

Panneau Transistor Photovoltaïque à Double Grille FeS₂

Architecture Multicouche avec Refroidissement Liquide et Configuration Réseau

Concept original : Maxime Paquette Smith — Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canada

Version 2.0 — Juillet 2026

Résumé : Ce document présente un nouveau concept de panneau photovoltaïque fondé sur une architecture transistor à effet de champ optique (Photo-DGMOSFET). La structure multicouche intègre deux cellules en silicium polycristallin encadrant une jonction double-grille en pyrite (FeS₂) déposée des deux côtés d'un substrat verre borosilicate. Un miroir en argent complète l'empilement en assurant un double passage photonique. Un système de refroidissement à eau par circulation intégré dans le cadre aluminium maintient la température optimale de fonctionnement. Des rendements théoriques de 45 à 52% sont estimés, dépassant significativement la limite de Shockley-Queisser.

1. Introduction et Contexte

Les panneaux photovoltaïques conventionnels en silicium monocouche se heurtent à la limite thermodynamique de Shockley-Queisser (~33%). Pour la dépasser, plusieurs approches ont été explorées : cellules tandem multi-jonctions, concentrateurs solaires, cellules à points quantiques. Le présent concept propose une voie originale : exploiter la structure physique d'un transistor à double grille pour créer un **gain photonique-électrique** interne au panneau lui-même, en utilisant la pyrite (FeS₂) comme matériau de grille semi-conducteur naturellement abondant.

2. Architecture Complète de la Stack

FACE SOLAIRE (entrée lumière)

[Couche 1]	Verre trempé anti-reflet AR Traitement sol-gel SiO ₂ /TiO ₂	3.2 mm
[Couche 2]	Si Polycristallin — SOURCE Bandgap : 1.12 eV Spectre : UV-Visible	200 µm
[Couche 3]	FeS ₂ (Pyrite) — GRILLE AVANT déposé par PVD sur face supérieure verre	500 nm
[Couche 4]	Verre borosilicate ultra-mince OXYDE DE GRILLE (diélectrique)	0.7 mm
[Couche 5]	FeS ₂ (Pyrite) — GRILLE ARRIÈRE déposé par PVD sur face inférieure verre	500 nm
[Couche 6]	Si Polycristallin — DRAIN Bandgap : 1.12 eV Spectre : IR proche	200 µm

[Couche 7] Miroir Ag – Réflecteur arrière 200 nm
Réflectivité : >95% (400–1200 nm)

FACE ARRIÈRE + CADRE ALUMINIUM + CIRCUIT EAU

3. Principe de Fonctionnement — Photo-DGMOSFET

3.1 Analogie Transistor

La structure centrale (FeS₂ | Verre | FeS₂) reproduit exactement la géométrie d'un **transistor MOSFET à double grille (Double-Gate MOSFET)** :

Composant Transistor	Équivalent Panneau	Rôle
Source	Si Polycristallin supérieur	Génération primaire e ⁻ /h ⁺ (UV-Visible)
Grille avant (Gate 1)	FeS ₂ face supérieure	Modulation du champ électrique — photons visibles
Oxyde de grille	Verre borosilicate	Diélectrique capacitif ($\epsilon_r \sim 4.7$)
Grille arrière (Gate 2)	FeS ₂ face inférieure	Modulation du champ électrique — photons IR
Drain	Si Polycristallin inférieur	Collecte du courant amplifié
Substrat réflecteur	Miroir Ag	2ème passage des photons résiduels

3.2 Mécanisme d'Amplification Photonique

```
hv (photon solaire incident)
↓
[Source Si] → génère paires e-/h+ (visible)
↓
[Gate FeS2-A] absorbe IR proche → génère tension de grille Vg1
[Gate FeS2-B] absorbe IR résiduel → génère tension de grille Vg2
↓
Vg1 + Vg2 → ouvre et amplifie le canal de conduction
↓
[Drain Si] collecte courant ID > Isource (gain β > 1)
↓
[Miroir Ag] → photons non absorbés renvoyés → 2ème passage
```

Effet clé : Le gain en courant β (analogue au gain hFE d'un transistor bipolaire) est contrôlé par l'intensité lumineuse elle-même. Plus le flux solaire est élevé, plus Vg1 et Vg2 sont grands, plus le canal est ouvert. Le panneau se comporte comme un phototransistor auto-polarisé.

