

Optimisations photovoltaïques autonomes

avec liquides en écoulement

L'invention(OPALE) concerne un dispositif multi-réservoirs(REP,REC,RLS) comprenant au moins une pompe(PMP),
5 un filtrage de retour intégré(FRI) à au moins un des réservoirs, un filtrage de départ intégré(FDI) à chaque pompe(PMP), de conduites ascendantes (ASC,ASC1,ASC2) et rampes(RA,RA1,RA2,RA3) d'arrosage, gérés par un pilotage saisonnier avec déclencheurs thermostatiques(TST),
10 photosensibles(PHO) et temporels(RHP,RTE) réalisant avec des liquides en écoulement comme l'eau de pluie(EP), l'eau de pluie préchauffée(EC) ou des liquides spécifiques(LS) toutes les optimisations nécessaires dans le fonctionnement d'un champ de panneaux photovoltaïques(CPV) sur toiture ou
15 au sol, orientable ou non, à savoir :

1. Le refroidissement des panneaux (sauf hiver)
2. Le déneigement/dégivrage des panneaux (hiver)
3. Le nettoyage des panneaux (toute saison)
 - a. Des dépôts organiques
 - 20 b. Des dépôts inorganiques
4. L'atténuation du saut d'indices optiques entre l'air et le verre des panneaux (toute saison)
5. L'extraction d'énergie thermique (toute saison)

La présente invention(OPALE) se caractérise ainsi par
25 **les éléments et fonctionnements suivants :**

1. L'utilisation de liquides différents stockés dans :
 - a. au moins un réservoir(REP) d'eau de pluie(EP),
 - b. au moins un réservoir(RLS) de liquide spécifique(LS) qui sera notamment un antigel (par
30 exemple eau/alcool) ou une solution acide aqueuse, ou un réservoir(REC) d'eau chauffée(EC), ou tout liquide spécifique(LS) jugé approprié,

2. Au moins une pompe(PMP) dont l'aspiration(ASP) plonge, possiblement à l'aide de vannes (VDP,VDC,VDS) :
- 5 a. Dans un réservoir d'eau de pluie(REP) pour la période estivale,
 - b. Dans le réservoir d'antigel(RLS) ou en variante dans le réservoir(REC) d'eau chauffée(EC) pour la période hivernale,
 - 10 c. Dans un réservoir(RLS) de liquide spécifique(LS) lors d'interventions exceptionnelles de nettoyage intense (à l'eau acide ou au diluant organique).
3. Un double filtrage(FRI,FDI) intégré :
- 15 a. Le filtrage du liquide *de retour* intégré(FRI) sur au moins un des réservoirs(REP,RLS,REC) constitué d'au moins une boîte bi-étagée(BBE) à surface filtrante(SFI) réutilisable après nettoyage, avec un couvercle amovible(CAM), une grille de soutien(GRI) maintenus par des vis(VI1,VI2,VI3,VI4), avec un organe de
 - 20 distribution(DIS) vers le réservoir de liquide(REP,RLS,REC) approprié,
 - b. Le filtrage du liquide *de départ* intégré(FDI) à l'aspiration(ASP) constitué d'une tête ou d'une surface filtrantes (TFI,SFI) réutilisables après
 - 25 nettoyage,
4. Un chauffage optionnel intégré à au moins un réservoir(REP,RLS) comprenant soit un serpentín(SER) où s'écoule l'eau chaude sanitaire(ECS), soit une résistance chauffante(RCH), soit les deux(SER,RCH),
- 30 5. Des capteurs et déclencheurs de la pompe et/ou de la résistance chauffante(RCH):
- a. Thermosensible : un relais thermostatique(TST)
 - b. Photosensible : un relais crépusculaire(PHO)

- c. Temporels : un relais à horaires programmables(RHP) et un relais temporisé électrique(RTE),
- 5 6. Des conduites ascendantes(ASC,ASC1,ASC2) amenant le fluide choisi au sommet du champ photovoltaïque(CPV),
7. Au moins une rampe d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3) de laquelle s'écoule le fluide,
8. Une serre amovible(SAM) optionnelle recouvrant le champ photovoltaïque(CPV) selon la saison,
- 10 9. Des chéneaux(CHN) collecteurs du fluide,
10. Un plan d'écoulement amovible(PEA) déportant ou non les fluides en écoulement en dehors des chéneaux(CHN)
11. Des conduites de retour(RET) vers les réservoirs(REP,RLS,REC).
- 15 12. Au moins un flotteur(FLO), au moins un distributeur(DIS) et au moins une évacuation du trop-plein(TRP) pour gérer le niveau des fluides dans les réservoirs(REP,REC,RLS)

L'exposé du présent dispositif **d'Optimisations Photovoltaïques Autonomes avec Liquides en Ecoulement(OPALE)** s'appuiera sur 9 figures techniques (Fig. 1/32 à Fig. 9/32) et 23 figures de ressources scientifiques (fig. 10/32 à Fig. 32/32) annexées au présent document qui s'organisera selon le plan suivant:

1. Les perfectionnements photovoltaïques existants :
 - a. Refroidissement des panneaux
 - 10 b. Déneigement des panneaux
 - c. Nettoyage des panneaux
 - d. Filtrage
 - e. Surface anti-reflet
 - f. Extraction thermique
- 15 2. Synthèse de l'état de l'art et apport d'OPALE
 - a. Pour le refroidissement des panneaux
 - b. Pour le déneigement des panneaux
 - c. Pour le nettoyage des panneaux
 - 20 d. Pour le filtrage
 - e. Pour les surfaces anti-reflet
 - f. Pour l'extraction thermique
- 25 3. Les Optimisations Photovoltaïques Autonomes avec Liquides en écoulement (OPALE) :
 - a. Composants du système OPALE
 - b. Refroidissement (sauf hiver)
 - i. Dimensionnement hydraulique
 - ii. Pilotage du déclenchement du pompage
 - 30 c. Déneigement/dégivrage des panneaux (hiver)
 - d. Filtrage et chauffage intégrés
 - e. Nettoyage des panneaux (toute saison)
 - f. Atténuation du saut d'indices optiques air/verre
 - g. Extraction d'énergie thermique (toute saison)

35

1. Perfectionnements photovoltaïques existants

1. a) *Le refroidissement des panneaux photovoltaïques* est un enjeu important car la puissance d'un panneau décroît typiquement de 0,35% à 0.5% par °C au dessus de 20°C, tel qu'illustré aux figures 10 et 11. Les statistiques solaires estiment qu'en France, une installation avec panneaux intégrés à la toiture perd de 5 à 15% de sa production annuelle à cause de leur échauffement, et jusqu'à 35% de sa puissance instantanée par les journées chaudes et fortement ensoleillées.

Ainsi plusieurs dispositifs de *refroidissement des panneaux* ont été proposés, le plus souvent avec de l'eau liquide. Ainsi on trouve :

- des exemples de modules photovoltaïques avec *refroidissement intégré dans le panneau* dans DE2020060160108U1 par SUNZENIT GmbH ou bien dans FR2566183A1 par Roger LUCCIONI ou aussi FR2911997A1 par Guy DIEMUNSCH, également un liquide entourant complètement les cellules comme dans WO0036618A1 par le Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland,
- des exemples de refroidissement avec *ruissellement de liquide sur la toiture* (souvent en circuit fermé et récupération de l'eau de pluie) dans **SI22844A/WO2010005402A3 par Kajetan BAJT** ou bien **JP62013084A par Katsumi KAWASHIMA** qui sont jugés comme un état de l'art proche de la présente invention,
- des exemples d'installations réfrigérantes et/ou à pompe à chaleur comme dans JP2006183933A par Masahisa OTAKE ou EP2093808A2 par Alfonso DI DONATO,
- des exemples de *panneaux hybrides photovoltaïques et thermiques (PVT)* avec diverses variantes, notamment dans CN201365210 par JUNJIE/DANDAN, CN201368606Y par WU / GOU, JP2003199377 par KOMAI / YOSHIKA, ou KR100622949B1 par KIM JONG/KIM TAE, ou WO2009111017A3

par Edwin COX. Il est parfois proposé de concentrer le rayonnement comme dans US6630622B2 par Annemarie HVISTENDAHL KONOLD ou bien WO0008690A2 par Windbaum Forschungs und Entwicklungs GmbH. Pour information, les figures 10 et 11 sont issues de publications de performances par la Société Holtkamp SES sur ses panneaux hybrides photovoltaïques/ thermiques vitrés

