



Projet Tunisoutenable, Actions pour la
soutenabilité en Tunisie
CUP n. E51G22000190009

Gestion énergétique (Opportunité des énergies renouvelables Vs énergie électrique), relations transition écologique - transition énergétique

- Date : 2 Octobre 2023
- Formateur : Mohamed Wissem NAOUAR
- E-mail : wissem.naouar@enit.utm.tn



1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

- Civilisation de Sumer qui date de plus de 10 milles ans et qui était située dans le sud de la Mésopotamie antique (actuellement l'Iraq)



Tablette Babylonienne

Compte de chèvres et de moutons



Monument qui représente le système solaire



Porte de Ishtar (Musée de Berlin)

1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

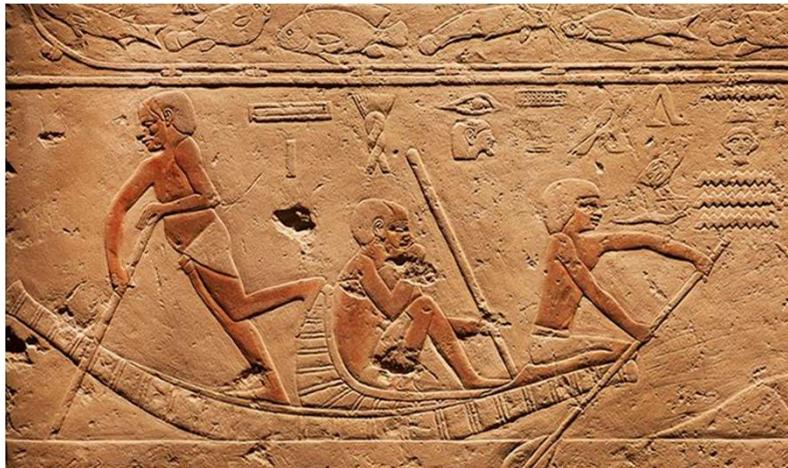
- Civilisation de Sumer qui date de plus de 10 milles ans et qui était située dans le sud de la Mésopotamie antique (actuellement l'Iraq)
- ➔ Invention de la roue -> Première forme de transfert énergétique



1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

- Civilisation des pharaons (actuellement l'Egypte) qui date de plus de 7000 ans



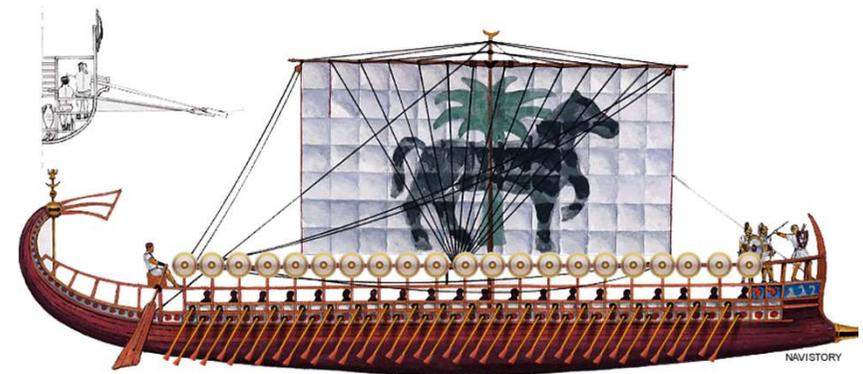
1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

- Civilisation de Carthage qui date de plus de 3 mille ans
- ➔ Exploitation de l'énergie fournie par le vent pour faire déplacer les bateaux



Port antique de Carthage



Navire de la civilisation
carthaginoise

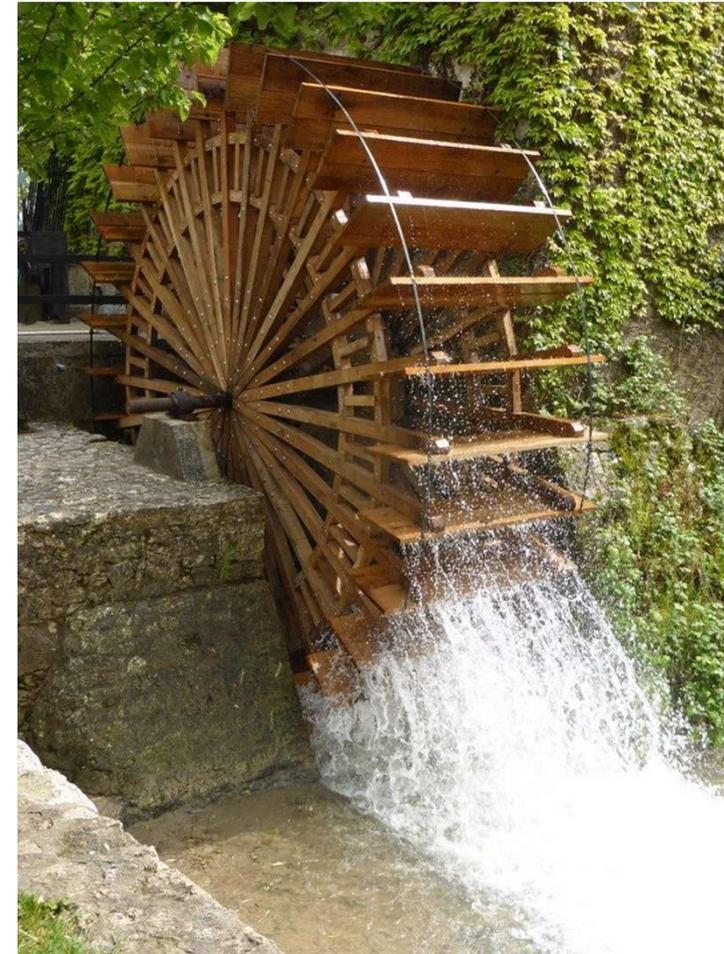
1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

- Histoire moderne
- ➔ Les moulins à eau permettaient d'exploiter l'énergie fournie par l'écoulement de l'eau pour faire tourner des machines



- ➔ Apparition de l'hydroélectricité

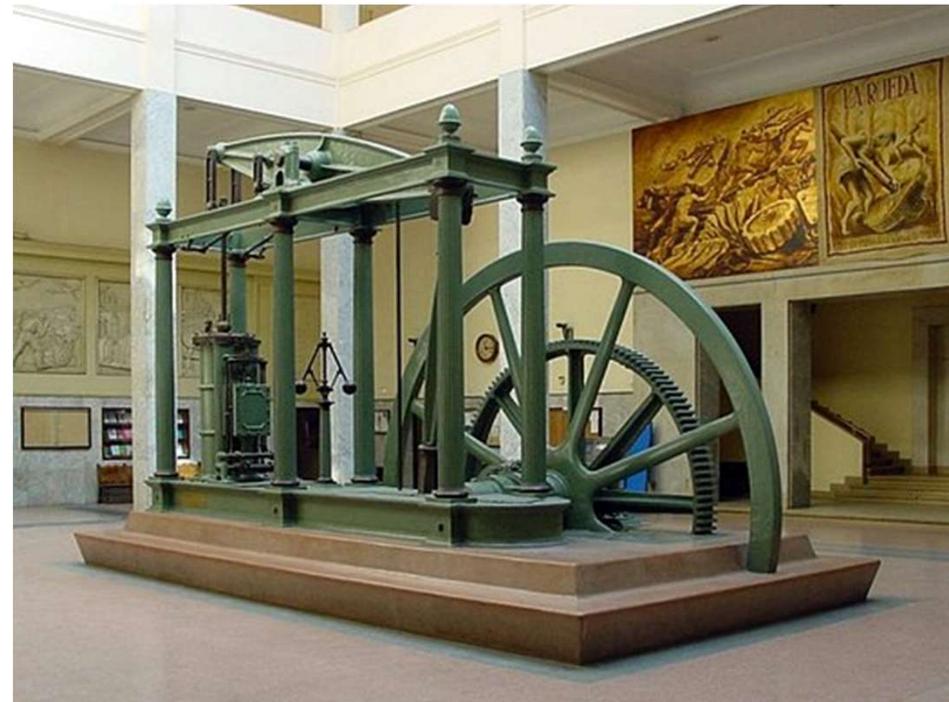
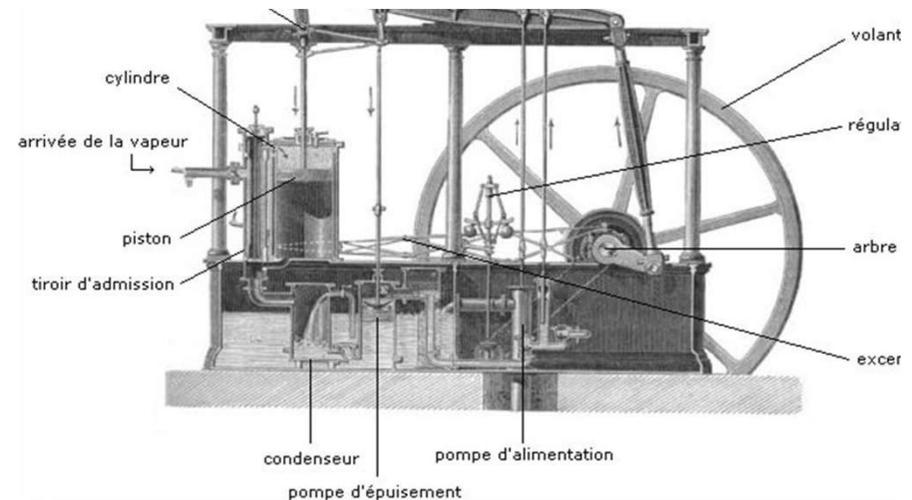


1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

- Histoire moderne
- ➔ Machine de James Watt
- ➔ Pas de dépendance géographique
- ➔ La machine de James Watt est également connue sous le nom de moteur à vapeur. Elle exploite l'énergie fournie par la pression de la vapeur pour la réalisation de mouvements mécaniques
- ➔ Nécessité d'une énergie primaire pour avoir de la vapeur

Prototype de la machine de Watt installé dans le hall de l'école d'ingénieurs de l'université polytechnique de Madrid



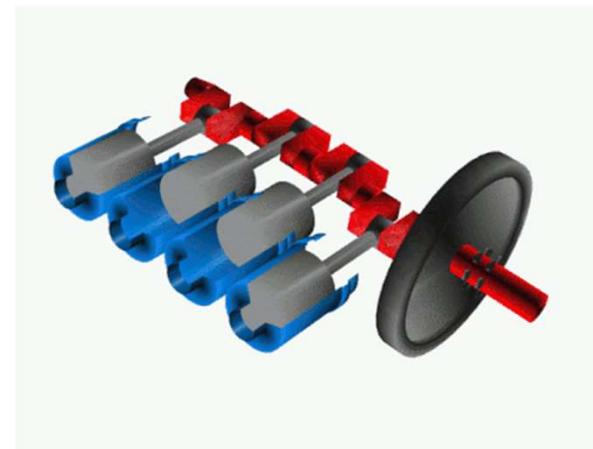
1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

- Histoire moderne
- ➔ Invention des moteurs à combustion
- Un moteur à combustion (ou explosion) est un moteur qui fonctionne à l'aide de la combustion d'un carburant. Il dispose d'une densité de puissance plus élevée que les moteurs à vapeur. Pour un même volume, il procure une plus grande puissance et il est plus léger que les premiers moteurs qui étaient à vapeur.
- L'histoire des moteurs à combustion commence lorsque, en 1854, Eugenio Barsanti et Felice Matteucci inventent le premier moteur à combustion à un cylindre.



Moteur V6 d'une Mercedes Benz

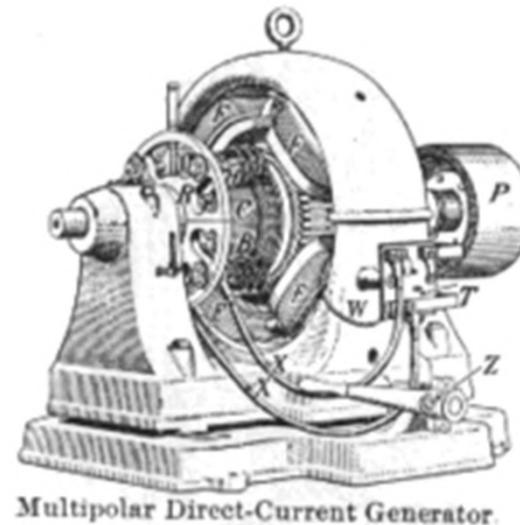
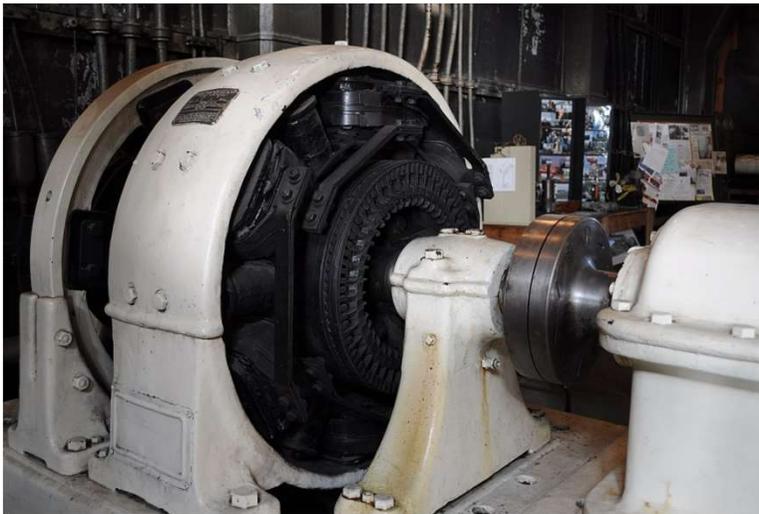


https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_combustion_et_explosion#/media/Fichier:Cshaft.gif

1.INTRODUCTION

1. Un peu d'histoire...

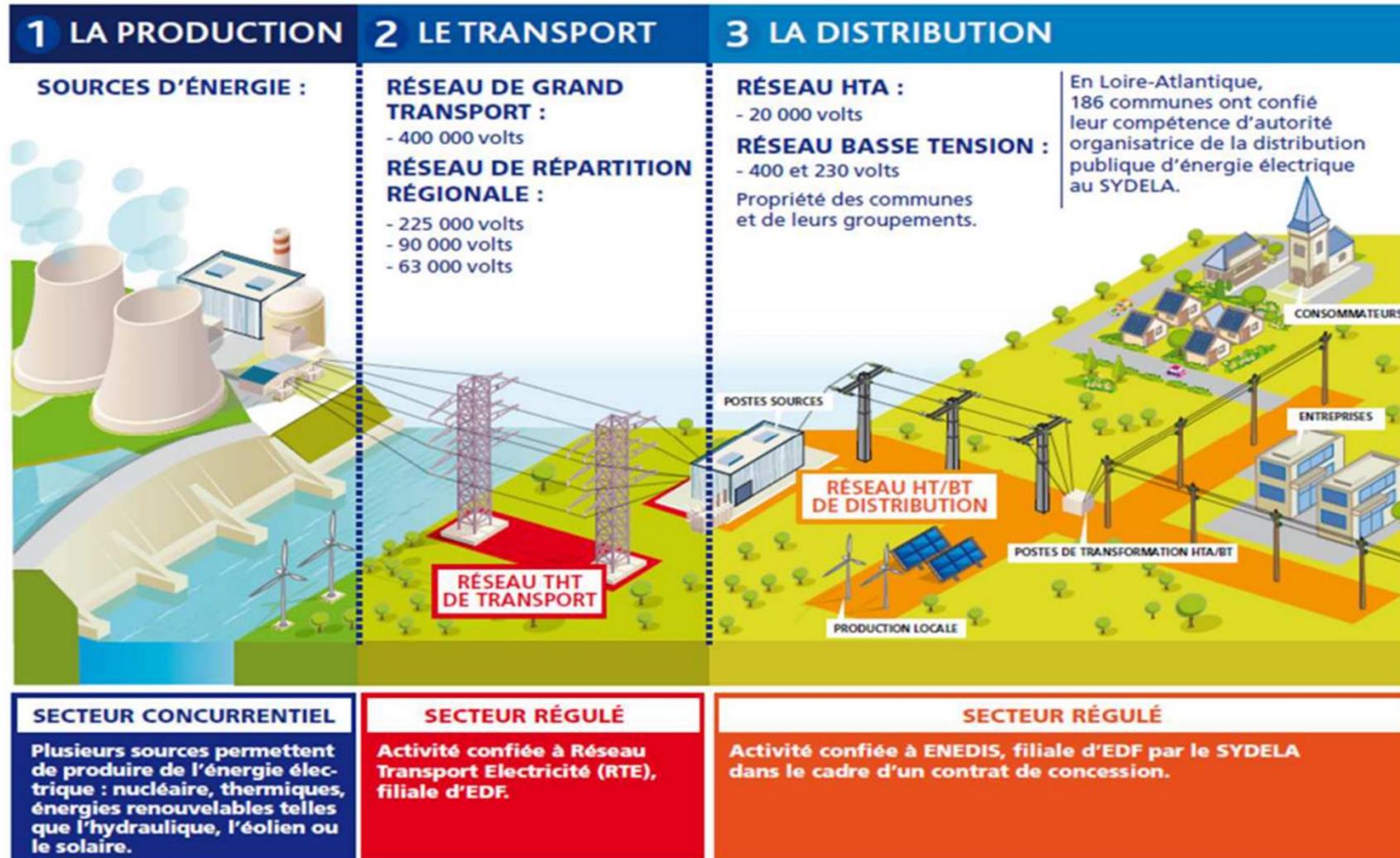
- Histoire moderne
- ➔ Invention des machines électriques (ou moteurs électriques)
- L'histoire des machines électriques commence lorsque Thomas DAVENPORT invente officiellement en 1834 la première machine électrique (alimentée par batterie).
- En 1886, il y a eu l'invention du moteur DC
- A partir de l'année 1888, la machine alternative est brevetée
- Depuis, les machines électriques ne cessent de s'améliorer et les puissances de machines électriques atteignent maintenant la valeur du GW



Multipolar Direct-Current Generator.

1.INTRODUCTION

2. Réseau électrique conventionnel



Source : Rapport "Les réseaux électriques, stockage stationnaire et réseaux intelligents : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles »

1.INTRODUCTION

2. Réseau électrique conventionnel

- Production centralisée d'énergie électrique par des centrales de grande puissance

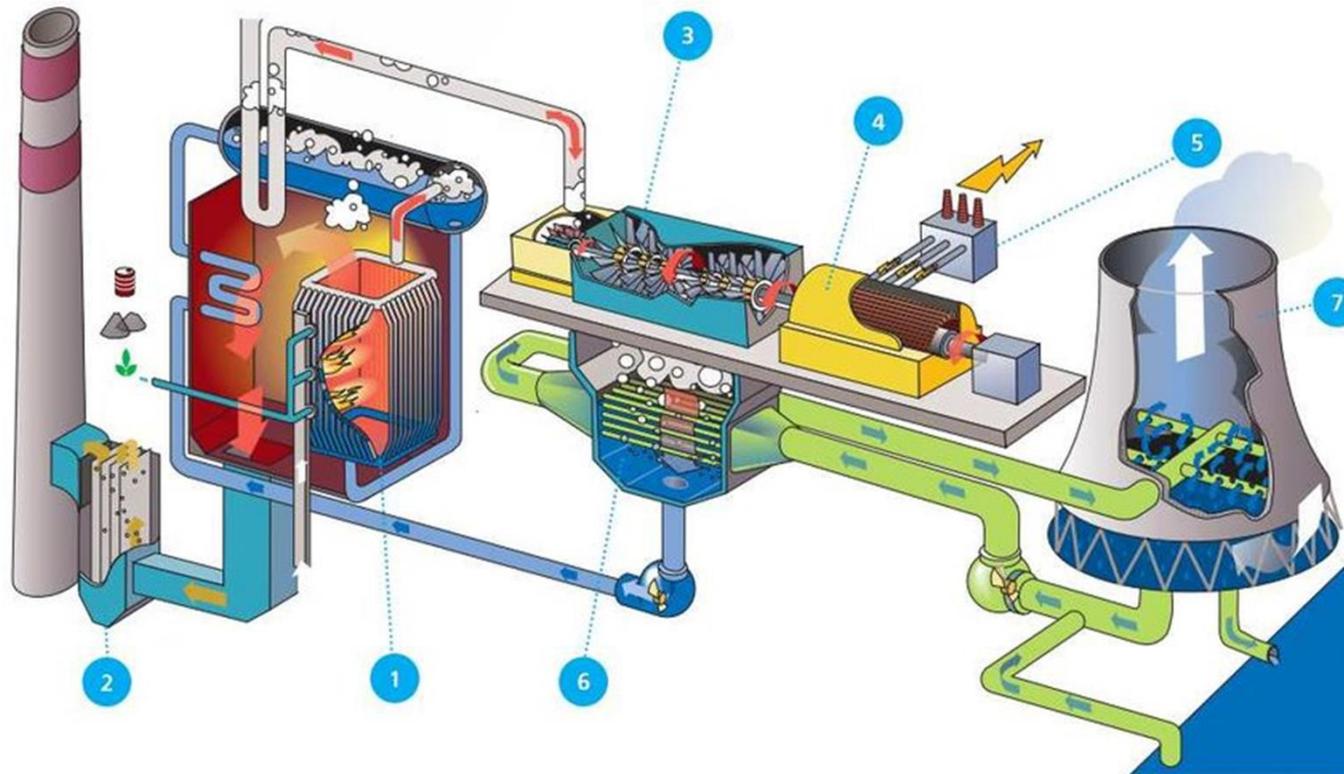


Schéma synoptique d'une centrale thermique

- | | | | | | | | |
|---|--------------------|---|------------------|---|----------------|---|-------------------------|
| 1 | Chaudière à vapeur | 3 | Turbine à vapeur | 5 | Transformateur | 7 | Tour de refroidissement |
| 2 | Electro fibre | 4 | Alternateur | 6 | Condensateur | | |

