

L'énergie solaire pour le développement local

O. Savadogo

Dr d'État ès Sciences Physiques

Professeur Titulaire

osavadogo@polymtl.ca

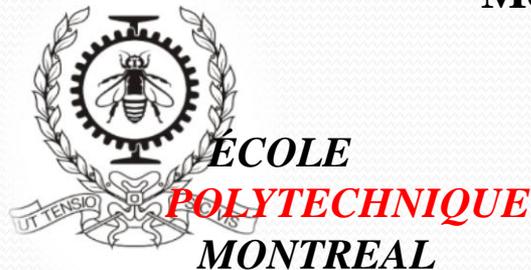
+1 514 3404725

DESS: Énergie et Développement Durable

Département de Génie Chimique

École Polytechnique de Montréal

Montréal, Québec, Canada, Octobre 15, 2010



<http://www.newmaterials.polymtl.ca>



Plan

I. Introduction

II. Pourquoi le Solaire?

III. Les Applications

IV. Les coûts

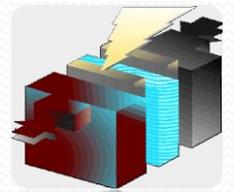
V. Énergie solaire et développement local.



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

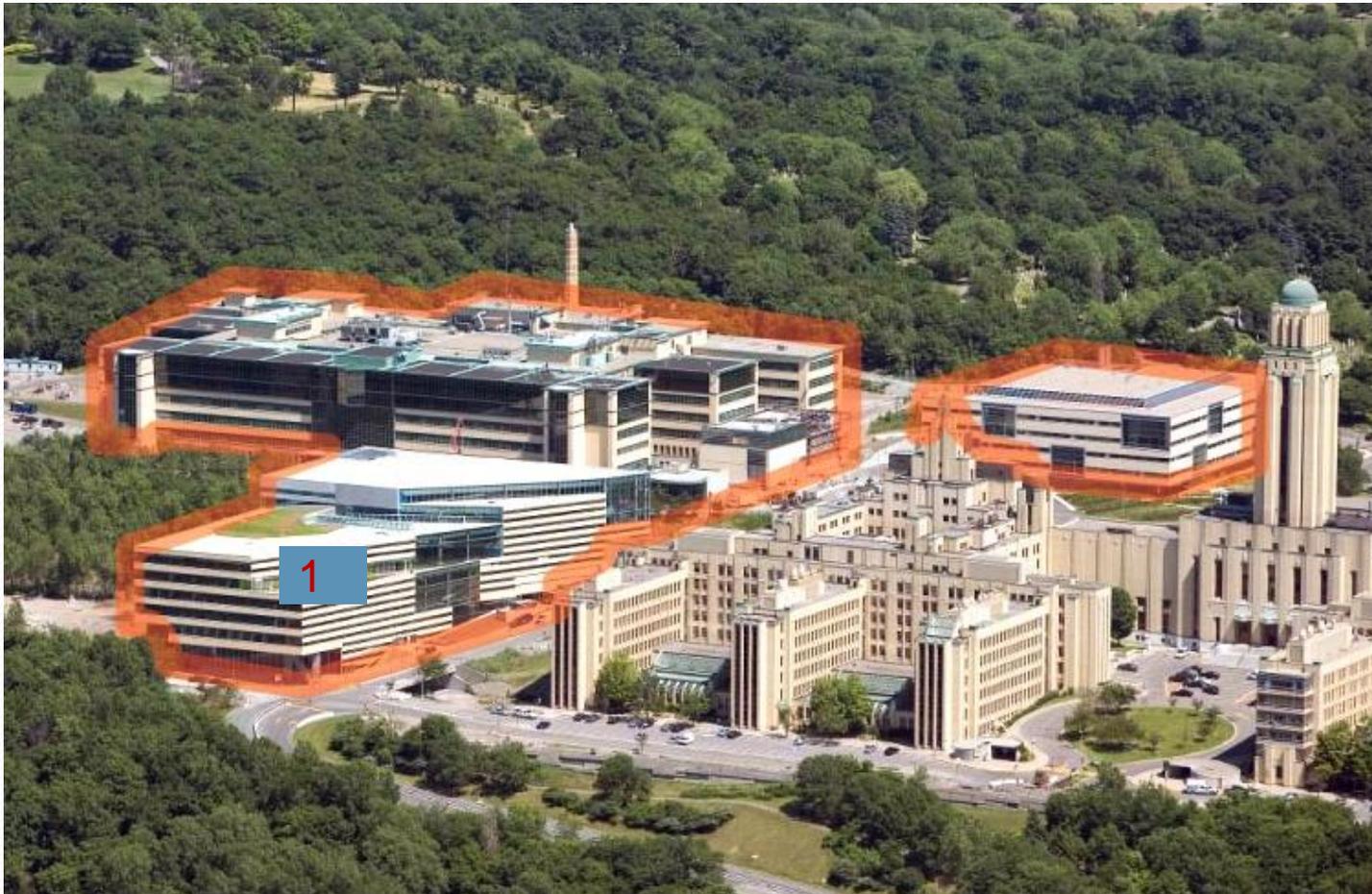
LaNoMat



Savadogo@

École Polytechnique de Montréal

POLYTECHNIQUE'S FACILITIES ON THE UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL CAMPUS



+ Aisenstadt
building



1. Claudette-Mackay-Lassonde Buildings: Polytechnique's "green" buildings

Polytechnique at a glance

POLYTECHNIQUE, CRADLE OF ENGINEERING IN QUEBEC

137 years
founded in 1873

2nd largest
campus in Canada

Polytechnique + Udm +
HEC

\$145 M
budget

1st in Canada

for the scope of
its engineering
research

1st in Quebec

teaching and
engineering
research



35,700 graduates

27%
OIQ members

1,100+ diplomas
per year

6,000 students

1,500 graduate
students

21% international
students

120 countries

Laboratoire de nouveaux matériaux pour l'énergie (LaNoMat);

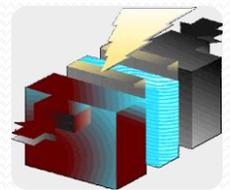
Département de Génie Chimique;

Laboratoire financé par les Fonds Canadiens pour l'Innovation .

Mission du laboratoire

- Nouveaux concepts d'identification, de méthodes de fabrication et de caractérisation de nouveaux matériaux pour les systèmes d'énergie;

-Formation en Énergie et Développement durable;

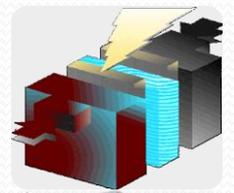


Urgence pour les besoins énergétiques

Population mondiale devrait augmenter de 41% entre 2002 (6,3 milliards) et 2050 (8,9 milliards) ,

Avec un accroissement annuel de la richesse estimé a 2,7% durant la même période, la demande en énergie primaire d'ici 2050 devrait

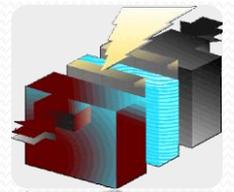
s'accroître de 155% par rapport a 2002 dont l'Afrique en particulier ou la demande serait plus importante



Urgence pour les besoins énergétiques

Toutes les estimations de 2009 montrent que les réserves de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) disponibles en Afrique représentent entre 8 et 18% des réserves mondiales. Selon BP (10,5 % en pétrole et 7,9% en gaz)

même des découvertes de nouveaux gisements se multiplient, dans une économie en croissance, nous risquons de ne plus retrouver les prix des 1990



Consommation

- * 2 types de consommation d'énergie :
 - 75 % de l'énergie thermique (chauffage, transport, climatisation, eau chaude)
 - 25 % électricité (appareils ménagers, éclairage, etc. ...)
- * 3 secteurs différents pour la consommation totale d'énergie :
 - 1/3 habitat domestique (4 MWh/an/foyer en électricité, c'est-à-dire 500W de puissance électrique continue)
 - 1/3 industrie + secteur tertiaire
 - 1/3 transports
- * Importance de l'énergie thermique et rôle prépondérant du transport

