

# Diversification du stockage énergétique : chaleur, batteries, hydraulique, hydrogène et nouvelles technologies

Congrès solaire du pacifique, le 29.11.2024

Lionel Perret





Lionel Perret, [lionel.perret@planair.ch](mailto:lionel.perret@planair.ch)

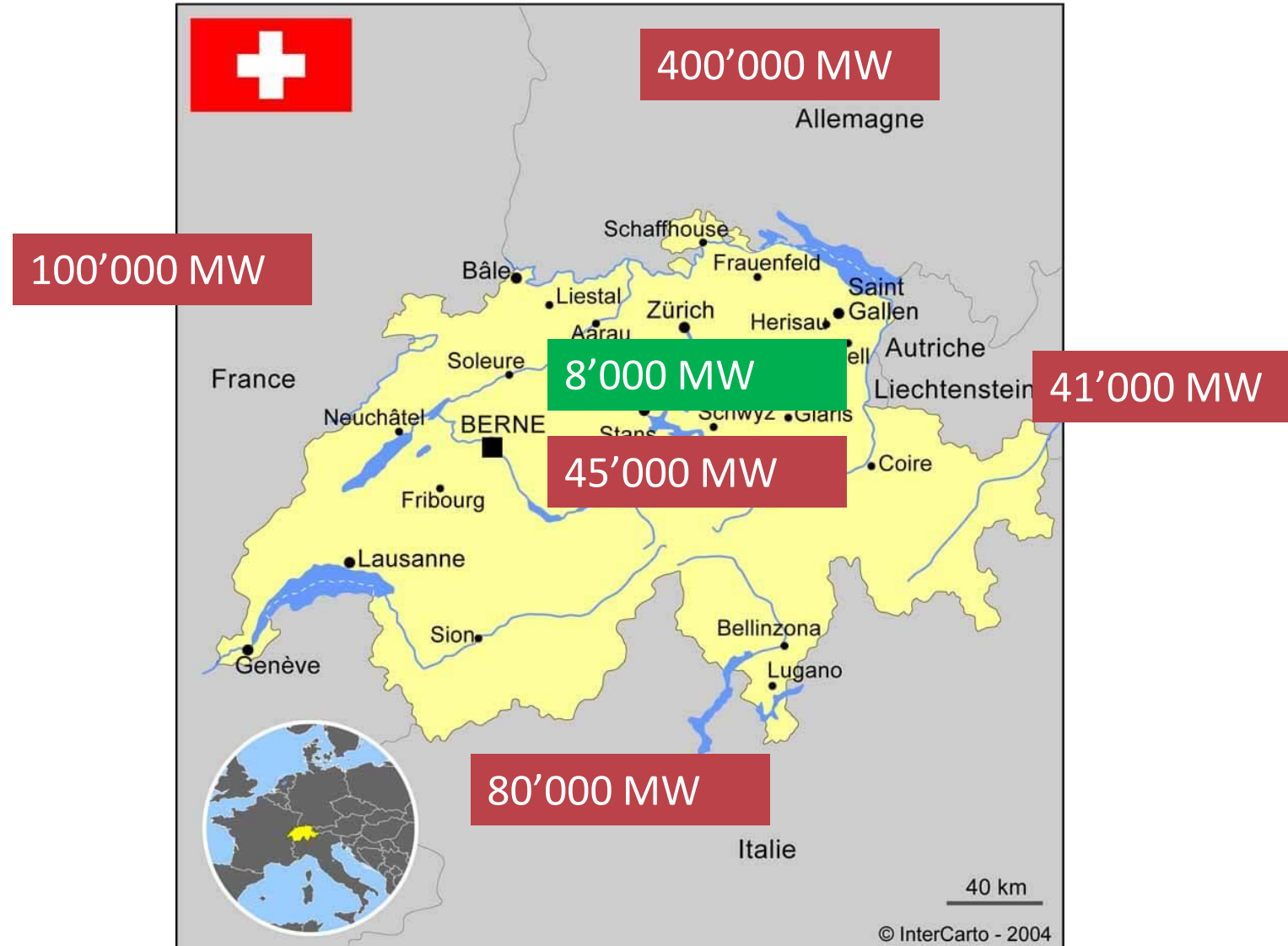
0041 24 566 52 02

00689 87 70 33 83



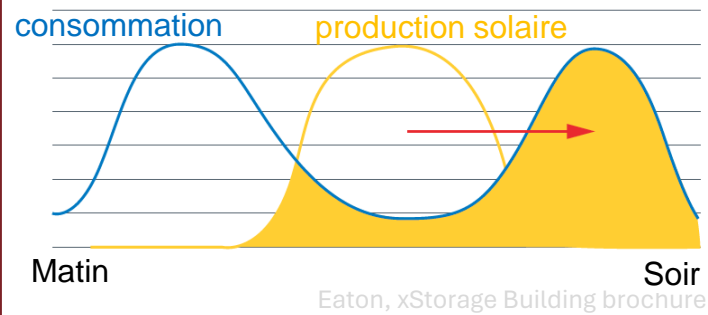
# Un grand besoin de stockage et de flexibilité

