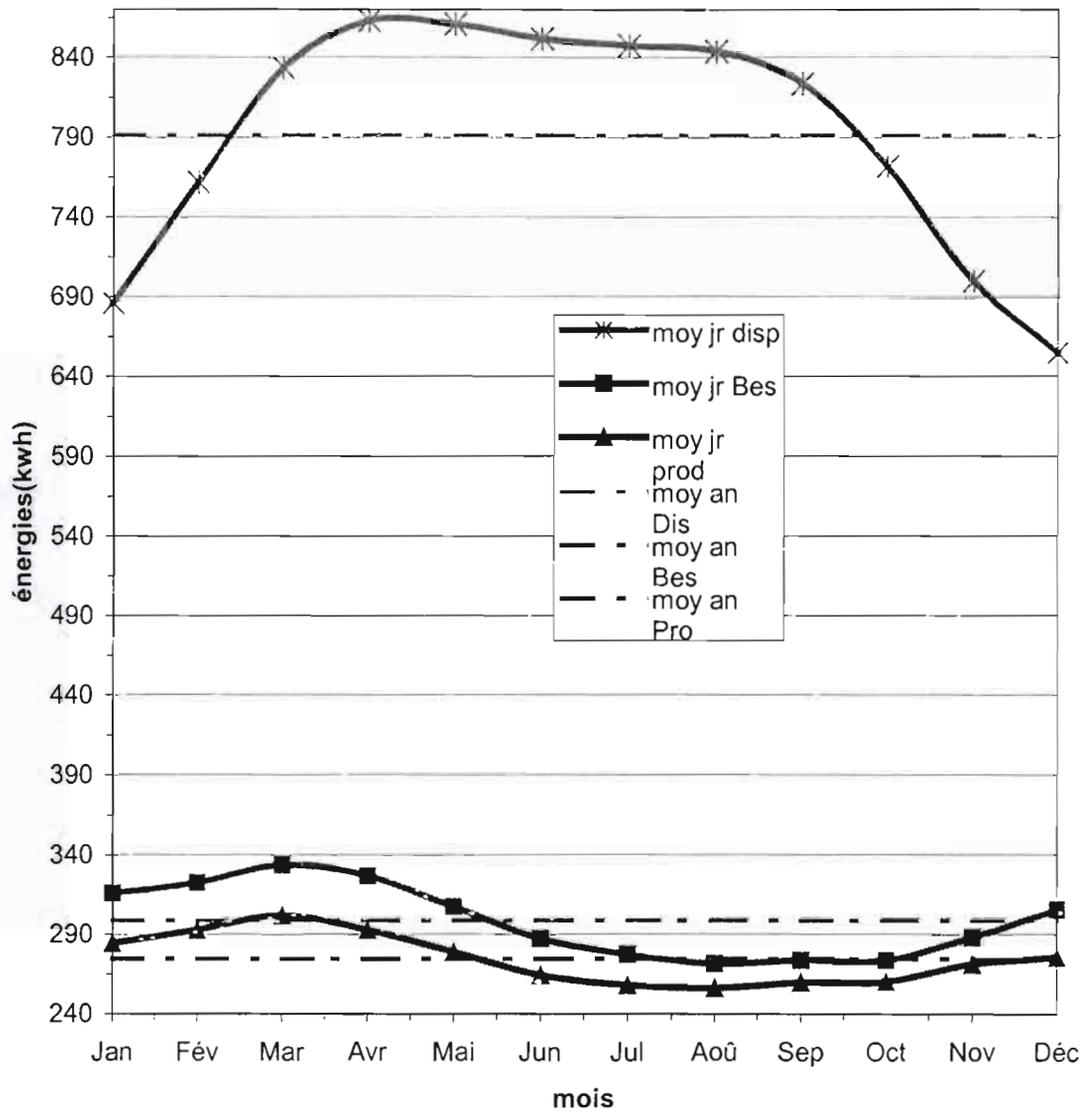
Annexe 1

fig A1.12: taux de couverture solaire en fonction du volume du stock (Restaurant)



Annexe 1

fig A1.13: consommation d'énergies journalières en moyenne mensuelle(kwh) (Restaurant)



Annexe 1

fig A1.14: Influence de l'inclinaison sur la productivité (Restaurant)