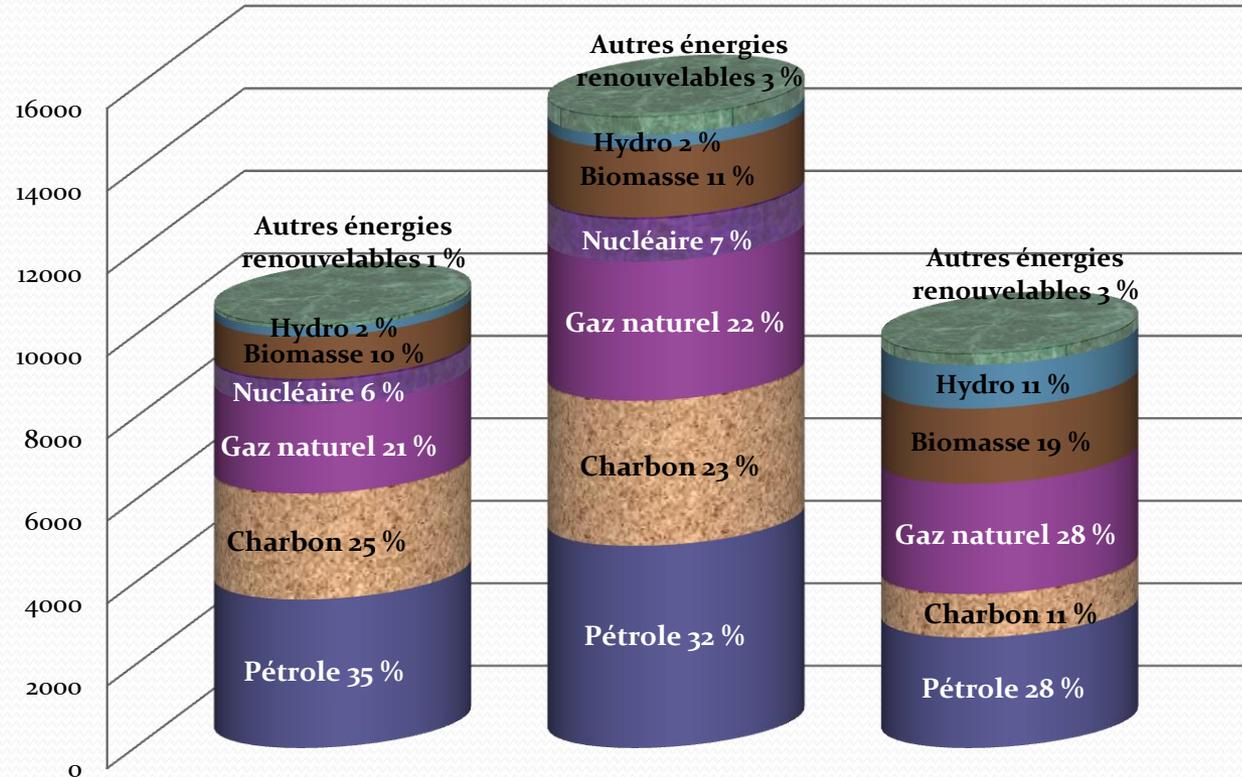


2004
Mix énergétique mondial
10 287 TEP/an

Scénario AIE "vert"
15 311 TEP/an

2030

Scénario Greenpeace
9 570 TEP/an



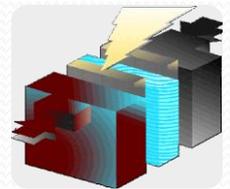
Les prévisions les plus optimistes montrent que la contribution des énergies renouvelables passera au mieux de 12% en 2004 à 30% en 2030 alors que les contributions des hydrocarbures ne changeront pas significativement



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

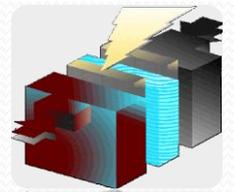
Urgence pour les besoins énergétiques

Inconvénients des hydrocarbures:

Maintenir la teneur des émissions en GES à une valeur inférieure à 450 parties par million (ppm) en volume équivalent de gaz carbonique (CO₂);

La teneur en émission en gaz de réchauffement était de 280 ppm jusqu'en 1800 et elle est de 383 ppm aujourd'hui

-La disponibilité à un coût abordable à long terme



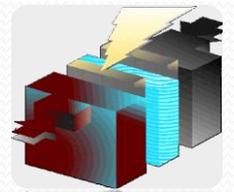
Classification des sources d'énergie:

Pourquoi le pétrole? et pourquoi le solaire?

A) Pour les énergies diluées:

i) 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 m à 85% de rendement

ii) 27 tonnes d'air arrivant à 60 km/h sur les pales d'une éolienne.



Urgence pour les besoins énergétiques

B) Les énergies intermédiaires qui sont de nature chimique et électromagnétiques

-La production d'un kWh d'énergie nécessite la transformation de la centaine de grammes au kilogramme (kg) de matières.

i) 100 grammes de pétrole ;

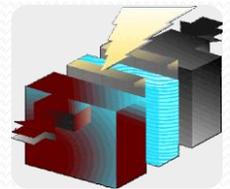
ii) l'énergie solaire incidente sur un mètre carré de surface de la terre et par jour donne en moyenne 1 kWh d'énergie.



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

Urgence pour les besoins énergétiques

c) Les énergies concentrées. Un kWh nécessite du micro au milligramme de matière.

-Fusion thermonucléaire et fission nucléaire

Ainsi pour une centrale de 1000 MW, il faudrait utiliser par an:

-30 tonnes d'uranium enrichi à 3,2% par an (33%)

- 1 à 1,5 millions de fuel par année (38%)

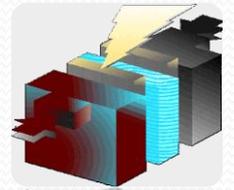
- 2 à 2.5 millions de tonnes de charbons (38%).



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

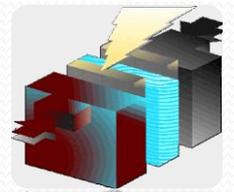
LaNoMat



Savadogo@

Urgence pour les besoins énergétiques

- 1200 tonnes d'eau par seconde d'une hauteur de 100 m avec un rendement de 85%
- 20 à 30 km² de panneaux solaires ayant des rendement de 15%
- entre des centaines et des milliers d'éoliennes selon les puissances et les rendements



Nos besoins énergétiques ne représentent que 1/1000 de l'énergie solaire

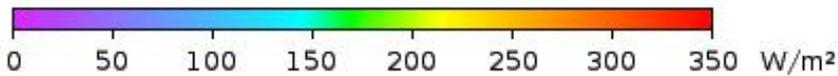
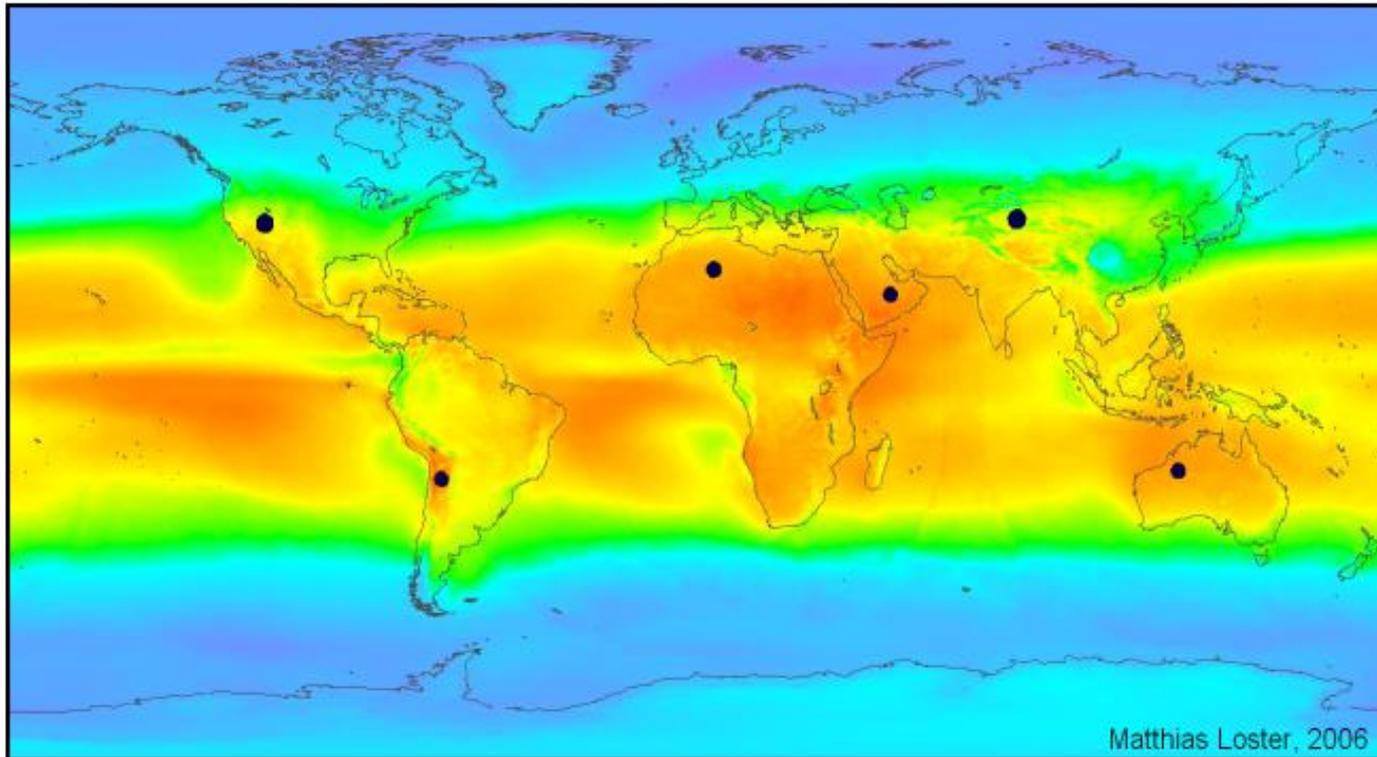
L'énergie totale absorbée sur une année est de $3\,850 \times 10^{21}$ joules, (10^{21} joules = ZJ);