1.INTRODUCTION

2. Réseau électrique conventionnel

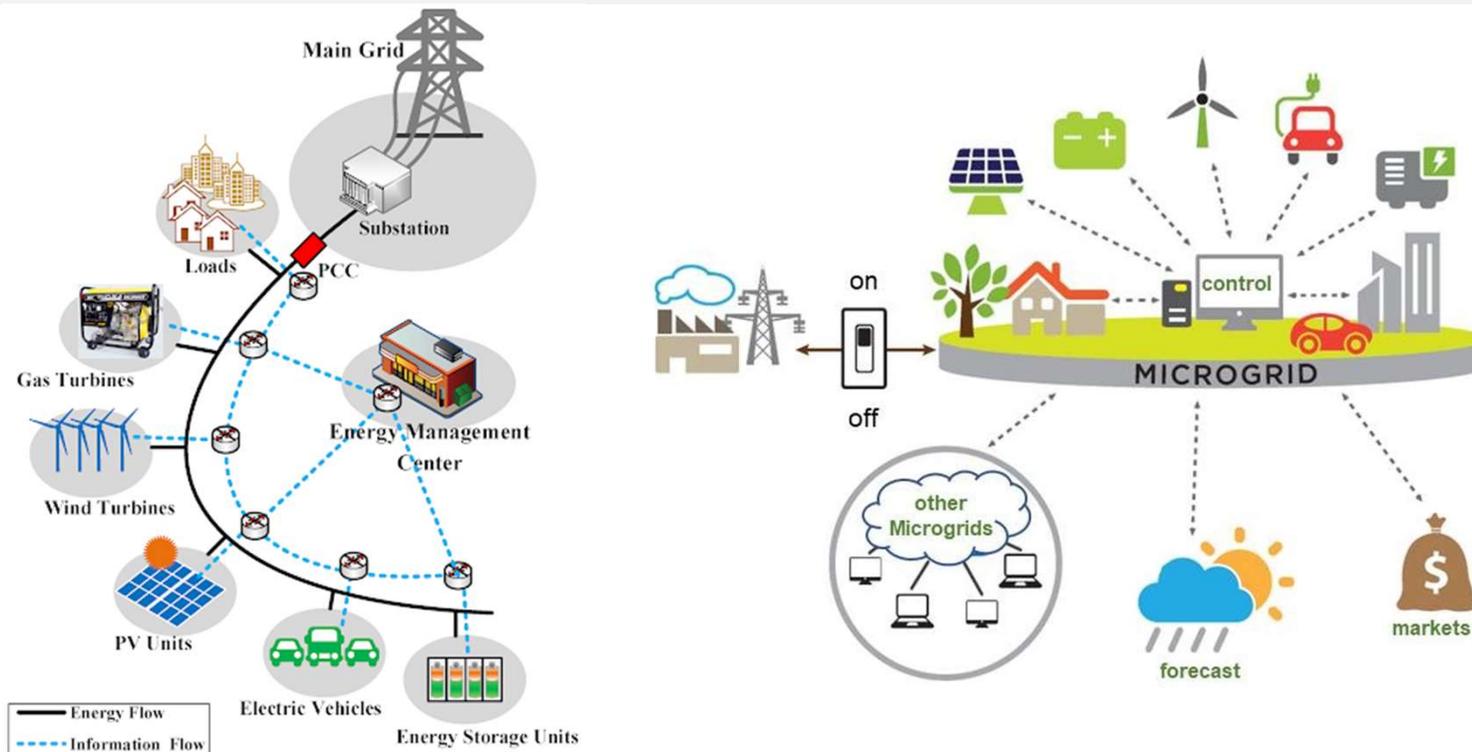
- Production centralisée d'énergie électrique par des centrales de grande puissance
- Exemple: La centrale électrique de Rades qui combine une turbine à gaz et une turbine à vapeur (combustion à deux cycles : à gaz et à vapeur) avec une capacité de 450MW



1.INTRODUCTION

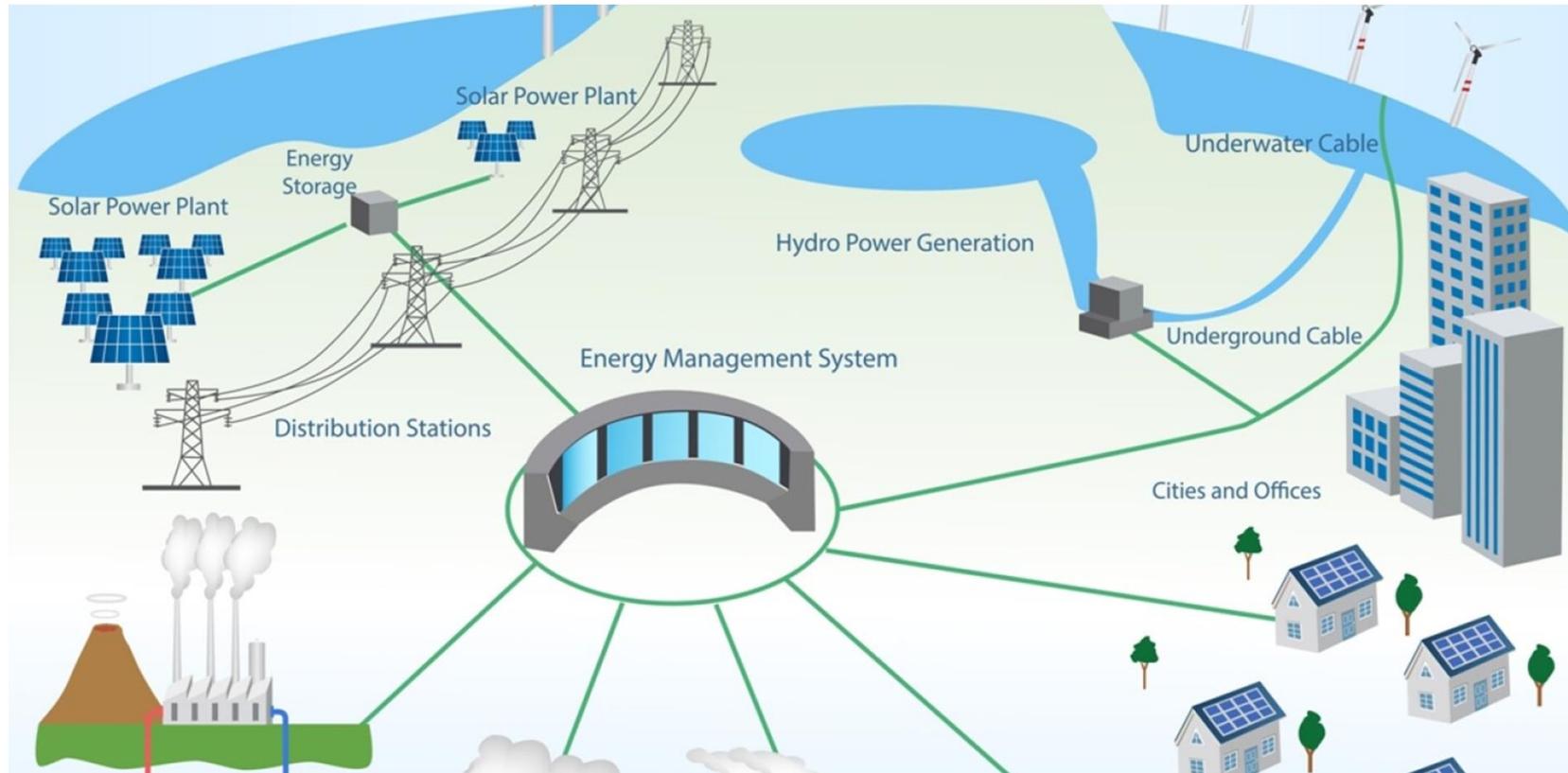
3. Les micro-réseaux (et nanoréseaux)

Un **micro-réseau** peut être décrit comme étant un système d'énergie intégré incluant des installations locales de génération d'énergie électrique (micro-turbines, panneaux-photovoltaïques, éoliennes, etc), des charges électriques, des installations de stockage d'énergie électrique (batteries, super-condensateurs) et un système de supervision et de gestion des flux énergétiques. Ces micro-réseaux sont destinés à assurer une **génération décentralisée** de l'énergie électrique en assurant un approvisionnement électrique local pour un certain nombre de consommateurs.



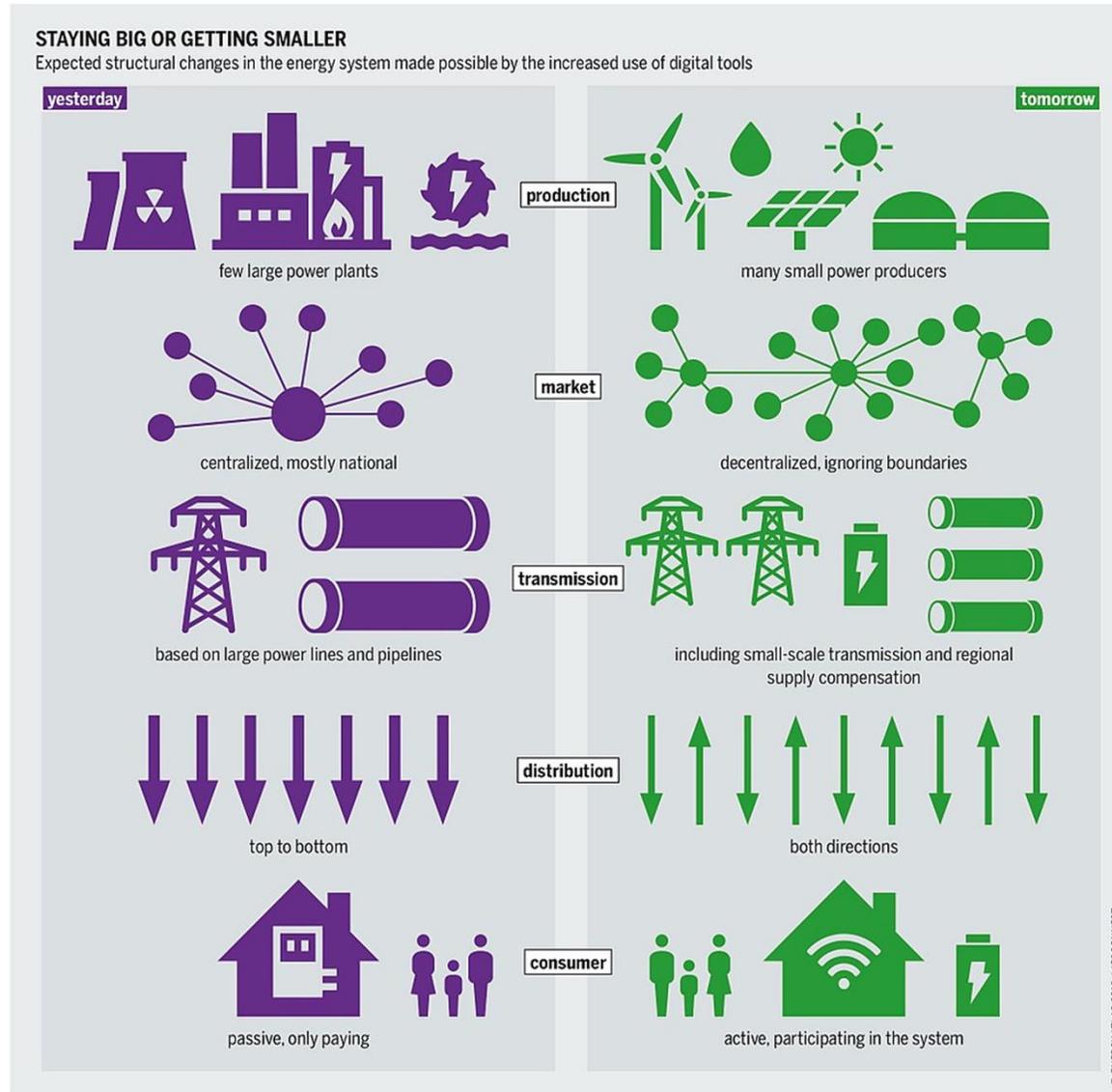
1.INTRODUCTION

4. Vers les réseaux électriques intelligents (Smart Grids)...



1.INTRODUCTION

4. Vers les réseaux électriques intelligents (Smart Grids)...



2. LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE (DÉFINITIONS, OBJECTIFS ET ENJEUX)

1. Définitions

- La transition énergétique peut être définie comme étant l'ensemble **des changements** apportés aux systèmes de génération et de consommation d'énergie électrique conventionnels, et ce en vue de répondre à plusieurs objectifs et enjeux.
- Les **changements** à apporter pour les **systèmes de génération** d'énergie consistent en un passage d'un système de génération centralisé et essentiellement basé sur des énergies fossiles (Pétrole, Gaz, Charbon) ou à risque (Nucléaire) vers des systèmes de génération décentralisés et fondés sur des énergies renouvelables
- Les **changements** à apporter pour les **systèmes de consommation** consistent en l'amélioration de la qualité d'énergie électrique (Réduction de l'effet des charges polluantes), optimisation des modes utilisés pour la consommation de l'énergie électrique (Exemple: Tarification variable) et optimisation des besoins en énergie.

2. LA TRANSITION ENERGÉTIQUE (DÉFINITIONS, OBJECTIFS ET ENJEUX)

2. Objectifs

- La réalisation d'une transition progressive entre une génération d'énergie basée sur des énergies primaires **polluantes ou dangereuses** (Pétrole, Gaz, Charbon et Nucléaire) vers des énergies renouvelables **propres et sans danger** (solaire, éolien, hydraulique, etc.)
- Augmenter la part des énergies renouvelables
- Diminuer la part des énergies fossiles (non renouvelables) et nucléaire (à risque)



Catastrophe nucléaire de Fukushima



- Amélioration du système écologique terrestre au travers de la réduction de l'émission des gaz à effet de serre (Emission CO₂)
- Lutter contre le réchauffement climatique
- Réduction de la consommation d'énergie électrique
- Réduction des prix de consommation d'énergie électrique

2. LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE (DÉFINITIONS, OBJECTIFS ET ENJEUX)

3. Enjeux

- Système de génération plus complexe
- Risque d'instabilité du réseau électrique
- Nécessité de l'utilisation du concept Internet of Things (IoT) pour la gestion d'énergie



Computers and Electrical Engineering

Volume 106, March 2023, 108556



Smart microgrid with the internet of things for adequate energy management and analysis

R Sitharthan ^a, S Vimal ^b, Amit Verma ^c, Madurakavi Karthikeyan ^d, Shanmuga Sundar Dhanabalan ^e, Natarajan Prabakaran ^f, M Rajesh ^g, T Eswaran ^h

- Apparition du concept de « Cyber-security »

Review

Microgrid Cyber-Security: Review and Challenges toward Resilience

Bushra Canaan, Bruno Colicchio and Djaffar Ould Abdeslam *

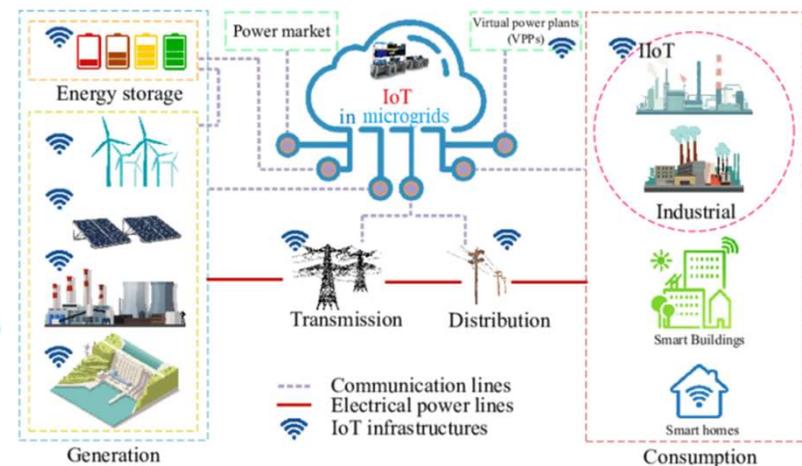
- Gestion d'énergie plus complexe



Article

Improvement of Perception Layer Routing Protocol with Static Nodes in IoT-Based Microgrids

Jun Yang ^{1,2}, Chang Yu ^{1,2,*} and Zijian Hu ^{1,2}



3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

1. Classification et caractéristiques des sources d'énergies renouvelables

- Les énergies renouvelables peuvent être classées selon leur source d'alimentation
 - ▶ Le soleil
 - ▶ Le vent
 - ▶ La chaleur de la terre (Chaleur stockée dans une couche sous sol proche de la couche de surface de la terre)
 - ▶ Les chutes d'eau (barrages, chutes naturelles, etc.)
 - ▶ Les marées (dans les plages)
- ➔ Les sources d'alimentation pour les énergies renouvelables sont **illimitées**
- ➔ Les sources d'alimentation pour les énergies renouvelables sont **intermittentes**
- ➔ Le caractère intermittent des énergies renouvelables **nécessite une opération de stockage**
- ➔ Certaines sources d'alimentation dépendent de l'**emplacement géographique**
- ➔ Nécessité d'utilisation de **dispositifs intermédiaires** pour transformer l'énergie renouvelable en énergie électrique

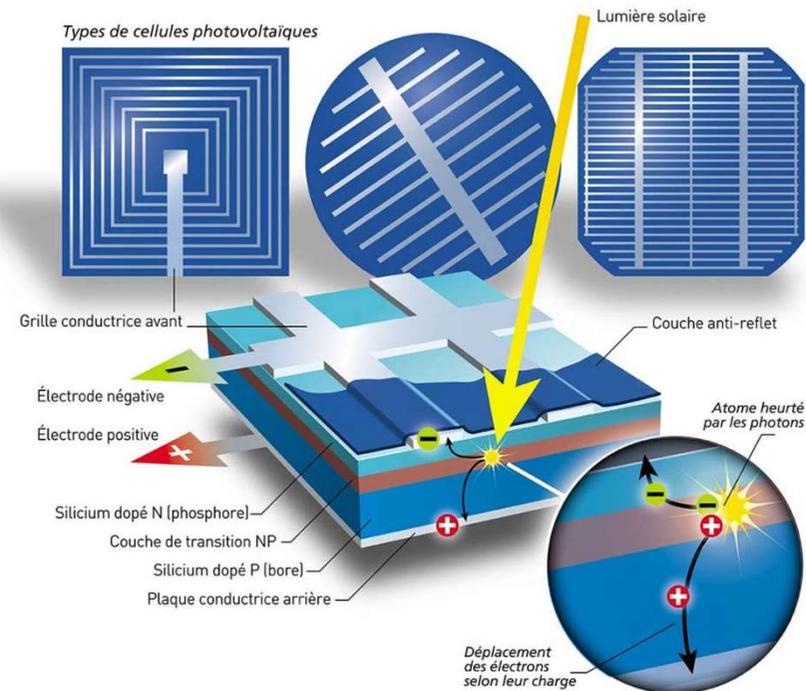
3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

2. Energie solaire

- L'énergie solaire est issue du rayonnement du soleil qui est transformé en énergie électrique par des panneaux photovoltaïques (PV)

➔ Constituant de base : La cellule photovoltaïque

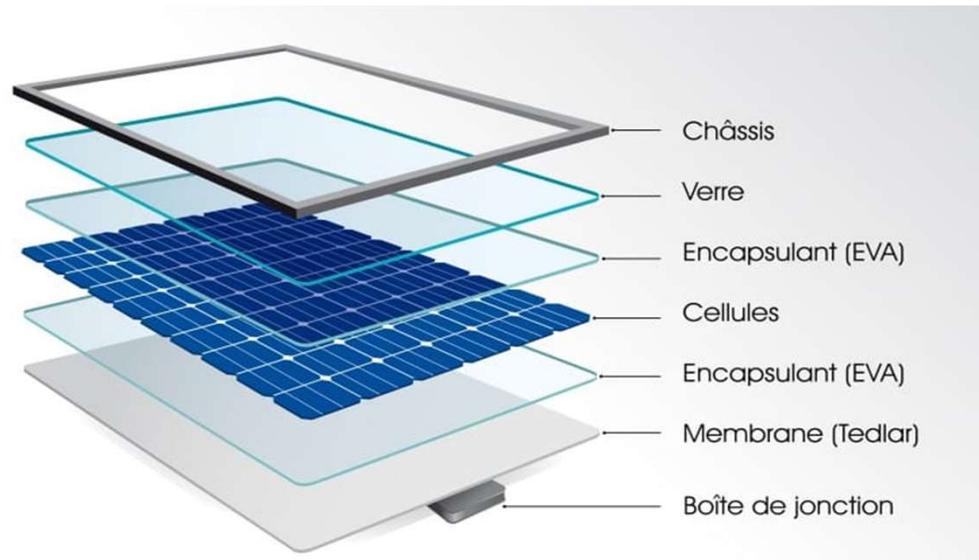
- Une cellule photovoltaïque est constituée d'une jonction PN en silicium (équivalent à une diode)
- Lorsque un photon issu de la lumière solaire percute un atome de la jonction PN, des charges électriques (positive et négative) sont libérées pour être réparties sur les électrodes (positive et négative) de la cellule PV et créer un déplacement des électrons en présence de charges



Article "LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES : SOURCE INÉPUISABLE D'INNOVATIONS"
<https://www.choisir.com/energie/articles/117006/les-cellules-photovoltaïques-source-inepuisable-dinnovations>

3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

2. Energie solaire



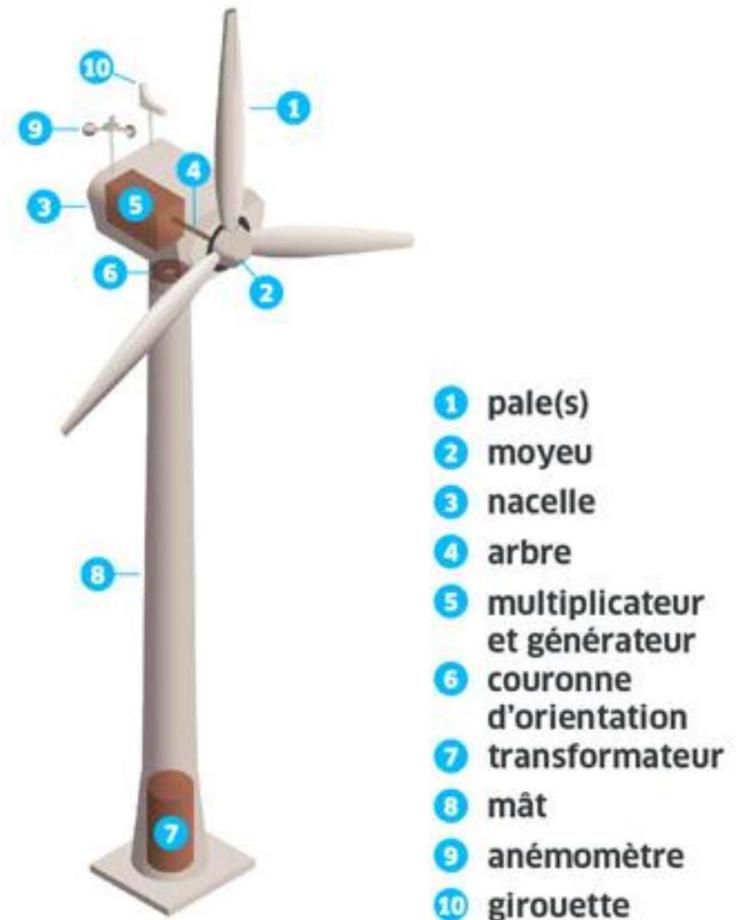
<https://www.jade-technologie.com/composition-dun-panneau-solaire/>

- Constitution du panneau solaire
 - ▶ Le châssis ou cadre utilisé pour la fixation de l'ensemble des constituants du panneau PV
 - ▶ Le verre utilisé pour protéger les cellules PV des percussions d'objets (grêles, objets portés par le vent, etc)
 - ▶ Encapsulant EVA (Ethylène Acétate de Vinyle) placé en dessus et en dessous des cellules PV en vue de les protéger hermétiquement contre l'air et l'humidité.
 - ▶ Les cellules PV qui permettent de générer l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire.
 - ▶ La membrane Tedlar utilisée pour protéger le panneau PV contre la corrosion, l'effet de la variation de température etc
 - ▶ La boîte de jonction utilisée pour raccorder le panneau PV à d'autres dispositifs.