Même sur l'île Suisse en Europe



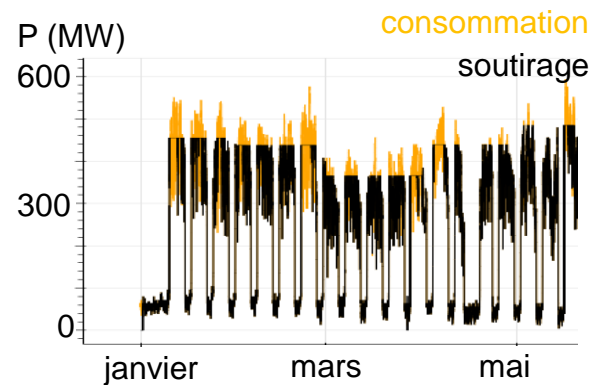
# Applications du stockage

## Augmentation de la consommation propre



- Déplacement de la consommation de l'énergie solaire (journée ou saison)
- Rentabilité dépend de la différence de tarif d'achat et de reprise de l'électricité

## Ecrêtage de la pointe de soutirage



- Réduction des pointes mensuelles ou annuelles de soutirage
- Rentabilité dépend du tarif de puissance et du profil de consommation

## Backup et îlotage

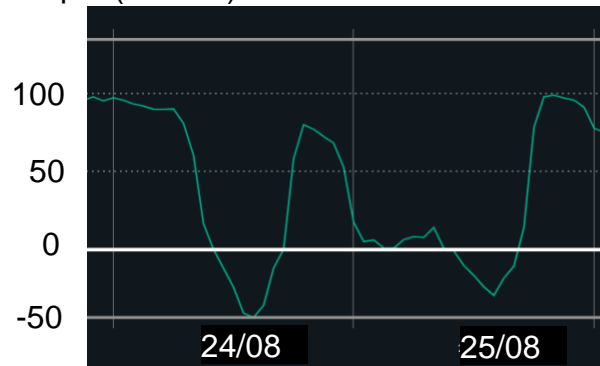


- Sécurité d'approvisionnement locale
- Rentabilité peu probable

# Applications du stockage

## Arbitrage de l'énergie

Prix spot (€/MWh)



www.rte-france.com

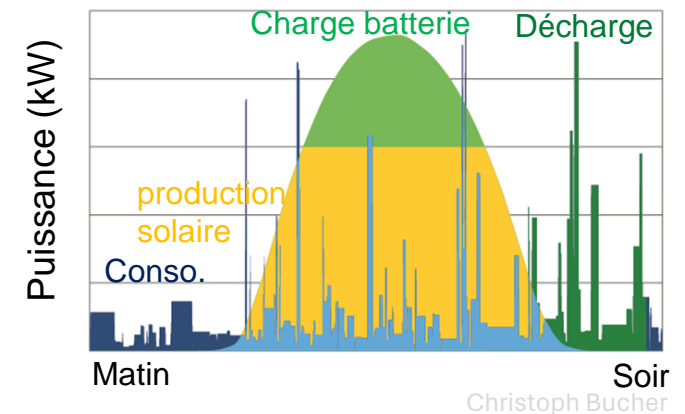
- Achat de l'énergie à faible coût et revente quand le prix est haut la même journée
- Marché spot, intraday
- Rentabilité grâce à la forte volatilité des prix

## Services systèmes



- Stabilisation de la fréquence du réseau électrique.
- Rémunération en échange d'une capacité réservée, prête à intervenir en fonction des déviations de la fréquence

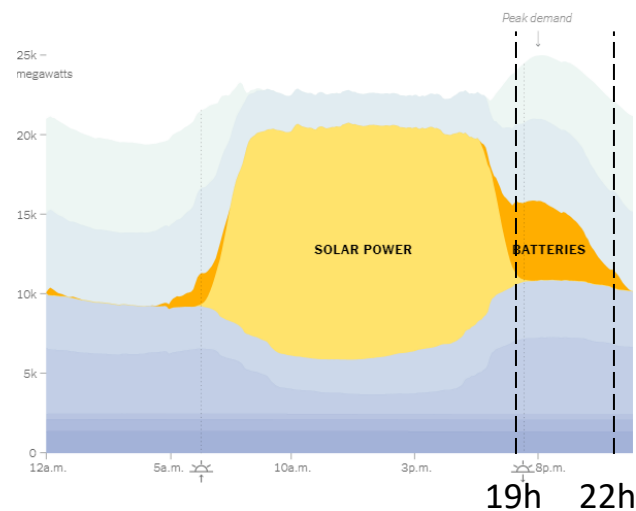
## Ecrêtage de la pointe PV



- Diminution de la pointe de PV injectée dans le réseau
- Solution pour éviter des renforcements du réseau