la photosynthèse capte 3×10^{21} joules $\times 10^{21}$ joules,

le vent contient 2,2 ZJ,
Usages humains: 0,5 ZJ dont 0,06 ZJ sous forme d'électricité



Pourquoi le solaire pour l'Afrique?



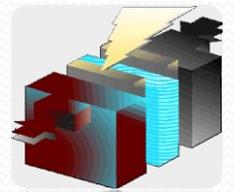
$\Sigma \bullet = 18 \text{ TWe}$



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

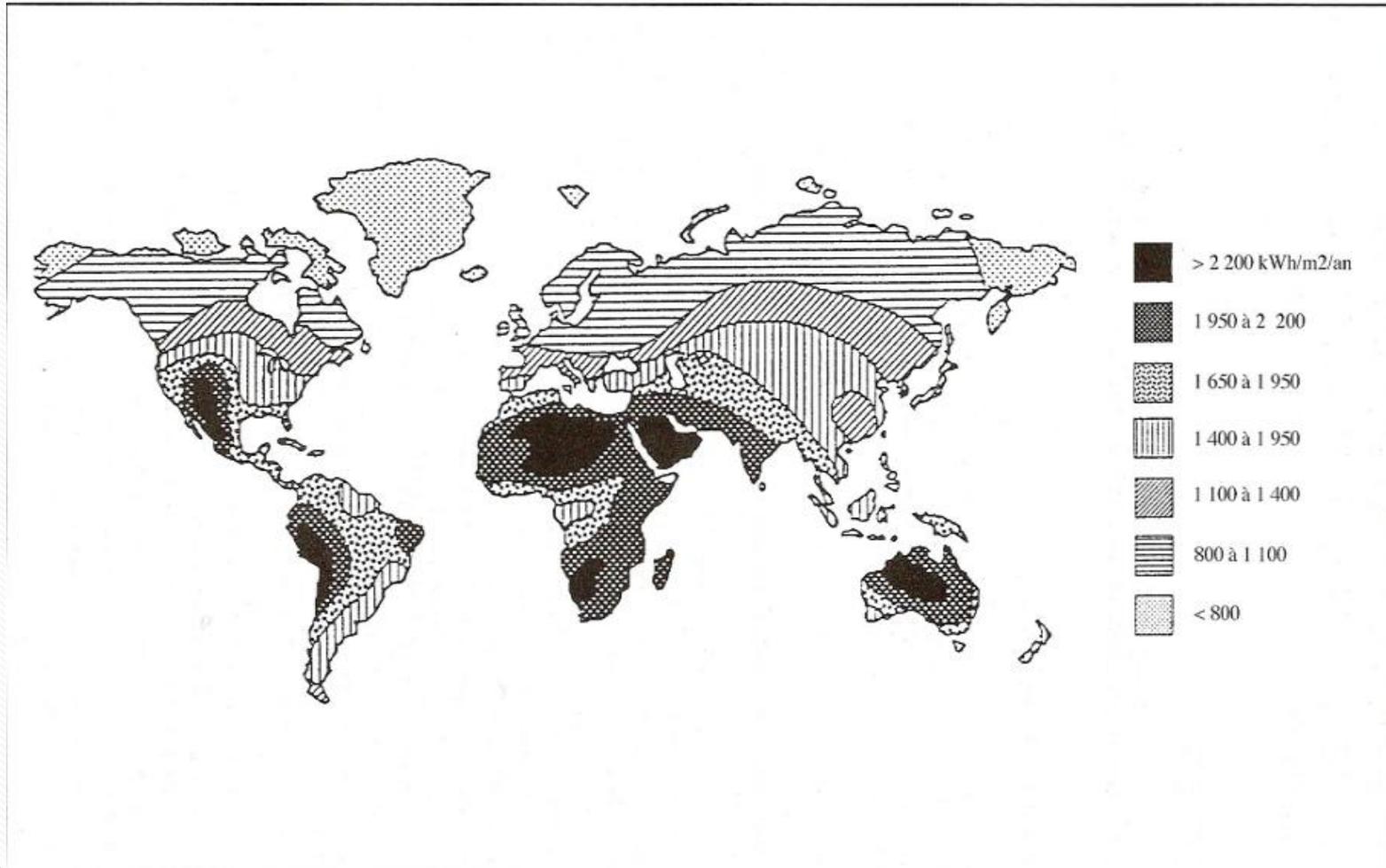
LaNoMat



Savadogo@

Urgence pour les besoins énergétiques

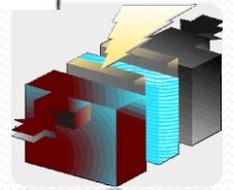
Pourquoi le solaire?



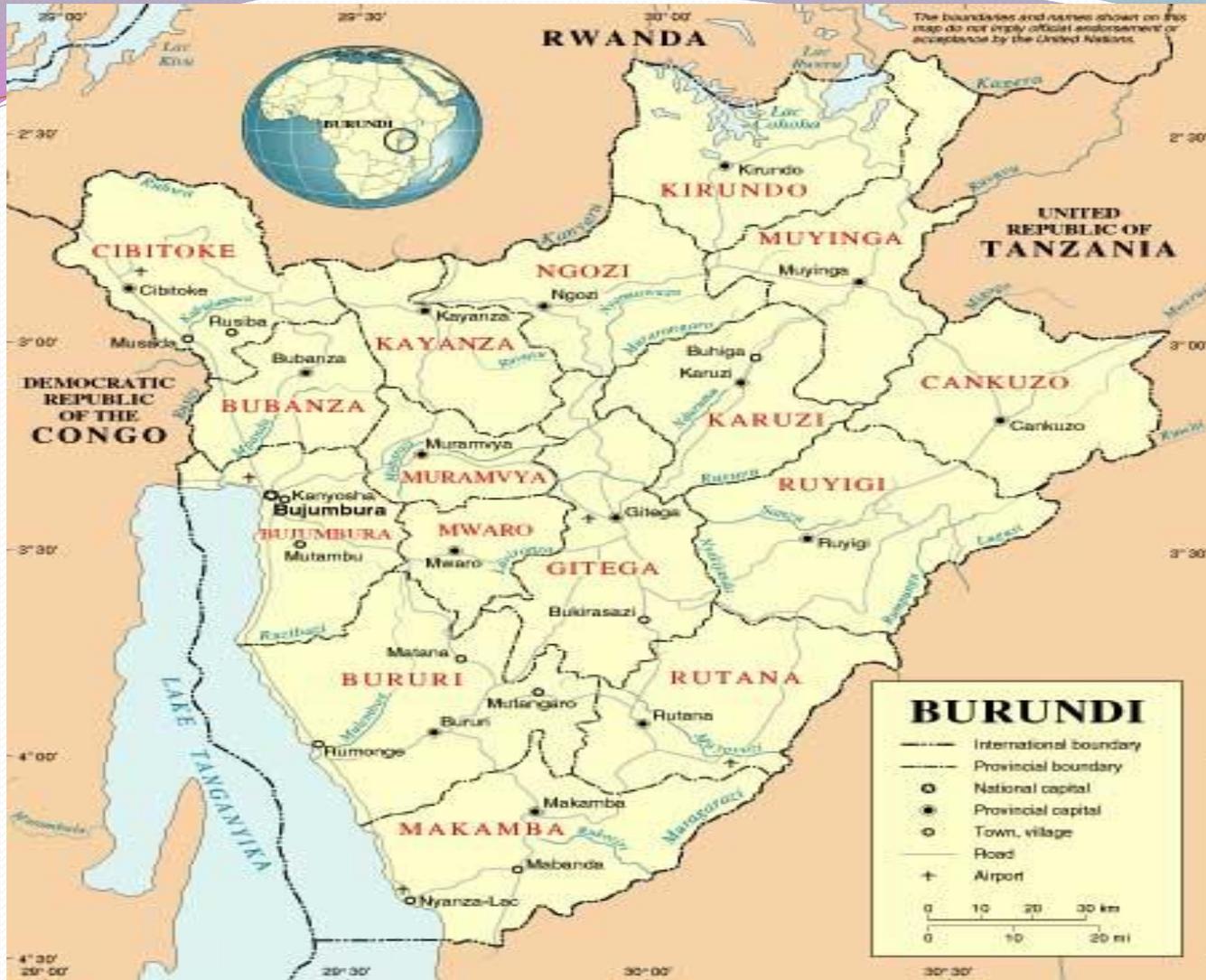
**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@



Gisement solaire des sites?