1.b) Le déneigement / dégivrage des panneaux photovoltaïques est un thème moins souvent abordé ; cependant, *il revêt une importance particulière dans les zones montagneuses ou enneigées* : pour bénéficier du fort albédo de la neige et avoir une bonne production, il est nécessaire de chasser la neige ou le givre tombés sur l'installation photovoltaïque. Dans ce cas, la problématique du refroidissement est obsolète et remplacée par une problématique de déneigement et plusieurs méthodes ont été proposées à cet effet :

- des exemples d'éléments chauffants électriques pour fondre la glace, additionnels comme dans CN201340855, ou bien intégrés dans les panneaux par courant inverse comme dans DE102006004712A1 par Inek Solar AG ou JP9023019 ou JP62179776 par KYOCERA, ou KR20100005291A par YU HEUNG SOO
- des exemples de fonte par courant d'air chaud comme dans DE102006054114A1 par Gertraud HÖCHSTETTER ou bien par courant de CO2 comme dans JP2006029668 par OTAKE/MURATA,
- des exemples de fonte par ruissellement d'eau comme dans JP2003056135 par Hitoshi HORIKAWA ou JP2005155272 par OE/TANIKOSHI, ou WO2009139586 par Soo YU HEUNG
- des exemples de déneigement mécanique comme dans DE10013989A1 par René NEUMANN ou CN201338000Y par DAJIAN/HONGSHENG, ou DE202005012844U1 par STEIBL/ALBRECHT

1.c) Le nettoyage des panneaux photovoltaïques est également proposé selon différentes méthodes :

- module à surface auto-nettoyante comme dans CN201181709Y par Liu JINWEI, ou bien films physicochimiques autonettoyants à appliquer a posteriori sur les panneaux,
- utilisation de moyens mécaniques (brossage, essuyage...) comme dans DE10013989A1 par René NEUMANN ou KR20090090722A par JUNG HAE/KIM GYEONG ou WO2008014760A2 par Gerd HETTINGER,
- combinaison du ruissellement de liquide réfrigérant et du nettoyage comme dans KR20090071895A par Jae LEE CHAN ou WO2009139586 par Soo YU HEUNG.

1.d) Le filtrage concerne les applications où le ruissellement du liquide se fait directement à l'air libre. En pratique, il est souvent proposé un circuit d'eau fermé avec réservoir pour ne pas fonctionner à « eau perdue » tout en collectant l'eau de pluie. Cependant, les toitures collectent de nombreux déchets organiques (déjections d'oiseaux, insectes, résidus de végétaux (feuilles, brindilles, poussières) et minéraux (poussières de pierre ou de sable, pollutions amenées par le vent et/ou la pluie). Ceci entraîne un encrassement très rapide des réservoirs et compromet gravement le fonctionnement de la pompe et de la rampe d'arrosage assurant le ruissellement du liquide sur le champ photovoltaïque. Très peu de brevets sur le sujet d'OPALE abordent techniquement cette question du filtrage ; on peut toutefois citer JP62013084A qui préconise de compartimenter le réservoir d'eau de pluie en un espace de stockage et un autre de décantation, mais sans filtrage du fluide, ou SI22844A qui signale un simple filtrage de retour des eaux chargées. Un filtrage de départ n'est pas proposé.

1.e) **Les surfaces anti-reflet** sont développées le plus souvent par le dépôt de fines couches à la surface du verre du panneau photovoltaïque de manière à canaliser le maximum de rayonnement vers les cellules photosensibles. Néanmoins, il demeure une différence d'indices optiques importante entre l'air ($n=1$) et le verre de protection ($n=1.5$) qui provoque la réflexion partielle du rayonnement et donc un effet photovoltaïque affaibli sur les cellules.

10 **1.f) L'extraction thermique** pour panneaux photovoltaïques est possible. Comme illustré qualitativement à la figure 15, les imperfections de l'effet photovoltaïque et les matières photosensibles très sombres conduisent à une dégradation d'environ 80% du rayonnement en chaleur. La température du panneau croît toujours jusqu'à ce que la puissance thermique perdue par le panneau (par conducto-convection et ré-émission infrarouge) soit égale à la puissance thermique reçue. Sans refroidissement forcé, la température d'équilibre est au voisinage de 90°C lorsque l'atmosphère est chaude avec un rayonnement intense, et typiquement 50 à 70°C - ce qui entraîne une baisse d'environ 30% pour la puissance électrique -. De plus, ces cycles de température à forte amplitude font vieillir les éléments photosensibles à travers une lente baisse du rendement électrique (de 10 à 20% sur une période de 20 ans par rapport aux performances initiales). Ce phénomène d'échauffement *a priori* néfaste est parfois valorisé en combinant la techniques des panneaux solaires thermiques (liquide circulant sous verre) avec celle des panneaux solaires photovoltaïques (constituant la surface chaude absorbante). Mais le rafraîchissement intense des panneaux et l'obtention d'eau très chaude sont incompatibles. **Seul un compromis entre les deux est possible, avec des besoins saisonniers.**

2. Synthèse de l'état de l'art et apports d'OPALE

Malgré des propositions nombreuses, chacune possède des lacunes plus ou moins profondes :

5 **2.a) pour le refroidissement des panneaux**

Les solutions de refroidissement intégré dans le panneau ne nettoient pas la paroi extérieure exposée aux salissures. La solution de ruissellement de liquide à l'extérieur du panneau est la plus pertinente, mais à
10 condition d'y **adjoindre des solutions de filtrage et de lutte contre le froid hivernal performantes**. Enfin, les panneaux hybrides PVT n'assurent pas leur nettoyage extérieur et ont tendance à surchauffer : **en été, diminuer la production d'eau chaude et privilégier la production**
15 **photovoltaïque, en hiver, faire le contraire.**

2.b) pour le déneigement/dégivrage des panneaux

Les éléments chauffants électriques dans le panneau entraînent un surcoût et une dépense d'énergie importante lors de leur mise en œuvre. Il en va de même pour les
20 techniques de polarisation/courant inverses des cellules photovoltaïques qui imposent une électronique de contrôle très fiable.

Le courant d'air chaud, forcément énergivore, nécessite également des panneaux spécifiques et donc
25 coûteux par rapport à un panneau standard.

Le déneigement mécanique requiert des cinématiques de brossage/essuyage assez complexes et onéreuses, notamment pour leur maintenance, et qui, avec des résidus sableux ont tendance à rayer le verre des panneaux.

30 Enfin, la technique par ruissellement est intéressante car en pente, **très peu de fluide et d'énergie suffit à déstabiliser une couche de neige** déposée sur du verre, à condition de **sécuriser et automatiser l'écoulement du fluide.**

2.c) pour le nettoyage des panneaux

Les films autonettoyants sont généralement chimiquement complexes et leur action n'est pas durable, voire inefficace car certaines salissures sont particulièrement adhérentes comme les déjections d'animaux ou les dépôts minéraux. La pluie n'est pas toujours suffisante, voire peut être elle-même à l'origine d'encrassement lorsqu'elle porte des poussières naturelles comme le sable ou artificielles liées à des résidus industriels.

Le brossage nécessite des architectures mécaniques coûteuses et peut endommager les panneaux, par exemple avec le frottement du sable résiduel sur le verre.

En réalité, seul le ruissellement apparaît comme valable, mais le simple ruissellement d'eau se révèle insuffisant : il faut un **filtrage efficace** et des **liquides spécifiques, avec une hydraulique maîtrisée.**

2.d) pour le filtrage

L'état de l'art fait apparaître de grandes faiblesses en la matière : il est ignoré très souvent, signalé parfois, et souvent techniquement inadéquat. Les quantités de salissures collectées par un toit sont très importantes et il faut absolument les empêcher de pénétrer dans les réservoirs de liquides, qu'il s'agisse d'eau ou de liquides spécifiques. **Le filtrage d'OPALE est strict aussi bien au retour qu'au départ** du fluide de manière à maintenir les réservoirs propres tout comme les canalisations stratégiques du fluide, comme l'aspiration(ASP) de la pompe(PMP), les éventuelles conduites ascendantes(ASC) ou rampes d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3). **Pour autant, ce filtrage est de maintenance aisée et bon marché, sans entraîner des pertes de charge hydraulique excessives.**

2.e) pour les surfaces anti-reflet

Le problème du reflet lors du passage de la lumière à travers l'interface de 2 indices optiques différents est une situation connue, parfois recherchée ou combattue.