# Les batteries électrochimiques

- Marché des batteries en forte expansion
- Prix des batteries Li-ion (rack) a largement chuté : >75% en 5 ans
- **Optimales pour toutes les applications:** consommation propre, lissage du pic de consommation et production, services systèmes, arbitrage, backup, UPS
- Exemple en Californie : 16 GW de puissance
  - Entre 19h et 22h, > 1/5 de la demande d'électricité de l'Etat délivré
  - Puissance atteinte équivalente à 7 réacteurs nucléaires !



## Lithium-ion

- ✓ Prix décroissant
- ✓ Maturité
- ✓ Deuxième vie
- ✓ Multi-fonctions
- ✓ Efficacité
- ✗ Matériaux critiques (sauf LFP)
- ✗ Risques d'opération (sauf LFP)

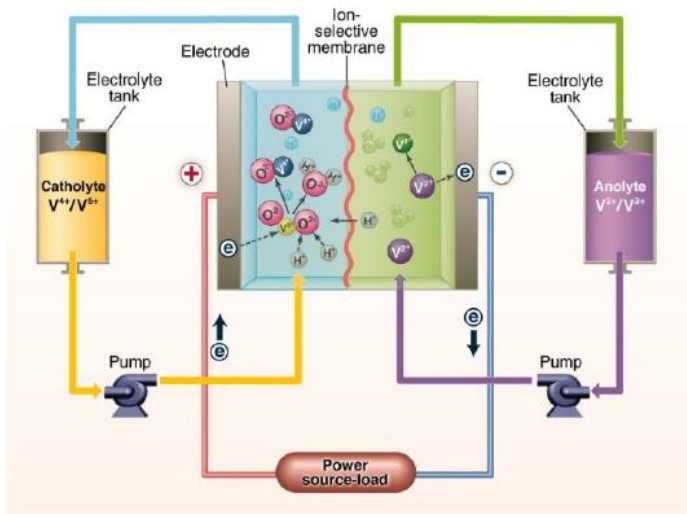
## Sodium (sel fondu)

- ✓ Matériaux abondants
- ✓ Efficacité
- ✗ Prix
- ✗ Maturité



# Les batteries à flux redox

- Stockent l'énergie sous forme chimique dans un électrolyte liquide
- Capacité et puissances indépendantes car 2 électrolytes séparés
- Applications : consommation propre, lissage du pic de consommation et production, UPS
- Exemple en Australie 2 MW / 8 MWh



Wikimedia.org



## Flux Redox

- ✓ Dimensionnement indépendant de la puissance et de l'énergie
- ✓ Durée de vie
- ✓ Empilable
- ✗ Densité d'énergie
- ✗ Efficacité
- ✗ Lentes
- ✗ Maturité
- ✗ Prix

# Force hydraulique

## Les barrages

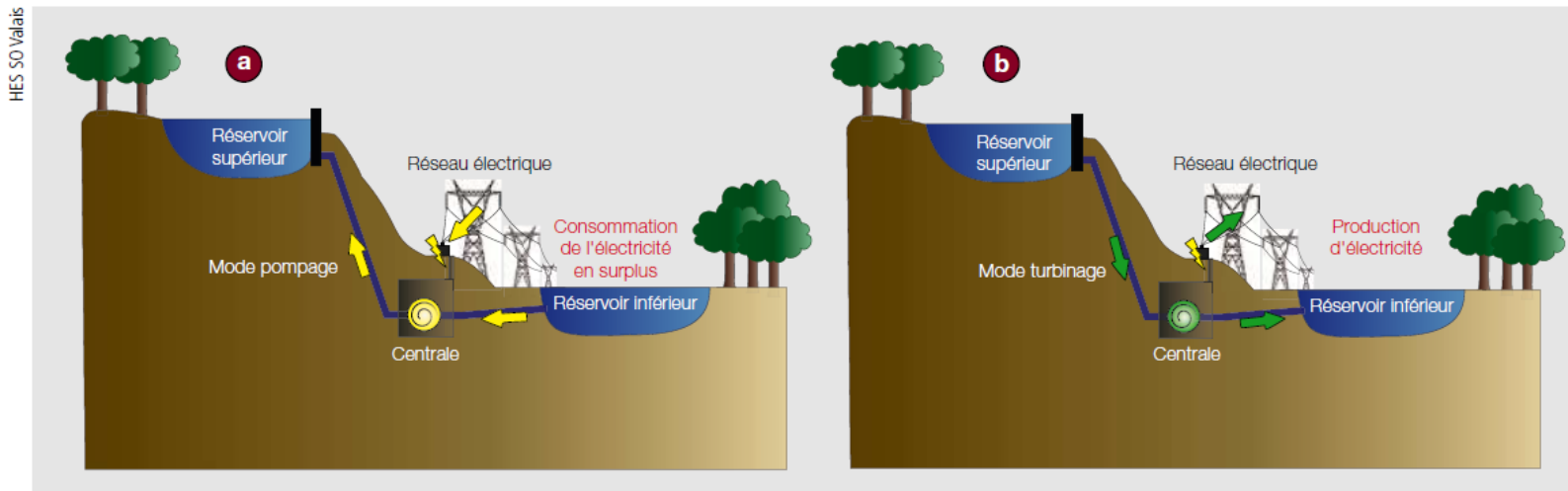
- Pas un stockage au sens où ils ne peuvent pas absorber de surplus d'électricité
- Eau stockée dans des retenues et turbinées au moment opportun