Données sur les gisements ?

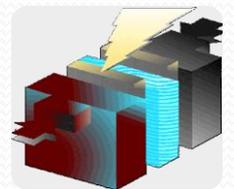
Évaluation du gisement sur les sites



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

Pourquoi le solaire?

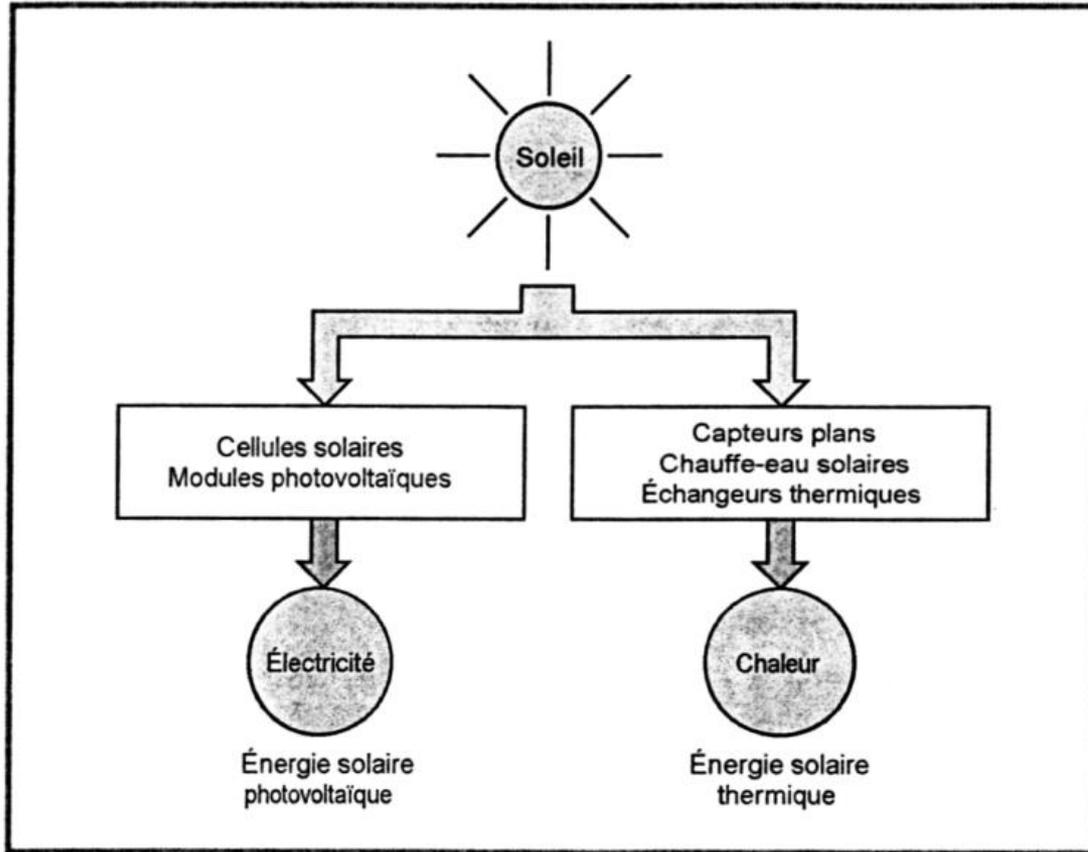


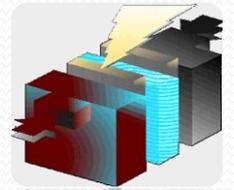
Figure 1.1 - Les deux types d'énergie solaire



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

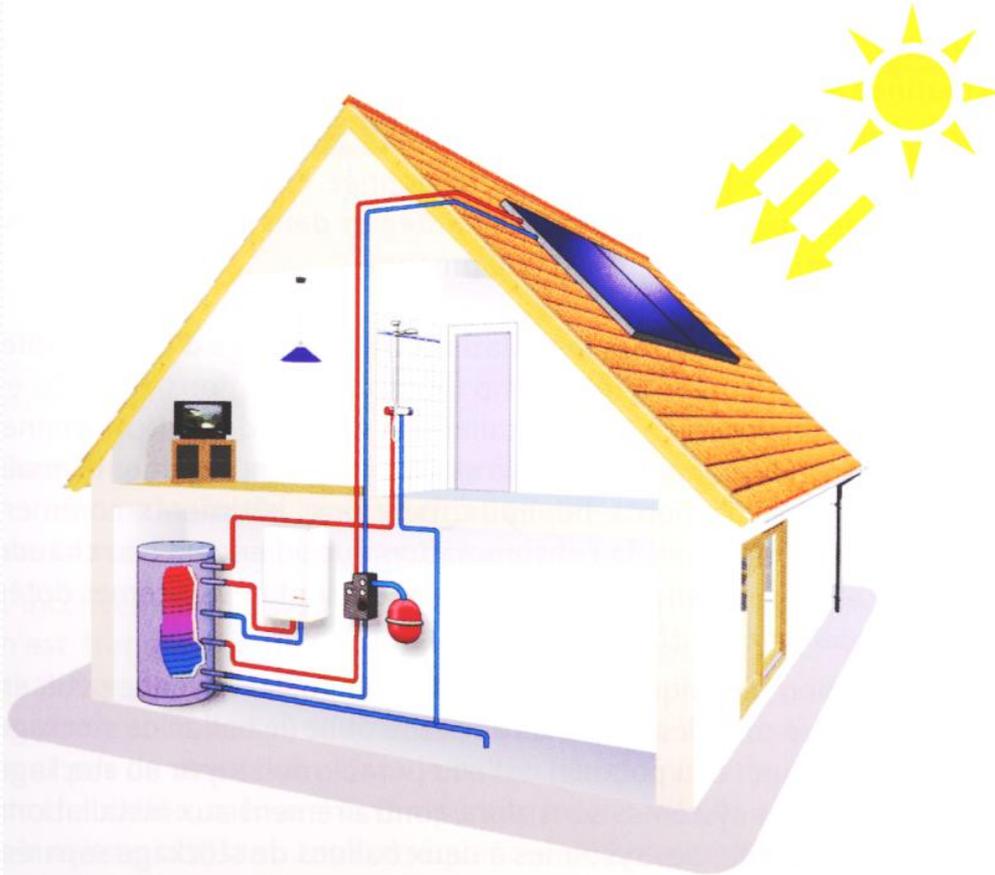
LaNoMat



Savadogo@

Voies Chaleur:

a) Solaire Thermique (voie la plus utilisée dans le monde):



Chauffe eau solaire:

Recherche sur matériaux absorbants à coûts peu élevés

Frigidaires solaires par:

- adsorption ou par
- absorption

Cuisinières solaires;

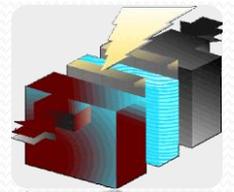
Séchage des récoltes



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



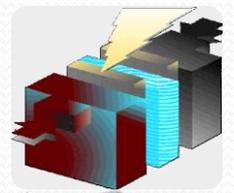
Savadogo@

b) Centrales thermodynamiques:

Captation de la chaleur par des miroirs qui le concentrent pour chauffer des liquides caloripporteurs (centaines de degrés) qui

vont chauffer l'eau en vapeur qui va actionner des turbines pour donner de l'électricité:

Important que le gisement soit supérieur à 1900 kW/m^2 /an



-
Un exemple de ce système est construit à la centrale de Kramer Junction en Californie. Il est formé de 5 SEGS (Solar Electric Generation Systems) de 30 MW chacun pour un total de 150 MW.