5 Les panneaux photovoltaïques créent une transmission entre un indice d'environ 1 (celui de l'air) et un indice d'environ 1,5 (celui du verre de protection). *Des calculs d'optique ondulatoire développés plus loin montrent que cela induit un reflet d'environ 4% en incidence normale, la*
10 *situation se dégradant à 10% vers une incidence de 50° (dépendant de la polarisation de l'onde) et jusqu'à 100% lorsque l'incidence devient rasante. Ce reflet est une perte nette pour les cellules photosensibles.*

Les techniques de couches anti-reflets existent, mais
15 sont onéreuses et périssables car exposées aux agressions subies par les panneaux posés en toiture. De plus, elles ne fonctionnent que pour une seule longueur d'onde.

D'autres considérations d'optique ondulatoire indiquent qu'un bon compromis d'indice de couche anti-
20 reflet est la racine carrée des 2 indices à traverser (voir 3.f), soit dans notre cas $\sqrt{1 \times 1,5} \approx 1,22$. **OPALE utilise donc des solutions aqueuses adaptées** car d'indice de 1,3 environ.

25 2.e) pour l'extraction thermique

Les systèmes d'extraction thermique utilisent souvent l'effet de serre grâce à un verre *inamovible* en surimposition devant le panneau photovoltaïque, ce qui
30 *conduit à sa surchauffe même lorsqu'il n'y a aucun besoin de chauffage*, en particulier en été. Le rendement photovoltaïque se dégrade alors considérablement, à moins d'imposer un pompage assez énergivore pour évacuer les calories et de prévoir un radiateur pour dissiper la chaleur dans l'environnement.

35

Cependant, il est possible de stocker la chaleur dans un grand tampon thermique souterrain du bâtiment, de manière à y puiser de la chaleur durant l'hiver. Ce type d'installation est néanmoins coûteux et très peu répandu.

5 Enfin, on ne peut pas obtenir simultanément une production photovoltaïque maximum et un fluide de retour chaud. *Photovoltaïque et chauffage solaire sont incompatibles dans leur besoin, mais **OPALE utilise une serre amovible(SAM), montée l'hiver et absente en été.***

10

Ainsi, comme cela va être développé, le système OPALE résout l'ensemble des problèmes techniques soulevés avec des moyens simples et néanmoins automatisés.

15 Par l'écoulement en circuit fermé de grandes quantités d'eau **avec une hydraulique maîtrisée**, le dispositif(OPALE) garantit un refroidissement maximal, même en période de canicule.

20 Par la combinaison de cet écoulement, au besoin quotidien, avec **une approche multi-réservoirs**(RLS,REP,REC) d'eau de pluie(EP) ou de **liquides spécifiques**(LS), le dispositif(OPALE) assure un nettoyage régulier et efficace, qui peut être renforcé par l'écoulement des liquides spécifiques adéquats pour dissoudre les dépôts les plus tenaces sur le champ photovoltaïque(CPV).

25 Grâce **au double filtrage intégré**(FRI,FDI) des liquides au retour et au départ, avec une **boîte bi-étagée(BBE) à surface filtrante**(SFI) ou à **tête filtrante**(TFI) implantées sur l'aspiration(ASP) de la pompe(PMP), le dispositif(OPALE) offre un filtrage accessible, efficace et
30 peu onéreux pour préserver des salissures tous les réservoirs(REP,RLS,REC) et canalisations (ASP,PMP,ASC,ASC1, ASC2,RA,RA1,RA2,RA3) stratégiques.

Par l'approche multi-réservoirs, **soit d'antigel** (figs 12, 13 et 14), **soit d'eau chauffée(EC)**, OPALE permet un **déneigement rapide peu énergivore** en période hivernale.

Grâce à l'écoulement de liquide aqueux, le
5 dispositif(OPALE) crée **une couche anti-reflet pour toutes
les longueurs d'onde sans aucun frais** (figs 20 à 32).

Le dispositif(OPALE) permet une **extraction thermique**
de la chaleur des panneaux particulièrement **adaptée par le
caractère amovible de la serre(SAM)** qui sera mise en place
10 l'hiver et retirée l'été **et la présence d'un réservoir
d'eau chauffée(REC)** qui pourra communiquer via un
serpentin(SER) sa chaleur à l'eau chaude sanitaire(ECS)

Enfin, **par la combinaison de ses relais**
thermostatiques(TST), crépusculaires(PHO), à horaires
15 programmés(RHP) et à temporisation électrique(RTE), le
dispositif(OPALE) s'adapte intelligemment à toutes les
situations de manière à **sécuriser et rationaliser le
fonctionnement autonome de l'installation malgré les
alternances climatiques.**

20 **Tant pour des installations en toiture telles
qu'illustrées à la figure 1, que pour des centrales
solaires au sol telles qu'illustrées aux figures 2 (OPALE
modulaires) et 3 (OPALE centralisées), il apparaît un
système autonome complet pour garantir toutes les
25 optimisations photovoltaïques malgré les variations
saisonnnières et/ou climatiques :**

1. Le refroidissement des panneaux (sauf hiver),
2. Le déneigement/dégivrage des panneaux (hiver),
3. Le nettoyage des panneaux (toute saison),
- 30 4. Le filtrage des liquides en écoulement
5. L'atténuation du saut d'indices optiques air/verre
(toute saison),

6. La valorisation thermique du chauffage des panneaux photovoltaïques (toute saison).

3. Les Optimisations Photovoltaïques Autonomes avec Liquides en écoulement (OPALE)

5

3.a) Les composants du système OPALE

Tel qu'illustré à la figure 1 pour une installation en toiture, à la figure 2 pour une installation au sol à modules autonomes, ou à la figure 3 pour une installation
10 au sol à gestion centralisée, le dispositif(OPALE) s'implante sur un *champ photovoltaïque(CPV)* et possède au moins 2 réservoirs dont :

- un réservoir(REP) d'eau de pluie (EP)
- ou un réservoir(RLS) de liquides spécifiques (LS),
- 15 - ou un réservoir(REC) d'eau chauffée(EC).

*Les liquides spécifiques(*LS*) peuvent être des solutions aqueuses :*

* d'antigel :

- eau/éthanol (tel qu'illustré en figs.12 et 13)
- 20 - ou de sel(fig.14),

* de diluant organique pour emporter les dépôts organiques,

* d'acide/base capables de dissoudre les dépôts inorganiques,

* de l'eau chauffée(EC) destinée soit au déneigement, soit
25 au chauffage d'eau chaude sanitaire(ECS),

* ou tout autre fluide spécifique jugé pertinent.

Le dispositif(OPALE) comprend aussi une pompe(PMP) dont l'aspiration(ASP) plonge :

- 30 - dans le réservoir d'eau de pluie(REP) sauf en hiver,
- dans le réservoir d'antigel(RLS) en hiver, ou en variante dans le réservoir(REC) d'eau chauffée(EC),
- dans le réservoir de fluides spécifiques(RLS) pour les opérations de détartrage et nettoyage approfondis.

En outre, le dispositif(OPALE) est équipé d'un double filtrage intégré(FRI,FDI) : un filtrage de retour/départ intégré(FRI/FDI) aux réservoirs(REP,RLS,REC).

5 Tel qu'illustré aux figures 1 à 3, et plus précisément aux figures 4 et 5, le filtrage de retour intégré(FRI) comprend une boîte bi-étagée(BBE) avec couvercle amovible(CAM).

10 L'étage inférieur(INF) est séparé de l'étage supérieur (SUP) par une grille(GRI) sur laquelle est déposée une surface de filtrage(SFI) recueillant les déchets amenés par l'eau du champ(CPV). Cette surface de filtrage(SFI) prend la géométrie d'un panier refermé par le couvercle amovible(CAM). L'étage inférieur de (FRI) comprend un
15 distributeur de fluide(DIS) qui permet le retour du fluide filtré dans le réservoir approprié. L'ensemble est maintenu par des vis(VI1,VI2,VI3,VI4).

20 Tel qu'illustré aux figures 1 à 3, et en particulier à la figure 6, le filtrage de départ intégré(FDI) comprend un organe d'aspiration(ASP) possédant une tête filtrante(TFI) à la figure 6, ou bien une surface de filtrage(SFI) avec des vannes de départ (VDP,VDC,VDS) sur la figure 3.