## Les stations de pompage-turbinage (STEP)

- Fonctionnement en cycles pompage-turbinage entre un réservoir inférieur et un réservoir supérieur
- 99% de la capacité de stockage d'énergie mondiale

### Pompage turbinage

- Maturité
- Durée de vie
- Eau de pluie comme charge supplémentaire
- Demande des conditions géographiques spécifiques
- Bilan environnemental moins bon en milieu tropical





# Gravitationnel

- Energie potentielle est stocké et restituée par un système de treuils ascensionnels
- Société Energy Vault (Suisse)
- Grande quantité de béton: 315 000 tonnes pour la construction des seuls blocs mouvants  $\approx$  construction d'un barrage
- Exemple Chine: 100 MWh/ 25 MW, 100 m



## Gravitationnel

- Pas d'autodécharge
- Durée de vie
- Projet d'utiliser des matériaux recyclés
- Maturité
- Impact CO2
- Impact visuel

# Air comprimé

- L'air est comprimé et stocké dans des réservoirs sous-terrains.
- En phase de déstockage, l'air comprimé est détendu à travers une turbine qui produit de l'électricité
- Stockage adiabatique : perte de chaleur récupérées
- Exemple en Suisse (2017)
  - Rendement 72%, pourrait alimenter la ville de Lugano

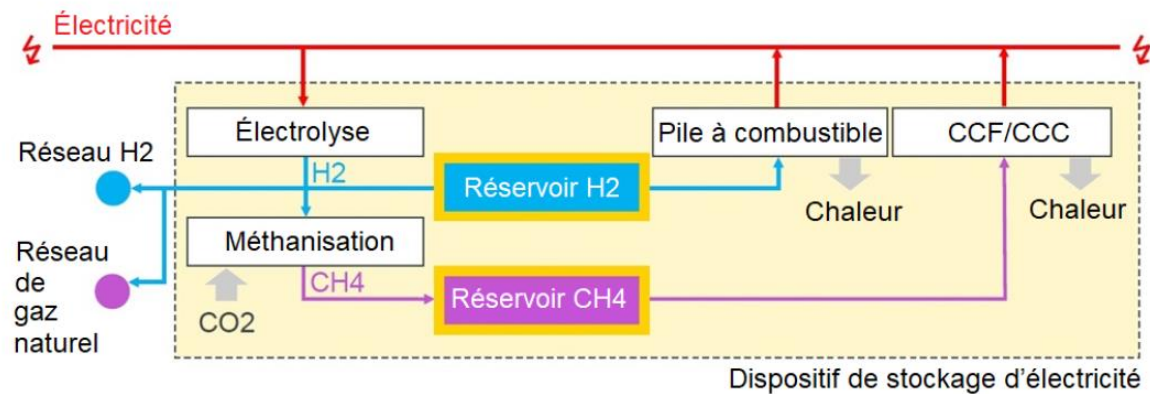


## Air comprimé

- ✓ Moindre utilisation des ressources
- ✓ Pas d'impact visuel
- ✓ Efficace, sûr durable
- ✗ Maturité
- ✗ Prix
- ✗ Sites spécifiques
- ✗ Efficacité plus faible que batteries et pompage turbinage, donc l'électricité doit être propre

# Hydrogène

- L'hydrogène produit par électrolyse est soit reconvertie en électricité par une pile à combustible, (soit éventuellement après conversion en méthane) reconvertie en électricité + chaleur par un procédé couplage chaleur force (CCF)
- Stockage dans des réservoirs souterrains ou en surface



Exemple en Suisse, Schiffenen:  
2 MW couplé à un barrage

## Hydrogène

- ✓ Maturité électrolyse
- ✓ Dimensionnement indépendant de la puissance et de l'énergie
- ✗ Rendement chaîne hydrogène – pile à combustible de 34%

## Méthane

- ✓ Stockage du méthane relativement facile en surface
- ✗ Source de CO2
- ✗ Maturité méthanisation
- ✗ Rendement chaîne hydrogène – méthane – CCF de 15%