Centrale de Kramer Junction, Californie



LaNoMat

Savadogo@

Centrales à capture cylindro-parabolique:

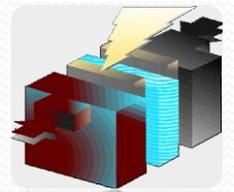
I) Kramer Junction, Californie: 150 MW; Total en Californie de 354 MWe

II) Boulder City, Nevada: 64 Mwe; alimentation de 14.000 habitations; 182400 miroirs; 19300 capteurs; 120 ha; 1,2 millions de litres destinés à retenir la chaleur.

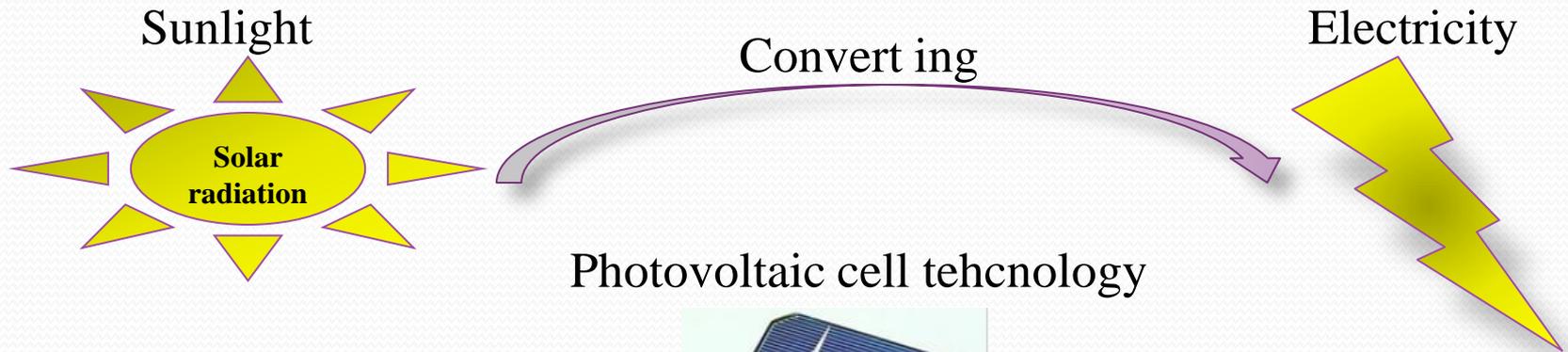
III) Ashlim à 40 km au sud de Beer-Sheva en Israël: 500 MWe, 2% de puissance demandée en Israël; surface nécessaire à l'installation 900 hectares

IV) Aspres sur Buëch dans les hautes Alpes: 20 Mégawatts électriques

Compagnies: Acciona Solar Power (Espagne), Solel Solar Systems (Israel); Abengoa Solar (Espagne)



Voie lumière: capteur photovoltaïque



Semiconductor used is:
Silicon

- Monocrystalline
- Polycrystalline
- Amorphous

Technologies

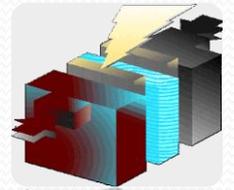
Les modules solaires monocristallins

Les modules solaires polycristallins

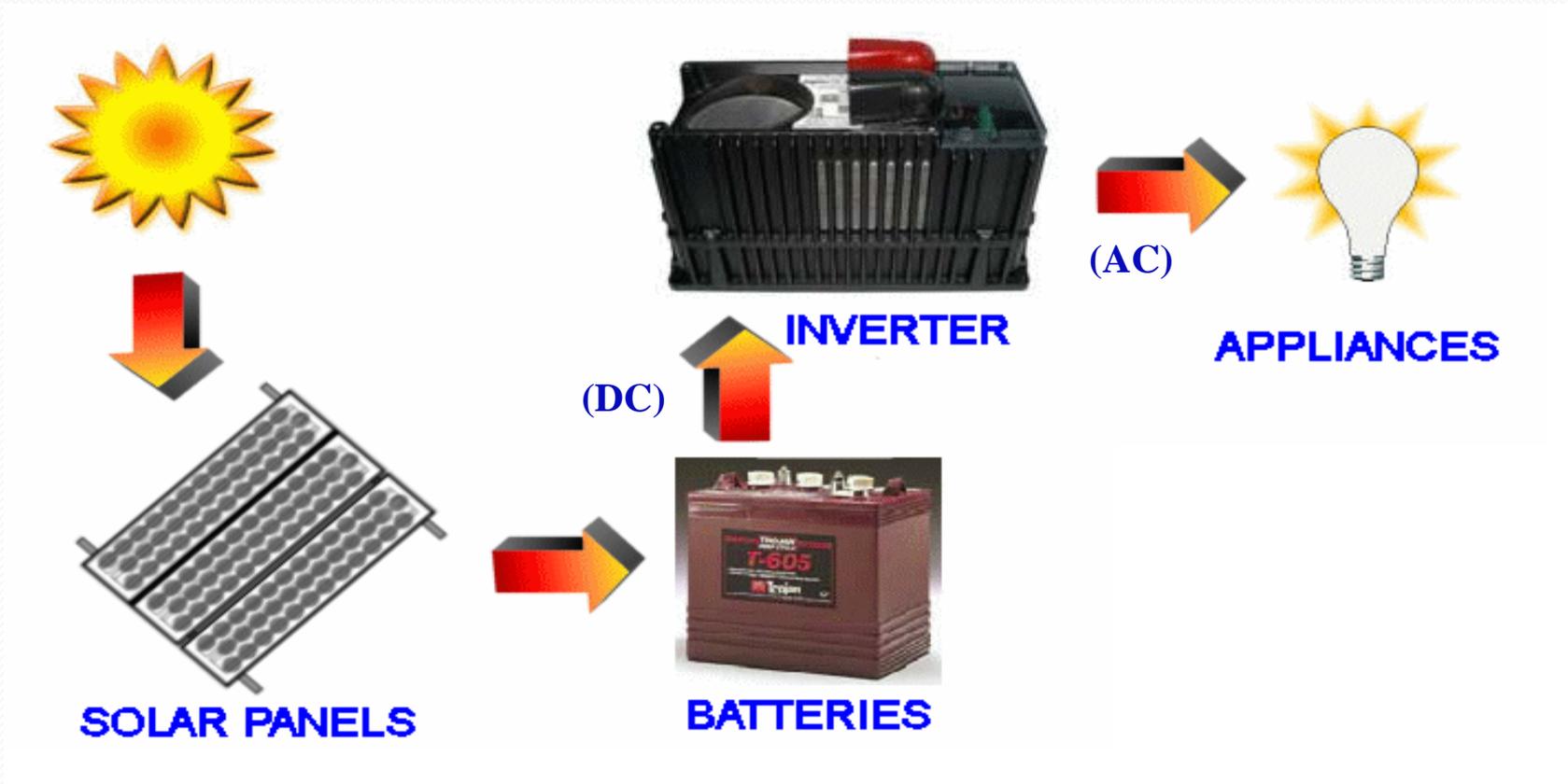
Les modules solaires amorphes

Les modules solaires en couche mince à base
d'absorbeur CdTe

Les modules solaires en couche mince a base
d'absorbeur CIGS

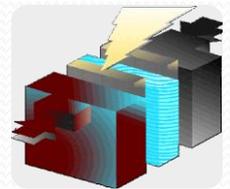


How a Photovoltaic System works?