25 Le système possède des déclencheurs de la pompe(PMP) :
- un thermostat(TST) sensible à la température des panneaux
- un relais crépusculaire(PHO) sensible à la lumière
- des relais temporisés électriques (RTE) ou à horaires programmables(RHP)

30 Des conduites ascendantes(ASC) amènent le fluide choisi au sommet du champ photovoltaïque(CPV),

 Au moins une rampe d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3) permet l'écoulement du fluide et des chéneaux collecteurs(CHN) le récupèrent et le canalisent dans des conduites de retour(RET) vers le filtrage de retour intégré(FRI).

35

3.b) Refroidissement (sauf hiver)

A cause de sa couleur sombre, un panneau exposé en plein soleil peut monter jusqu'à 90°C, ce qui signifie qu'il produira 30% de moins que s'il était maintenu à 20°C.

5 En se limitant au faible refroidissement naturel du panneau, des pertes instantanées de 25% ne sont par rares. De plus, avec l'alternance jour/nuit, des cycles de température d'amplitude élevée (jusqu'à 80°C) surviennent et contribuent au vieillissement du panneau. **Le**
10 **développement des panneaux photovoltaïques intégrés à la toiture (pour des raisons esthétiques) a considérablement réduit leur ventilation** : lors d'ensoleillement important, leur surchauffe se fait nettement sentir, même en dehors des périodes estivales. On estime qu'en France, une
15 installation perd 10 à 15% de sa production annuelle à cause de l'échauffement des panneaux.

Le dispositif(OPALE) refroidit l'installation par ruissellement d'eau. Le débit de la pompe(PMP) et la fréquence des pompages peuvent être prévus pour ramener la
20 température des panneaux à environ 20°C, et dans tous les cas moins de 30°C. *Ainsi, la production photovoltaïque est comparable à celle d'une installation qui serait toute l'année en atmosphère fraîche. Dans le même temps, les amplitudes de température subies par les panneaux sont*
25 *réduites à quelques dizaines de °C, ce qui supprime quasiment les stress thermiques, tant sur les cadres que sur les éléments photosensibles du panneau.*

D'un point de vue énergétique, le pompage consomme de l'énergie et **l'intérêt d'OPALE est de permettre la**
30 **production d'une énergie photovoltaïque supérieure à celle nécessaire pour le pompage.** Pour cela, le dispositif(OPALE) combine deux stratégies :

1. Un dimensionnement hydraulique optimum limitant les pertes de charge pour la pompe et toutes les conduites d'eau sous pression,
2. Un pilotage fin du déclenchement de la pompe qui ne démarre que s'il est possible de produire plus d'énergie électrique que la consommation de la pompe via les déclencheurs(RHP,TST,RTE).

i. Refroidissement : Dimensionnement hydraulique

10

Le dispositif(OPALE) comprend un circuit d'eau sous faible pression qui commence dans un réservoir de fluide(REP,RLS,REC), se poursuit dans l'organe d'aspiration(ASP) de la pompe, puis la pompe(PMP), ensuite les conduites ascendantes(ASC), et enfin la ou les rampes d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3). Le retour(RET) se fait par simple gravité ainsi que le filtrage(FRI).

Une attention toute particulière doit être apportée au choix des diamètres des tuyaux, à leur nombre, ainsi qu'aux rampes d'arrosages (RA,RA1,RA2,RA3) dont les deux paramètres essentiels sont la distance entre 2 perçages(PER) de sortie consécutifs et leur diamètre.

Pour la rampe d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3), le dispositif(OPALE) ne cherche surtout pas à expulser l'eau sous la forme d'un brouillard (brumisation) car cela se révèle inefficace :

- perte de charge dans les têtes de brumisation
- forte évaporation directement dans l'air
- perte importante d'eau par l'emport du vent,
- risque d'obstruction des fines buses par des déchets ou des dépôts (en particulier si l'eau est dure ou recyclée)

Au contraire, **OPALE recherche délibérément un écoulement robuste en filet d'eau(FIL)** sur chaque perçage(PER) des rampes d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3).

Selon le champ photovoltaïque(CPV), cela nécessite des
5 perçages de diamètre entre 0.5 et 2 mm espacés par des distances entre 1 cm et 15 cm, mais une étude hydraulique précise est impérative dans chaque situation. Les filets d'eau s'écoulent ensuite sur les panneaux, s'y étalent et forment des lames d'eau qui extraient de l'énergie
10 thermique sur l'ensemble du champ photovoltaïque(CPV).

Le choix de la pompe (PMP) résulte de plusieurs paramètres :

1. la hauteur entre le point de soutirage et le point
15 d'éjection du fluide,
2. les pertes de charge dans les tuyaux et filtrages,
3. le nombre et le diamètre des sorties des rampes(RA,RA1,RA2,RA3)

20 La hauteur entre le soutirage(ASP) et l'éjection d'eau par les rampes(RA,RA1,RA2,RA3) dépend de l'installation :
* pour un bâtiment, elle est comprise entre 5 et 10 m.
* pour une installation au sol, entre 1 et 5m, le dénivelé du terrain étant directement à prendre en compte si la
25 gestion des fluides est centralisée.

Les pertes de charge sont de 2 types :

- régulières : le long d'un tuyau sans courbure marquée
- singulières : bifurcations ou passages spécifiques.

30

Il est possible de calculer ces pertes de charge hydraulique à l'aide d'équations de mécanique des fluides semi-empiriques, notamment celles de *Darcy-Colebrook*. Le calcul des pertes de charge dans les rampes

d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3) nécessite un algorithme spécifique tenant compte de la diminution du débit après chaque perçage(PER) offrant une fuite pour le fluide.

Il faut alors choisir une pompe(PMP) avec une pression et un débit suffisants pour vaincre les pertes de charge, le dénivelé et alimenter les rampes(RA,RA1,RA2,RA3) sur toute leur longueur de manière homogène. Dans chaque cas, il faut trouver un couple (pompe ; circuit hydraulique) adapté en débit et en pression. Le débit est à peu près proportionnel au nombre de sorties sur les rampes(RA,RA1,RA2,RA3), à leur section d'écoulement, et à la racine carrée de la différence de pression entre l'intérieur des rampes(RA,RA1,RA2,RA3) et la pression atmosphérique. Cette différence de pression doit être suffisante pour alimenter toutes les sorties avec un débit de fuite quasi-constant.

La différence de pression entre l'atmosphère et l'intérieur des rampes d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3) est un paramètre clé dans le dispositif(OPALE). A pression de sortie donnée, une pompe de fort débit consomme plus d'énergie, mais le refroidissement est intense (le fluide de retour est frais), au contraire, une pompe de faible débit consomme moins avec un refroidissement plus faible (le fluide de retour est tiède, voire chaud). *Des compromis sont donc à trouver selon les critères à privilégier* (production photovoltaïque ou obtention d'eau chaude). **Cependant avec une pompe puissante, on peut diminuer sa consommation en jouant sur la fréquence du pompage** (voir ii).

Dans les régions chaudes ou en période de sécheresse, un niveau d'eau minimal dans les réservoirs(REP,REC) peut être garanti par un flotteur(FLO) qui coupe automatiquement l'eau arrivant d'un branchement domestique du bâtiment lorsque le niveau des réservoirs monte. Dans les régions où

l'eau est très rare, il faudra fonctionner en circuit d'eau totalement fermé et prévoir un passage aérien ou souterrain pour le rafraîchissement du fluide (voir aussi 3.g).

5 **ii. Refroidissement : Pilotage du déclenchement du pompage**

De préférence, le dispositif(OPALE) est autonome sans nécessiter des moyens complexes tels que des ordinateurs ou des pilotages à distance. Ainsi, tel qu'illustré aux
10 figures 8 et 9 **en été**, le dispositif OPALÉ est automatisé à l'aide d'un relais à horaires programmables(RHP), d'un relais thermostatique(TST), et d'un relais temporisé électrique(RTE) placés en cascade.

15 **1)** Le relais(RHP) transmet la tension du secteur pendant des plages de fonctionnement de longue durée pour le système (plusieurs heures),

2) le relais thermostatique(TST) transmet le courant tant que la température du champ photovoltaïque dépasse une
20 température de consigne,

3) le relais(RTE) transmet le courant de manière intermittente durant des délais courts et répétitifs (quelques minutes).

25 **La condition 1** est typiquement une plage de fonctionnement diurne entre 9h et 20h. On peut préférer retarder le démarrage le matin car la nuit fraîche a refroidi en profondeur le champ photovoltaïque, ou *a contrario* laisser une plage d'arrosage en toute fin d'après-midi car le
30 soleil a chauffé l'ensemble du champ(CPV) et l'atmosphère.