# Chaleur

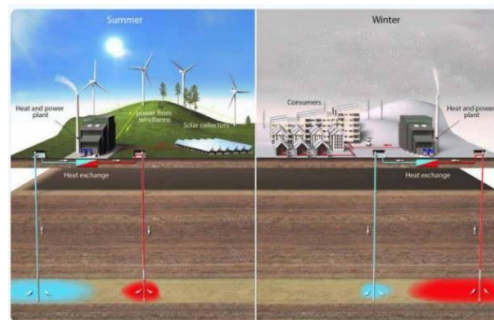
- Stockage de l'énergie thermique dans des cuves ou le sous-sol.
- Stockage journalier : Couverture des charges de pointe journalières, amélioration du fonctionnement des installations (durée de fonctionnement plus longue des producteurs), stockage de l'énergie solaire
- Stockage saisonnier : Puits, aquifères, trous de forage
- Ne fait de sens que si la chaleur stockée n'est pas reconvertie en électricité



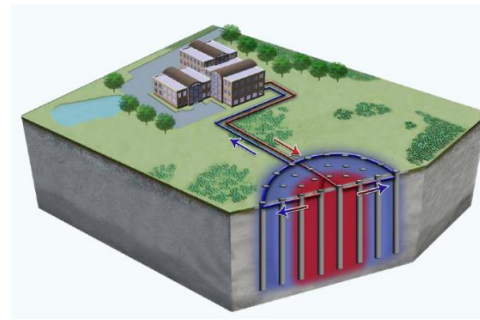
Boiler



Puits (Danemark, 12 GWh)