3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

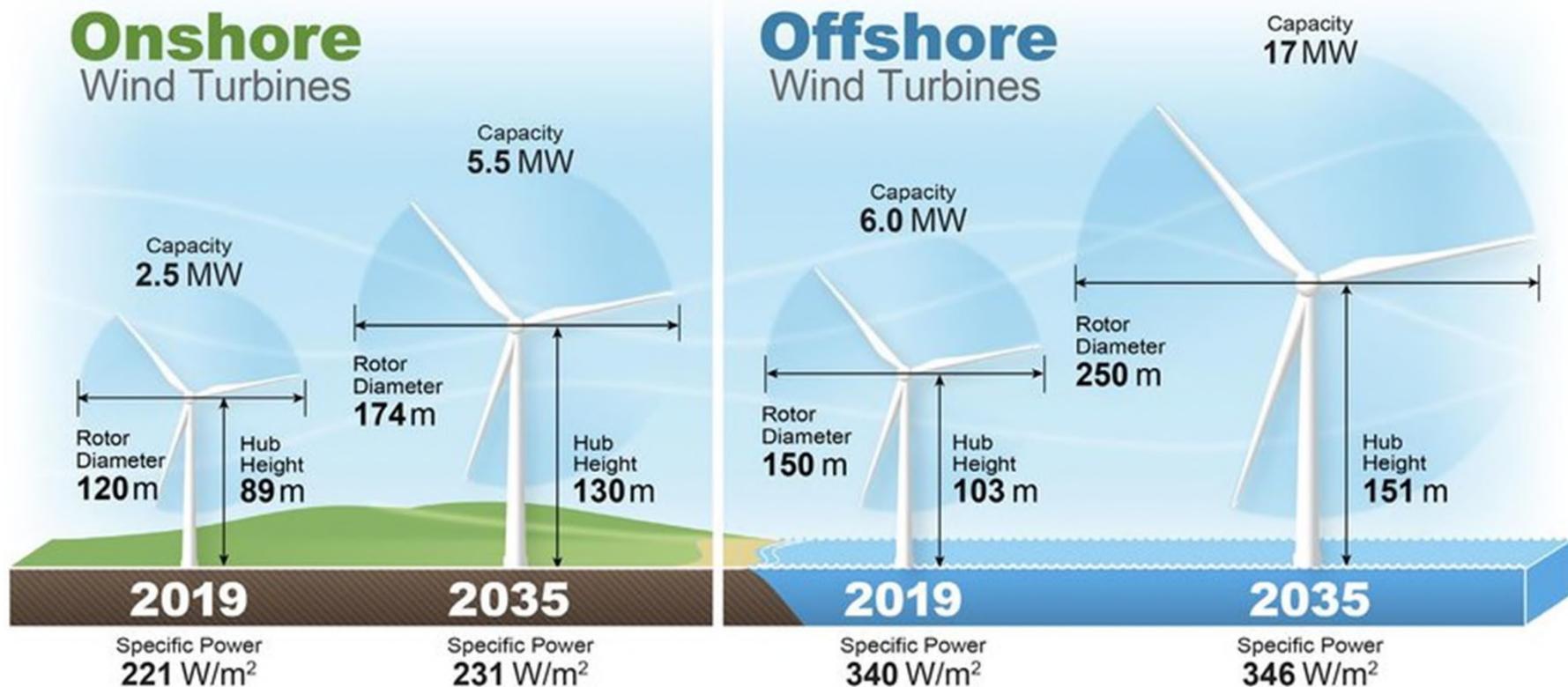
3. Énergie éolienne

- L'énergie éolienne est issue de l'énergie cinétique du vent qui entraîne un générateur électrique permettant de transformer l'énergie mécanique créée par le vent en énergie électrique.
- Constitution de l'éolienne
 - ▶ Un mouvement de rotation est imposé à l'arbre du rotor (4) par les pâles (1) et le moyeu (2) qui sont entraînés par la force du vent.
 - ▶ Le multiplicateur (5) permet d'accélérer le mouvement du rotor avant de transmettre l'énergie mécanique vers le rotor du générateur (5). La vitesse du vent à elle seule étant insuffisante pour produire de l'électricité.
 - ▶ Le générateur (5) dont le rôle est de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.
 - ▶ La nacelle (3) est la structure qui héberge les constituants mécaniques et électriques de l'éolienne.
 - ▶ La couronne d'orientation de l'éolienne (6) permet de diriger la nacelle selon l'orientation du vent.
 - ▶ Le mât (8) est une structure verticale permettant de placer les système de conversion d'énergie de l'éolienne à une hauteur suffisante.
 - ▶ L'anémomètre et la girouette (9-10) permettent d'avoir des informations sur la vitesse et orientation du vent qui vont être exploitées dans le contrôle de l'éolienne et l'orientation (via la couronne d'orientation (6)) des pâles (1) de sorte qu'elles soient face au vent.
 - ▶ Le transformateur (7) est le dispositif électrique qui interface l'éolienne au réseau électrique



3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

3. Énergie éolienne



Analysis | [Published: 15 April 2021](#)

Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050

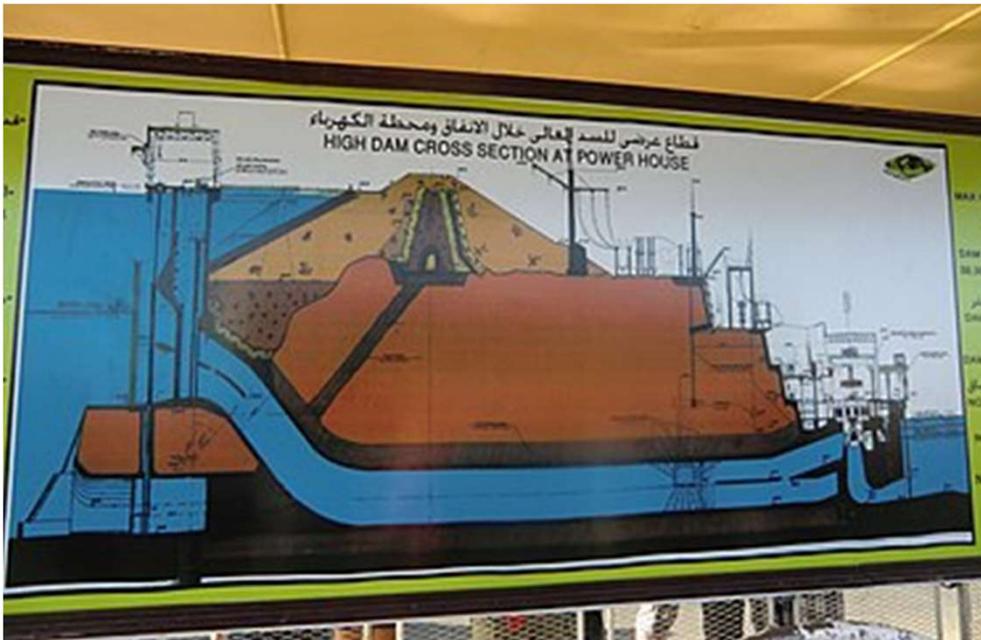
[Ryan Wiser](#) , [Joseph Rand](#), [Joachim Seel](#), [Philipp Beiter](#), [Erin Baker](#), [Eric Lantz](#) & [Patrick Gilman](#)

[Nature Energy](#) 6, 555–565 (2021) | [Cite this article](#)

3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

4. Energie hydraulique

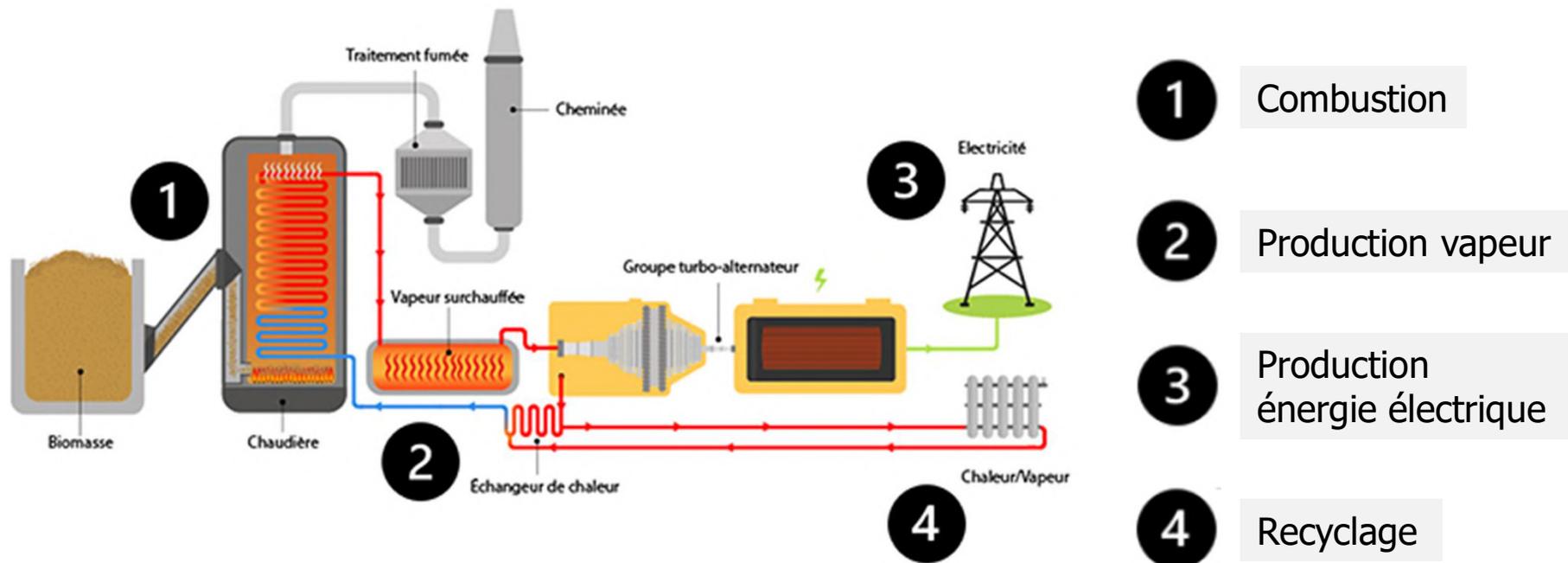
- L'énergie hydraulique est issue de l'énergie cinétique produite par l'écoulement de l'eau dans les barrages, les courants marins, les fleuves, les marées, etc. L'énergie cinétique produite est ensuite transformée en énergie électrique via des génératrices.
- Exemple: Barrage d'Aswan en Egypte



3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

5. Biomasse

- L'énergie de biomasse est issue de l'opération de combustion de matières organiques d'origines biologiques (origine végétale, animale, bactériennes et fongique (Champignons)) tels que les cultures, les déchets organiques, le bois, etc.



<https://www.be-atex.com/actualites/focus/les-centrales-biomasse-fonctionnement-avantages-et-inconvenients>

- **NB:** La génération d'énergie électrique à partir de sources biomasse a un bilan CO2 neutre ou faible étant donné qu'il est comparable au taux émis par les végétaux lors de leur phase de croissance

3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

5. Biomasse

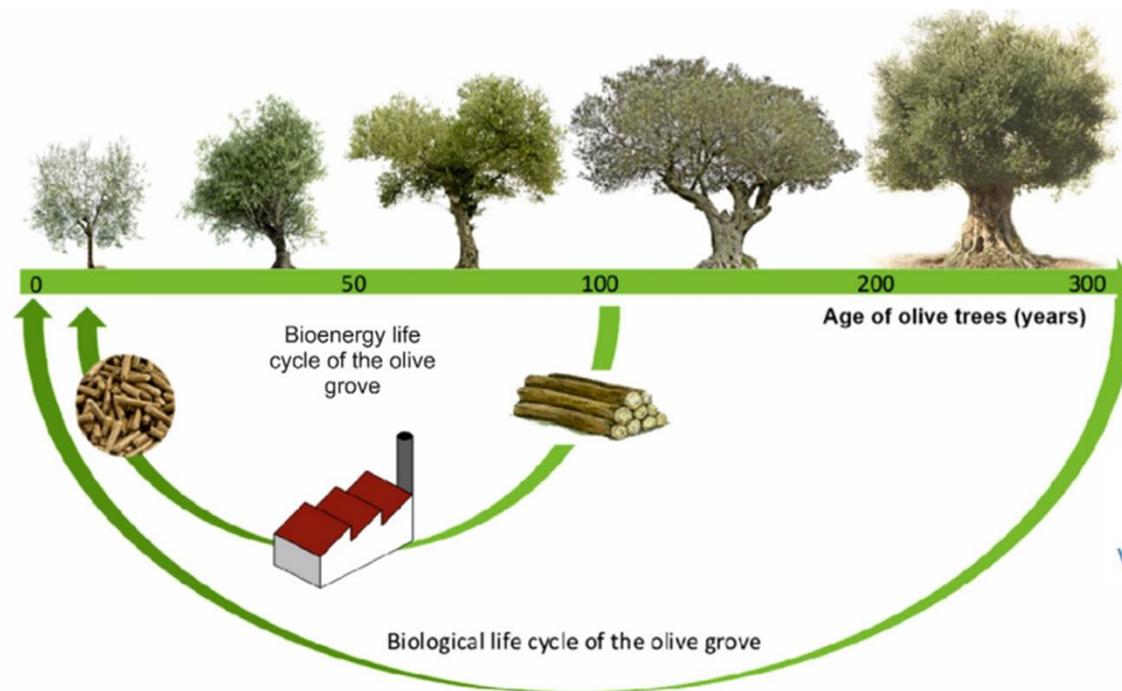
- Exemple : Les oliviers comme source Biomasse

Sustainable biomass pellets using trunk wood from olive groves at the end of their life cycle

Víctor M. Soltero ^{a,*}, Lidia Román ^a, M. Estela Peralta ^a, Ricardo Chacartegui ^b

^a Department of Design Engineering, University of Seville, 41011 Seville, Spain

^b Department of Energy Engineering, University of Seville, 41092 Seville, Spain



Energy Reports

Volume 6, November 2020, Pages 2627-2640

3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

5. Biomasse

- Exemple : Les oliviers comme source Biomasse

Olive-derived biomass as a source of energy and chemicals

Encarnación Ruiz, Juan Miguel Romero-García, Inmaculada Romero, Paloma Manzanares, María José Negro, Eulogio Castro ✉

First published: 11 September 2017 | <https://doi.org/10.1002/bbb.1812> | Citations: 58



World map highlighting countries where olive trees were cultivated in 2016.

3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

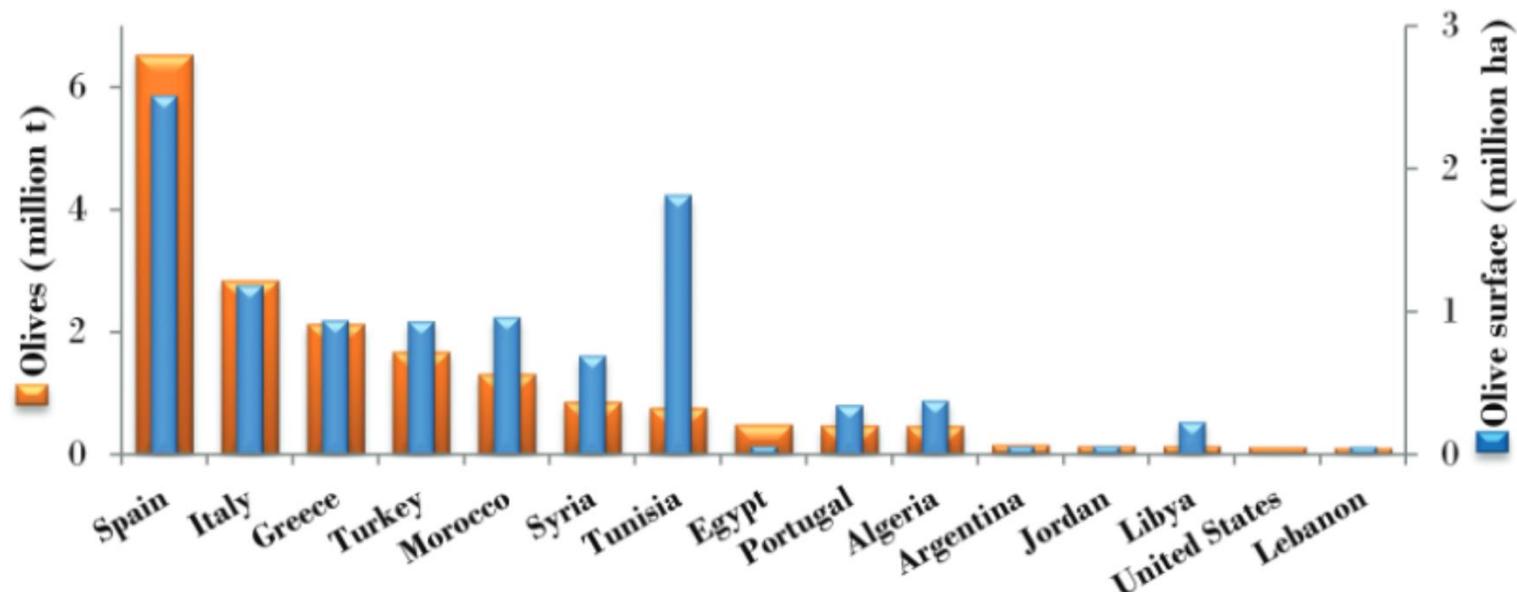
5. Biomasse

- Exemple : Les oliviers comme source Biomasse

Olive-derived biomass as a source of energy and chemicals

Encarnación Ruiz, Juan Miguel Romero-García, Inmaculada Romero, Paloma Manzanares, María José Negro, Eulogio Castro ✉

First published: 11 September 2017 | <https://doi.org/10.1002/bbb.1812> | Citations: 58

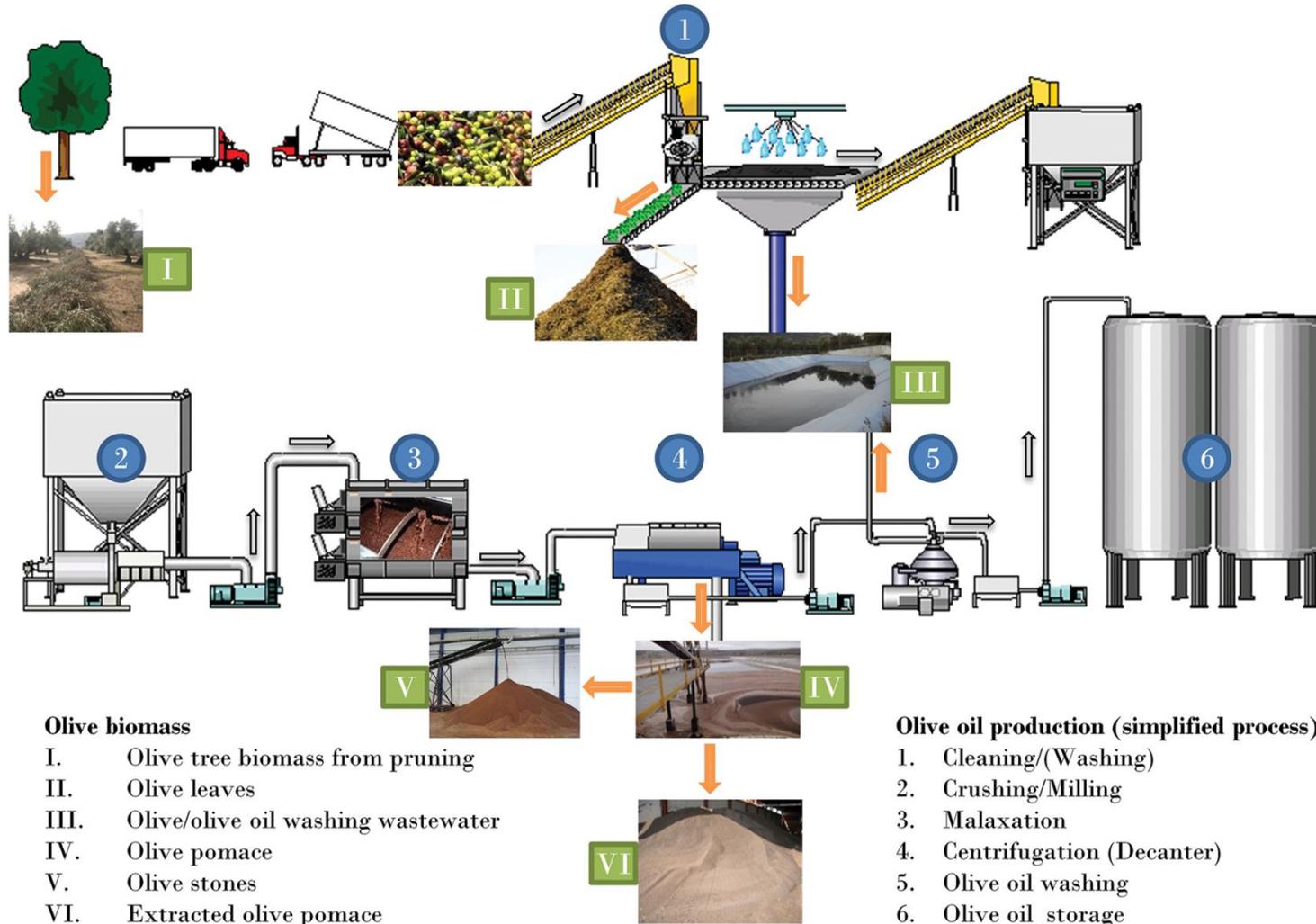


Olive tree cultivation land and production of olives corresponding to the top 15 olive oil producing countries (average values in the period 2010-2014).