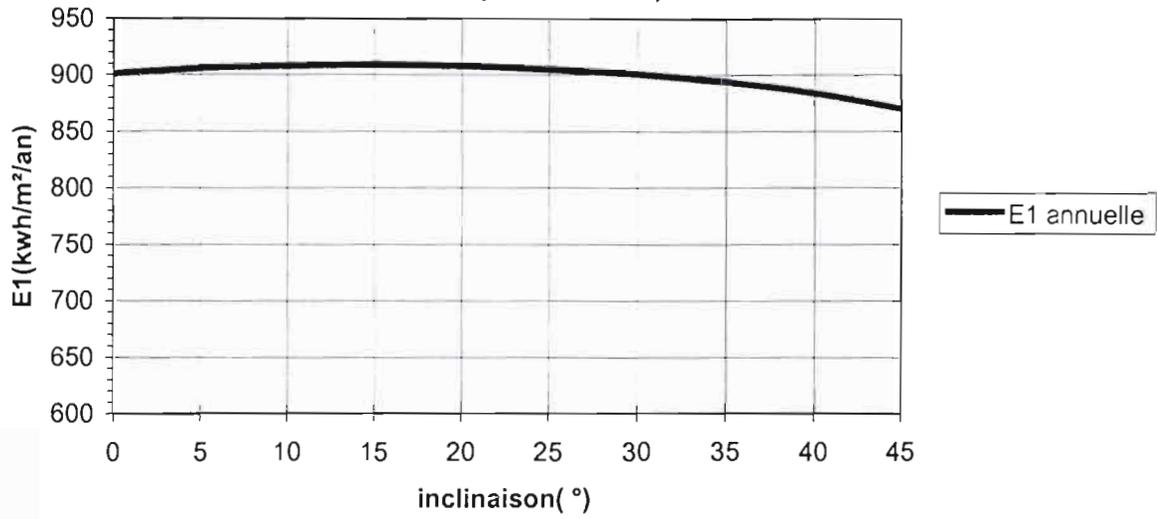
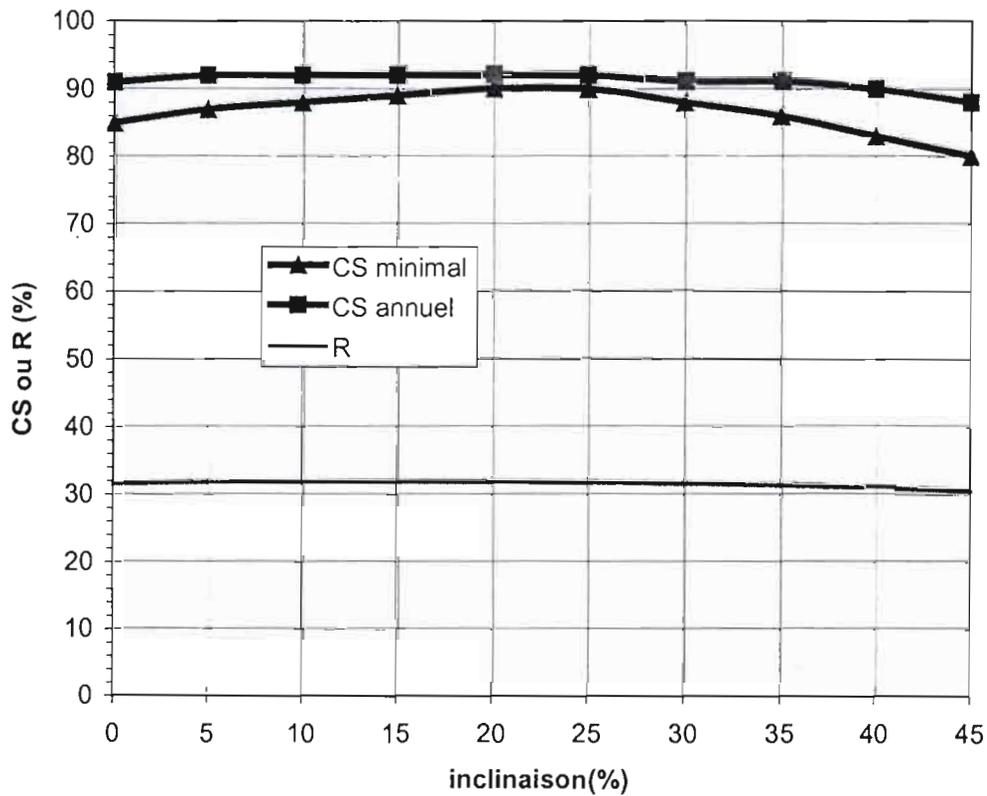


fig A1.15: influence de l'inclinaison sur le rendement et les taux de couvertures moyen et maximal (Restaurant)



Annexe 2

Tableau A2.1 : évaluation des performances énergétiques du système/cellule.

Date : 25/06/2003

Nom du fichier :	c:\mes documents\dianepfe\essai\essaicell\valeurs optimales.s2k													
Station :	<Utilisateur> . Mbour*													
Type de système :	SYSTEME CAPTEUR BALLON (Sans appoint , Sans échangeur)													
Type de capteur :	Zenit Thermic													
Inclinaison [*]:	30,00													
Orientation [*]:	0,00													
Surface totale [m²]:	51,06													
Déperdition de la boucle de captage [W/(m².K)]:	3,74													
Efficacité de la boucle de captage:	0,85													
Type de ballon:	3000I													
Déperdition thermique du ballon [W/(m².K)]:	6,38													
Besoin journalier moyen en eau chaude [l/l]:	3400													
Température de référence moyenne [°C]:	55													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel	
Couverture [%]	90	91	91	90	91	93	95	96	96	96	94	90	93	
Besoins [kWh]	4662	4198	4628	4314	4034	3445	3310	3281	3360	3632	4006	4548	47418	
Productivité [kWh]	4214	3821	4214	3870	3675	3219	3150	3156	3232	3485	3779	4115	43929	
Productivité /m²	83	75	83	76	72	63	62	62	63	68	74	81	860	

Tableau A2.2 : évaluation des performances énergétiques du système/restaurant.

Date : 27/06/2003

Nom du fichier :	c:\mes documents\dianepfe\essai\essairesto\valeurs optimales.s2k													
Station :	<Utilisateur> . Mbour*													
Type de système :	SYSTEME CAPTEUR BALLON (Sans appoint , Sans échangeur)													
Type de capteur :	Zenit Thermic													
Inclinaison [*]:	20,00													
Orientation [*]:	0,00													
Surface totale [m²]:	110,40													
Déperdition de la boucle de captage [W/(m².K)]:	3,72													
Efficacité de la boucle de captage:	0,86													
Type de ballon:	Ballon00*													
Déperdition thermique du ballon [W/(m².K)]:	14,03													
Besoin journalier moyen en eau chaude [l/l]:	6800													
Température de référence moyenne [°C]:	60													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel	
Couverture [%]	90	91	90	90	91	92	93	94	95	95	94	90	92	
Besoins [kWh]	9791	9033	10344	9811	9534	8621	8602	8419	8214	8488	8647	9471	108974	
Productivité [kWh]	8822	8198	9359	8785	8648	7928	8004	7944	7795	8071	8134	8549	100238	
Productivité /m²	80	74	85	80	78	72	72	72	71	73	74	77	908	

Annexe 2

Tableau A2.3 : évaluation des performances énergétiques du système/villas R2A et R2B.