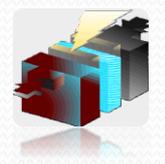
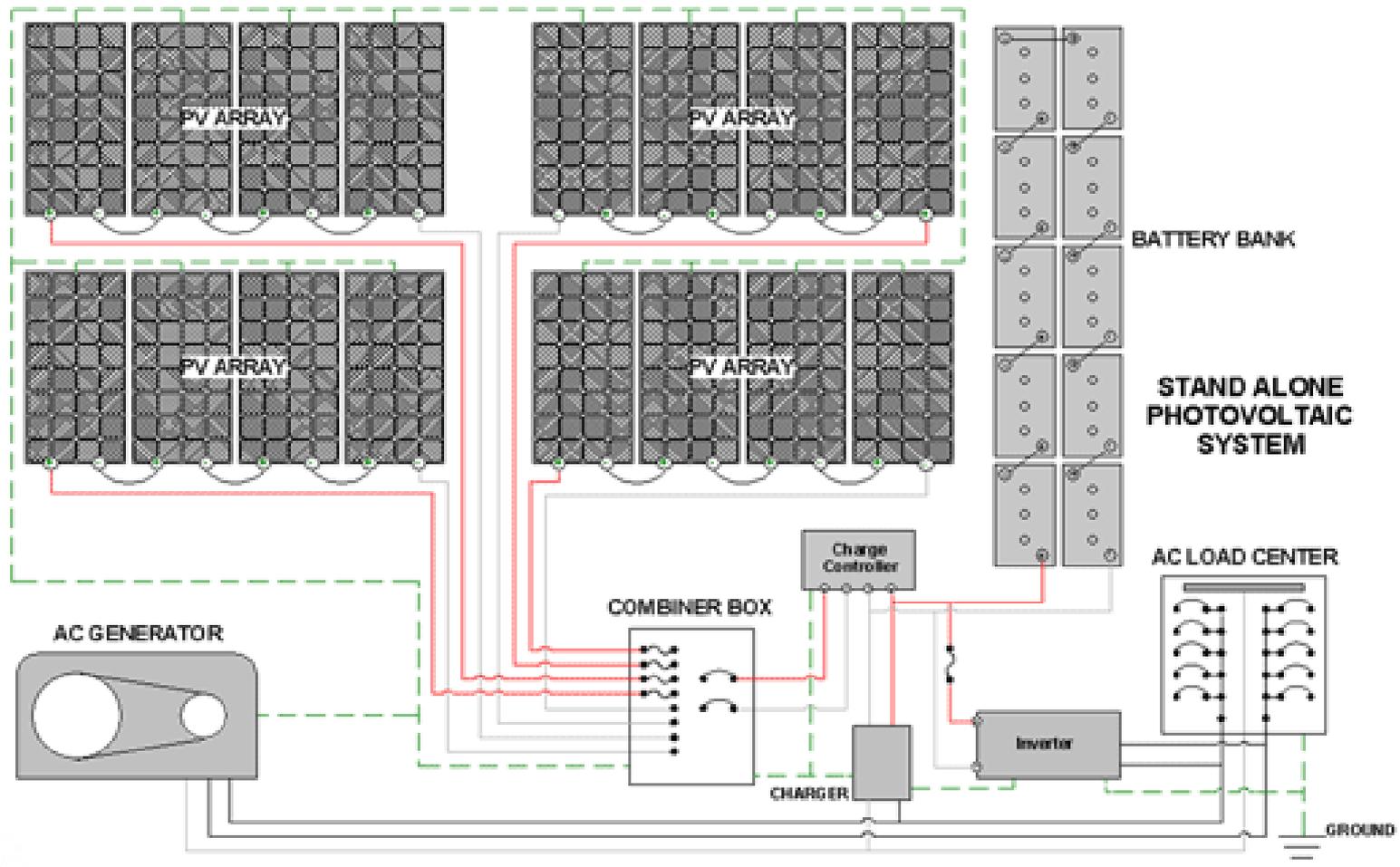
**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

LaNoMat



Savadogo@

(A) Off-Grid Photovoltaic Systems



(A) Off-Grid Photovoltaic Systems

Average energy consumption in
Montreal

$P_n = 12 \text{ kWh/day}$



1 module:

$P_n = 200 \text{ w}$

$A = 0.90 \text{ m}^2$

$T = 25\text{-}30 \text{ years}$

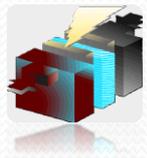
$\eta = 15\%$

Total = 24 modules

$P_n = 4800 \text{ w} = 4.8 \text{ kw}$

Average sun pick in Montreal = 2.5 h/day

$$\begin{aligned} E_n(\text{total}) &= 2.5 \text{ h/day} \times 4800 \text{ w} = 12,000 \text{ wh/day} \\ &= 12 \text{ kWh/day} \end{aligned}$$



(A) Off-Grid Photovoltaic Systems

Average energy consumption in
Bujumbura

$P_n = 24 \text{ kWh/day}$



1 module:

$P_n = 200 \text{ W}$

$A = 0.90 \text{ m}^2$

$T = 25\text{-}30 \text{ years}$

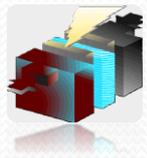
$\eta = 15\%$

Total = 24 modules

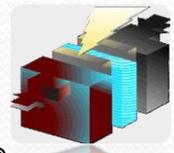
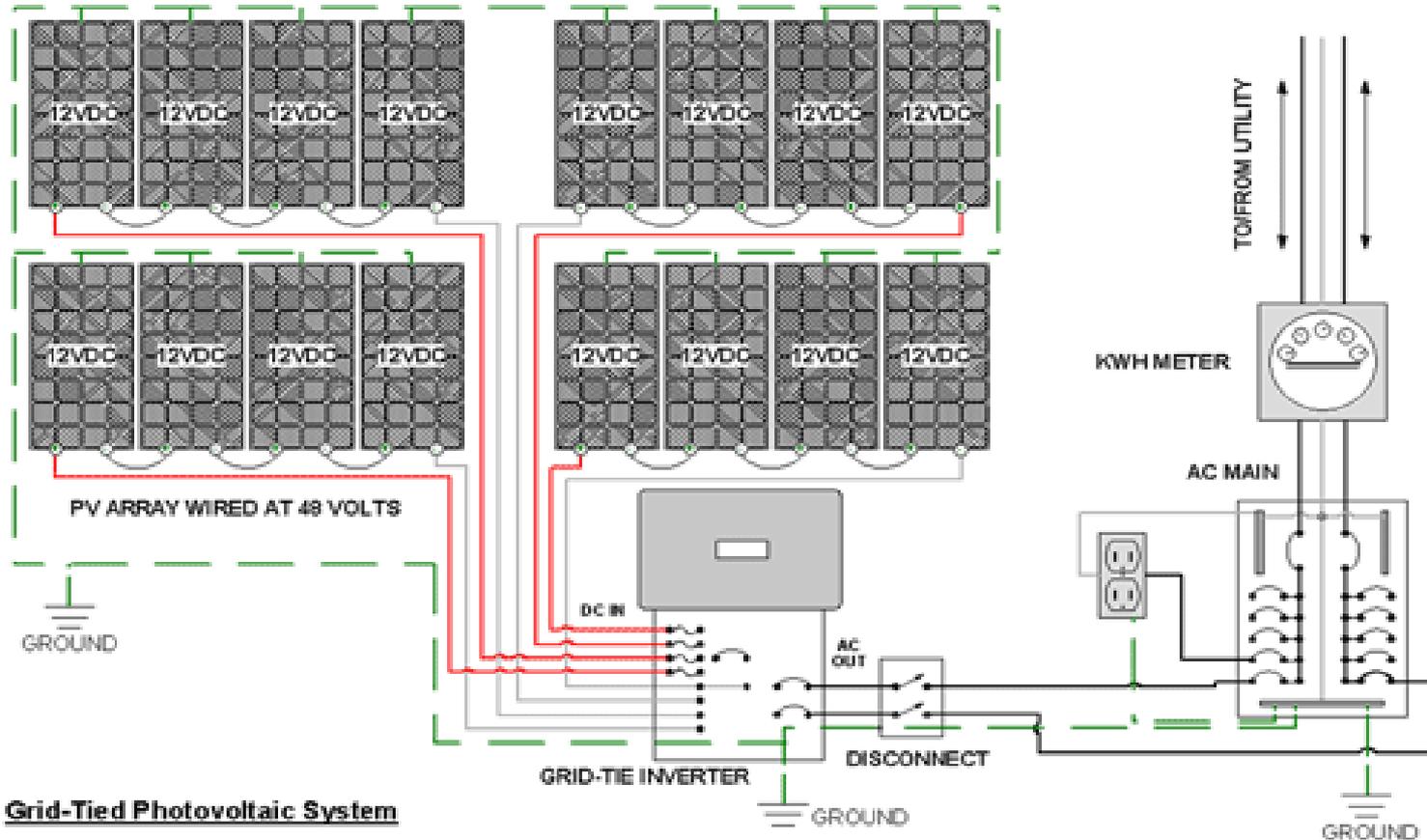
$P_n = 4800 \text{ W} = 4.8 \text{ kW}$

Average sun pick in Bujumbura = 5 h/day with 1 kW

$E_n(\text{total}) = 5 \text{ h/day} \times 4800 \text{ W} = 24,000 \text{ Wh/day}$
 $= 12 \text{ kWh/day}$



(B) Grid-Tied Photovoltaic Systems



Solaire hybride



Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une cellule photovoltaïque pour la conversion de la lumière en électricité

Par ailleurs, la chaleur intense émise par le concentrateur est capturée via un système de refroidissement liquide.