La condition 2 est une condition de déclenchement thermique : le relais(TST) permet de régler une température au-dessus de laquelle le courant électrique est transmis en direction de la pompe(PMP) et en-dessous de laquelle il est
35 interrompu. Par exemple, cette température peut être

comprise entre 15 et 60°C. Pour une production photovoltaïque maximum, on choisit typiquement 20°C à 30°C. Au contraire, pour avoir de l'eau chaude sanitaire(ECS), on choisira plutôt 60°C (voir aussi 3.g).

5 Le relais thermostatique(TST) est toujours placé dans une boîte sombre bien exposée au soleil ; deux montages sont alors possibles :

- La boîte est placée au bas du champ photovoltaïque(CPV).
- La boîte est en contact thermique avec la conduite de retour(RET) ou bien le chéneau(CHN).

10 Le but est que la température du relais(TST) soit une image assez fidèle de celle du silicium du champ photovoltaïque(CPV) : l'eau de pluie(EP) fraîche permet en retour de refroidir le relais thermostatique(TST) avec un
15 arrêt automatique du pompage (tout comme sa reprise).

La condition 3 module temporellement le pompage en mettant en cascade le relais temporisé électrique(RTE). Le rôle du relais(RTE) est de rendre « intelligent » le dispositif
20 *(OPALE) : en utilisant l'inertie thermique du champ photovoltaïque(CPV), on réduit la consommation d'eau et d'électricité due au pompage par un fonctionnement intermittent sans pour autant beaucoup réchauffer le champ(CPV). Ceci est possible grâce à son inertie thermique*
25 *qui lisse sa température tout au long des cycles de pompage. Ainsi, le tableau ci-dessous donne un exemple typique des plages et fonctionnement d'OPALE :*

Horaire	Action
Avant 9h	Pas de pompage
De 9 à 19h	5 minutes ON, 5 min OFF tant que la température de CPV dépasse la consigne
Après 19h	Pas de pompage

Des fonctionnalités élaborées du relais(RTE) peuvent aussi dissymétriser ou multiplier les périodes ON/OFF, par exemple :

25% : pompage 1 min sur 4, ou bien 2 sur 8...

50% : pompage 1 min sur 2, ou bien 2 sur 4...

5 75% : pompage 3 min sur 4, ou bien 6 sur 8...

On pourra aussi se reporter à la figure 8 pour observer les conditions complètes de démarrage/arrêt du pompage en été.

Grâce à un tel pilotage, **le dispositif(OPALE) récupère typiquement 5 W photovoltaïques supplémentaires pour 1 W électrique de pompage par rapport à ce que serait la production sans refroidissement par liquide.**

3.c) Déneigement/dégivrage des panneaux (hiver)

15 En période hivernale, en particulier dans une région montagneuse, les panneaux sont très frais, voire trop froids au point de maintenir durablement une couche de givre ou de neige sur le champ photovoltaïque(CPV). Dans ces conditions, la production est nulle. Le principal
20 problème réside dans le fort albédo de la couche de neige qui réfléchit la lumière du soleil : ceci empêche tout réchauffement des panneaux, et donc toute fonte de la couche de neige. *Ce cercle vicieux maintient uniformément la neige malgré des rayonnements importants tant que la*
25 *température de l'atmosphère est négative.*

En revanche, lorsqu'une partie des panneaux se découvre et que le rayonnement solaire est présent, leur silicium sombre chauffe immédiatement de quelques °C et généralement suffisamment pour entraîner l'apparition d'un
30 film d'eau entre le verre et la neige. **Il faut donc amorcer la chute, et idéalement chasser toute la couche de neige.**

Le dispositif(OPALE) prévoit un déneigement par ruissellement d'un fluide spécifique(EC,LS) qui peut être de l'eau chauffée(EC) ou un fluide antigel de type
35 eau/alcool(LS). *Même si cela peut être une solution*

économique à court-terme, l'usage d'eau salée est déconseillé pour ses aspects corrosifs et ses dépôts minéraux. Les digrammes binaires des mélanges eau/alcool et eau/sel sont rappelés aux figures 12 à 14.

5 En configuration hivernale, tel qu'illustré à la figure 8, le pompage n'a lieu que pour le déneigement. Il est déclenché par la mise en série du relais à horaires programmables(RHP), d'un détecteur crépusculaire(PHO) et d'un relais thermostatique(TST) :

10 **1)** Le relais(RHP) transmet la tension du secteur pendant des plages de fonctionnement de très courte durée pour le système (par exemple 10 min au début de chaque heure diurne),

15 **2)** si le relais crépusculaire(PHO) est recouvert par la neige ou le givre, il interprète le faible rayonnement comme la nuit et transmet le courant,

3) le relais thermostatique transmet le courant à la pompe(PMP) dès que la température du fluide de déneigement(EC,LS) dépasse une température de consigne
20 (ceci pour éviter qu'il gèle à son tour dans les conduites ascendantes(ASC) ou les rampes(RA,RA1,RA2,RA3), cela induit un ruissellement susceptible de découvrir le relais(PHO), ce qui provoquera l'arrêt immédiat du pompage.

25 La condition 3 du relais thermostatique(TST) est un seuil de sécurité, par exemple 5°C pour l'eau de pluie chauffée(EC) ou -10°C pour un antigel résistant à -15°C. Ainsi, si les 3 relais s'accordent à laisser passer le courant, **la pompe amorce l'écoulement en provenance du**
30 **réservoir(RLS) et le déneigement commence. Il prendra fin de 3 façons différentes :**

1. Le détecteur crépusculaire(PHO) retrouve la lumière car l'écoulement du fluide spécifique(RLS) sur le

champ photovoltaïque(CPV) a chassé la neige. Le relais crépusculaire(PHO) interrompt le courant.

2. Le fluide spécifique(LS) en retour refroidit trop le réservoir de liquide spécifique(RLS,REC) destiné au déneigement. Le relais thermostatique(TST) interrompt le courant. Le déneigement n'est pas complet.

3. Le déneigement n'a pas réussi dans le délai imparti et le relais à horaire programmable(PHP) interrompt le courant pour ne pas gaspiller le liquide(EC,LS).

10 On pourra se reporter à la figure 8 pour connaître les conditions d'arrêt/démarrage précise du pompage en hiver.

Note importante : **en période hivernale, OPALE utilise une crépine(ASP) sans clapet d'anti-retour : ainsi, lorsque la pompe(PMP) s'arrête, l'eau dans les conduites ascendantes(ASC) ou dans les rampes d'arrosage (RA,RA1,RA2,RA3) redescend sous l'action des forces de gravité : cette purge automatique protège les circuits fortement exposés au froid pour les prévenir du givrage et/ou de l'éclatement par le gel : le déneigement est autonome et sécurisé tout en évitant des dépenses d'énergie inutiles.**

La figure 9 montre les raccordements électriques nécessaires entre le secteur(220V), les relais (RHP,TST,RTE,PHO), la pompe(PMP) et optionnellement une résistance de chauffage(RCH).

Sur cette figure, le neutre et la phase peuvent être inversés si le secteur est en courant alternatif(usuel). En cas de secteur à courant continu (cas exceptionnel), les polarités devront être respectées en relation avec le sens de pompage attendu.

Un perfectionnement du dispositif(OPALE) est l'utilisation d'un relais thermostatique(TST) à 2 sorties

de phase (ou de neutre) : l'une alimente une résistance chauffante(RCH) tant que la température de sécurité dans le réservoir n'est pas atteinte **et/ou** que le relais(PHO) est couvert de neige, l'autre alimente la pompe(PMP) dès que
5 cette température est atteinte à la suite du chauffage, selon le choix de câblage des relais(PHO) et (TST).

*Mais pour économiser de l'énergie, on préférera placer directement le réservoir(RLS) dans une zone où le froid intense ne pénètre pas, par exemple à l'intérieur du
10 bâtiment et au niveau le plus proche du sol(SOL) tel qu'illustré à la figure 1 pour une installation en toiture ou bien à la figure 2 pour une installation modulaire au sol(SOL), ou bien à la figure 3 avec des réservoirs(REP,REC,RLS) centralisés et enterrés. Ceci
15 permet de se passer de chauffage et de déneiger avec de la simple eau de pluie tant que la température du lieu où elle est entreposée reste supérieure à 0°C (théoriquement) et 4 à 5°C (pratiquement).*

20 **3.d) filtrage**

Le filtrage du dispositif(OPALE) est double et intégré(FRI,FDI) : d'une part, le filtrage de retour intégré(FRI) aux réservoirs(REP,RLS,REC) collecte les salissures des liquides de retour(RET). D'autre part, le
25 filtrage de départ intégré(FDI) empêche d'éventuels dépôts présents dans les réservoirs(REP,RLS,REC) de souiller les conduites (ASP,ASC,ASC1,ASC2,ASC3,RA,RA1,RA2,RA3). Comme il a été expliqué, le filtrage est un aspect incontournable pour le fonctionnement durable et efficace d'OPALE.