3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

5. Biomasse

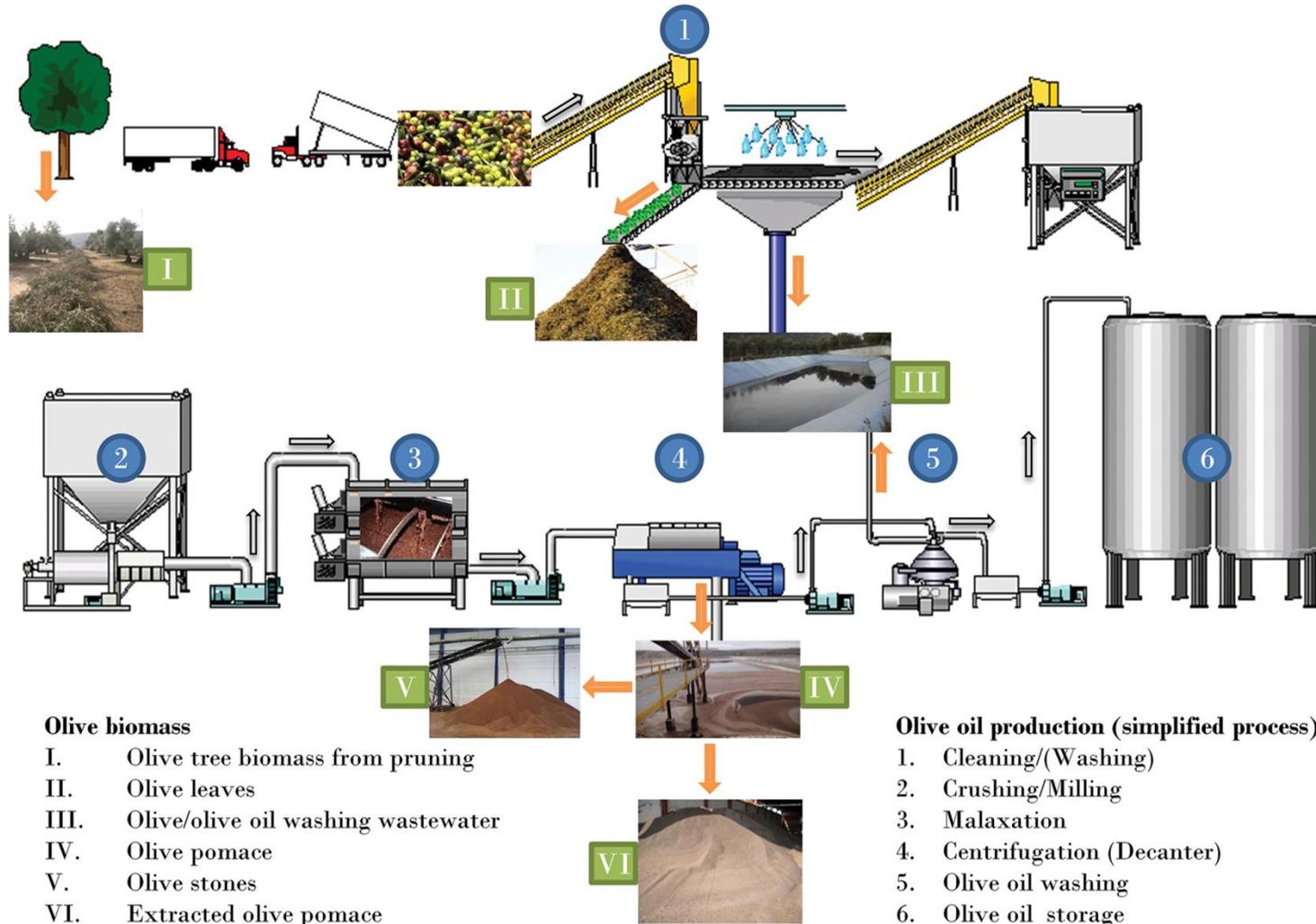
- Exemple : Les oliviers comme source Biomasse



3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

5. Biomasse

- Exemple : Les oliviers comme source Biomasse



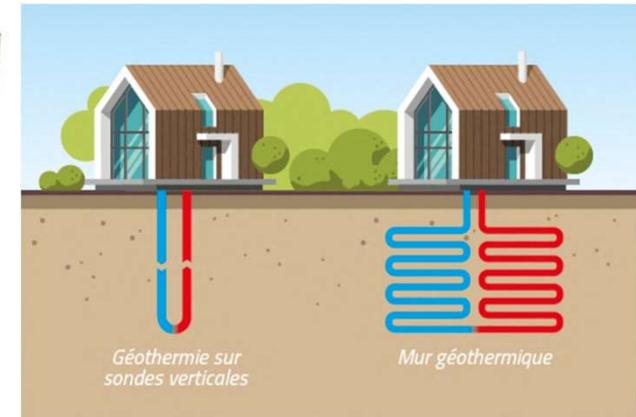
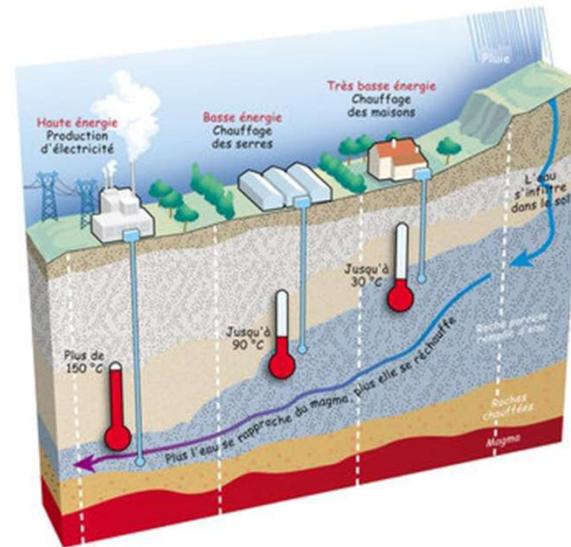
3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

6. Géothermie

- L'énergie de géothermie consiste en l'exploitation de l'énergie de chaleur puisée dans des gisements souterrains

- ➔ Pas d'intermittence
- ➔ Faible émission de CO2
- ➔ Disponibilité des gisements

<https://www.monchauffageelectrique.com/qu-est-ce-que-la-geothermie.html>



- Selon la température des gisements souterrains, il existe essentiellement 3 techniques d'exploitation de l'énergie géothermique
 - ▶ **Haute énergie:** Si l'eau présente dans le gisement souterrain possède une température supérieure à 160°C, elle se transforme en vapeur lorsqu'elle monte à la surface. La vapeur recueillie à la surface est transformée en énergie électrique en utilisant des turbines et des génératrices.
 - ▶ **Basse énergie:** Si l'eau présente dans le gisement souterrain possède une température comprise entre 90°C à 160°C, son énergie thermique est transférée vers un autre liquide qui s'évapore à plus basse température et fait également tourner des turbines et des génératrices pour produire de l'électricité.
 - ▶ **Très basse énergie:** Lorsque la température du gisement souterrain ne dépasse pas 30°C, un liquide est envoyé en sous sol pour qu'il s'échauffe et remonte par la suite en surface avec une température comprise entre 10° et 20°, ce qui lui permet d'assurer le chauffage de bâtiments

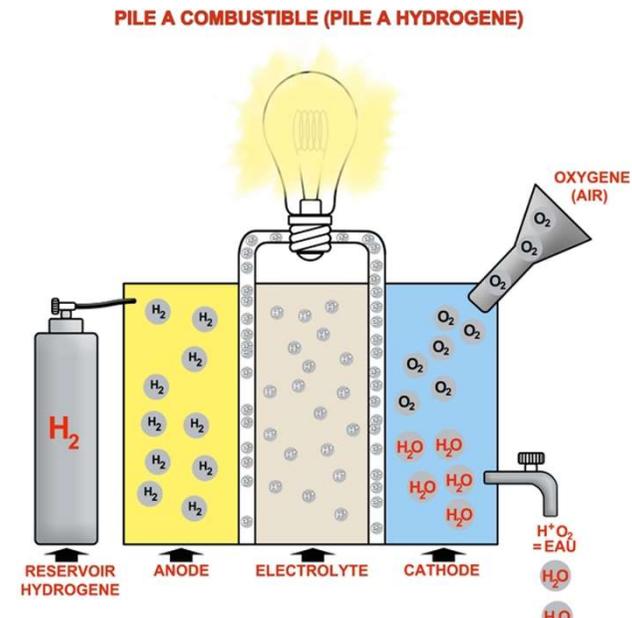
3. SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

7. Hydrogène renouvelable

- L'hydrogène peut être utilisé comme une source primaire pour les piles à combustible (le combustible étant l'hydrogène) pour fournir de l'énergie électrique. L'hydrogène est obtenu à partir de sources abondantes ou renouvelables comme l'eau → Nécessité d'utiliser une énergie primaire pour les transformations chimiques permettant d'obtenir de l'hydrogène → L'hydrogène est qualifié de renouvelable lorsque il est issu de transformations alimentées par de l'énergie renouvelable.

➔ Constituant de base : La pile à combustible

- Principe de fonctionnement de la pile à combustible:
 - ▶ La pile à combustible inclut deux électrodes: Une anode et un cathode
 - ▶ Les deux électrode sont séparées par un électrolyte qui ne laisse pas passer les électrons.
 - ▶ L'hydrogène (issu d'un réservoir) est transformé en ions positifs (H^+) qui vont circuler au travers de l'électrolyte.
 - ▶ Les électrons dissociés vont donc circuler sur un circuit connecté à une charge externe.
 - ▶ Au niveau de la cathode, les électrons, associés à l'oxygène O_2 (issu de l'air) et aux ions H^+ vont former de l'eau (H_2O).



<https://www.caradisiac.com/quel-avenir-pour-l-hydrogene-113577.htm>

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

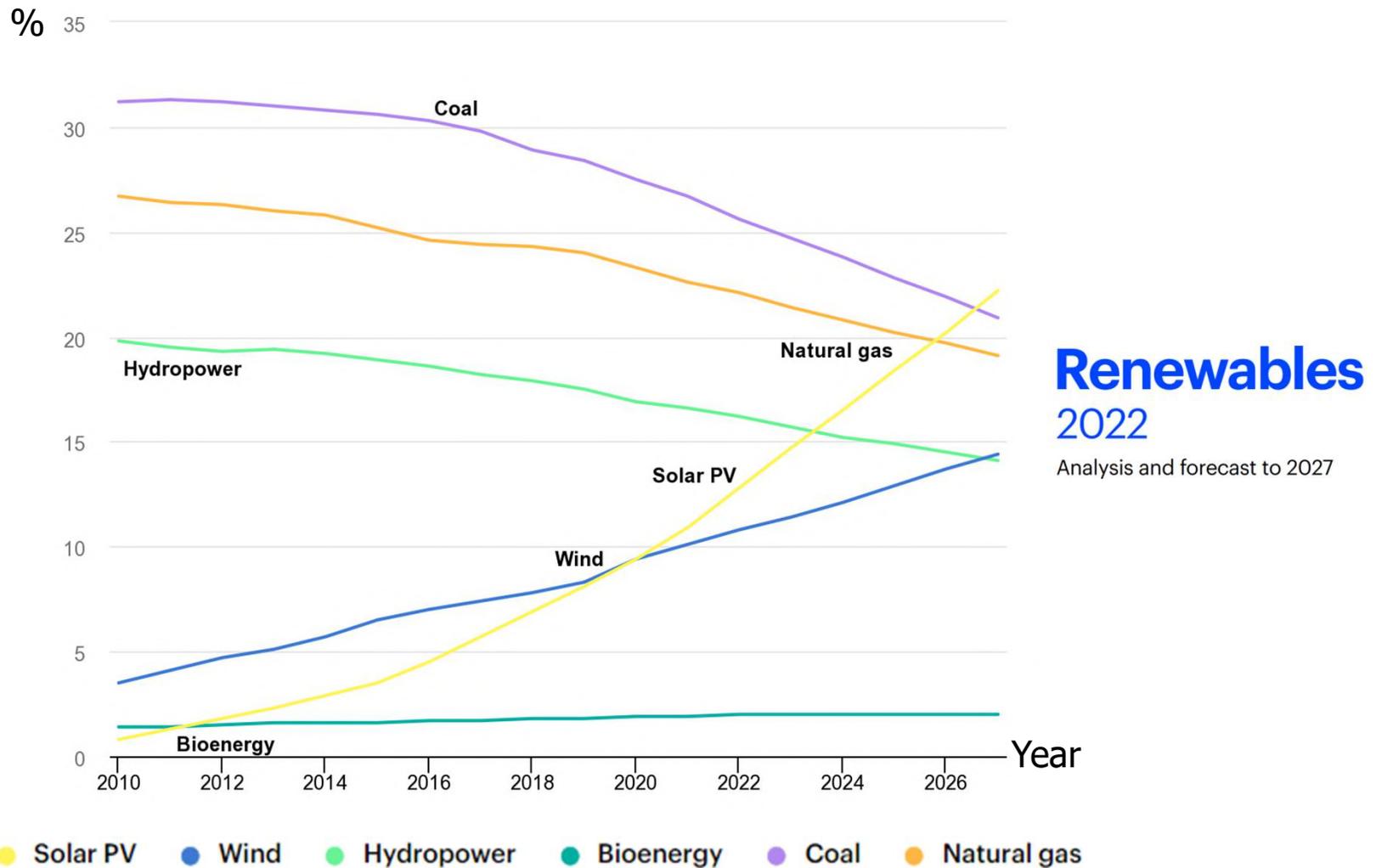
1. Questions sur la transition énergétique en Tunisie

- En ce qui concerne la transition énergétique en Tunisie, plusieurs questions se posent
 - Quel est le mix énergétique actuel?
 - Quelles sont les sources d'Energie Renouvelable les mieux adaptées pour la Tunisie?
 - Est-ce qu'il y a des études stratégiques effectuées?
 - Si oui, quel est le mix énergétique planifié pour la Tunisie pour les années à venir?
 - Comment planifier la transition énergétique de la Tunisie en exploitant au mieux ses ressources?

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

2. Situation énergétique mondiale

- Part de la capacité de puissance cumulée par technologie de 2010 à 2027 (en %)

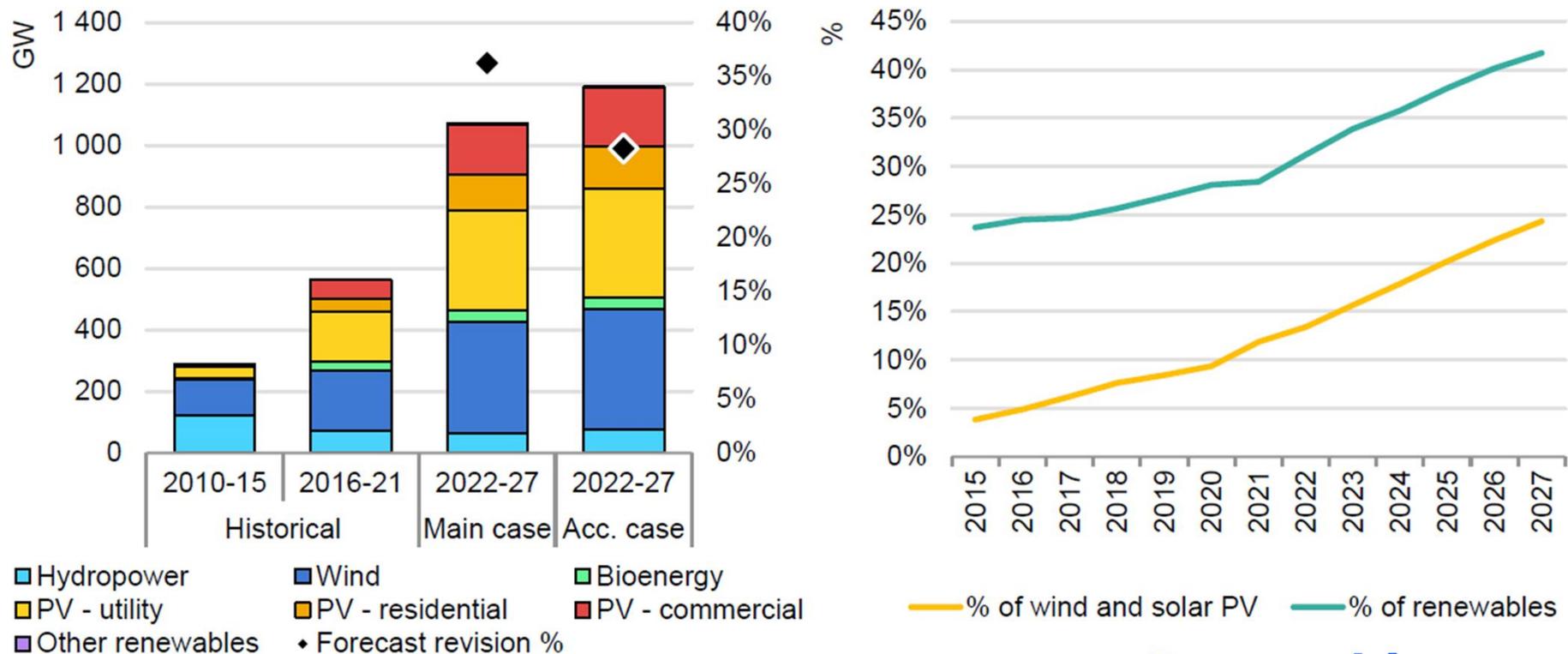


<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-cumulative-power-capacity-by-technology-2010-2027>

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

2. Situation énergétique mondiale

- Ajouts annuels de capacités d'énergies renouvelables par technologie en Chine, 2010-2027 (à gauche) et parts des énergies renouvelables dans la production d'électricité, 2015-2027 (à droite)



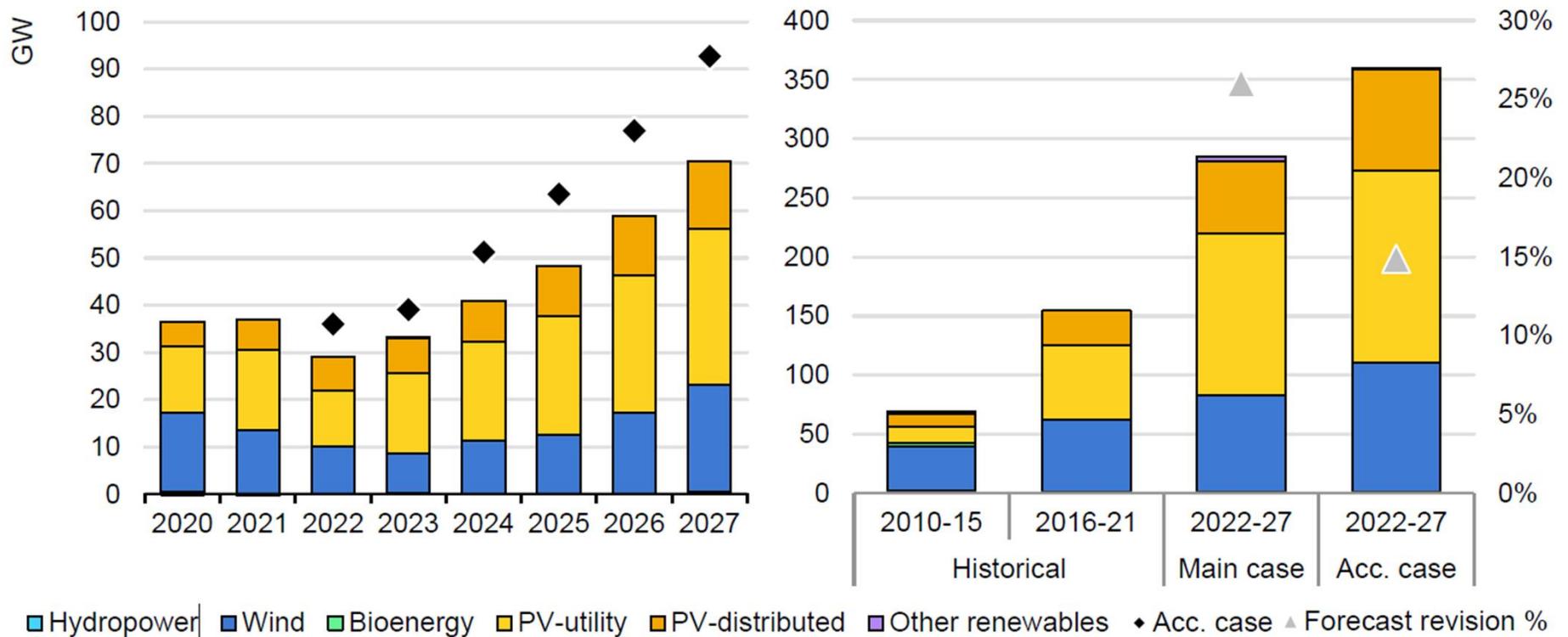
Renewables
2022

Analysis and forecast to 2027

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

2. Situation énergétique mondiale

- Ajouts annuels de capacités d'énergies renouvelables par technologie aux États-Unis, 2020-2027 (à gauche) et croissance totale de la capacité d'énergies renouvelables, 2010-2027 (à droite)