Ceci permet à la centrale de convertir 75% de la lumière du soleil

From: Zenith Solar

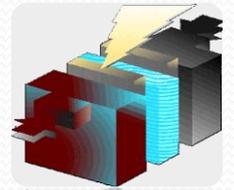


**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

Mais les cellules sont très sensibles à la chaleur?

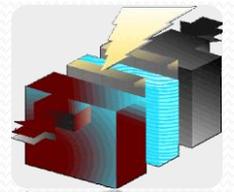
LaNoMat



Savadogo@

Avantages du PV:

- Appareils solaires sont peu énergivores;
- Baisse continue du coût des panneaux;
- Une des seules dont le coût baisse de manière significative;
- Nouvelles technologies en développement;
- Possibilité de systèmes hybrides;





SYSTÈME SOLAIRE POUR télécoms, BOTSWANA



PANNEAUX SOLAIRES monté sur le toit (Afrique du sud)



SOLAR SCHOOL POWERED RURAL, AFRIQUE DU SUD



STATION DE TELEMETRIE utilisant l'énergie solaire



CLINIQUE SOLAR POWERED, E-
AFRIQUE DU SUD



Des modules solaires totalisant 220KWp sur le toit et la façade sud du siège de Kyocera à Kyoto, le Japon prévoit des exigences de puissance électrique du bâtiment



Système d'énergie solaire sur le toit d'une église à Mbinga (Tanzanie)



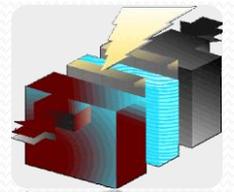
Les panneaux solaires sur le dispensaire de Tanghin Dassouri (25 km au sud-ouest de Ouagadougou) ont permis d'éclairer deux décennies de naissances de ces 60.000 habitants



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@



L'installation de 7,5 MW solaires photovoltaïques dans deux usines sur les îles de Santiago(5 MW) et Sal (2,5 MW) Ces nouvelles installations vont produire 4% de l'énergie totale du Cap-Vert et sera utilisé pour la consommation



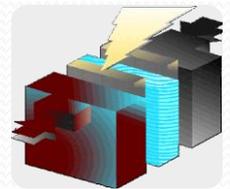
Pompage solaire dans un village au Burkina-Faso



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



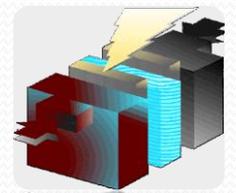
Savadogo@



Pompage PV à Assamo-Djibouti
(Avril-2009)



Cuiseur solaire à PK 12
(banlieue de Djibouti-ville
(avril-2009)





Pompage de l'eau au
Burkina

6m³/heure

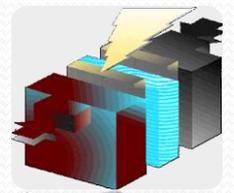
12 KW



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

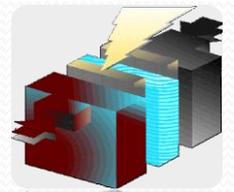
Lampadaire solaire
en Casamance
au Sénégal



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

<http://www.newmaterials.polymtl.ca/>



Exemple de l'optimisation des façades d'un immeuble par l'intégration de panneau solaire photovoltaïque à la verticale sur la partie haute du bâtiment et en inclinaison sur sa base.

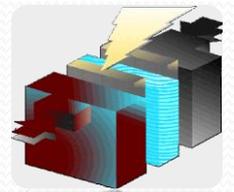


la tombée de la nuit, le panneau solaire devient un élément de décoration extérieur et agrémente la façade de votre maison

Immeuble solaire

<http://www.bati-depot.fr/>

LaNoMat



Savadogo@

Centrale photovoltaïque

- 40 MW-Sarnia (Canada) pour alimenter 15 000 foyers (injectés au réseau)
- Espagne plusieurs centrales allant jusque 60 MW chacune –
- Amerleja(Portugal);
- Allemagne construction de Centrales de dizaines de MW
- France constructions et projets en cours;

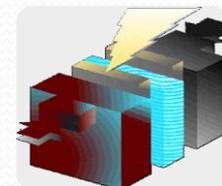
- Maroc (projet lancé de 1 milliard de \$) pour la constructionn de centrale
- Burkina-Faso (Annonce officielle de la constructiond'une centrale de 20-30 MW (projet en court)



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

Énergie solaire et Développement Local

Projets pour sites non raccordés au réseau

-Pompage

-Irrigation

-Électrification villageoise

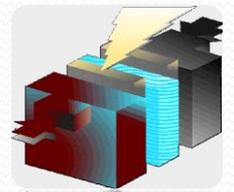
-Conservation des médicaments en zone rurale



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



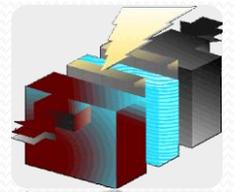
Savadogo@

Pour sites raccordés au réseau

-Consommateurs individuels qui peuvent devenir producteurs de quelques kW

Cas de l'Allemagne (consommation positive), Canada, France, USA, etc.

Centrales Solaires: Les centrales présentent un intérêt pour une injection sur le réseau; ceci minimise le coût de la centrale
Absence de système de stockage qui peut valoir au moins 50% du coût de l'installation



Coûts:

Installation domestique de 3 kW qui fournit 3000 kWh/an² dont l'installation a coûté 6 \$/W, le kWh coûte 0.8\$;

le prix descend à 0.5\$ si on obtient 4500 kWh/an (zone bien ensoleillée).

En Afrique une telle installation pourrait fournir de l'électricité à moins de 0.3 \$ le kWh.

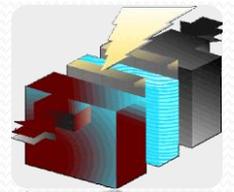
pour une centrale solaire telle que celle d'Amareleja (Portugal), ayant coûté 261 millions d'euros et qui produit 93 GWh/an, alors le coût du kWh peut être estimé à 0.3 \$.



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

pour le projet (à échéance 2013) de centrale photovoltaïque à concentration de

Mildura, en Australie, d'une puissance de 154 MW

et produisant 270 GWh par an ou 1753 h de fonctionnement par an, investissement initial de 420 millions de dollars australiens, soit 230 M€ le prix du kWh descendrait à moins de 0.08\$

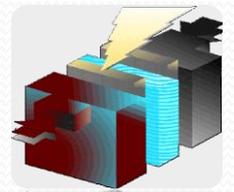
Si installé au Sahara: 390 GWh au lieu de 270 GWh



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

Rentabilité d'une installation dépend de:

Investissement

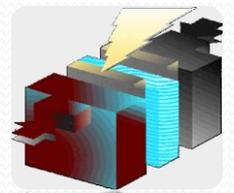
Exploitation ou quantité produite donc gisement solaire;

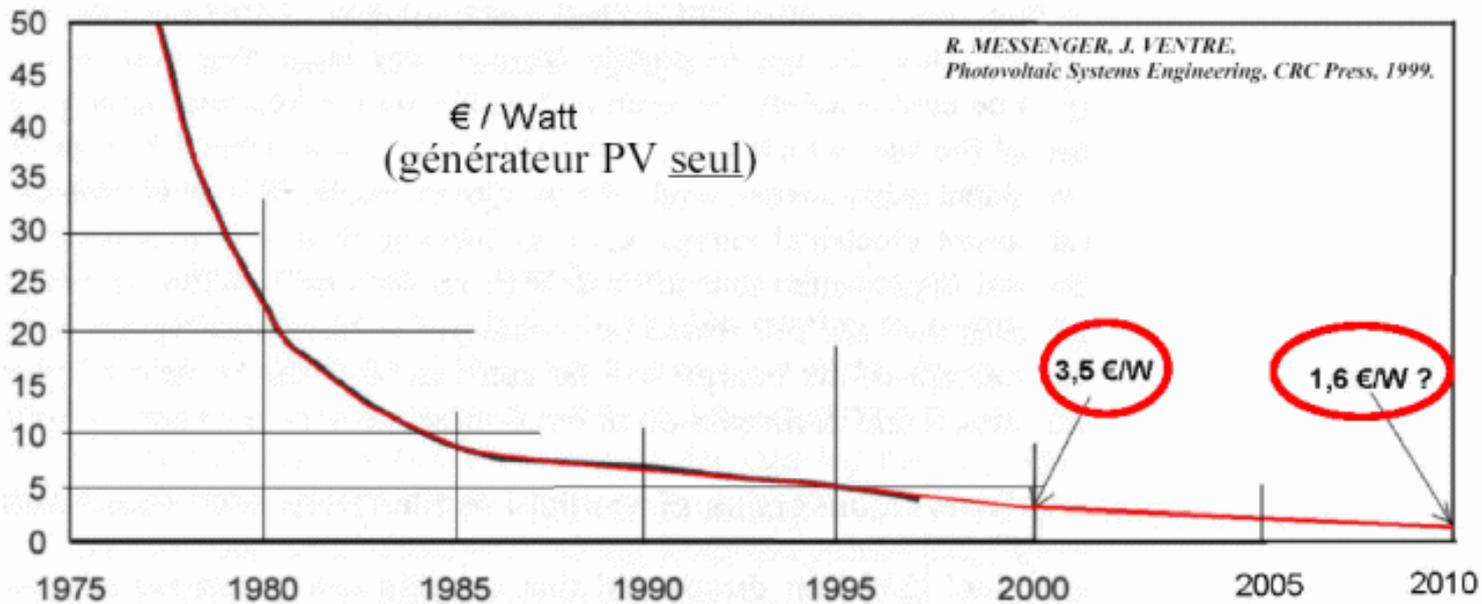
Financement (crédits de carbone, fonds spéciaux);