Date : 25/06/2003

Nom du fichier :	c:\mes documents\dianepe\essai\essaivilla\essai2a2b.s2k													
Station :	<Utilisateur> . Mbour*													
Type de système :	SYSTEME CAPTEUR BALLON													
	{ Sans appoint , Sans échangeur }													
Type de capteur :	J. Giordano Ind. C8/8S													
Inclinaison [*]:	30,00													
Orientation [*]:	0,00													
Surface totale [m²]:	2,00													
Déperdition de la boucle de captage [W/(m².K)]:	4,70													
Efficacité de la boucle de captage:	0,85													
Type de ballon:	100_Vertical													
Déperdition thermique du ballon [W/(m².K)]:	1,13													
Besoin journalier moyen en eau chaude [l/j]:	100													
Température de référence moyenne [*C]:	55													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel	
Couverture [%]	93	94	93	92	92	93	94	96	96	96	96	94	94	
Besoins [kWh]	126	117	134	127	122	109	109	106	103	107	110	121	1391	
Productivité [kWh]	118	109	125	116	113	102	102	101	100	103	105	114	1308	
Productivité /m²	59	55	62	58	56	51	51	51	50	52	53	57	654	

Tableau A2.4 : évaluation des performances énergétiques du système/villas R3B.

Date : 25/06/2003

Nom du fichier :	c:\mes documents\dianepe\essai\essaivilla\essai3b.s2k													
Station :	<Utilisateur> . Mbour*													
Type de système :	SYSTEME CAPTEUR BALLON													
	{ Sans appoint , Sans échangeur }													
Type de capteur :	J. Giordano Ind. C2S													
Inclinaison [*]:	30,00													
Orientation [*]:	0,00													
Surface totale [m²]:	3,70													
Déperdition de la boucle de captage [W/(m².K)]:	4,29													
Efficacité de la boucle de captage:	0,85													
Type de ballon:	150_Vertical													
Déperdition thermique du ballon [W/(m².K)]:	1,22													
Besoin journalier moyen en eau chaude [l/j]:	150													
Température de référence moyenne [*C]:	55													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel	
Couverture [%]	92	92	92	90	91	92	93	95	96	96	95	92	93	
Besoins [kWh]	189	175	201	190	183	164	163	159	155	160	165	182	2086	
Productivité [kWh]	174	161	184	171	166	151	152	151	149	154	157	168	1938	
Productivité /m²	47	44	50	46	45	41	41	41	40	42	42	45	524	

Annexe 2

Tableau A2.5 : évaluation des performances énergétiques du système/villas R4.

Date : 25/06/2003

Nom du fichier :	c:\mes documents\dianepe\essai\essaivilla\essair4.s2k													
Station :	<Utilisateur> . Mbour*													
Type de système :	SYSTEME CAPTEUR BALLON													
	[Sans appoint , Sans échangeur]													
Type de capteur :	Zenit Thermic													
Inclinaison [°]:	15,00													
Orientation [°]:	0,00													
Surface totale (m²):	4,14													
Déperdition de la boucle de captage [W/(m².K)]:	3,81													
Efficacité de la boucle de captage:	0,86													
Type de ballon:	250L_Vertical													
Déperdition thermique du ballon [W/(m².K)]:	1,95													
Besoin journalier moyen en eau chaude [l/j]:	250													
Température de référence moyenne [°C]:	55													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel	
Couverture [%]	92	93	93	93	94	95	96	97	97	97	96	92	94	
Besoins [kWh]	315	292	335	317	306	273	271	265	258	267	274	303	3477	
Productivité [kWh]	291	271	312	294	287	260	260	255	250	258	263	280	3281	
Productivité /m²	70	65	75	71	69	63	63	62	60	62	63	68	792	

Tableau A2.6: évaluation des performances énergétiques du système/infirmierie

Date : 25/06/2003

Nom du fichier :	c:\mes documents\dianepe\essai\essaifir\essairfir.s2k													
Station :	<Utilisateur> . Mbour*													
Type de système :	SYSTEME CAPTEUR BALLON													
	[Sans appoint , Sans échangeur]													
Type de capteur :	J. Giordano Ind. C2S													
Inclinaison [°]:	30,00													
Orientation [°]:	0,00													
Surface totale (m²):	3,70													
Déperdition de la boucle de captage [W/(m².K)]:	4,28													
Efficacité de la boucle de captage:	0,85													
Type de ballon:	100L_Vertical													
Déperdition thermique du ballon [W/(m².K)]:	1,13													
Besoin journalier moyen en eau chaude [l/j]:	100													
Température de référence moyenne [°C]:	60													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel	
Couverture [%]	92	92	92	91	92	93	94	95	95	95	94	92	93	
Besoins [kWh]	144	133	152	144	140	127	127	124	121	125	127	139	1603	
Productivité [kWh]	132	122	140	132	129	117	118	117	115	119	120	128	1489	
Productivité /m²	36	33	38	36	35	32	32	32	31	32	32	35	403	