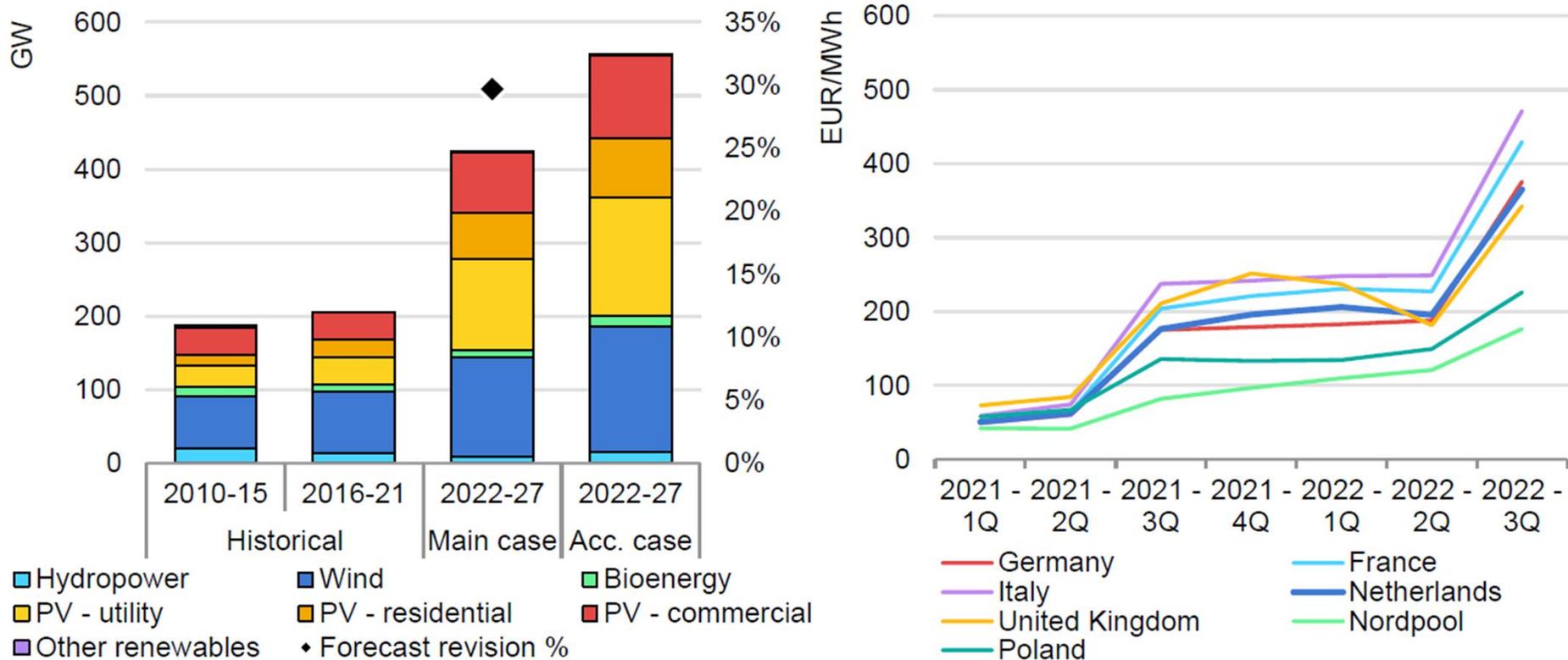
Renewables
2022

Analysis and forecast to 2027

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

2. Situation énergétique mondiale

- Ajouts annuels de capacités d'énergies renouvelables par technologie en Europe, 2010-2027 (à gauche) et prix de l'électricité en gros pour certains marchés sélectionnés (à droite)



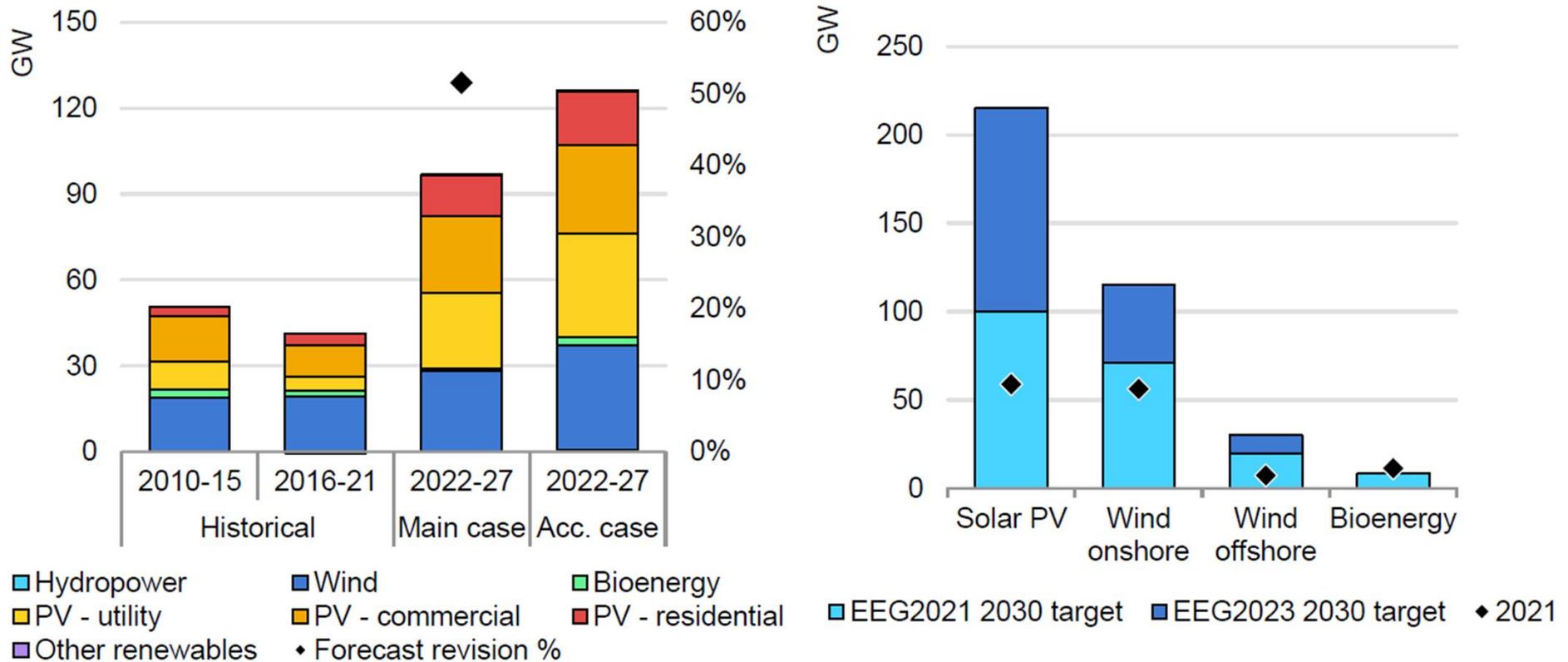
Renewables
2022

Analysis and forecast to 2027

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

2. Situation énergétique mondiale

- Ajouts annuels de capacités d'énergies renouvelables par technologie en Allemagne, 2010-2027 (à gauche) et objectifs pour la capacité installée cumulée en 2030 selon les lois EEG2021 et EEG2023 par rapport à la capacité installée actuelle (2021)



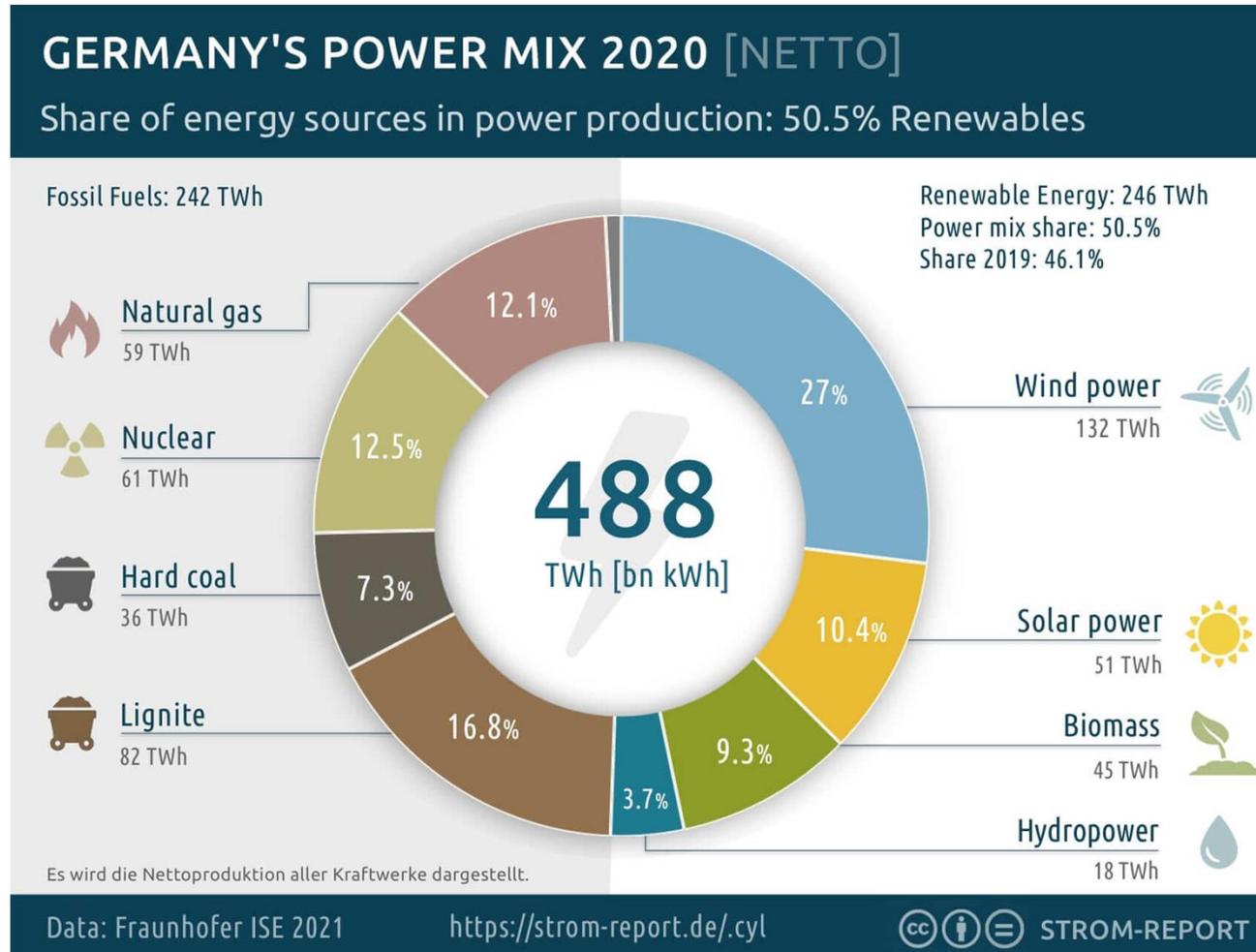
Renewables
2022

Analysis and forecast to 2027

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

2. Situation énergétique mondiale

- Mix Energétique Allemagne (83.2 millions habitants en 2021 – Superficie 357,592 km²)



4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

3. Situation énergétique de la Tunisie

- En 2015, l'**ITÉS** (Institut Tunisien des Etudes Stratégiques) a publié le rapport "**Energie 2025**" dans lequel il est mentionné que la Tunisie présente dans son bilan énergétique un déficit de **4.2 Mtep (Millions de tonnes équivalent pétrole)**.
- Selon le rapport "**La sécurité énergétique de la Tunisie à l'horizon 2023**" publié par l'**ITÉS**, si la production nationale d'énergie primaire continue son déclin en parallèle avec l'augmentation de consommation (**de 2% par an**), le déficit énergétique atteindrait **8,2 Mtep** et la dépendance énergétique sera dans ce cas de **63%** aux environs de **2030**.
- Le **taux de dépendance énergétique** d'un pays indique la part d'énergie qu'il doit importer. Ce taux est obtenu en divisant les importations nettes d'énergie d'un pays par sa consommation brute d'énergie.
- Evolution de quelques indicateurs sur la situation énergétique en Tunisie (y compris le taux de dépendance énergétique)

		1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Intensité énergétique ⁵ (ktep/M\$-2015)		0,30	0,29	0,28	0,26	0,26	0,25	0,25
Production de pétrole brut	ktep	4 754	4 443	3 808	3 551	3 991	2 628	1 884
Taux de dépendance énergétique	%	-18%	2%	11%	21%	20%	45%	58%
Consommation produits pétroliers	ktep	3 153	3 372	4 064	4 354	4 158	4 840	4 882
Importation produits pétroliers	ktep	1 546	1 508	2 280	3 192	3 819	4 096	4 499
Part des importations de produits pétroliers		49%	45%	56%	73%	92%	85%	93%

Source : International Energy Agency, 2021

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

3. Situation énergétique de la Tunisie

- Mix Énergétique Tunisie (12.26 millions habitants en 2021 – Superficie 163,610 km²)

Production de l'énergie électrique par type d'énergie primaire (1950-2020)

	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production d'électricité par énergie primaire (GWh)															
Gaz Naturel				1 038	3 587	6 192	8 837	11 875	14 603	16 773	17 623	18 507	18 618	19 513	19 047
Fuel lourd	(*) 121	206	637	1 144	1 290	382	292	3	2	873	0,4	0	0	0	0
Gas oil				221	6	12	6	2	1	1	0,5	1	1	0,4	20
Diesel	20	21	2	3	0,2	0,1									
Hydraulique		47	41	23	44	36	64	145	50	70	45	17	17	66	46
Eolien							23	42	138	448	414	449	453	500	465
Solaire PV															0,2
Auto production		42	115	381	637	680	874	939	1 024	1 009	1 220	1 187	1 496	1 534	1 500
Tunisie	141	316	796	2 810	5 535	7 306	10 096	13 007	15 819	19 174	19 362	20 161	20 554	21 613	21 078

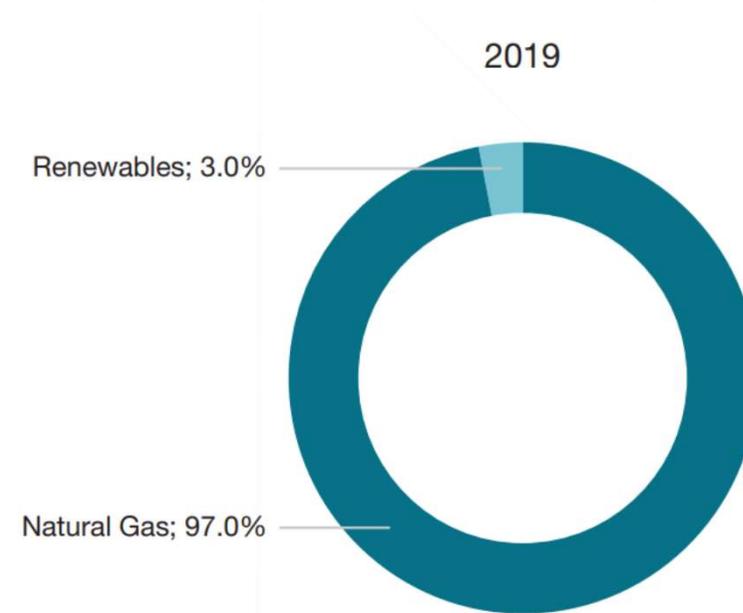
(*) En 1950 l'énergie primaire de Goulette est un mix de charbon (8%), lignite (19%) et fuel Oil (73%)

Source : ATPG, les annales de l'énergie 2020, juin 2021

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

3. Situation énergétique de la Tunisie

- Mix Énergétique Tunisie (12.26 millions habitants en 2021 – Superficie 163,610 km²)
- Le mix énergétique tunisien est essentiellement basé sur le **Gaz Naturel**.
- **En 2020**, le **déficit énergétique** a atteint **5.142 Mtep**.
- La **part de l'énergie renouvelable** dans le mix énergétique évolue très lentement et est uniquement égale à **2.8% du mix en 2020** selon le rapport "**La transition énergétique et écologique en Tunisie à l'horizon 2050**" de l'ITES.



Source : GiZ -2019

➔ Transition énergétique en Tunisie **très lente**

➔ Le déficit énergétique mettant en cause la sécurité énergétique constitue une variable importante incitant la Tunisie à **accélérer sa transition énergétique** dans les années à venir

Source: Rapport "La transition énergétique et écologique en Tunisie à l'horizon 2050" de l'ITES

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

3. Situation énergétique de la Tunisie

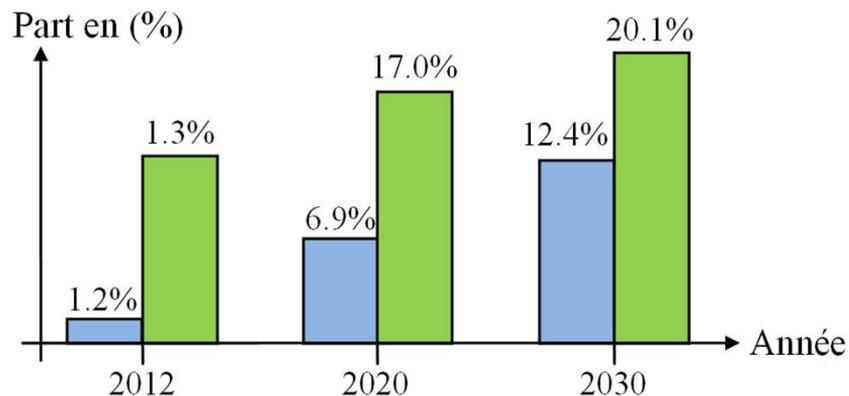
- A court et moyen terme, le **gaz naturel gardera une place dominante** et quasi-exclusive dans la production nationale de l'énergie électrique.
- Ceci étant, les énergies renouvelables, en particulier **le photovoltaïque et l'éolien**, devraient contribuer d'une manière plus significative à la production nationale d'énergie électrique.
- Selon l'**ANME (Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie)** qui est une institution tunisienne chargée de la mise en œuvre de la politique de promotion des énergies renouvelables et d'utilisation rationnelle de l'énergie, **les sources d'énergie renouvelables basées sur le photovoltaïque et l'éolien sont susceptibles de prendre une plus grande place d'ici 2030.**
- Dans son rapport publié en juin 2014 et intitulé (**Stratégie nationale de maîtrise de l'énergie**), l'ANME fixe, pour l'horizon de 2030, **un objectif de 30% relatif à la contribution des énergies renouvelables (avec et sans biomasse)** dans la production nationale d'énergie électrique.
- Hors biomasse, la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie électrique devrait atteindre **12.4% en 2030** contre **1.2% en 2012.**
- Source : STEG (<https://www.steg.com.tn/fr/institutionnel/produire.html>)

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

3. Situation énergétique de la Tunisie

- La figure ci-dessous (à gauche), extraite du même rapport (**Stratégie nationale de maîtrise de l'énergie**), résume la contribution prévue des énergies renouvelables à la production énergétique finale pour l'horizon de **2030**.
- Afin d'atteindre cet objectif et selon l'**ANME**, il est prévu d'augmenter la productivité des différentes filières d'énergie renouvelable comme le montre la figure ci-dessous (à droite) pour l'horizon 2030. A remarquer que parmi les filières citées, le pompage PV devrait contribuer avec une par estimée à des installations de puissance 8 MW.

Source : ANME (<https://www.anme.tn/>)



- Part des énergies renouvelables dans la consommation finale (sans biomasse)
- Part des énergies renouvelables dans la consommation finale (avec biomasse)

Filières	Objectifs en 2030
Eolien	1755 MW
Solaire PV raccordé au réseau	1510 MW
Dont toits solaires	590 MW
Solaire CSP	460 MW
Pompage PV	8 MW
Bio-méthanisation	300 MW
Solaire thermique pour le chauffage d'eau	2.85 MW

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

4. Plan d'actions proposé pour la transition énergétique Tunisienne



M. Khaled Kaddour, *coordinateur*,
Mme Amel Jrad
Mme Noura Laroussi
M. Adel Ben Youssef
Mme Asma Dhakouani

• Source : ITES (<https://www.ites.tn/home>)

- Selon l'ITES (**Institut Tunisien des Etudes Stratégiques**), dans son rapport "**La transition énergétique et écologique en Tunisie à l'horizon 2050**", la stratégie nationale relative à la transition énergétique peut être subdivisée en **6 piliers**, chacun étant réparti en plusieurs actions.

Pilier 1 : Augmenter la part des énergies renouvelables dans les mix énergétique et électrique et chez les consommateurs finaux

Action 1 : Accélérer le déploiement des projets engagés et programmés dans le Plan Solaire Tunisien

Action 2 : Mettre en place un programme diversifié en termes de schémas de montage industriel et technologique

Action 3 : Explorer le potentiel d'autres sources d'énergies alternatives (bio fuel, captations de méthane, énergies marines, etc.)

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

4. Plan d'actions proposé pour la transition énergétique Tunisienne

Pilier 2 : Consolider les efforts en matière d'efficacité énergétique auprès des ménages et des entreprises

Action 4 : Généraliser les programmes de réhabilitation et d'isolation thermique des bâtiments

Action 5 : Redynamiser et renforcer les campagnes de sensibilisation aux programmes d'efficacité énergétique à destination des citoyens

Action 6 : Conduire les programmes d'efficacité énergétique dans le secteur productif par des programmes thématiques

Action 7 : Réformer l'ANME

Pilier 3 : Prospector les nouveaux gisements d'énergie conventionnelle

Action 8 : Réviser le code des hydrocarbures pour plus d'attractivité des multinationales pour les prospections gazières

Action 9 : Relancer les programmes de prospection avec les partenaires internationaux

Action 10 : Mettre en place une filière d'hydrogène vert

Pilier 4 : Développer l'infrastructure de production, de transport et de stockage de l'énergie

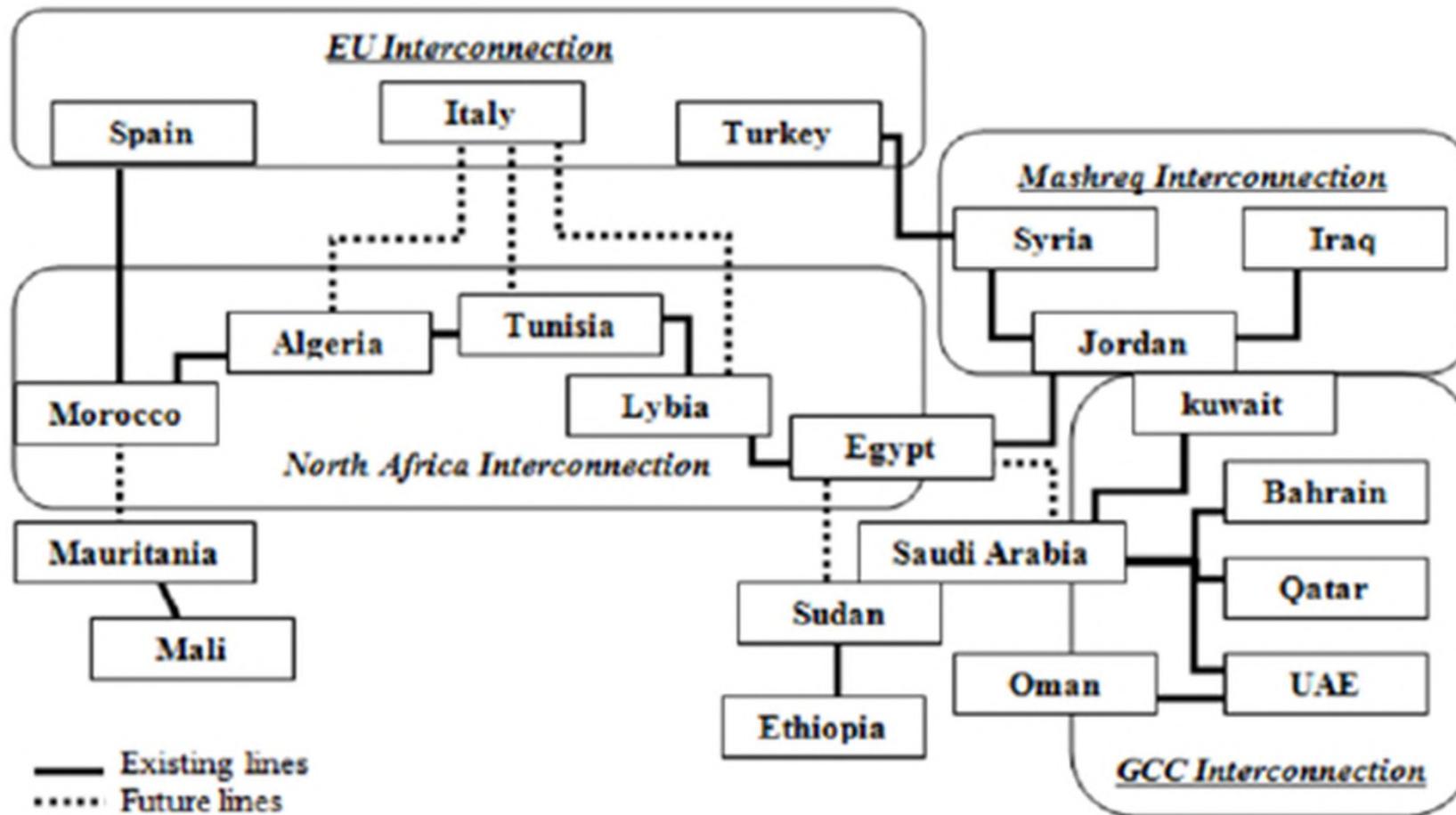
Action 11 : Moderniser et renforcer le réseau de transport de l'électricité

Action 12 : Investir et déployer les infrastructures de stockage (STEP, batteries de stockage à grande échelle et bornes de recharge)

Action 13 : Renforcer les interconnexions électriques avec les pays du Maghreb et accélérer la création du marché maghrébin

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

4. Plan d'actions proposé pour la transition énergétique Tunisienne



Source Ftiti et al, 2021 (Sustainability Déc 2021)

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

4. Plan d'actions proposé pour la transition énergétique Tunisienne

Pilier 5 : Mettre l'innovation au cœur du système énergétique pour favoriser sa transformation

Action 15 : Généraliser le déploiement des solutions numériques pour la production et la distribution de l'énergie (Smart systems - Réseau, compteurs et moyens de production)

Action 16 : Généraliser le déploiement du Smart Grid et le déploiement de l'Internet de l'Énergie (IoE)

Action 17 : Instaurer un système de transparence structuré et conforme aux exigences de l'Accord de Paris

Pilier 6 : Pratiquer une veille technologique continue

Action 18 : Nouer des partenariats stratégiques avec des pays à fort développement technologique en matière énergétique (France, Corée du Sud, Allemagne, Etats-Unis, Chine, etc.)