Maintenance;

-PV a une maintenance faible;

-Thermodynamique a une maintenance élevée;

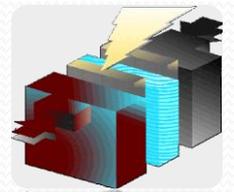




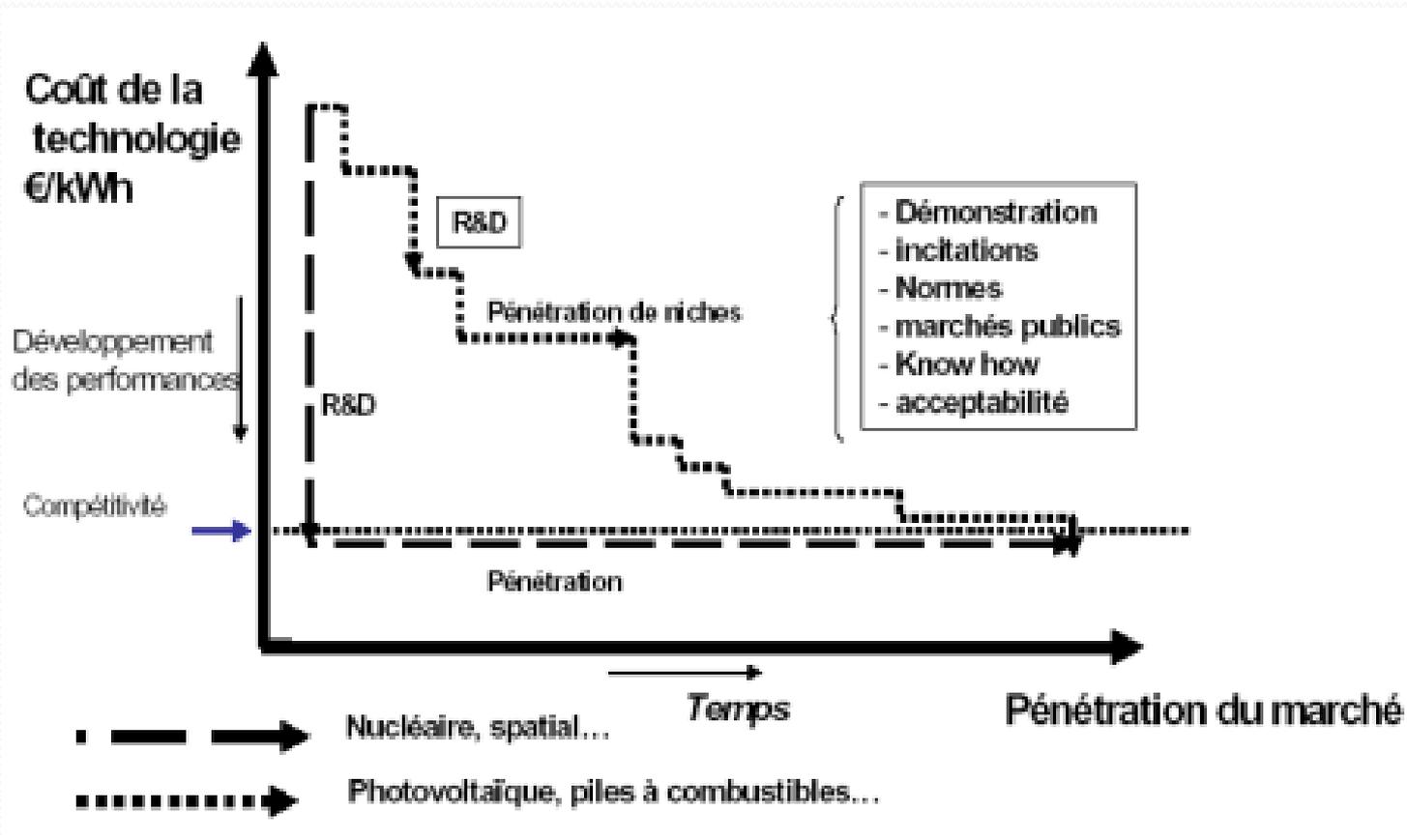
**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



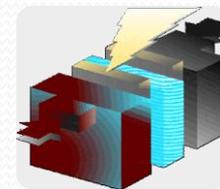
Savadogo@



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

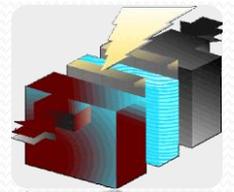
LaNoMat



Savadogo@

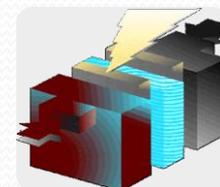
Inconvénients du solaire PV:

- Coûts élevés des matériaux;
- C'est ne haute technologie pas accessible `(emprunte de l'électronique);
- Rendements restent faibles (moins de 30% pour les systèmes réels);
- Gisement est intermittent
- Technologie exportée du nord vers le Sud où les utilisateurs sont potentiellement plus tributaires (augmentation du coût);



Avantages du solaire PV:

- Bien adapté à la nature dispersée de l'habitat (zone rurale);
- Production individualisée (besoins par foyer);
- Possibilité d'injecter dans le réseau;
- Maintenance est minime pour le PV;



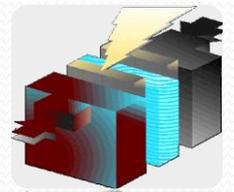
Pour le Burundi et la sous région:

-Promouvoir des installations individuelles, communautaires, industriels, etc. fonctionnant avec des systèmes solaires (PV simple, PV à concentration, thermique ou thermodynamiques?)

-Possibilités de systèmes hybrides?
PV de concentration?

-Assurer la formation d'une main d'œuvre qualifiée

-Centre Régional en Technologies Solaires Appliquées (CRTSA) dans le cadre des grands lacs ou de l'Afrique Centrale?



Nos projets en cours en Afrique:

- Projet Technologies Solaires Appliquées (Burkina-Faso) qui est financé par l'ACDI pour installer:

Un programme de License Professionnelle en Technologies Solaires Appliquées à l'UdeO (45 Techniciens dont 20% de femmes ont été formés);

-Formation de groupements de femmes dans les villages sur l'utilisation, la maintenance et la gestion des systèmes solaires;

-Impacts au niveau des décisions gouvernementales (centrale solaire; installations communautaires, etc.)

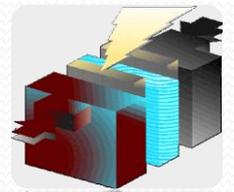
Période du projet: 2005-2011



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat



Savadogo@

-Installation de plusieurs systèmes PV en Afrique pour:

Éclairage; conservation des médicaments,

pompage de l'eau; le commercial;

Borne de charges de téléphone cellulaires;

Essai de systèmes individuels raccordés au réseau;

Suivi du comportement de plusieurs technologies sur des sites;

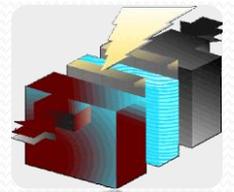


ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

<http://www.newmaterials.polymtl.ca>

LaNoMat

Savadogo@



Conclusion:

- L'énergie solaire devra être une source importante dans l'assiette énergétique du Burundi;
 - C'est une énergie adaptée pour les besoins individuels, communautaires, commerciaux, industriels (avec ou sans systèmes hybrides),
 - Possibilité d'injecter dans le réseau.
- Dans le contexte actuel des vrais enjeux de développement, une autosuffisante énergétique serait difficile à assurer sans cette source dans l'assiette énergétique de la majeure partie des pays africains.