Aquifères

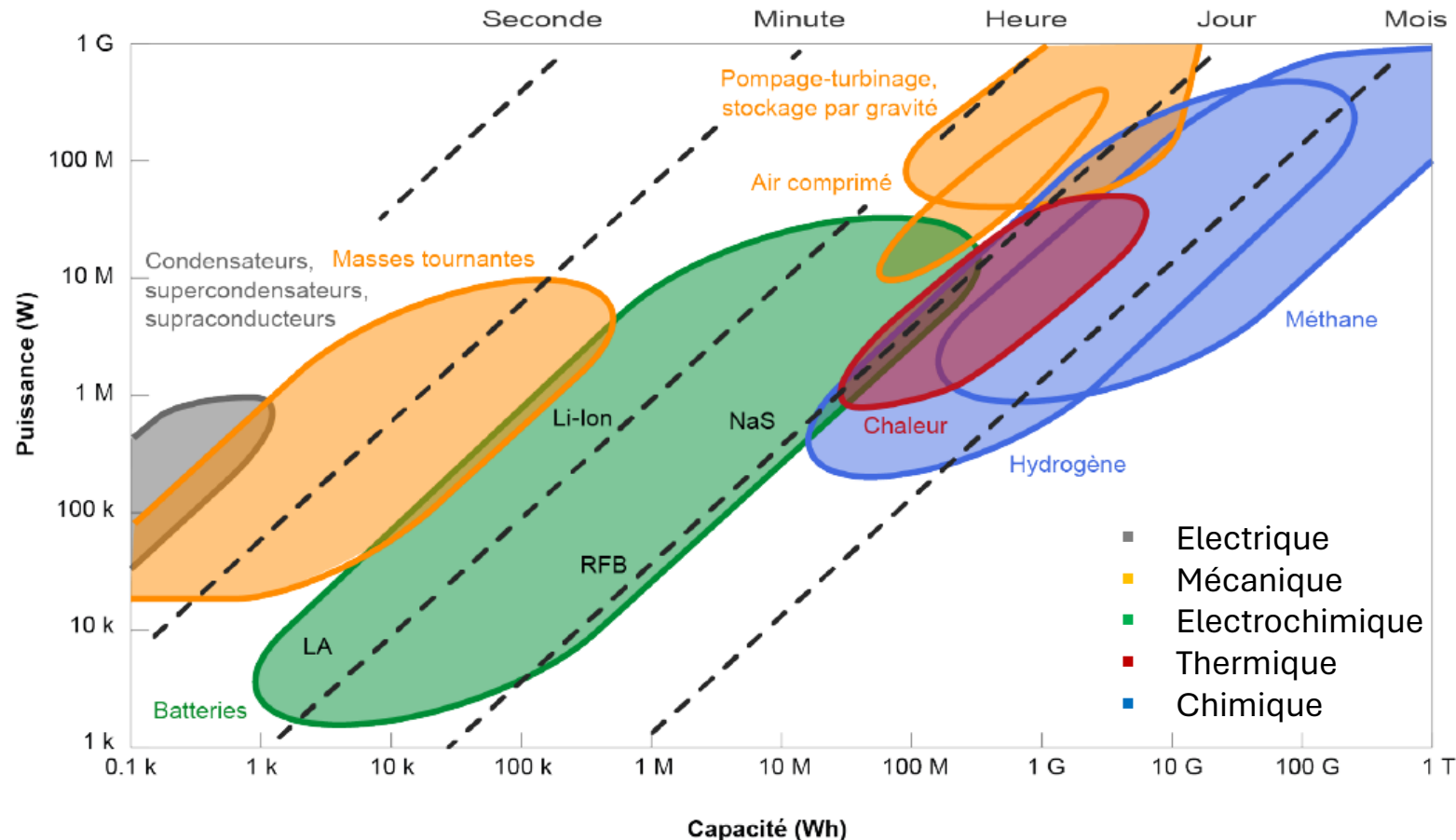


Trous de forage

## Chaleur - saisonnier

- Stockage saisonnier
- Impact paysager
- Changement de température du milieu naturel
- Requiert des conditions géologiques particulières
- Rentabilité

# Aperçu des technologies de stockage



Stockage journalier :

- **Batteries Li-ion**
- Batteries flux redox
- Air comprimé
- Gravitationnel
- STEP

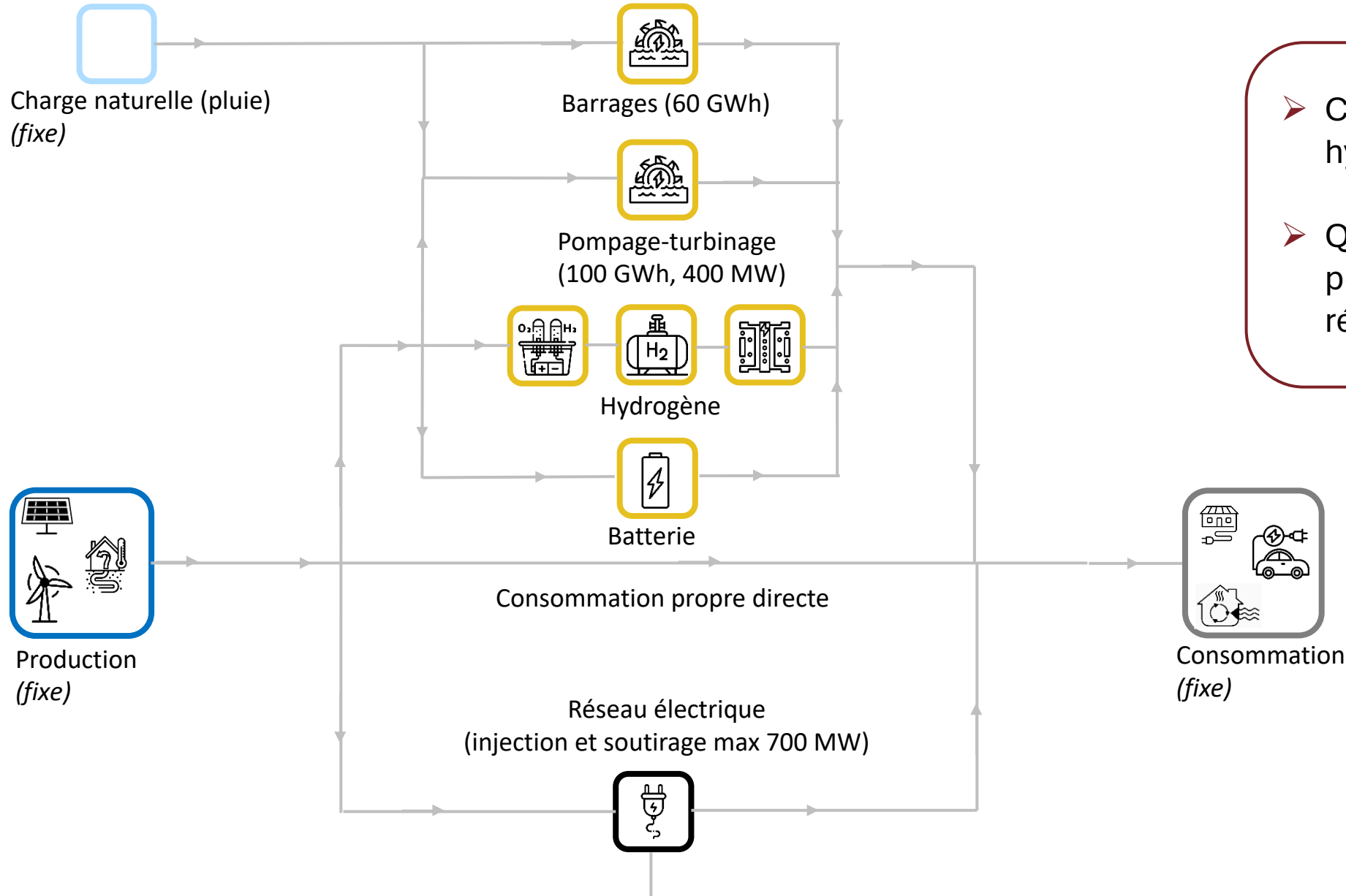
Stockage saisonnier:

- **STEP**
- **Hydrogène**
- Méthane
- Chaleur

➤ Différentes technologies de stockage pour différents temps de stockage



# Modélisation de systèmes énergétiques (canton Suisse)

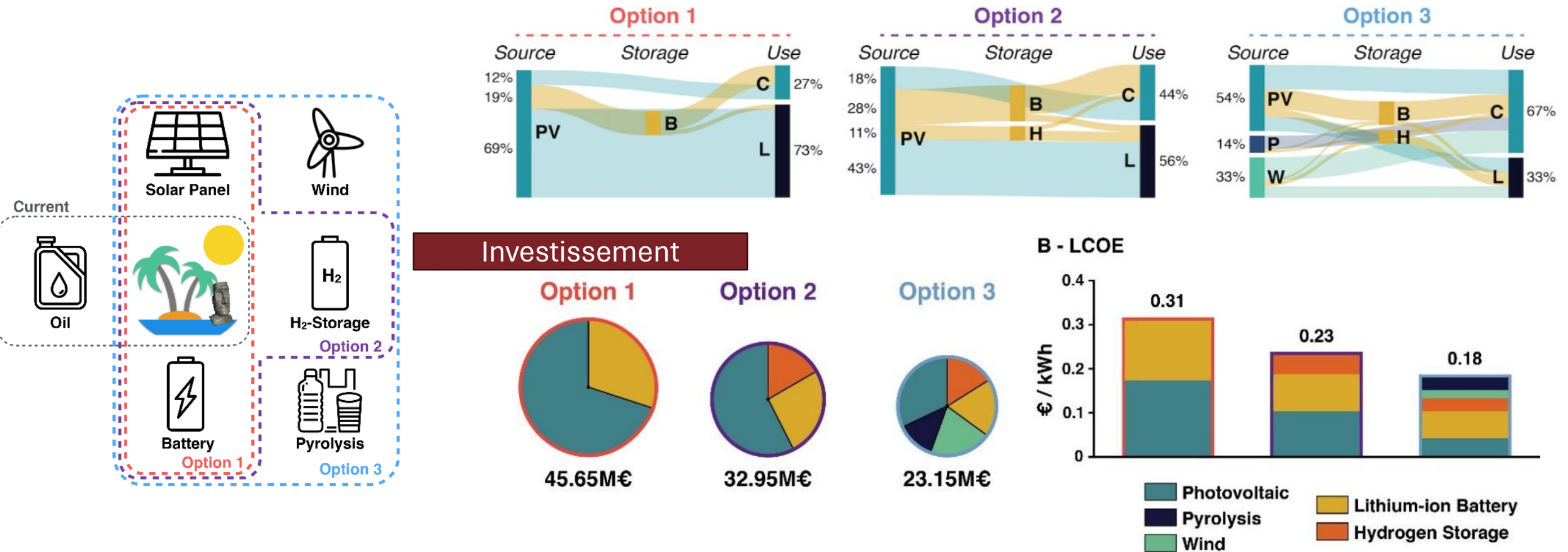


- Comment opérer la force hydraulique ?
- Quelle capacité de stockage pour une résilience locale et régionale ?