Action 19 : Créer des filières technologiques dans l'enseignement supérieur en phase avec les évolutions récentes et accroître le volume des recherches opérationnelles sur la transition énergétique

Action 20 : Renforcer l'écosystème entrepreneurial, les start-ups, pourvoyeurs de technologies innovantes et de solutions appropriées

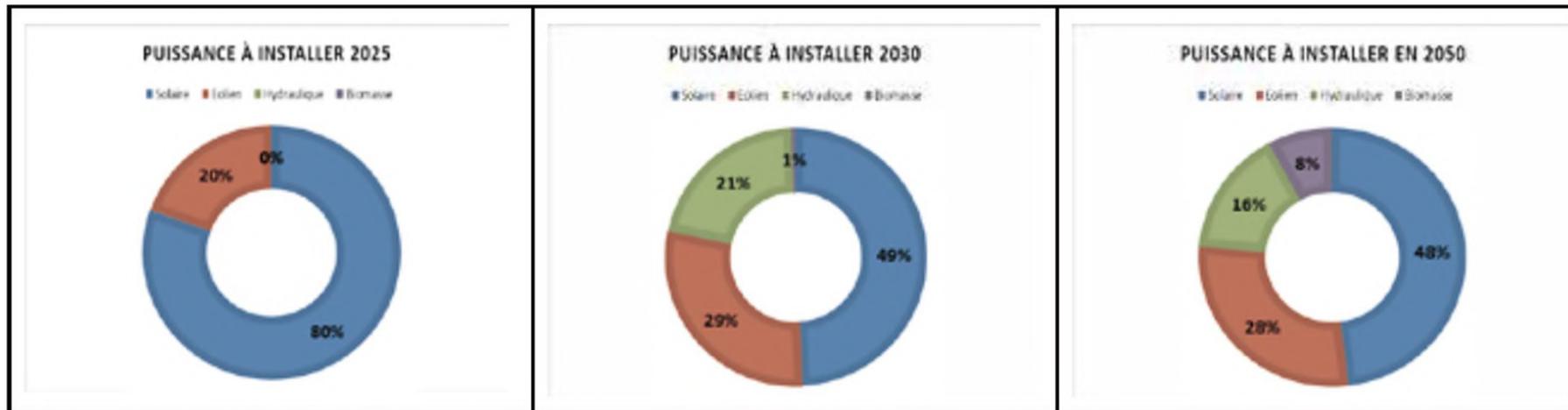
4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

5. Quels sont les ER les plus appropriées au contexte tunisien ?

- Solaire PV
 - Intégrer stockage électrique
 - Pompage solaire
- Eolien
- Biomasse
- Hydraulique



M. Khaled Kaddour, *coordinateur*,
Mme Amel Jrad
Mme Noura Laroussi
M. Adel Ben Youssef
Mme Asma Dhakouani

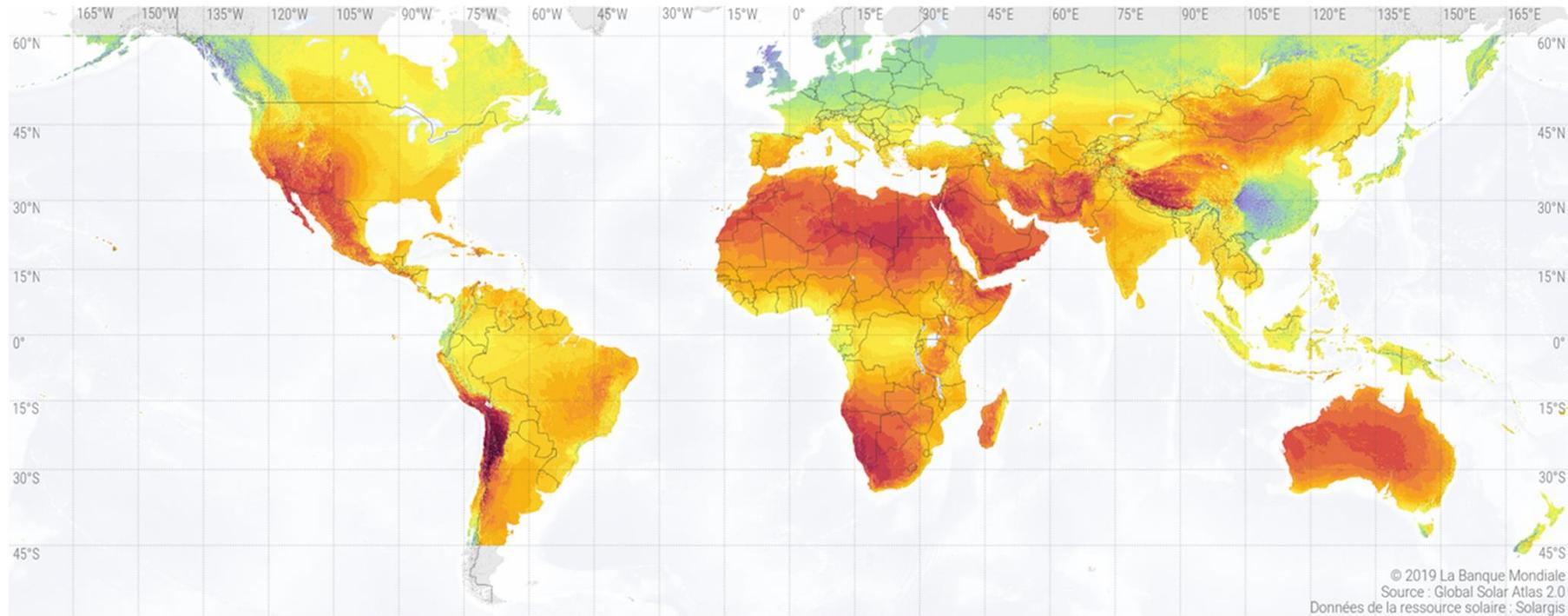


4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

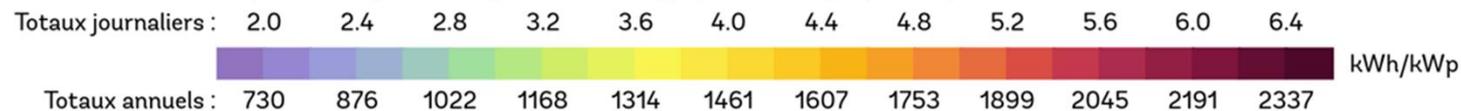
5. Quels sont les ER les plus appropriées au contexte tunisien ?

CARTE DE LA RESSOURCE SOLAIRE

POTENTIEL D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE



Moyenne à long terme du potentiel d'énergie photovoltaïque (PVOUT)

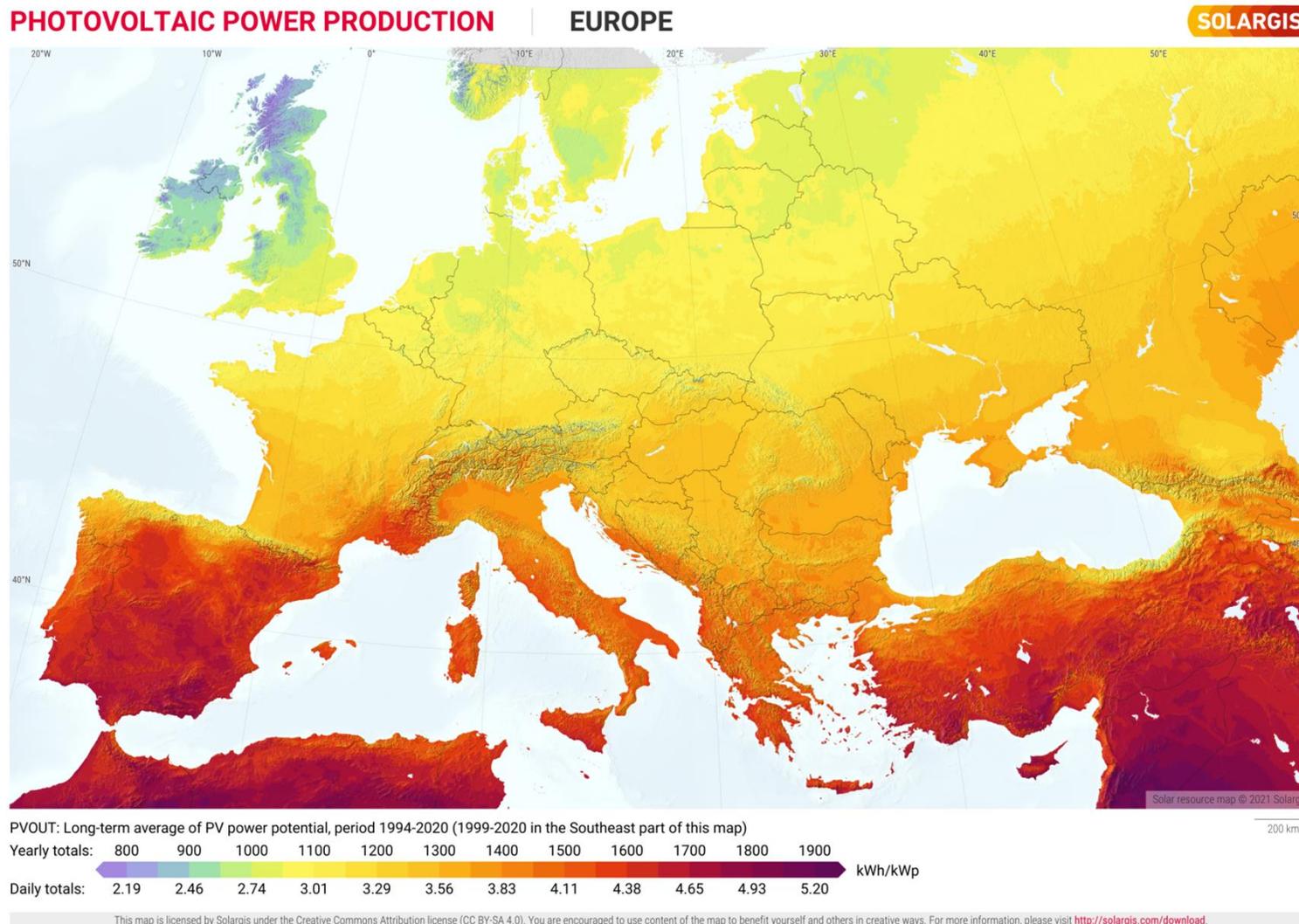


Cette carte est publiée par le Groupe Banque Mondiale, financée par l'ESMAP, et préparée par Solargis. Pour plus d'informations et pour les conditions d'utilisation, veuillez consulter le site: <http://globalsolaratlas.info>.

<https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

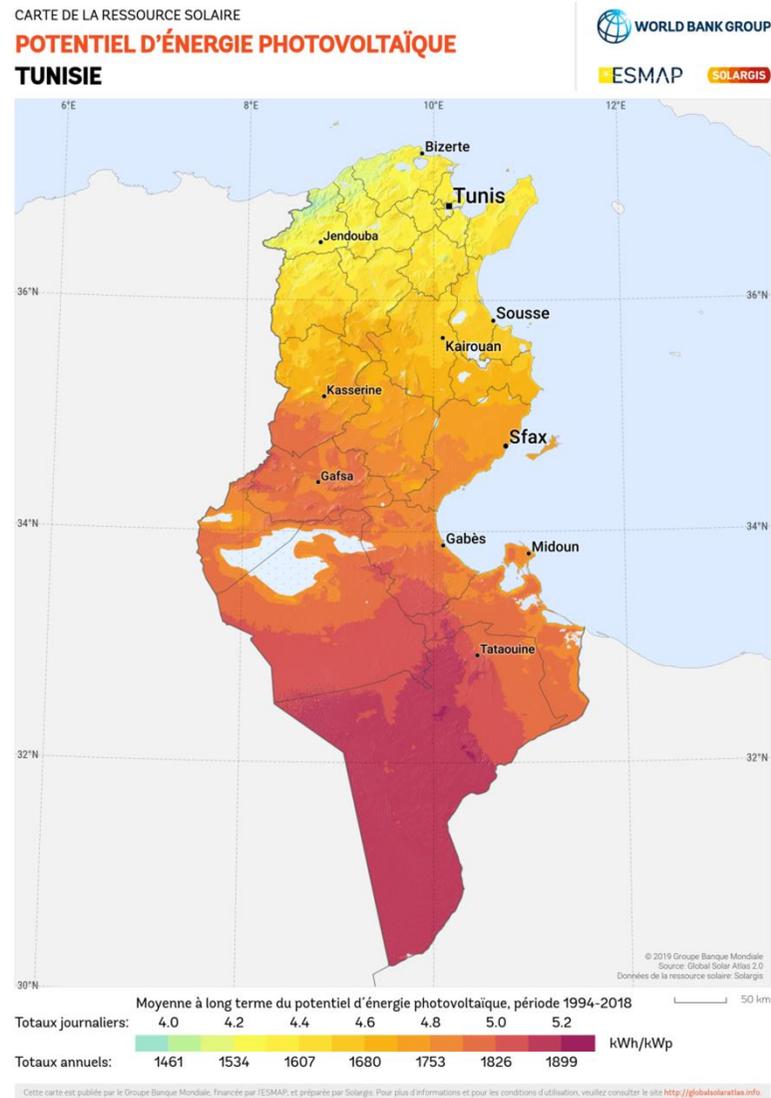
5. Quels sont les ER les plus appropriées au contexte tunisien ?



<https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

5. Quels sont les ER les plus appropriées au contexte tunisien ?

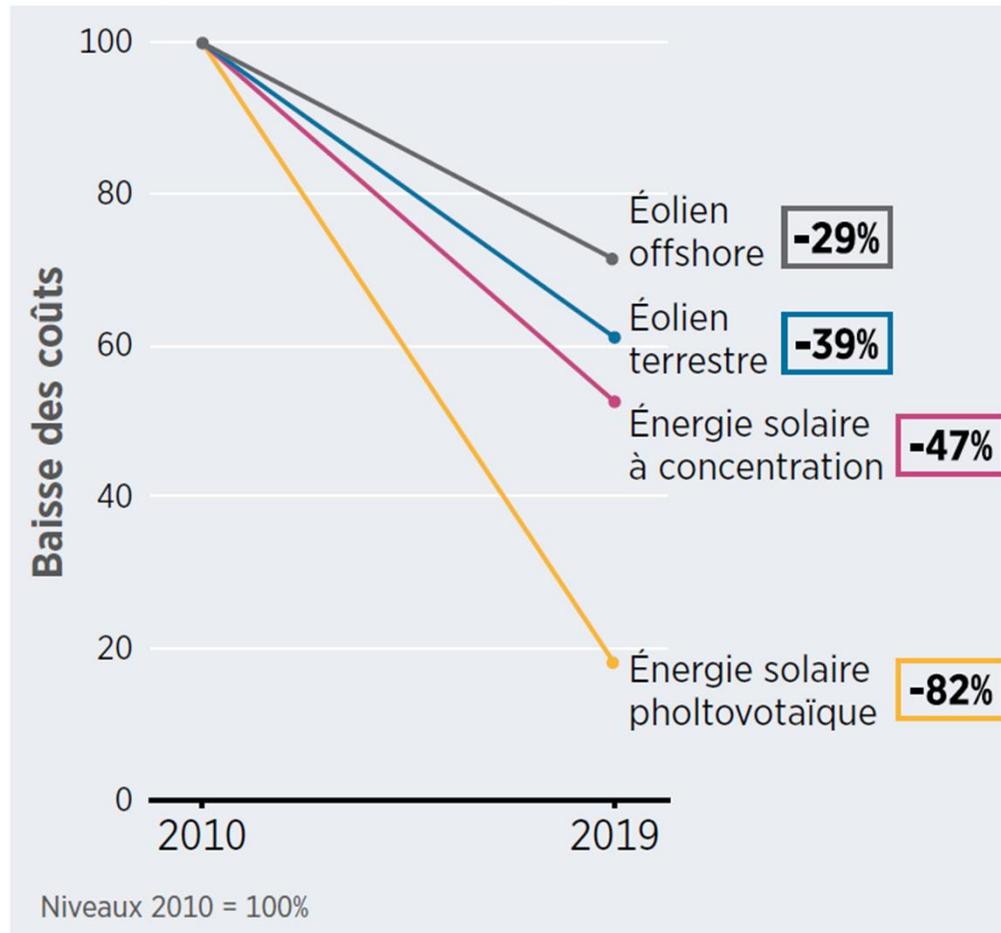


<https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

5. Quels sont les ER les plus appropriées au contexte tunisien ?

Baisse des coûts selon les technologies de production de l'énergie renouvelable

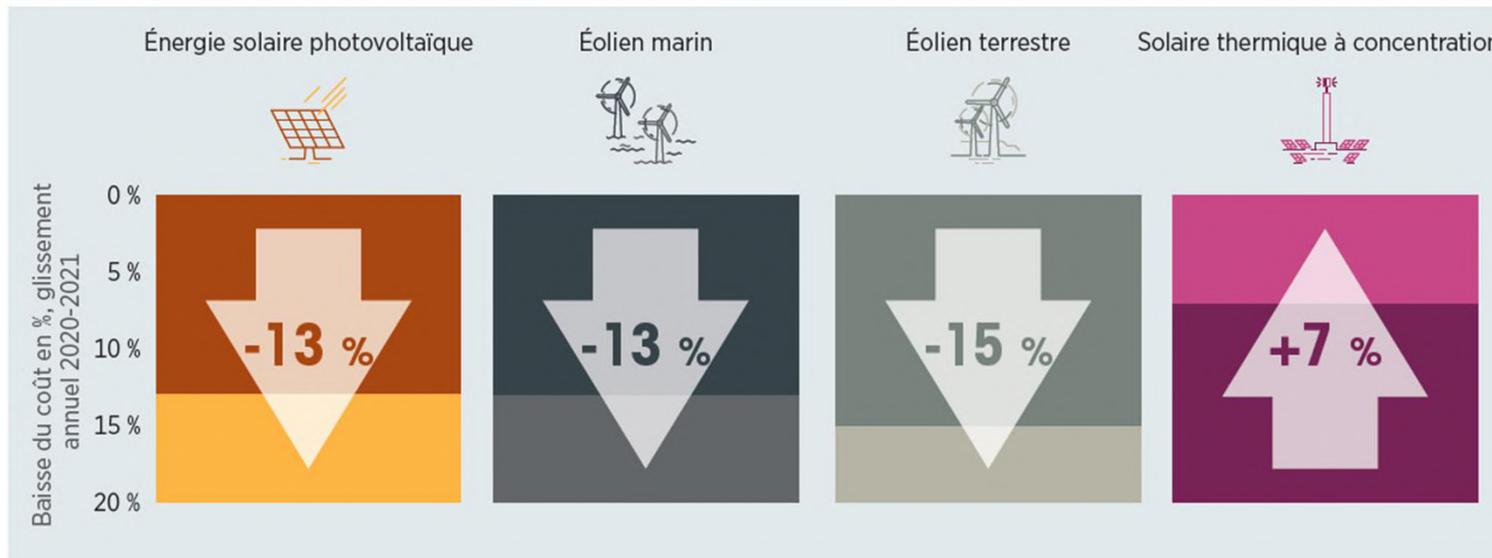


COÛT DE PRODUCTION DES
ÉNERGIES RENOUVELABLES
EN 2019

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

5. Quels sont les ER les plus appropriées au contexte tunisien ?

Baisse des coûts selon les technologies de production de l'énergie renouvelable (2020-2021)