Annexe 2

Tableau A2.7 : résultats du dimensionnement/cellule

CELLULE								
caractéristiques de base			collecteur principal			circuit de transfert		
SC(m ²)	Q(l/m ² /h)	Hstat	vitesse(m/s)	DC(mm)	LC(m)	vitesse(m/s)	DT(m)	LT(m)
51,06	50	13	1	30,1689	29,6	1,15	28,020785	32
				choix:30x32				choix:28x30
Accessoires		nombre	Le	J _T	J _{ACCES}	J _{TRANS}	J _{COLL}	J _{BALL}
vanne à boisseau sphér		5	0,875	0,0862521	0,7482366	2,7600657	0,296	0,0674057
vanne d'équilibrage		1	0,4					
clapet anti-retour		1	4					
Té à 90°		2	1					
coude à 90°		4	2,4					
				J TOTAL =		3,871708015		soit 4 mce
K	H(m)	Q(m ³ /s)	ρ(kg/m ³)	g(m/s ²)	R	P(W)	choix pompe	
1,2	17	0,0007092	997,738	9,81	0,85	166,58852	Puissance de 170 W	
vase d'expansion								
αeau	ρeau à 110°	Cp(J/kg)	I _{max} (w/m ²)	Bc	Kc(w/m ² /k)	Tm(°C)	Text(°C)	P(kw)
1,051	951,4	4,18	1029	0,77	3,62	55	24,1	34,7449
diamètre tuyauterie vase d'expans =			19,25254587		choix : tuyau φ 20x22 mm			
Vc (litre)	Kd	P1(bar)	P2(bar)	η	Vvase (litre)	choix volume du vase: V = 4 litres		
40,627076	0,051	1,5	2,5	0,6666667	3,1079713			
soupape de sécurité								
H(m)	H(bar)	surpression effective (bar)		pression d'ouvert (bar)		diamètre int mini (mm)		
17	1,65	0,5		2,5		63,64		
						choix: φint 65 mm		

Annexe 2

Tableau A2.8 : résultats du dimensionnement/restaurant

RESTAURANT								
caractéristiques de base			collecteur principal			circuit de transfert		
SC(m ²)	Q(l/m ² /h)	Hstat	vitesse(m/s)	DC(mm)	LC(m)	vitesse(m/s)	DT(m)	LT(m)
110,4	50	7	1	44,361234	64	1,2	40,335062	20
				choix:45x48		choix:42x45		
Accessoires		nombre	Le	j _T	J _{ACCES}	J _{TRANS}	J _{COLL}	J _{BALL}
vanne à boisseau sphér		9	1,8	0,0525141	0,8297233	1,0502827	0,64	0,0733945
vanne d'équilibrage		1	0,7					
clapet anti-retour		1	5,5					
Té à 90°		6	4,2					
coude à 90°		4	3,6					
				J TOTAL = 2,593400566		soit 3 mce		
K	H(m)	Q(m ³ /s)	ρ(kg/m ³)	g(m/s ²)	R	P(W)	Choix pompe	
1,2	10	0,0015333	997,738	9,81	0,85	211,87729	Puissance de 212 W	
vase d'expansion								
αeau	ρeau à 110°	Cp(J/kg)	Imax(w/m ²)	Bc	Kc(w/m ² /k)	Tm (°C)	Text(°C)	P(kw)
1,051	951,4	4,18	1029	0,77	3,62	55	24,1	75,1241088
diamètre tuyauterie vase d'expans = 41,62712621				choix : tuyau φ 42X45 mm				
Vc (litre)	Kd	P1(bar)	P2(bar)	η	V vase (litre)	choix volume du vase: V = 10 litres		
129,49645	0,051	1,5	2,5	0,6666667	9,9064784			
soupape de sécurité								
H(m)	H(bar)	surpression effective (bar)		pression d'ouvert (bar)		diamètre int mini (mm)		
10	0,97	0,5		2,5		120,174		
						choix: φint 121 mm		

Annexe 2

Tableau A2.9 : résultats du dimensionnement/villas

VILLA R2A							
Appareil	nombre	$Q^B(l/s)$	coeff γ	$Q^P(l/s)$	Vitesse (m/s)	D'après l'abaque de Dariés:	
						diamètre conduite (mm)	
baignoire	1	0,35	0,6	0,45	1	D interne =	23
lavabo	2	0,2				D normalisé	23x25
évier	1	0,2					
Total	4	0,75					
hauteur entre capteur et ballon =			1,5 m	longueur conduite =		5 m	
VILLA R2B							
Appareil	nombre	$Q^B(l/s)$	coeff γ	$Q^P(l/s)$	Vitesse (m/s)	D'après l'abaque de Dariés:	
						diamètre conduite (mm)	
douche	1	0,25	0,6	0,39	1	D interne =	20
lavabo	2	0,2				D normalisé	20x22
évier	1	0,2					
Total	4	0,65					
hauteur entre capteur et ballon =			1,5 m	longueur conduite =		5 m	
VILLA R3B							
Appareil	nombre	$Q^B(l/s)$	coeff γ	$Q^P(l/s)$	Vitesse (m/s)	D'après l'abaque de Dariés:	
						diamètre conduite (mm)	
baignoire	1	0,35	0,5	0,425	1	D interne =	23
lavabo	3	0,3				D normalisé	23x25
évier	1	0,2					
Total	5	0,85					
hauteur entre capteur et ballon =			1,5 m	longueur conduite =		5 m	
VILLA R4							
Appareil	nombre	$Q^B(l/s)$	coeff γ	$Q^P(l/s)$	Vitesse (m/s)	D'après l'abaque de Dariés:	
						diamètre conduite (mm)	
baignoire	2	0,7	0,4	0,58	1	D interne =	28
douche	1	0,25				D normalisé	28x30
lavabo	3	0,3					
évier	1	0,2					
Total	7	1,45					
hauteur entre capteur et ballon =			1,5 m	longueur conduite =		5 m	

Annexe 2

Tableau A2.10 : résultats du dimensionnement/infirmierie

INFIRMERIE							
Appareil	nombre	Q^B (l/s)	coeff γ	Q^P (l/s)	Vitesse (m/s)	D'après l'abaque de Dariés: diamètre conduite (mm)	
		0	0,5	0,25	0,9	D interne =	18
lavabo	5	0,5				D normalisé	18x20
		0					
Total	5	0,5					
hauteur entre capteur et ballon =				1,5 m	longueur conduite =		5 m