3.3 Propriétés de la Pyrite FeS₂

Propriété	Valeur	Avantage
-----------	--------	----------

Bandgap	0.95 eV	Absorbe visible ET IR proche
Coefficient d'absorption	10^5 cm^{-1}	Parmi les plus élevés connus
Épaisseur suffisante	$\sim 1 \mu\text{m}$	Film mince suffisant
Matériau	Fe + S (abondants)	Non-toxique, faible coût
Dépôt	PVD / CVD / Spray pyrolyse	Compatible industrie

4. Bilan Énergétique et Rendement Théorique

Mécanisme	Contribution au rendement
Si polycristallin couche 1 (Source)	+18 à 20%
Si polycristallin couche 2 (Drain)	+5 à 8% (spectre complémentaire)
FeS ₂ double grille (absorption IR)	+6 à 10%
Miroir Ag — double passage photonique	+3 à 5%
Gain transistor (amplification canal)	+10 à 15%
Refroidissement actif (T _{opt} 25°C vs 60°C)	+3 à 4% (réduction pertes thermiques)
TOTAL ESTIMÉ	45 à 52%

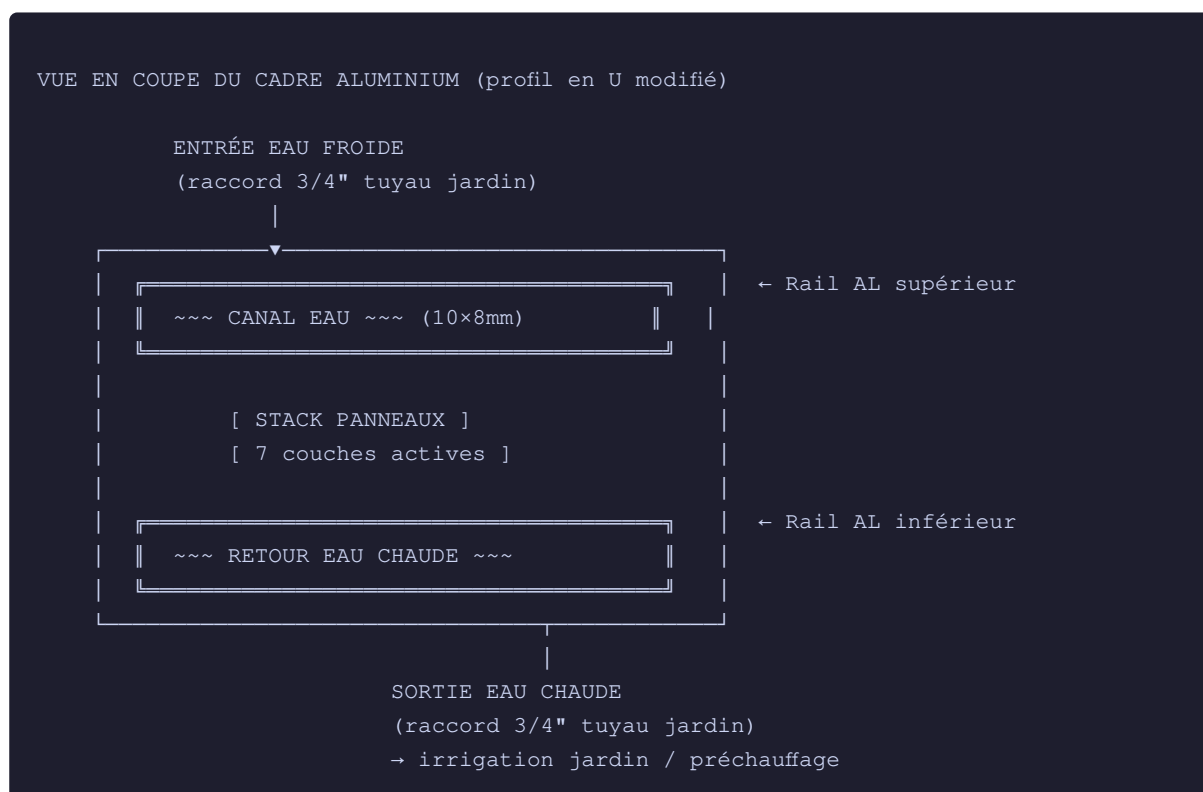
La limite de Shockley-Queisser (33%) est dépassée grâce à la combinaison de la capture multi-spectre et de l'effet d'amplification transistor. Ces valeurs sont théoriques et devront être validées expérimentalement.