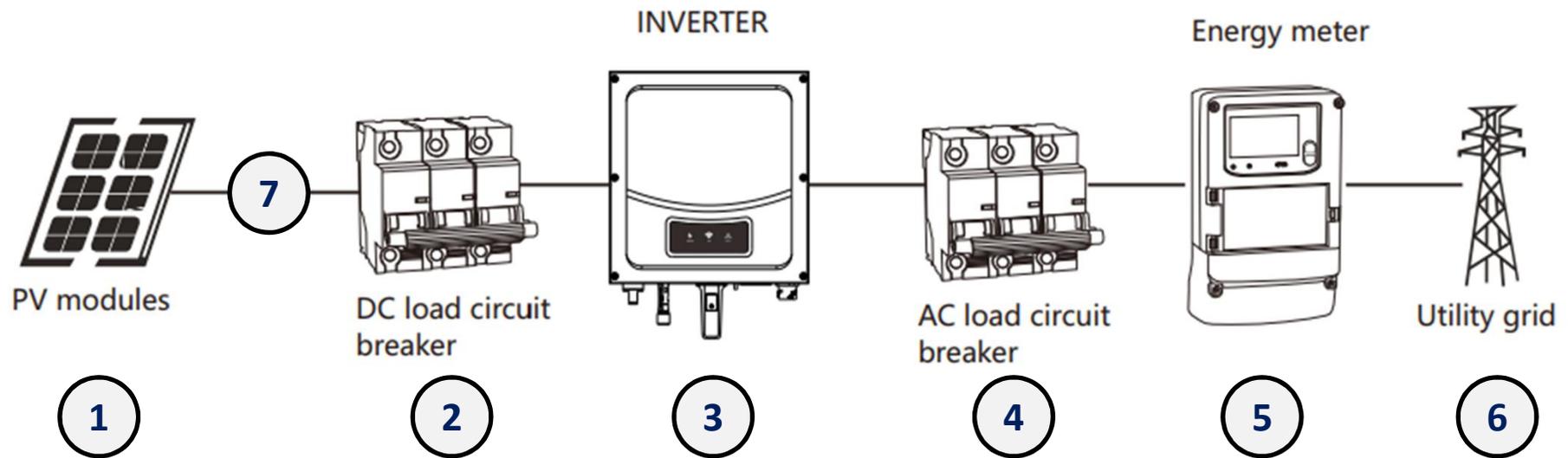


**COÛTS DE LA PRODUCTION
D'ÉNERGIE DE SOURCE
RENOUVELABLE
EN 2021**



4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque



1 Panneaux PV

3 Onduleur

5 Compteur intelligent

2 Protection côté DC

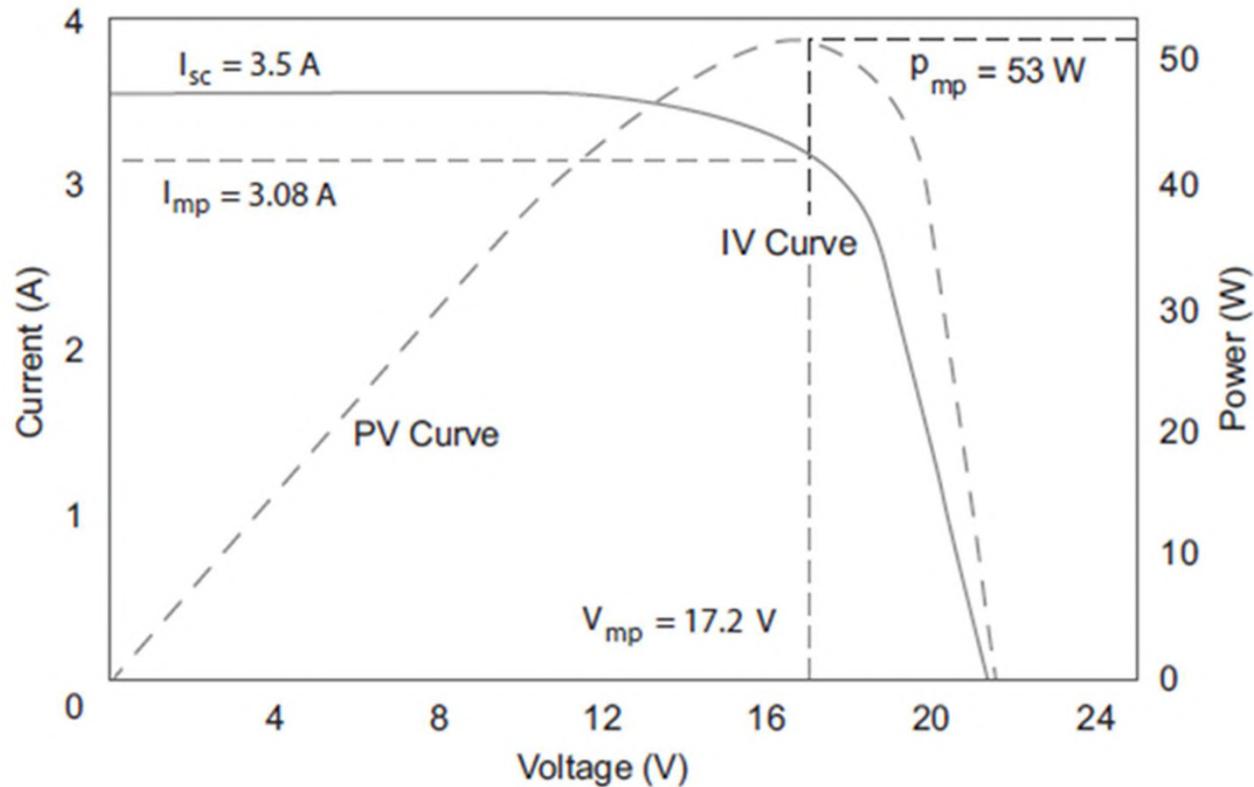
4 Protection côté AC

6 Réseau électrique

7 Câbles et connectiques

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

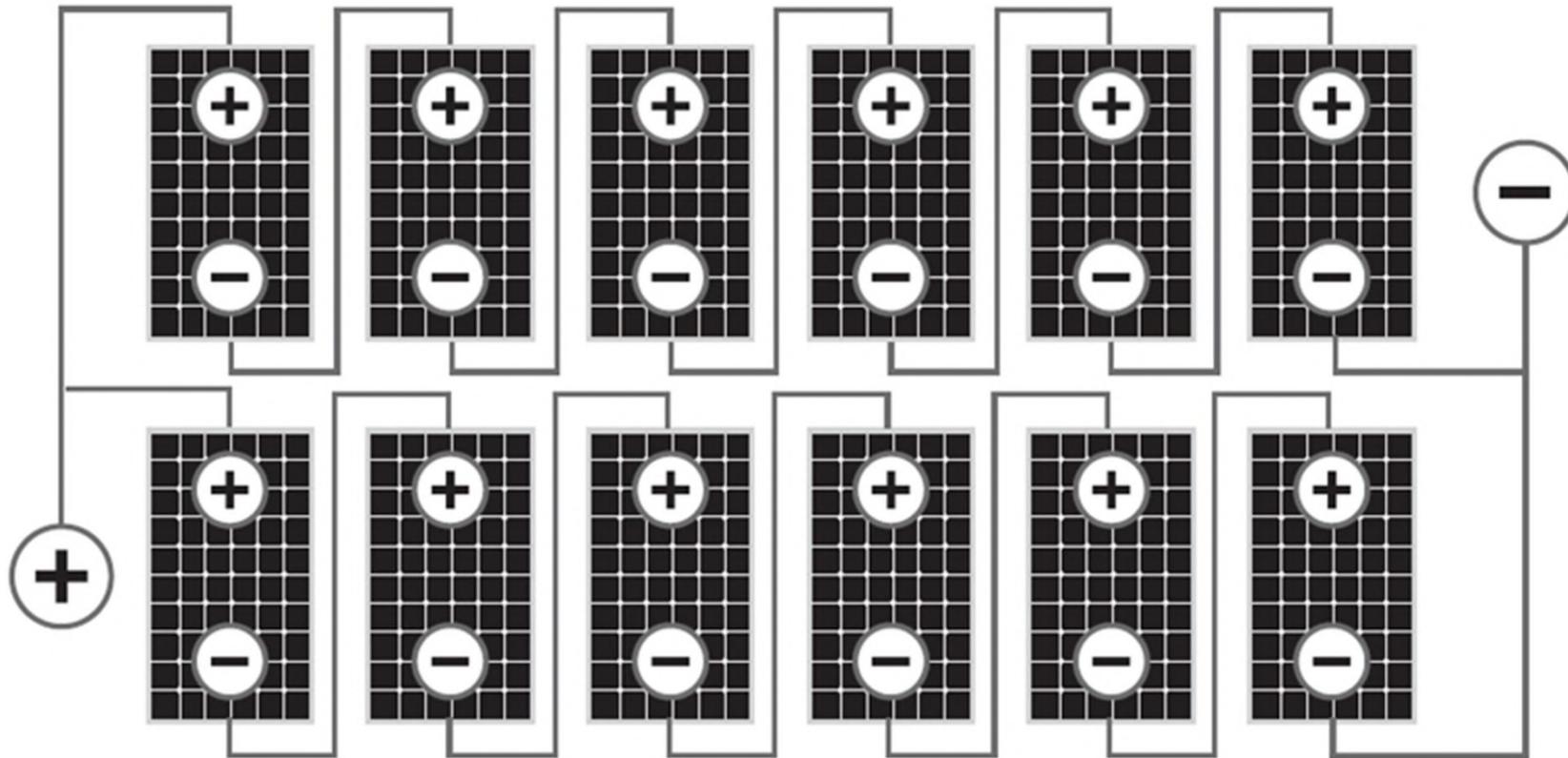
6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque



Exemple : Caractéristique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque



Combinaisons de connexions séries parallèle
de modules PV

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque



Exemple PV résidentiel

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque

Exemple: Onduleur monophasé 1.5 kW avec prix (Module basique)



SMA Sunny Boy 1.5

SKU: SMA SB 1.5-1VL-40

€683.00

Availability: In stock

* Required Fields

Delivery *

- European delivery + €70.00
- International delivery + €120.00

VAT/Tax for Customers: *

-- Please Select --

Add to Cart

Qty:

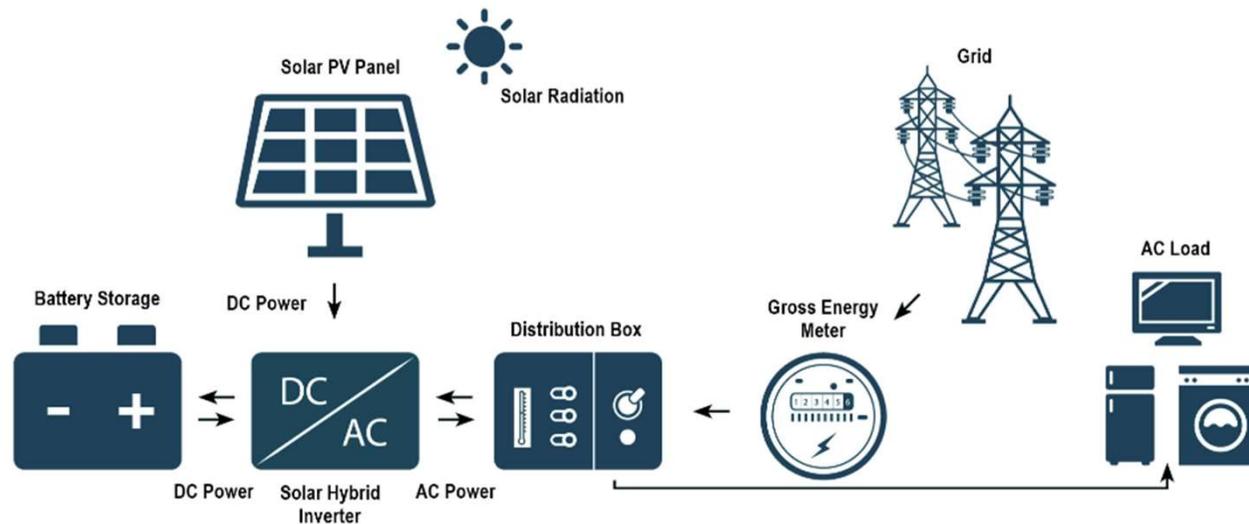
1



4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque

- Intégration des batteries



- Quel est l'utilité des batteries?

➔ L'excédent d'énergie électrique produite est conservé et est stocké dans des batteries (Meilleur dispositif de stockage d'énergie électrique jusqu'à présent)

**Emerging Opportunities
in Distributed Power
Electronics and
Battery Integration**

Setting the stage for an energy storage revolution

by Issa Batarseh and Khalil Alluhaybi

The push to develop new, cost-effective, and safe electric energy storage devices is intensifying. In the process, a new electric energy storage revolution is coming. It will disrupt the current methods for generating, distributing, and consuming energy in the same way refrigeration changed the world's production, distribution, and consumption of food.

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque

- Intégration des batteries

➔ Vers un déploiement massif des batteries durant la prochaine décennie

The Promise of Storage

Today, the promise of storage may be received with skepticism by many in the technical and business communities. Many correctly argue that since the invention of the battery in 1800 by Alessandro Volta, the quest for improved battery technology has not stopped. Gradual improvements have been made since then, but serious R&D activities for batteries started only when PV penetration became problematic for the power grid and commercialized electric and hybrid vehicles turned profitable. As a result, electrical storage efficiencies are significantly improving, while prices are falling, a trend that is expected to continue. The Electric Power Research Institute issued a forecast that Li-ion battery packs will drop to one-quarter of their current price by 2022 [9].

Setting the stage for an energy storage revolution

by Issa Batarseh and Khalil Alluhaybi

**Emerging Opportunities
in Distributed Power
Electronics and
Battery Integration**

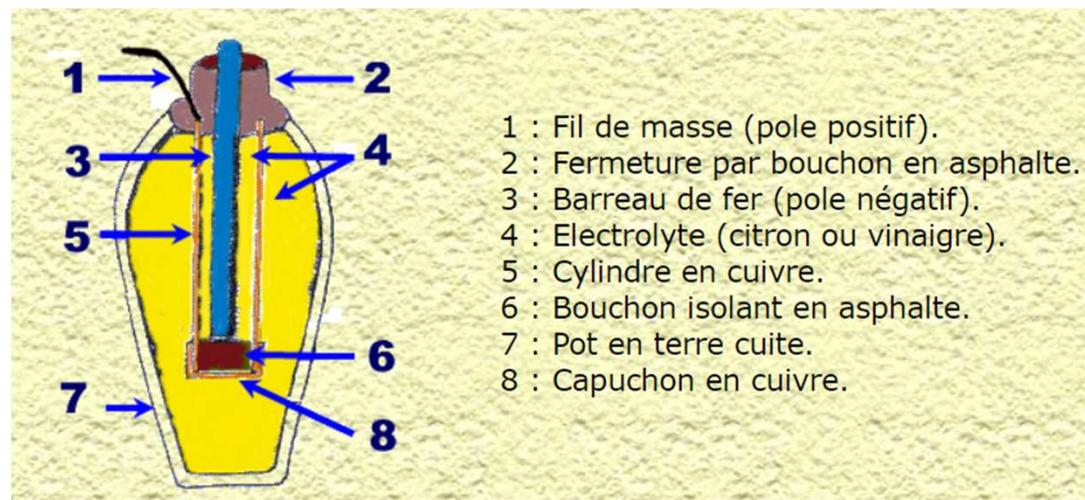
4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque

- Une petite parenthèse d'histoire sur les batteries...



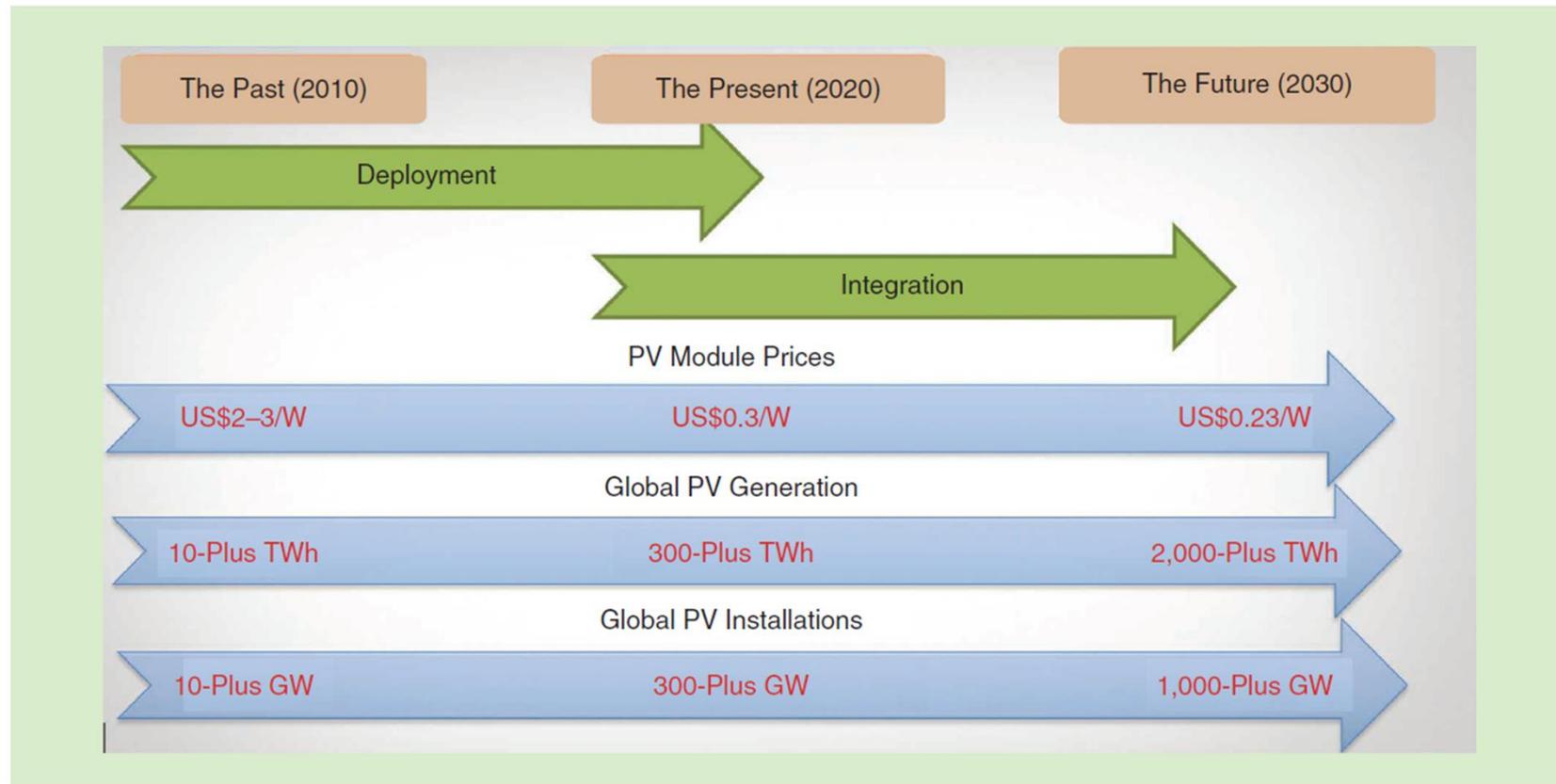
Les restes archéologiques de la batterie de Bagdad



4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque

- La prochaine décennie va voir un déploiement massif des batteries



**Emerging Opportunities
in Distributed Power
Electronics and
Battery Integration**

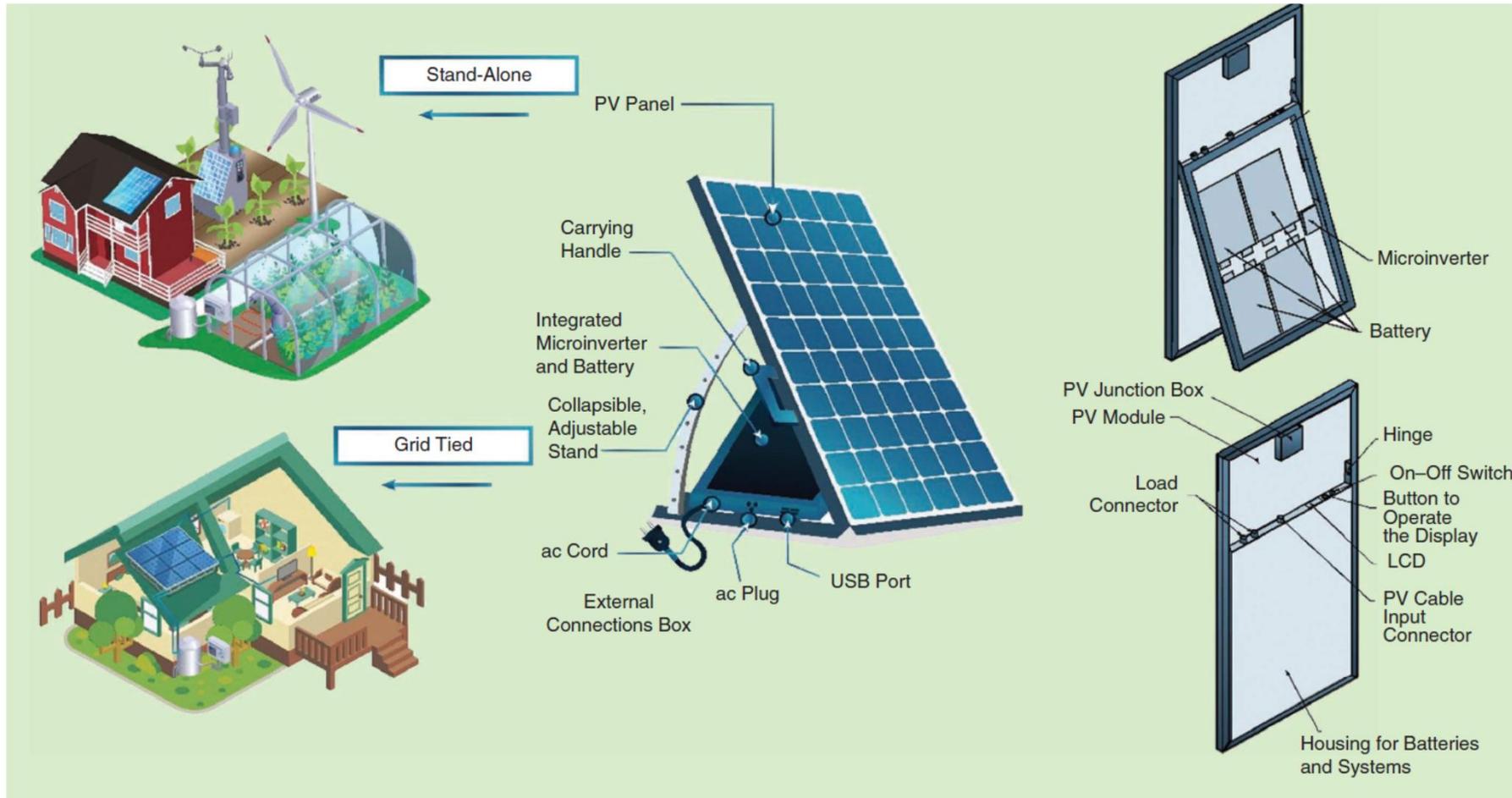
Setting the stage for an energy storage revolution

by Issa Batarseh and Khalil Alluhaybi

4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque

- Vers l'intégration des différents constituants d'un système photovoltaïque

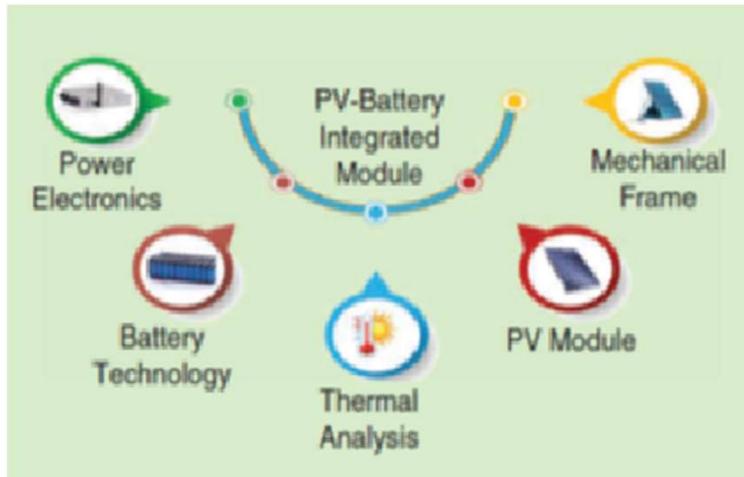


The integrated PV battery module and its applications.