Annexe 2

Tableau A2.11 : résultats d'évaluation économique

CELLULES				
a (euro/m ²)	Sc (m ²)	CI(euro)	Cadd (euro)	CE (euro)
415	51,06	24368,385	1705,78695	3359,23695
Ppompe (kw)	Punité centr (kw)	Prix du kw (euro)	Cm.enrj (euro)	
0,17	0,2	0,15245064	137,7875	
coûts en Fcfa				
Cm.enrj	Cadd		CE	CI
90381,7106	1118910,95		2203491,48	15984442,1
coût pour les quatre cellules			8813965,91	63937768,6
RESTAURANT				
a (euro/m ²)	Sc (m ²)	CI(euro)	Cadd (euro)	CE (euro)
430	110,4	54592,8	3821,496	5612,916
Ppompe (kw)	Punité centr (kw)	Prix du kw (euro)	Cm.enrj (euro)	
0,212	0,2	0,15245064	149,285	
coûts en Fcfa				
Cm.enrj	Cadd		CE	CI
97923,4958	2506710,3		3681792,25	35810147,2
coût total restaurant			7363584,5	71620294,3
VILLAS				
a (euro/m ²)	Sc (m ²)	CI(euro)	Cadd (euro)	CE (euro)
760	2	1748	122,36	122,36
760	2	1748	122,36	122,36
760	3,7	3233,8	226,366	226,366
760	4,14	3618,36	253,2852	253,2852
760	3,7	3233,8	226,366	226,366
coûts en Fcfa				
Cadd			CE	CI
80262,042			80262,042	1146600,6
80262,042			80262,042	1146600,6
148484,7777			148484,778	2121211,11
166142,4269			166142,427	2373463,24
148484,7777			148484,778	2121211,11
coût total villas			296969,555	4242422,22
TOTAL GENERAL			16474520	139800485
COÛT GLOBAL ACTUALISE SUR 20 ANS (Fcfa)			290196378	

schéma A3.1: principe du système/ restaurant (2 fois pour 13800 l/j)