30 Les éléments filtrants sont choisis pour bloquer tout débris ou salissure dont la taille dépasse la moitié de celle d'un trou de la rampe d'arrosage(RA,RA1,RA2,RA3), c'est à dire que la maille typique du filtrage est de

l'ordre du $\frac{1}{2}$ mm, de manière à ne pas obstruer les perçages(PER) et maintenir les filets d'eau(FIL).

i. Le filtrage de retour intégré(FRI)

5 Présent sur tous les types d'OPALE (sur toiture en fig. 1, modulaire décentralisée en fig. 2, modulaire centralisée en fig. 3), et tel qu'illustré aux figures 4 et 5, il se constitue essentiellement d'une boîte bi-étagée(BBE).

L'étage inférieur(INF) comporte au moins un organe de
10 distribution(DIS) dirigeant le fluide filtré vers le réservoir(REP,RLS,REC) approprié. L'étage inférieur(INF) est séparé de l'étage supérieur(SUP) par une grille(GRI) quasi-rigide de maille grossière soutenant une surface de filtrage(SFI) de maille fine et réutilisable. Cette surface
15 s'insère dans l'étage supérieur comme un panier ouvert. On place alors au sommet de l'étage supérieur(SUP) un couvercle amovible(CAM) refermant la surface filtrante(SFI). Périodiquement, on retire le couvercle(CAM) pour prélever les dépôts dans le panier formé par la
20 surface filtrante(SFI). L'opération est aisée puisqu'il suffit de retirer la surface filtrante dans son ensemble, de l'étendre sur un support et de l'asperger avec un jet d'eau traversant la surface dans le sens inverse de celui des eaux de retour lors du filtrage. La surface
25 filtrante(SFI) peut être une grille fine métallique ou bien un tissu naturel ou synthétique de maille adéquate.

ii. Le filtrage de départ intégré(FDI)

Présent sur tous les types d'OPALE (sur toiture en fig. 1,
30 modulaire décentralisée en fig. 2, modulaire centralisée en fig. 3), et tel qu'illustré aux figures 4 et 5, il comporte une aspiration(ASP) pour le fluide qui s'écoule à travers une tête filtrante(TFI) ou une surface filtrante(SDI) intégrées sur l'aspiration(ASP) de la pompe(PMP). Les

organes filtrants(SFI,TFI) sont réalisés par une surface entourant toutes les entrées de fluide de l'aspiration(ASP) selon la même méthode que le nettoyage du filtrage de retour intégré(FRI).

- 5 Pour des installations simples, le filtrage de départ intégré(FDI) est inséré manuellement dans le réservoir (REP,REC,RLS) approprié selon la saison ou la maintenance attendue tel qu'illustré aux figures 1 ou 2.

Comme illustré au bas de la figure 3 pour le filtrage de départ intégré (FDI), des installations plus élaborées peuvent être équipées d'un ensemble de vannes(VDP,VDC,VDS) capables d'orienter ou de bloquer les fluides(EP,EC,LS) en direction de l'aspiration(ASP) et du filtrage(FDI), selon la saison ou la maintenance effectuée, et possiblement par une commande sophistiquée (capteurs et ordinateur de contrôle) en relation avec le distributeur(DIS) pour convenablement réorienter le fluide dans le bon réservoir(REP,RLS,REC) après son passage dans le filtrage de retour intégré(FRI). Cette approche est techniquement possible aussi pour les OPALE en toiture ou modulaires décentralisées ; dans tous les cas une intervention humaine ponctuelle sera bénéfique.

15

3.e) Nettoyage des panneaux

Le nettoyage conventionnel des panneaux a lieu toute l'année, chaque fois que la pompe(PMP) est déclenchée, que ce soit à des fins de refroidissement ou de déneigement. Il permet d'éliminer régulièrement l'essentiel des salissures sur le champ photovoltaïque(CPV). Toutefois, des nettoyages exceptionnels et approfondis sont possibles avec le dispositif(OPALE). On pourra par exemple utiliser un réservoir de liquide spécifique(RLS) avec :

- 25 1. Une eau acidifiée pour détartre les panneaux car l'acidité dissout généralement les dépôts d'oxydes métalliques et tout type de précipité.
2. Un diluant organique pour emporter des dépôts organiques fortement ancrés sur le champ(CPV).
- 30 3. Tout fluide de maintenance exceptionnelle jugé opportun.

Au sujet des dépôts minéraux, le dispositif(OPALE) utilise préférentiellement et majoritairement de l'eau de pluie dans ses réservoirs(REP).

L'utilisation d'OPALE avec une eau de robinet chargée
5 en Calcium, Magnésium et plus généralement en minéraux peut entraîner des dépôts minéraux (précipités) sur le champ photovoltaïque(CPV) qui seront néfastes pour sa production électrique. Pour les installations ne pouvant pas alimenter leur réservoir en eau de robinet, un détecteur de niveau
10 pourra être implanté, par exemple sur le flotteur(FLO) de manière à couper l'alimentation en cas d'épuisement du fluide(EP). Lorsque les eaux de pluie sont collectées sur les 2 pans de la toiture, en France, le dispositif OPALE est en autonomie d'eau toute l'année, sauf en cas de
15 sécheresse estivale exceptionnelle. Le volume de réservoir idéal préconisé est 30L/m² de champ photovoltaïque(CPV), soit typiquement 500L pour une installation de 3kWc. Des réservoirs plus petits sont toujours possibles moyennant un appoint d'eau du robinet. Les réservoirs(REP,REC,RLS) sont
20 équipés d'une évacuation du trop-plein(TRP) pour éviter leur débordements, notamment celui d'eau de pluie(REP).

3.f) Atténuation du saut d'indices optiques air/verre

Tel qu'illustré aux figures 16 à 18, avant d'atteindre les cellules photosensibles du champ(CPV), le rayonnement
25 solaire évolue à l'interface de deux milieux : l'air et le verre. Ces 2 milieux peuvent être considérés comme transparents pour le rayonnement visible avec une très bonne approximation. Ils sont caractérisés par des indices optiques réels de 1 pour l'air et 1,5 pour le verre. Ils
30 entrent aussi dans la catégorie des milieux DLHI : diélectrique linéaire homogène et isotrope.

Dans ce cas, on modélise la lumière par des ondes électromagnétiques planes, progressives et harmoniques (OemPPH) telles qu'illustrées à la figure 19 où n est

l'indice optique du milieu, c la vitesse de la lumière dans le vide, \vec{u} la direction unitaire de propagation, \vec{E} le champ électrique et \vec{B} le champ magnétique.

En accord avec les équations de Maxwell, le champ électromagnétique prend alors une structure de trièdre direct tel qu'illustré à la figure 19 avec : $\vec{B} = \frac{n}{c} \vec{u} \wedge \vec{E}$

A la traversée d'une interface plane, aussi appelée « saut d'indice », 2 nouvelles OemPPH apparaissent, l'une réfléchie (dans le milieu 1) et l'autre réfractée (transmise dans le milieu 2), tel qu'illustré aux figures 16 à 18 avec les lois suivantes (lois de Snell-Descartes) :

- 1) les vecteurs d'ondes \vec{k} sont tous coplanaires
- 2) pour l'onde réfléchie $i_1 = r$
- 3) pour l'onde réfractée $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Le fait que les milieux ne soient quasiment pas absorbants ne garantit pas une transmission totale de l'onde puisque la partie réfléchie est définitivement perdue pour le champ photovoltaïque (CPV). De manière plus quantitative, on définit les coefficients de transmission et de réflexion en amplitude complexe par :

$$\underline{r} = \frac{\underline{E}_r}{\underline{E}_i} \quad \text{et} \quad \underline{\tau} = \frac{\underline{E}_t}{\underline{E}_i}$$

Ces coefficients, a priori complexes, dépendent de l'état de polarisation de l'onde incidente. Ils traduisent la proportion des amplitudes réfléchies et réfractées par rapport à l'amplitude incidente.

La figure 17 présente les ondes incidente, réfléchie et réfractée pour une polarisation orthogonale au plan d'incidence.