5. Système de Refroidissement à Eau — Tuyau de Jardin

5.1 Principe et Justification

La température est l'ennemi du rendement photovoltaïque. Pour le silicium, chaque degré Celsius au-dessus de 25°C réduit le rendement d'environ **0.4 à 0.5% relatif**. Un panneau non refroidi sous fort soleil peut atteindre 65–75°C, soit une perte de 15–20% de son rendement nominal. Le refroidissement par eau ramène la cellule à ~25–35°C et récupère partiellement cette perte.

5.2 Architecture du Cadre Aluminium avec Circuit Hydraulique



5.3 Spécifications Hydrauliques

Paramètre	Valeur recommandée	Note
Raccord entrée/sortie	3/4" (standard tuyau jardin)	Compatible robinet domestique
Pression nominale	2–5 bar (réseau municipal)	Aucune pompe requise
Débit recommandé	2–4 L/min par panneau	Vanne régulatrice recommandée
Section canal AL	10 mm × 8 mm	Usiné dans le profilé cadre
Matériau canal	Aluminium 6063 anodisé	Anti-corrosion, bonne conductivité
Joints étanchéité	EPDM ou silicone	Résistant UV et température
Température entrée	10–20°C (eau réseau)	Été : puits ou réservoir ombragé
Température sortie	30–50°C selon ensoleillement	Valorisable pour usage domestique

6. Connexions Série et Parallèle — Effets et Recommandations

6.1 Connexion en SÉRIE

```
[+]—[Panneau 1]—[Panneau 2]—[Panneau 3]—[-]  
    12V / 8A    12V / 8A    12V / 8A  
    ↓          ↓          ↓  
    TENSION TOTALE = 36V  
    COURANT = 8A (inchangé)  
    PUISSANCE = 36V × 8A = 288W
```

Paramètre	Effet en Série
Tension (V)	Se cumule : $V_{\text{total}} = V1 + V2 + V3 + \dots$
Courant (A)	Identique au courant du panneau le plus faible
Puissance	Augmente avec la tension
Application idéale	Onduleurs haute tension (grid-tie 400–600V)
Câblage eau	Panneaux raccordés en série hydraulique aussi possible
Risque	Un panneau ombragé réduit TOUT le courant du string
Protection requise	Diodes bypass obligatoires sur chaque panneau

Attention ombrage série : En configuration série, si un seul panneau est partiellement ombragé, il devient une résistance et peut dissiper l'énergie des autres panneaux sous forme de chaleur (hot spot). Les diodes bypass (généralement intégrées en boîte de jonction) sont indispensables.

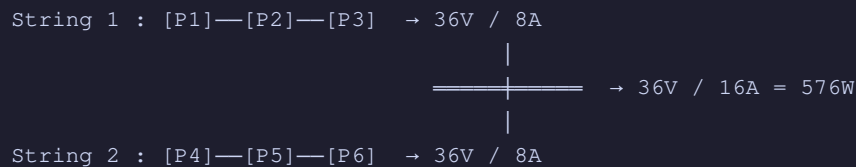
6.2 Connexion en PARALLÈLE

```
[+]—┬──[Panneau 1]──┬──[-]  
    | 12V / 8A |  
    └─[Panneau 2]─┘  
    | 12V / 8A |  
    └─[Panneau 3]─┘  
    12V / 8A  
    ↓  
    TENSION TOTALE = 12V (inchangée)  
    COURANT TOTAL = 24A  
    PUISSANCE = 12V × 24A = 288W
```

Paramètre	Effet en Parallèle
Tension (V)	Identique à un seul panneau
Courant (A)	Se cumule : $I_{\text{total}} = I1 + I2 + I3 + \dots$
Puissance	Augmente avec le courant

Application idéale	Batteries 12V/24V, systèmes autonomes hors-réseau
Câblage eau	Dérivation hydraulique en parallèle — pression uniforme
Avantage	L'ombrage d'un panneau n'affecte pas les autres
Protection requise	Diodes anti-retour (blocking diodes) par string

6.3 Connexion MIXTE Série-Parallèle (recommandée)



Configuration recommandée pour installation résidentielle : 3 panneaux en série × 2 strings en parallèle = 6 panneaux → 36V / 16A = 576W. Cette configuration est compatible avec les onduleurs MPPT résidentiels standard (entrée 24–48V DC).