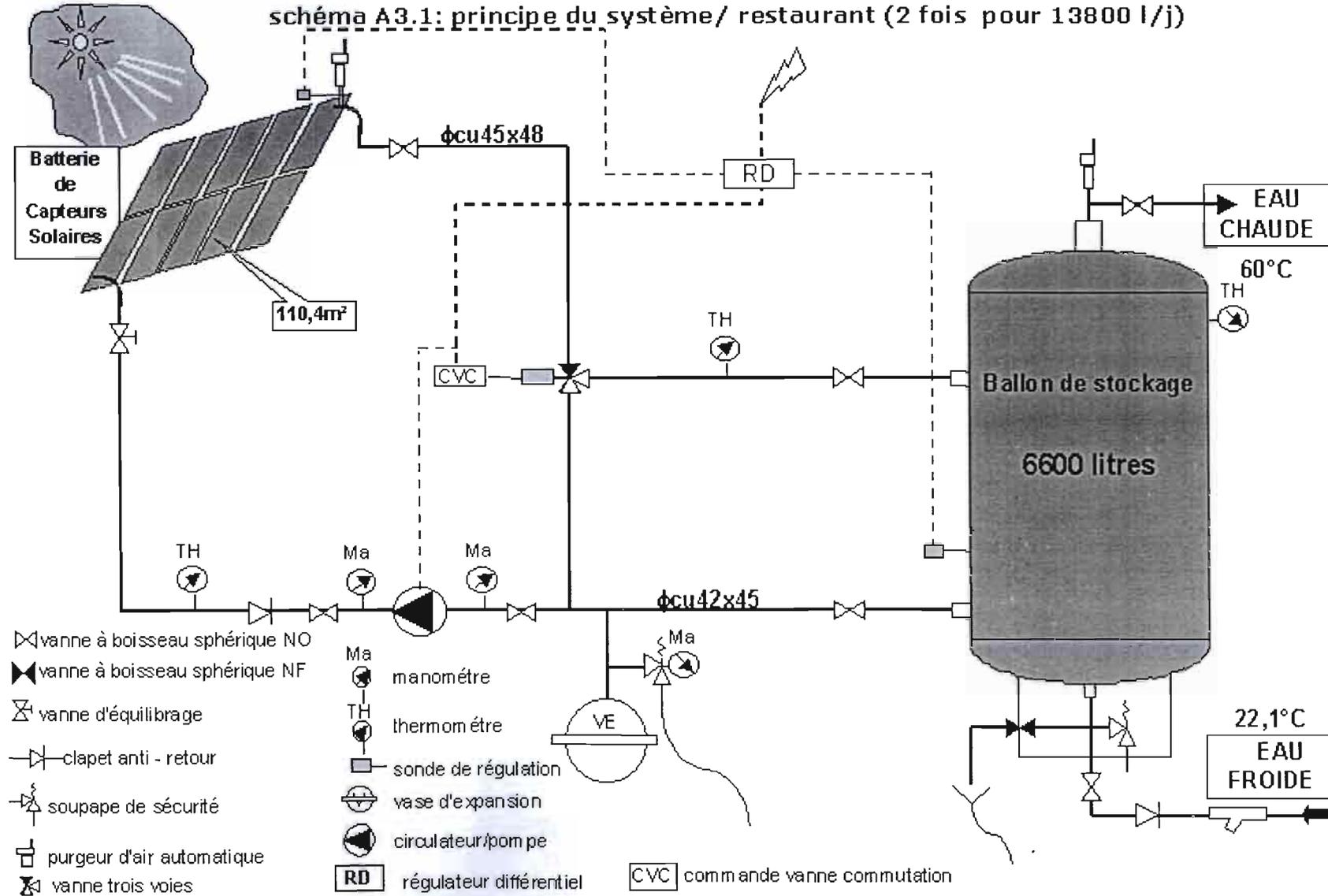


schéma A3.2: principe du système/ pour chaque cellule