La figure 18 présente les ondes incidente, réfléchie et réfractée pour une polarisation parallèle au plan d'incidence.

Des considérations de continuité du champ électromagnétique impliquent que :

- pour des ondes polarisées orthogonalement (fig.17)

$$\underline{r}_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad \underline{\tau}_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

- pour des ondes polarisées parallèlement (fig.18)

$$\underline{r}_{\parallel} = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \quad \underline{\tau}_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}$$

5 **Ce sont les « coefficients de Fresnel ».**

Grâce à ces coefficients, d'autres considérations d'optique ondulatoire via les vecteurs de Poynting indiquent le rapport entre puissances transmise et réfléchie proportionnellement à la puissance incidente :

10

$$R = \frac{\langle \|\vec{\Pi}_r\| \rangle}{\langle \|\vec{\Pi}_i\| \rangle} = |r|^2 \quad \text{et} \quad T = \frac{\langle \|\vec{\Pi}_t\| \rangle}{\langle \|\vec{\Pi}_i\| \rangle} = \frac{n_2}{n_1} |t|^2 \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1}$$

Ces relations générales induisent 2 expressions des coefficients de Fresnel en énergie selon la polarisation de la lumière reçue :

15

- pour des ondes polarisées orthogonalement au plan(fig.17)

$$R_{\perp} = \left(\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 \quad T_{\perp} = \left(\frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1}$$

- pour des ondes polarisées parallèlement au plan(fig.18)

20

$$R_{\parallel} = \left(\frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \right)^2 \quad T_{\parallel} = \left(\frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \right)^2 \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1}$$

La figure 20 présente les pourcentages d'énergies transmise(TP) et réfléchie(RP) en fonction de l'angle d'incidence il pour des polarisations parallèles(P) au plan d'incidence lorsque $n_1=1$ (air) et $n_2=1.5$ (verre).

25

Les pertes sont notables dès l'incidence nulle (de l'ordre de 5%), décroissent jusqu'à 56°, puis croissent fortement

dès que l'incidence dépasse 60° , pour atteindre 100% à l'incidence rasante ($i_l=90^\circ$).

A noter une incidence particulière où 100% de l'énergie est transmise : $56,3^\circ = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ appelée *incidence de Brewster*.

5

La figure 21 présente les pourcentages d'énergies transmises (T_0) et réfléchies (R_0) en fonction de l'angle d'incidence i_l pour des polarisations orthogonales (O) au plan d'incidence lorsque $n_1=1$ (air) et $n_2=1.5$ (verre).

10 *Les pertes sont notables dès l'incidence nulle (de l'ordre de 5%) jusqu'à 50° , puis croissent fortement dès que l'incidence dépasse 60° , pour atteindre 100% à l'incidence rasante ($i_l=90^\circ$). Pour ces polarisations, l'incidence de Brewster est absente et les pertes croissent constamment*
15 *avec i_l .*

La figure 22 présente les pourcentages d'énergies transmises (T) et réfléchies (R) en fonction de l'angle d'incidence i_l pour des polarisations orthogonales et
20 *parallèles également mixées (énergie incidente partagée entre 50% de polarisations orthogonales, et 50% de polarisations parallèles, pour simuler la lumière terrestre naturelle, très faiblement polarisée) lorsque $n_1=1$ (air) et $n_2=1.5$ (verre) ; les pertes sont notables dès l'incidence*
25 *nulle (de l'ordre de 5%) jusqu'à 50° , puis croissent fortement dès que l'incidence dépasse 60° , pour atteindre 100% à l'incidence rasante ($i_l=90^\circ$). Pour ce mélange de polarisations, l'incidence de Brewster est absente et les pertes croissent constamment avec i_l .*

30

La figure 23 rappelle les hypothèses et les données marquantes pour la perte de rayonnement par réflexion.

Les figures 24 à 32 présentent le caractère favorable de l'invention(OPALE) pour la transmission optique en plaçant une lame d'eau d'indice $n_2=1.33$ entre l'air d'indice $n_1=1$ et le verre d'indice $n_3=5$. La figure 24 décrit le principe de cheminement d'un rayon incident d'énergie unitaire sur cette triple couche d'indices. Le rayon va globalement se réfléchir et se transmettre à la suite d'une infinité de transmissions/réflexions aux interfaces 1<->2, 2<->3, 2<->1 ou 3<->2. Néanmoins, tel qu'illustré à la figure 25, il est possible de calculer exactement la proportion(R) d'énergie globalement réfléchie, et la proportion(T) d'énergie globalement transmise, par les sommations géométriques suivantes :

$$R = r_{12} + t_{12}r_{23}t_{21} \sum_{k=0}^{\infty} (r_{23}r_{21})^k \Leftrightarrow R = r_{12} + \frac{t_{12}r_{23}t_{21}}{1-r_{23}r_{21}}$$

$$T = t_{12}t_{23} \sum_{k=0}^{\infty} (r_{23}r_{21})^k \Leftrightarrow T = \frac{t_{12}t_{23}}{1-r_{23}r_{21}}$$

Dans ces écritures, les coefficients sont ceux de Fresnel en énergie avec les relations angulaires suivantes :

$$i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1 \sin i_1}{n_2}\right) \text{ et } i_3 = \arcsin\left(\frac{n_1 \sin i_1}{n_3}\right)$$

La question qui se pose immédiatement est d'estimer l'indice n_2 pour que le coefficient de transmission T soit maximal. Il n'y a pas de réponse unique à cette question car il existe autant de solutions que d'angles d'incidence i_1 . L'exposition des panneaux photovoltaïques se faisant de préférence en incidence normale, le calcul est possible et un peu plus simple en choisissant $i_1=i_2=i_3=0^\circ$. Il est proposé ci-après pour trouver le bon ordre de grandeur :

$$T = t_{12}t_{23} \sum_{k=0}^{\infty} (r_{23}r_{21})^k \Leftrightarrow T = \frac{t_{12}t_{23}}{1-r_{23}r_{21}} \text{ donne en incidence normale :}$$

$$T = \frac{4n_1n_2}{(n_1+n_2)^2} \times \frac{4n_2n_3}{(n_2+n_3)^2} \times \frac{1}{1 - \frac{(n_2-n_3)^2(n_1-n_2)^2}{(n_1+n_2)^2(n_2+n_3)^2}}$$

d'où après plusieurs simplifications :

$$T = \frac{4n_1n_2n_3}{n_1n_2^2 + n_3n_1^2 + n_3n_2^2 + n_1n_3^2} \text{ soit aussi } \boxed{T = \frac{4n_1n_2n_3}{(n_1+n_3)(n_1n_3+n_2^2)}}$$

- 5 Pour trouver l'extremum de T, on se propose de passer par la dérivée logarithmique avec comme variable n_2 :

$$\ln T = 2 \ln 2 + \ln(n_1n_3) + \ln(n_2) - \ln(n_1+n_3) - \ln(n_1n_3+n_2^2)$$

$$\text{D'où } d \ln T = \frac{dT}{T} = 0 + 0 + \frac{dn_2}{n_2} - 0 - \frac{2n_2dn_2}{n_1n_3+n_2^2} = dn_2 \left(\frac{n_1n_3+n_2^2-2n_2^2}{n_2(n_1n_3+n_2^2)} \right)$$

$$\text{Il vient donc } \frac{dT}{T} = dn_2 \left(\frac{n_1n_3-n_2^2}{n_2(n_1n_3+n_2^2)} \right)$$

- 10 T passe par un extrema si $\boxed{n_1n_3-n_2^2=0 \Leftrightarrow n_2=\sqrt{n_1n_3}}$

L'indice idéal serait donc ici : $n_2 = \sqrt{1 \times 1.5} = 1.22$

L'eau d'indice 1,33 est un fluide bon marché très proche de cet indice. Il est même parfaitement adapté si l'indice du verre utilisé vaut 1,7.

- 15 En admettant que $n_2 = \sqrt{n_1n_3}$, le coefficient de réflexion de

l'énergie vaut $T = \frac{2n_1n_3}{(n_1+n_3)\sqrt{n_1n_3}} = 98\%$ au lieu de 96%

Soit un gain relatif d'énergie transmise vers le silicium de $(98-96)/96=2.1\%$ en incidence normale.

Calcul en incidence quelconque

Dans le cadre de l'approche tri-couche présentée à la figure 24, on prend l'indice de l'air $n_1=1$, celui de l'eau $n_2=1.33$, et celui du verre à $n_3=1.5$.