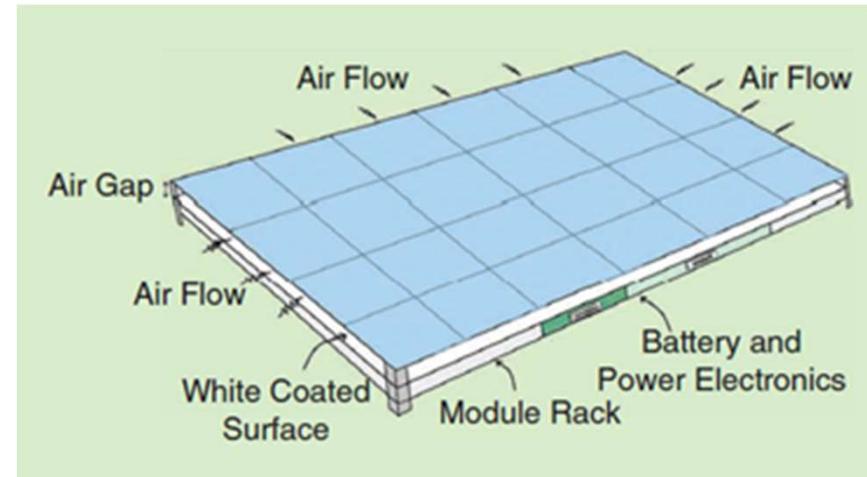
4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN TUNISIE

6. Constituants d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque

- Vers l'intégration des différents constituants d'un système photovoltaïque

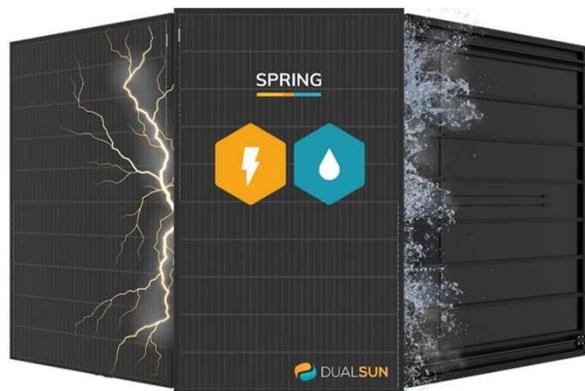


Aspects et thématiques de conception d'un module PV intégré



Exemple de module PV intégré

- Vers les systèmes photovoltaïques multifonctions



- Génération de l'énergie électrique
- Génération de l'énergie thermique par chauffage de l'eau

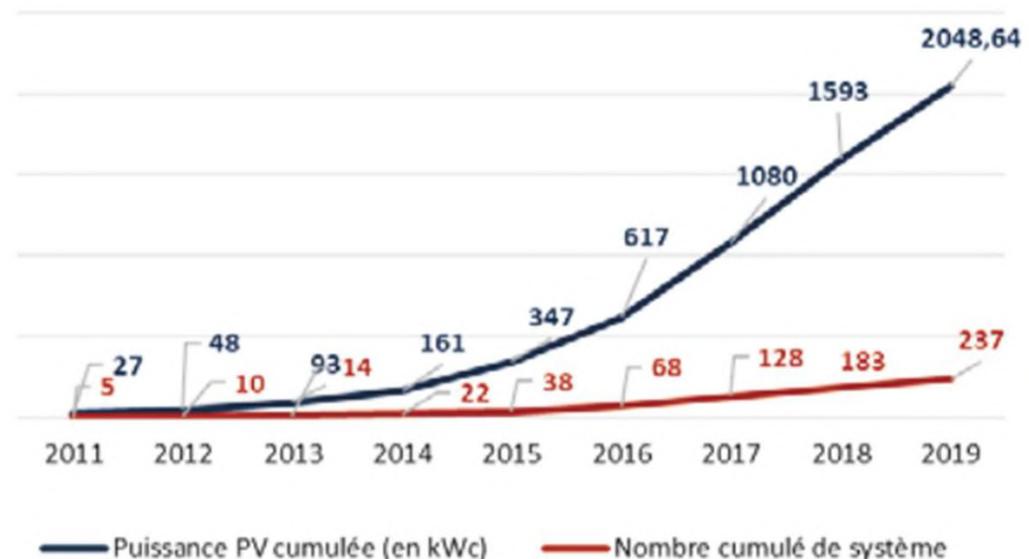
5. LE POMPAGE SOLAIRE

1. Le Pompage : application potentielle des système de génération PV

Le pompage de l'eau est considéré parmi les applications les plus importantes de l'énergie solaire PV non raccordée au réseau. Le ministère de l'Agriculture a adopté cette technologie pour couvrir les besoins en eau potable des populations des zones lointaines, notamment dans le sud tunisien. Le nombre d'installations de pompage solaire d'eau potable est estimé à environ une centaine de stations. Avec l'augmentation des prix de vente du gasoil, la baisse des coûts des systèmes solaires PV et la mise en place des primes spécifiques par le FTE, le recours au solaire PV pour le pompage d'eau destiné à l'irrigation est devenu économiquement rentable. Pour la période 2010-2019, le nombre des systèmes de pompage solaire d'eau d'irrigation a atteint 237 systèmes totalisant une puissance PV globale d'environ 2.058KWc.

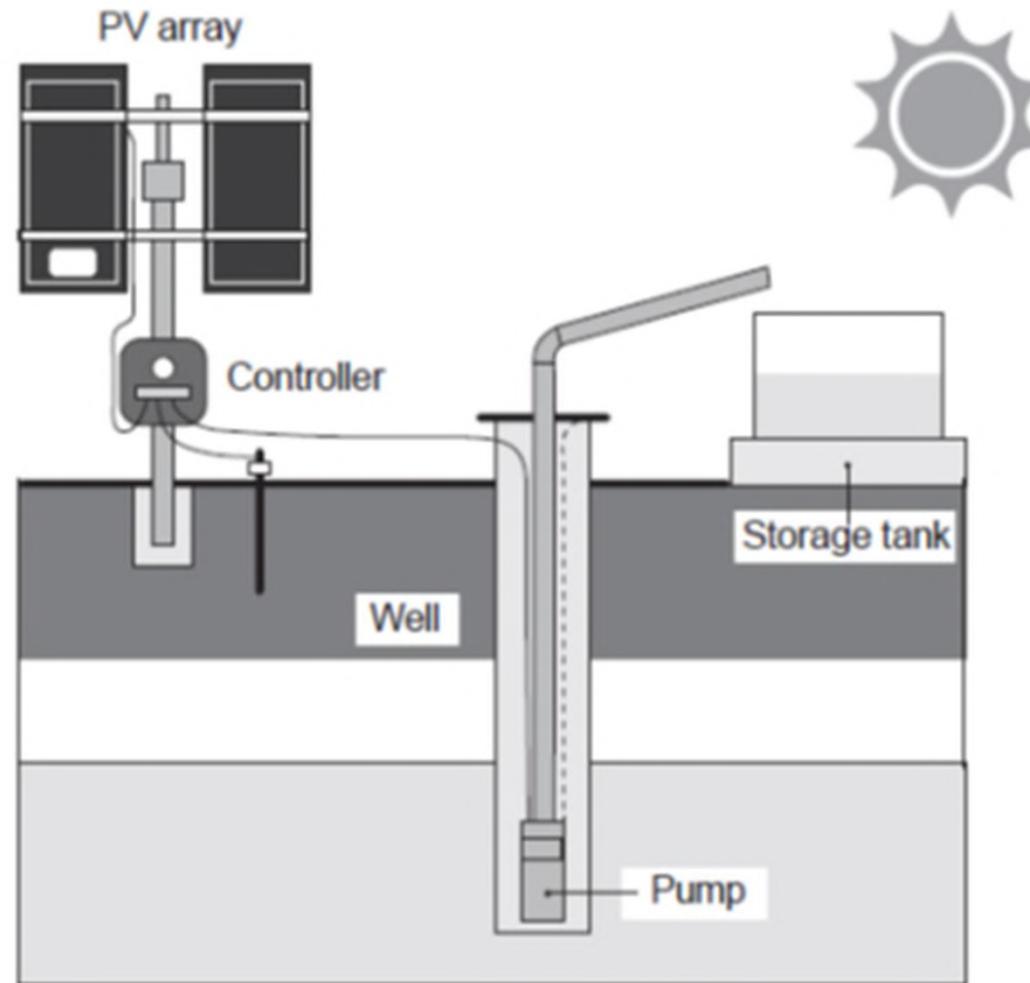


M. Khaled Kaddour, *coordinateur*,
Mme Amel Jrad
Mme Noura Laroussi
M. Adel Ben Youssef
Mme Asma Dhakouani



5. LE POMPAGE SOLAIRE

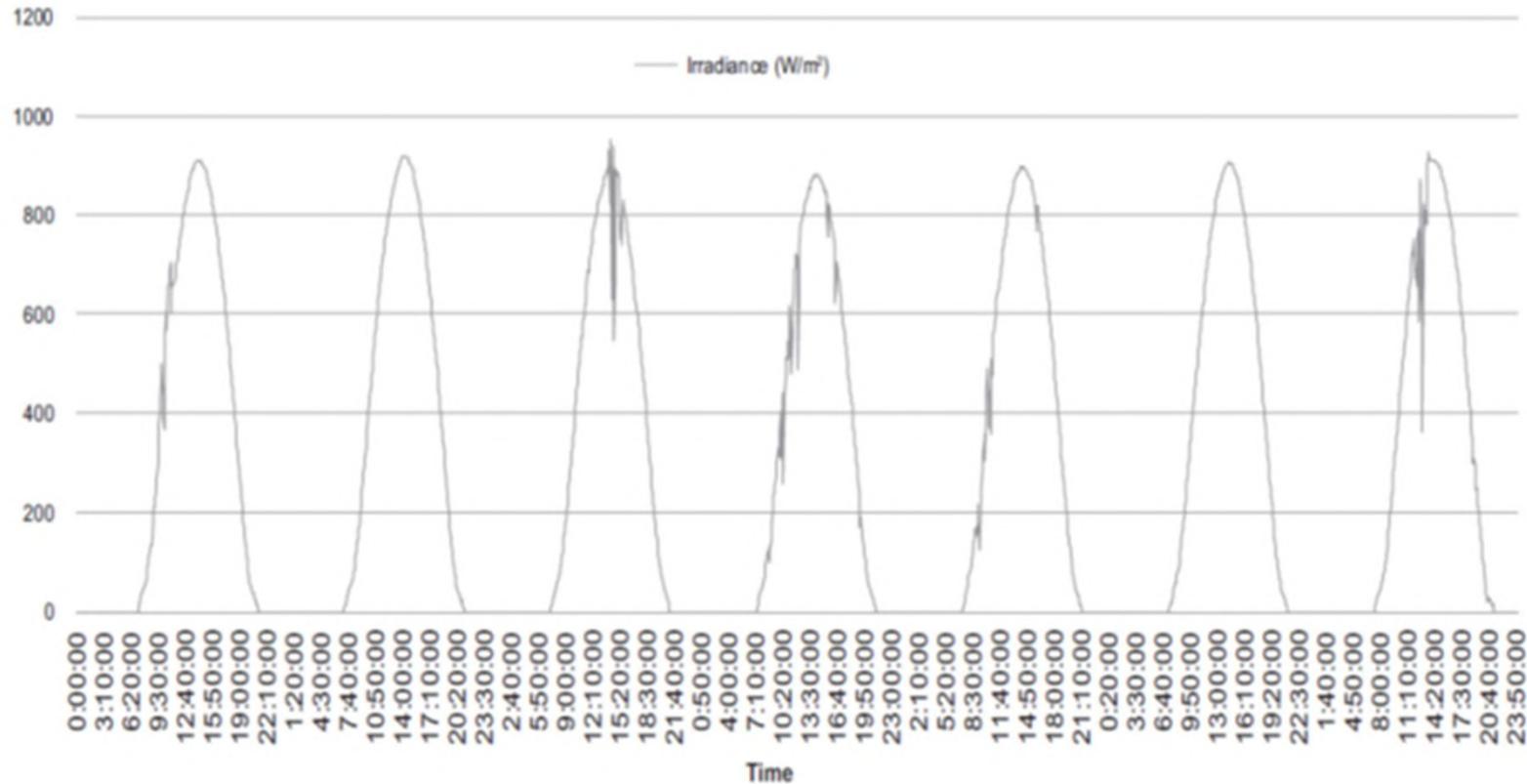
1. Le Pompage : application potentielle des système de génération PV



Structure typique d'un système de pompage solaire photovoltaïque

5. LE POMPAGE SOLAIRE

2. Intérêt du stockage pour le pompage solaire

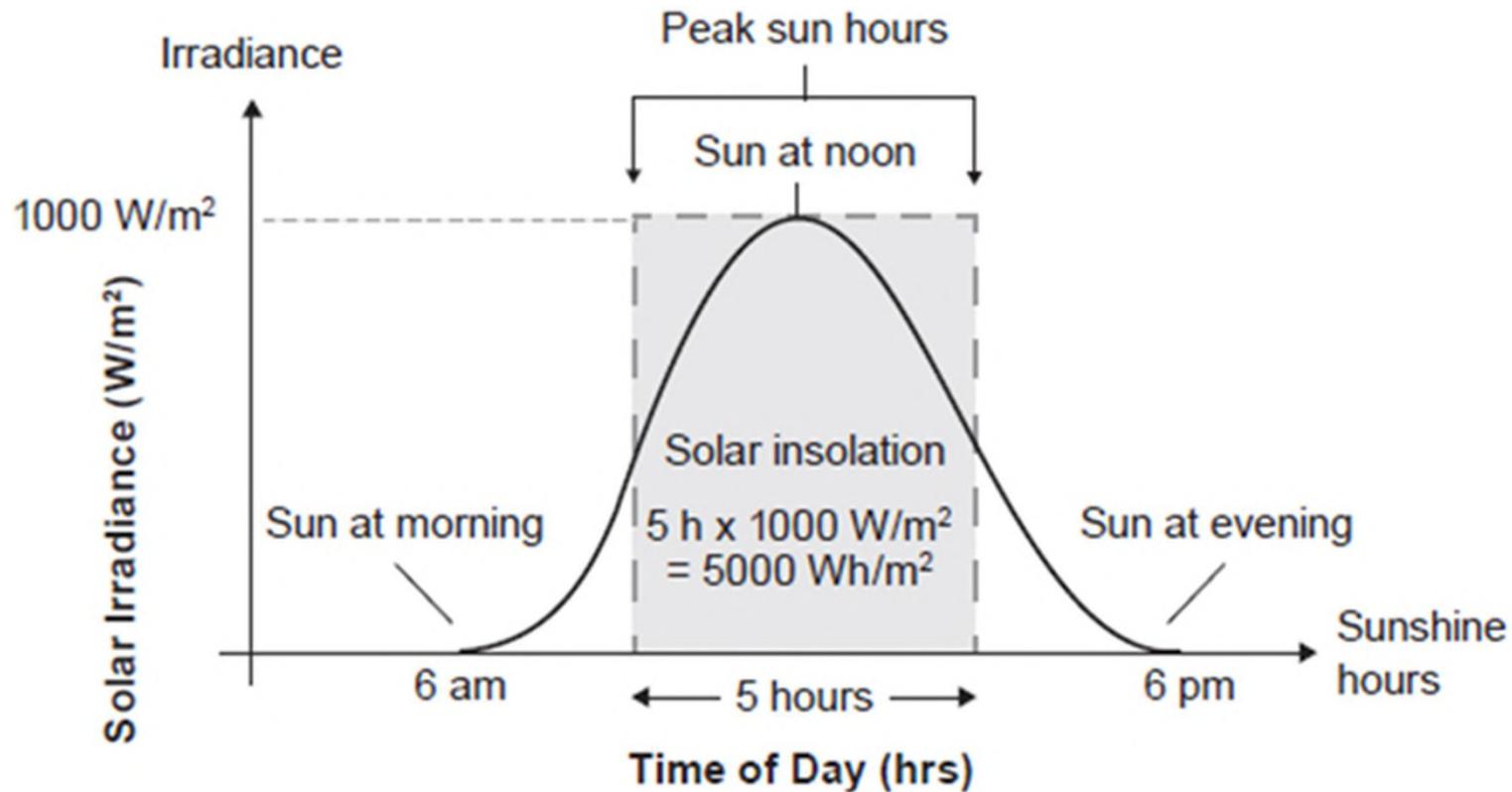


Exemple: Irradiation solaire par journées de la semaine (Valence – mois de juillet)

Source : Université polytechnique de Valence

5. LE POMPAGE SOLAIRE

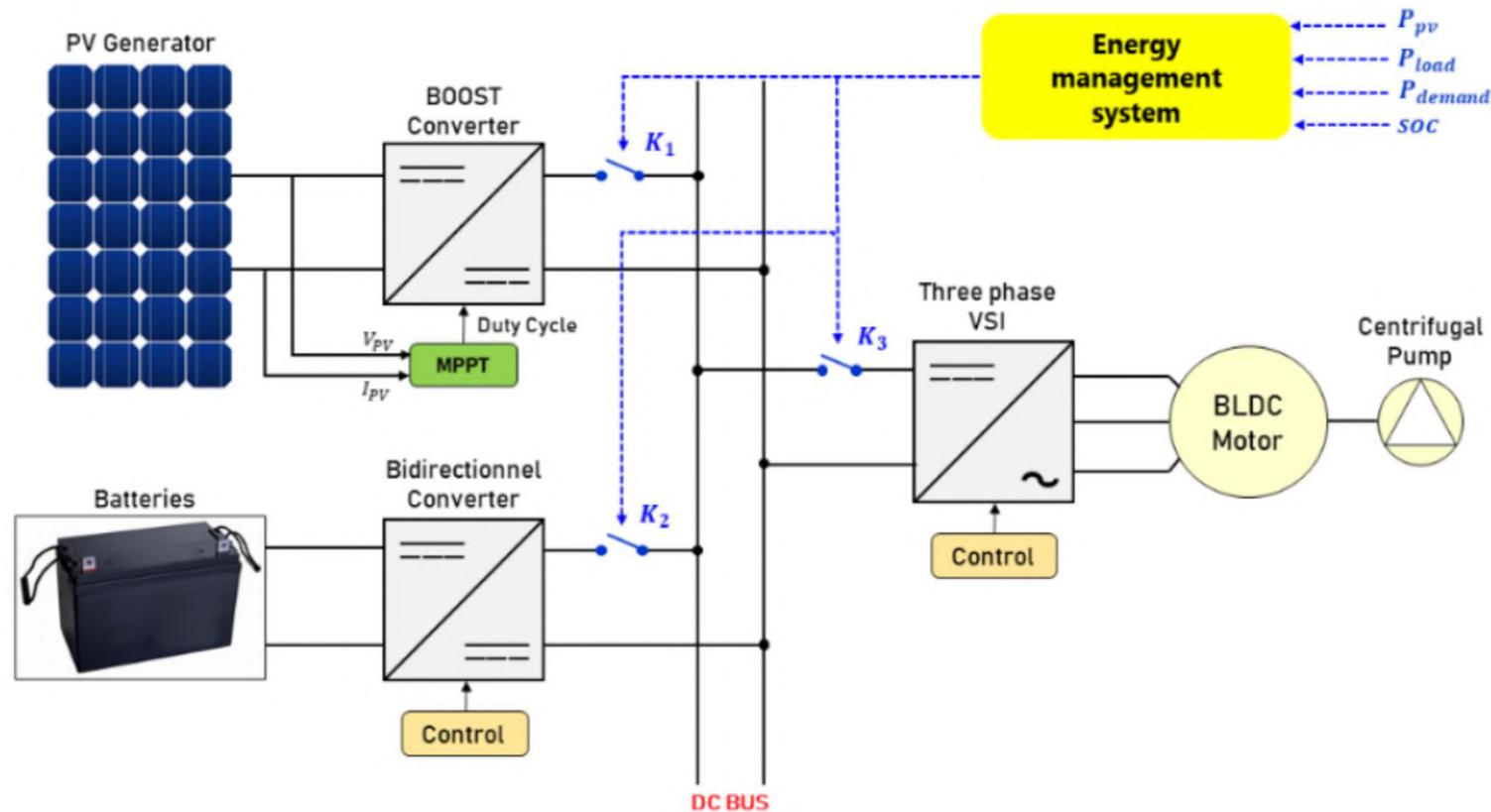
2. Intérêt du stockage pour le pompage solaire



Exemple: Graphe de l'irradiation solaire journalière

5. LE POMPAGE SOLAIRE

2. Intérêt du stockage pour le pompage solaire



Exemple: Système de pompage solaire avec stockage

Source : Benzaouia, M., and all, “Energy Management Strategy for an Optimum Control of a Standalone Photovoltaic-Batteries Water Pumping System for Agriculture Applications,” Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy Systems. ICEERE 2020, lecture Notes in Electrical Engineering, vol 681. Springer, Singapore.