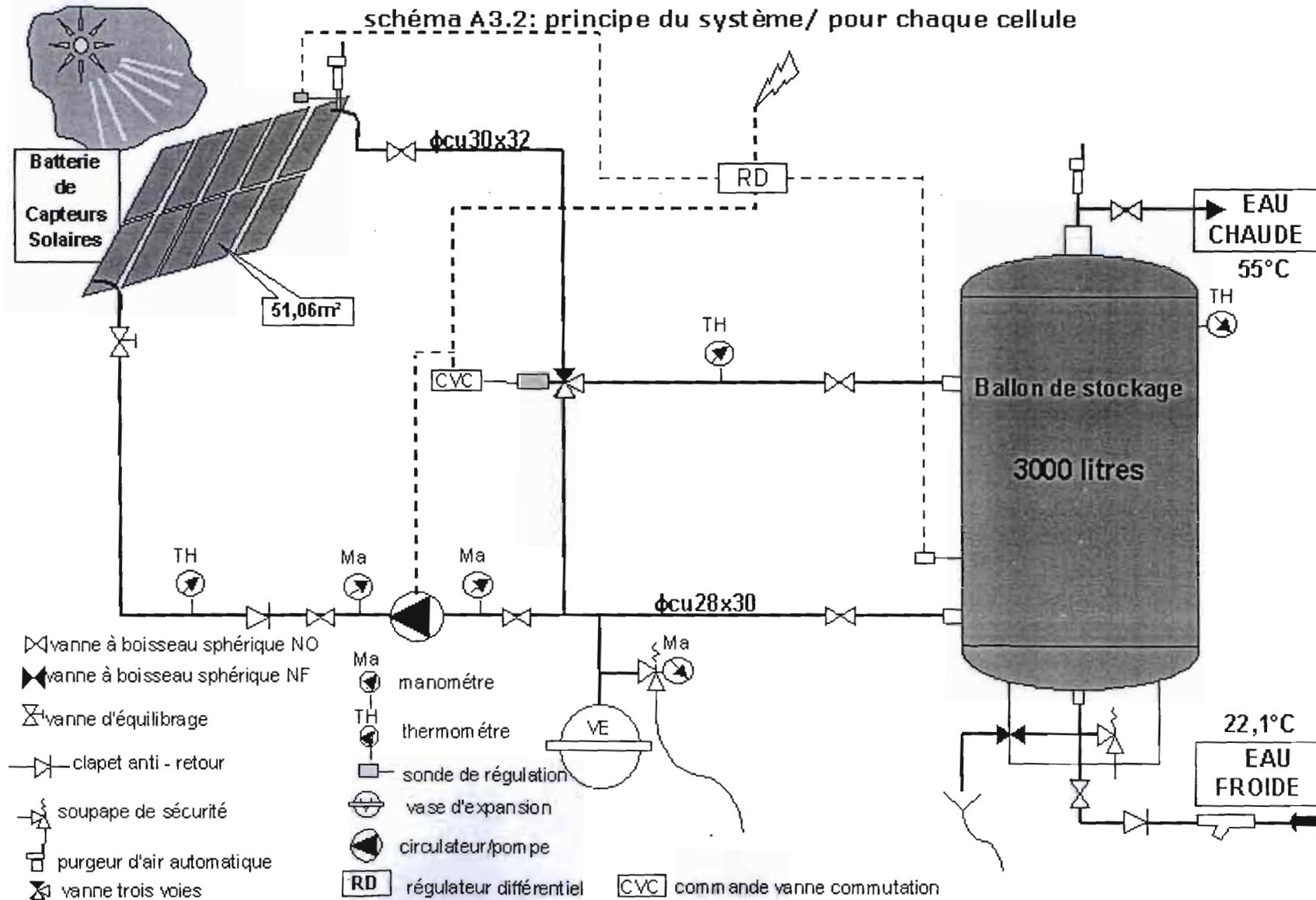
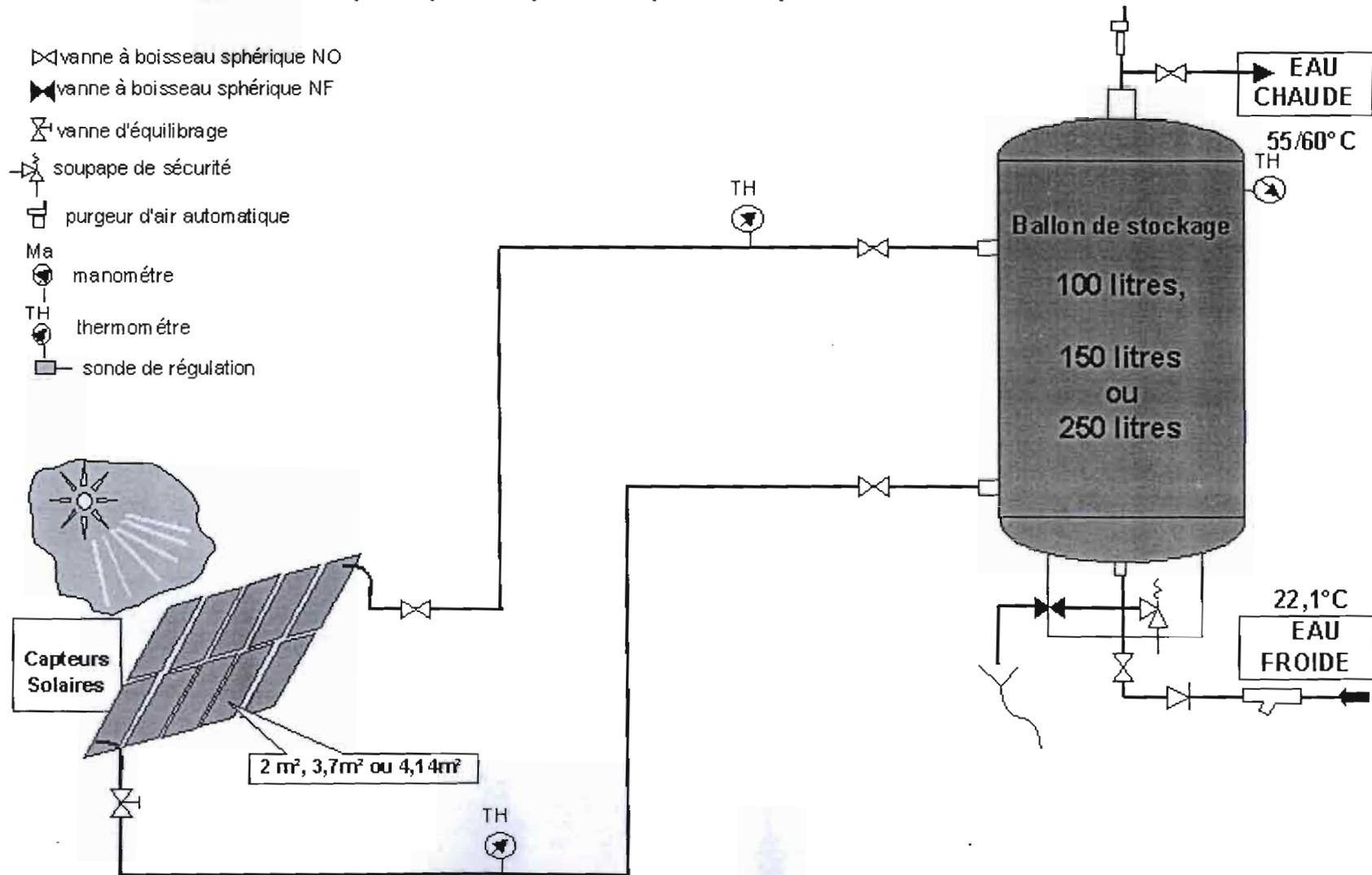