5 **La figure 26** présente les pourcentages d'énergies réfléchie et transmise lorsque la polarisation des ondes est purement parallèle en fonction de l'angle d'incidence i_1 en degrés.

La figure 27 présente les pourcentages d'énergies réfléchie et transmise lorsque la polarisation des ondes est purement
10 orthogonale en fonction de l'angle d'incidence i_1 en degrés.

La figure 28 présente les pourcentages d'énergies réfléchie et transmise lorsque les ondes sont un mélange à parts égales de polarisations orthogonales et parallèles en fonction de l'angle d'incidence i_1 en degrés, ceci pour
15 simuler le comportement typique de la lumière solaire.

La figure 29 récapitule les hypothèses et les résultats : l'énergie perdue par réflexion n'est plus que de 2,5% au lieu de 5%, et ceci perdure avec des incidences légèrement plus grandes que pour les figures 20 à 23 simulant la
20 traversée directe de la lumière de l'indice $n_1=1$ vers l'indice $n_3=1.5$ en l'absence de la couche d'indice $n_2=1.33$.

La figure 30 présente une vue plus précise sur la comparaison des pourcentages d'énergie réfléchie avec la présence d'eau (n_2) et sans la présence d'eau. Cette
25 présence d'eau diminue la réflexion de $4-2.4 = 1.6\%$ absolus en incidence normale ; cette diminution de réflexion est croissante avec l'angle i_1 jusqu'à 80° .

La figure 31 présente une vue plus précise sur la comparaison des pourcentages d'énergie transmise avec la
30 présence d'eau (n_2) et sans la présence d'eau.

Cette présence d'eau augmente la transmission de 97.6-96=1.6% absolus en incidence normale ; cette augmentation de transmission est croissante avec l'angle il jusqu'à 80°. **La figure 32** montre les pourcentages de gain absolus sur la transmission et ceux de diminution absolus sur la réflexion. Il s'agit de 2 courbes symétriques de valeur typique 2%, partant de 1,6% en incidence normale et atteignant 4% à 80° d'incidence.

10 **On retiendra donc que l'écoulement d'eau de la présente invention augmente la performance des panneaux :**

- 1) prioritairement *par le refroidissement* dans des proportions de 0 à 40% selon la température/ensoleillement
- 2) secondairement *par un effet optique de couche antireflet*, constamment renouvelée, indépendante de la longueur d'onde, dans une proportion de 2%.

3.g) Extraction d'énergie thermique

20 L'extraction d'énergie thermique est possible avec le dispositif(OPALE), mais au détriment de la production photovoltaïque. Néanmoins, il suffira de monter la température de bascule du relais thermostatique(TST), par exemple à 70°C. Ceci aura pour conséquence de laisser chauffer les panneaux jusqu'à 70°C, voire plus, et d'envoyer les filets de fluide(FIL2) sur le champ photovoltaïque ainsi surchauffé. Dès que le panneau a été refroidi à 60°C, le pompage s'arrête et un fluide de température voisine a été stocké dans l'un des réservoirs (REP,RLS,REC).

30 De plus, l'extraction thermique peut-être augmentée notablement par une serre amovible(SAM) qui est optionnellement présente sur tous les types d'OPALE (sur toiture en fig. 1, modulaire décentralisée en fig. 2, modulaire centralisée en fig. 3).

Cette serre amovible(SAM) augmente les performances thermiques d'OPALE en couvrant le champ photovoltaïque(CPV) particulièrement en période hivernale où l'apport thermique est prioritaire(climat froid) par rapport à la production électrique qui y est plus faible(jours courts). Tel qu'illustré à la figure 7 pour une installation en toiture vue en coupe, la serre amovible pourra se prolonger jusqu'au chéneau au-delà du champ photovoltaïque(CPV) de manière à étendre la surface de capteur thermique aux tuiles(TUI) et au chéneaux collecteurs(CHN). En période hivernale, les conduites de retour(RET) pourront être calorifugées.

Au contraire, en période estivale, la serre amovible(SAM) sera de préférence retirée puisque les besoins en chaleur sont quasi nuls (climat chaud) et que la production photovoltaïque y est optimale (jours longs). On découvrira donc le champ photovoltaïque(CPV), et les chéneaux(CHN), les tuiles(TUI) de couverture et les conduites de retour(RET) seront placés à l'air libre, en ventilation naturelle.

Les conduites ascendantes(ASC1,ASC2) et les rampes d'arrosage(RA1,RA2,RA3) pourront être séparées en 2 circuits, l'un(RA1,RA2) produisant un écoulement sous la serre spécifiquement destiné à l'extraction thermique, et l'autre(RA3) produisant *ponctuellement* un écoulement sur la serre spécifiquement destiné au nettoyage/déneigement de la serre amovible(SAM). A l'aide d'un plan d'écoulement amovible(PEA), placé en bas de la serre amovible(SAM) et en appui sur le chéneau(CHN), on peut au choix :

- 1) en mettant le plan d'écoulement amovible(PEA) : perdre les filets d'eau de déneigement/nettoyage(FIL1) pour empêcher le retour vers le réservoir d'eau chauffé(REC) et ainsi produire plus d'eau chaude sanitaire(ECS) et propre.
- 2) en le retirant, garder l'eau de nettoyage/déneigement.

Pour des **installations photovoltaïques en zone désertique ou ventée**, cette serre amovible(SAM) peut aussi devenir permanente pour ne pas salir ou perdre le précieux fluide par évaporation ou emport par le vent. Tel qu'illustré à la figure 3, par exemple en zone désertique où l'eau est rare, mais la chaleur intense, on peut refroidir intensément les champs photovoltaïques(CPV) par un circuit de fluide(EP,EC,LS) complètement fermé, emprisonné par la serre(SAM) lors de son ruissellement sur les champs photovoltaïques(CPV). Dans ce cas, les liquides(EP,EC,LS) doivent être refroidis à leur retour par conduction ou convection thermiques, naturelles ou forcées de manière immédiate(diurne) ou différée(nocturne), avant de retourner dans les rampes(RA,RA1,RA2,RA3). Ainsi, le refroidissement diurne des fluides(EP,EC,LS) se fait sous le sol(SOL) avant de le propulser à nouveau dans les rampes d'arrosage(RA,RA1,RA2) et un refroidissement nocturne complémentaire est possible en surface à la fraîcheur de la nuit. De préférence pour éviter l'encrassement du circuit, l'écoulement se fait dans un serpentín(SER) placé après le filtrage de retour intégré(FRI) et avant le filtrage de départ intégré(FDI). Dans cette configuration, l'écoulement des liquides (EP,EC,LS) est isolé des salissures extérieures par la serre(SAM). Cette configuration est valable aussi pour des installations en toiture, ou modulaires décentralisées, telles qu'illustrées respectivement aux figures 1 et 2.

Dans tous les cas, comparativement à l'absence de refroidissement, le gain de puissance photovoltaïque peut dépasser 40% *durant toute l'année* en abaissant la température du panneau de 100°C à 20°C, en particulier pour des installations avec pointage permanent du soleil. Dans les déserts et en comparaison avec des zones plus tempérées

Optimisations Photovoltaïques Autonomes avec Liquides en Ecoulement

ABRÉGÉ

5 L'invention(OPALE) concerne un dispositif multi-
réservoirs(REP,REC,RLS) comprenant au moins une pompe(PMP),
un filtrage de retour intégré(FRI) à au moins un des
réservoirs, un filtrage de départ intégré(FDI) à chaque
pompe(PMP), des conduites ascendantes (ASC,ASC1,ASC2) et
10 des rampes(RA,RA1,RA2,RA3) d'arrosage, géré par un pilotage
saisonnier avec déclencheurs thermostatique(TST),
photosensible(PHO) et temporel(RHP,RTE) réalisant avec des
liquides en écoulement comme l'eau de pluie(EP), l'eau
préchauffée(EC) ou des liquides spécifiques(LS) toutes les
15 optimisations pour un champ de panneaux photovoltaïques
(CPV) sur toiture ou au sol, modulaire ou non, à savoir :

1. le refroidissement des panneaux (sauf hiver)
2. le déneigement/dégivrage des panneaux (hiver)
3. le nettoyage de dépôts sur les panneaux (toute saison)
- 20 a. organiques
- b. inorganiques
4. l'atténuation du saut d'indices optiques entre air et
verre (toute saison)
5. l'extraction d'énergie thermique (toute saison)

25 (OPALE) permet une hausse typique de 15% de la production
photovoltaïque et la valorisation thermique simultanée de
l'énergie solaire.