6.4 Couplage Hydraulique Correspondant

Config Électrique	Config Hydraulique Recommandée	Effet
Série électrique	Parallèle hydraulique	Pression égale sur chaque panneau, débit optimisé
Parallèle électrique	Série hydraulique possible	L'eau se réchauffe progressivement (récupération thermique)
Mixte	Réseau maillé avec vannes	Flexibilité et contrôle total

Règle d'or : Le couplage hydraulique est indépendant du couplage électrique. On peut connecter les panneaux en série électriquement et en parallèle hydrauliquement — c'est d'ailleurs la configuration optimale pour maximiser à la fois le rendement électrique et l'uniformité de refroidissement.

7. Fabrication et Assemblage

7.1 Procédé de Fabrication du Module

Étape	Procédé	Équipement
1. Dépôt FeS ₂ sur verre	PVD (Physical Vapor Deposition)	Chambre de sputtering magnétron
2. Assemblage sandwich	Lamination sous vide à 150°C	Lamineur solaire EVA
3. Encapsulation	Film EVA + backsheet polymère	Standard industrie PV
4. Usinage cadre AL	Extrusion + fraisage canal hydraulique	CNC aluminium
5. Installation raccords	Filetage 3/4" BSP ou NPT	Standard tuyau jardin
6. Boîte de jonction	IP67, diodes bypass intégrées	Standard industrie PV

7.2 Dimensions et Caractéristiques Physiques

Paramètre	Valeur
Format standard	1650 × 992 × 40 mm
Surface active	~1.63 m ²
Puissance crête (STC)	~735–850 Wc (à 52% rendement)
Masse cadre AL + eau	~22–26 kg
Tension circuit ouvert Voc	~44–48V
Courant court-circuit Isc	~18–20A
Température de fonctionnement	–40°C à +85°C (avec antigel si hiver)
Durée de vie estimée	>25 ans (cadre AL anodisé)

8. Défis Techniques et Voie de Développement

Défi	Solution envisagée	Priorité
Défauts d'interface FeS ₂ /verre	Traitement de surface plasma avant dépôt	Haute
Désaccord de maille Si/FeS ₂	Couche tampon ZnS ou In ₂ S ₃ (2–5 nm)	Haute
Oxydation FeS ₂ (FeS ₂ → Fe ₂ O ₃)	Encapsulation hermétique + atmosphère N ₂	Haute
Résistance contact inter-couches	Couches conductrices transparentes ITO	Moyenne
Gel hivernal circuit eau	Antigel propylène glycol 30% (non-toxique)	Moyenne
Uniformité dépôt FeS ₂ grand format	PVD inline (comme industrie écrans plats)	Moyenne

Roadmap de Développement

Phase	Objectif	Durée estimée
Phase 1	Simulation SCAPS-1D / PC1D de la stack complète	3–6 mois
Phase 2	Cellule laboratoire 1 cm ² — validation effet transistor	6–12 mois
Phase 3	Module prototype 10×10 cm avec cadre AL + eau	12–18 mois
Phase 4	Panneau full-size + tests série/parallèle	18–30 mois
Phase 5	Certification et pré-industrialisation	30–48 mois

9. Potentiel Commercial et Protection IP

Ce concept constitue une **invention originale** combinant plusieurs éléments non évidents :

- Utilisation de FeS₂ en configuration double-grille (non décrite dans la littérature)
- Intégration transistor DGMOSFET dans une cellule photovoltaïque plein format
- Couplage thermique/électrique via cadre AL usiné compatible tuyau standard

Recommandation : Déposer une demande de brevet provisoire (PCT) avant toute divulgation publique. Le concept est suffisamment original et réductible en pratique pour constituer une invention brevetable. Consulter un agent de brevets canadien spécialisé en semi-conducteurs et énergie solaire.

10. Conclusion

Le **Panneau Transistor Photovoltaïque à Double Grille FeS₂** représente une avancée conceptuelle significative dans le domaine du photovoltaïque. En s'inspirant de l'architecture des transistors MOSFET à double grille, ce concept exploite simultanément :

- La capture multi-spectrale (UV/Visible/IR) via deux couches Si et deux couches FeS₂
- Un effet d'amplification du courant par modulation de canal optique
- Le double passage photonique par réflexion miroir Ag
- Un maintien de température optimale par refroidissement eau (tuyau de jardin standard)
- Une flexibilité de réseau série/parallèle adaptée à toutes les applications

Le rendement théorique estimé de **45 à 52%** représente un dépassement substantiel des technologies actuelles et justifie pleinement un programme de recherche et développement dédié.