schéma A3.3: principe du système/ pour chaque villa et l'infirmirie



Annexe 3

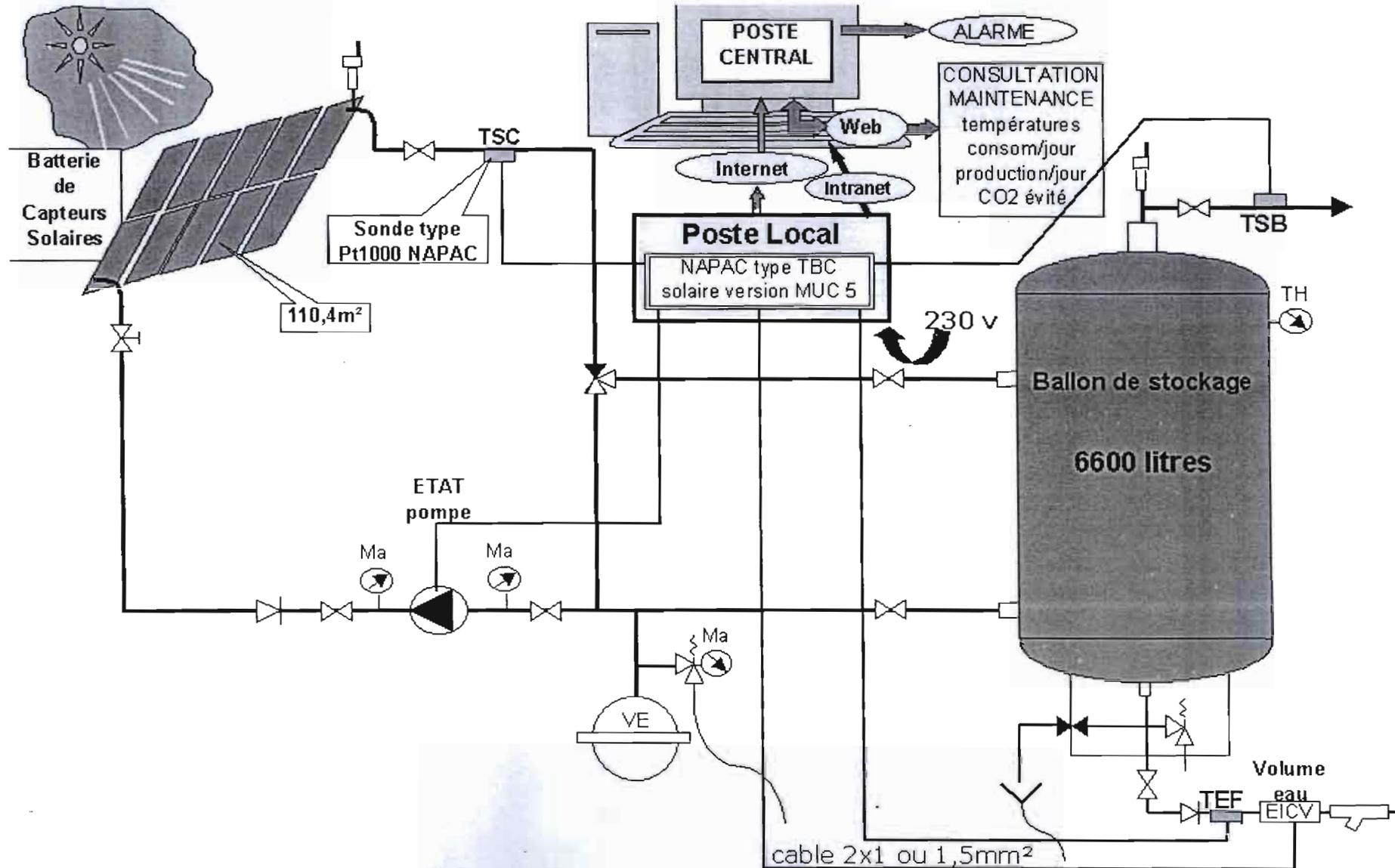


schéma A3.4 : principe du télécontrôle/cellule- restaurant

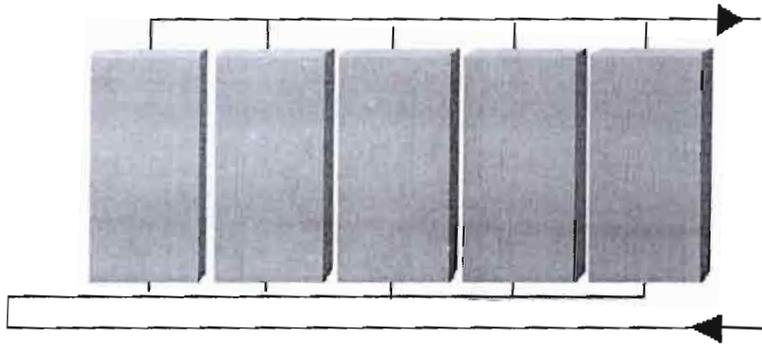


Schéma A3.5 : Raccordement en boucle de Tickelman



Schéma A3.6 : implantation des capteurs sur terrasse



Schéma A3.7 : implantation des capteurs intégration en toiture inclinée

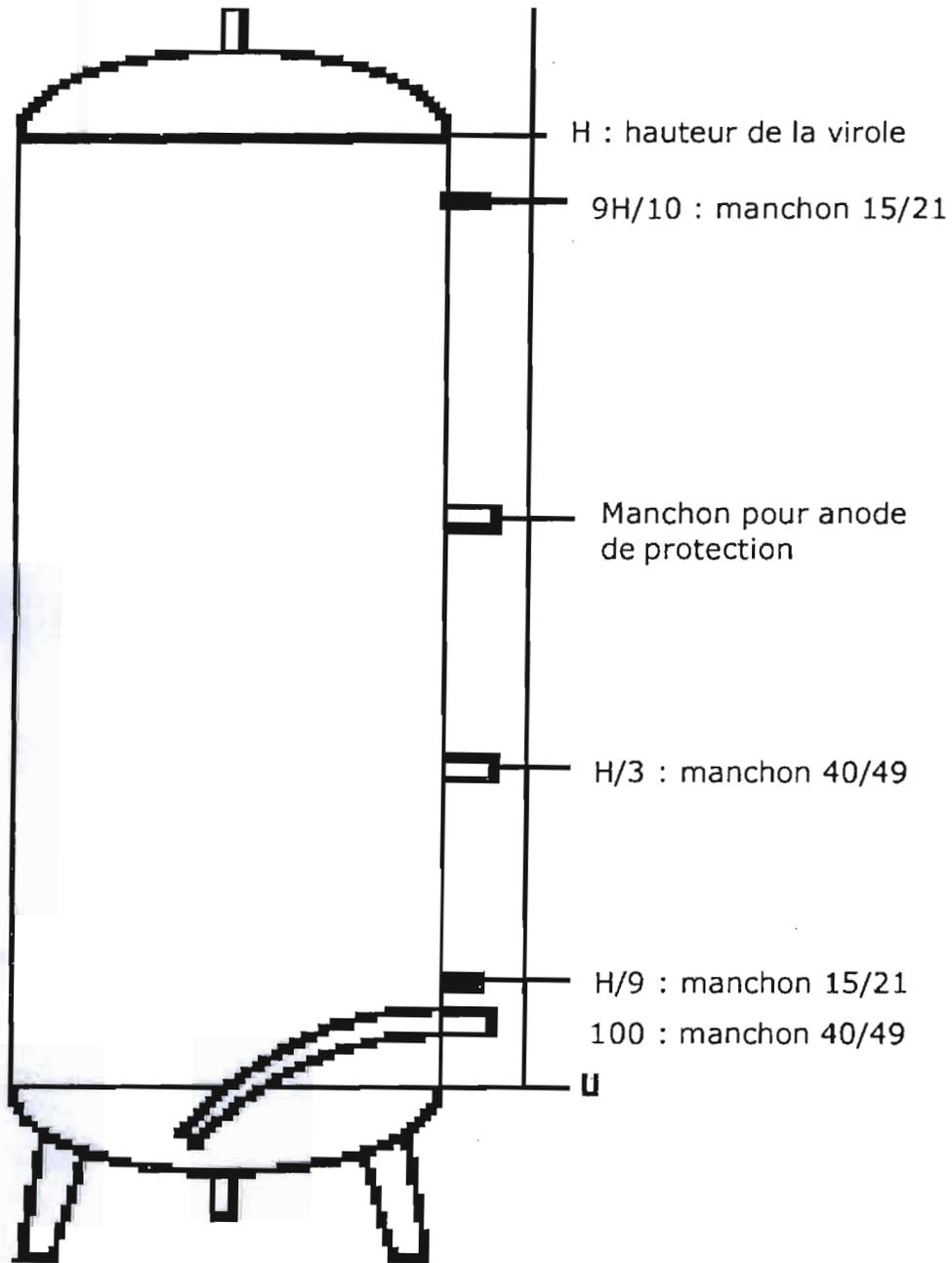


schéma A3.8 : ballon de stockage solaire type vertical

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Guide de l'eau chaude sanitaire. Conception et calcul des installations (collection des guides de l'AICVF édition 1991)

[2] Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives. Juin 2001 (Tecsol)

[3] Guide du chauffe-eau solaire (France édition multimédia).Tecsol BP434 66004 perpignan cedex.

[4] Météorologie nationale/projet PNUD-FEM : efficacité énergétique des bâtiments Côte d'ivoire/Sénégal (1996-2000)

[5] Traité pratique de plomberie et d'installation sanitaire 14^{ème} édition 1984.

- Document CSTB-Réf.MPE/411-Mai 1985.
- Guide de calcul prévisionnel des consommations d'énergie des bâtiments du tertiaire, 1992.
- Manuel de la régulation et de la gestion de l'énergie, par R. Cyssau et l'ACR

REFERENCES ELECTRONIQUES

<http://www.ademe.fr>
<http://www.cstb.fr>
<http://www.tecsol.fr>
<http://www.cositic.asso.fr>
<http://www.sigma-consultants.fr>
<http://www.outilssolaires.com>
<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>