# Mix énergétique sur une île du pacifique (base 2020)

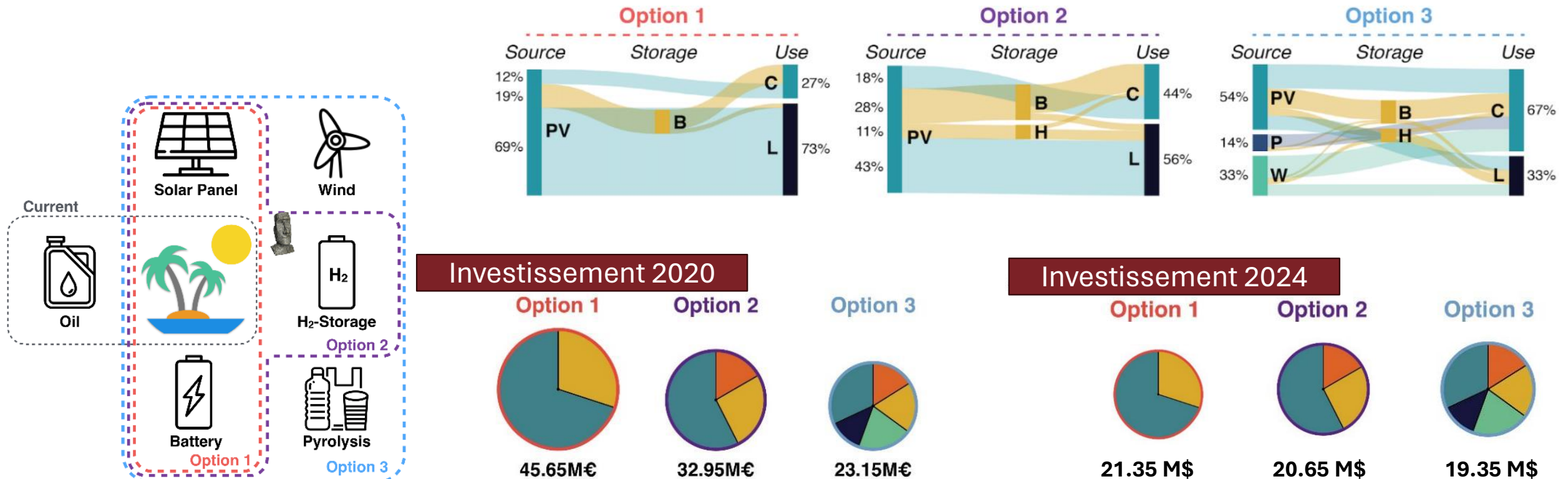
Le rôle de l'hydrogène et de la valorisation des déchets pour l'autonomie énergétique sur l'île de Pâques



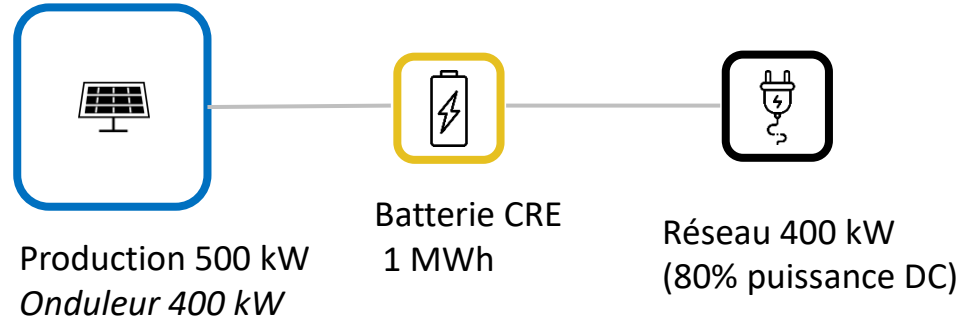
M. Cauz, L. Bloch, C. Rod, L. Perret, C. Ballif et N. Wyrsh, "Benefits of a Diversified Energy Mix for Islanded Systems". *Frontiers in Energy Research* (2020).

# Mix énergétique sur une île du pacifique (base 2020)

Le rôle de l'hydrogène et de la valorisation des déchets pour l'autonomie énergétique sur l'île de Pâques



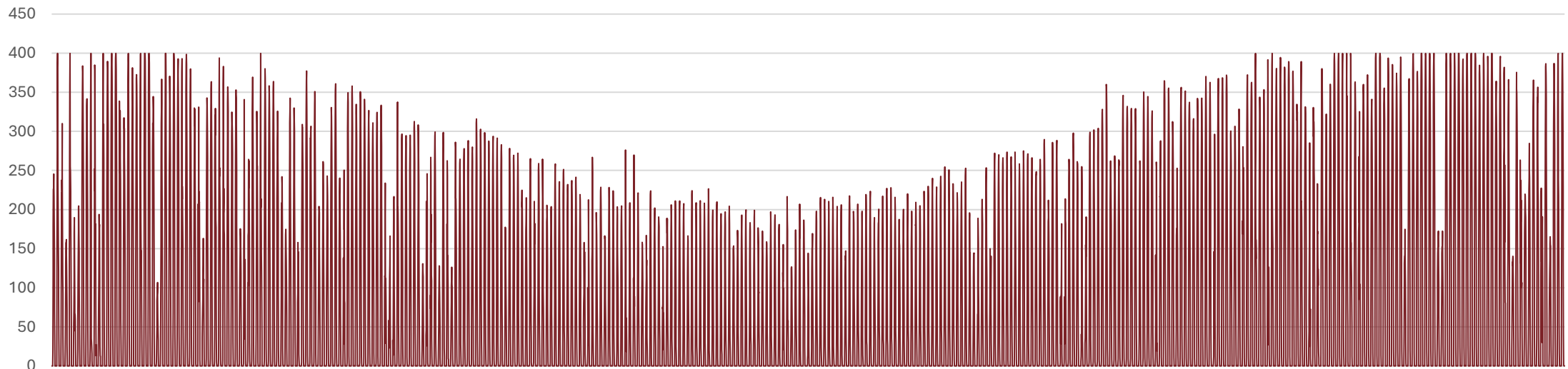
# Conception d'une installation solaire usuelle



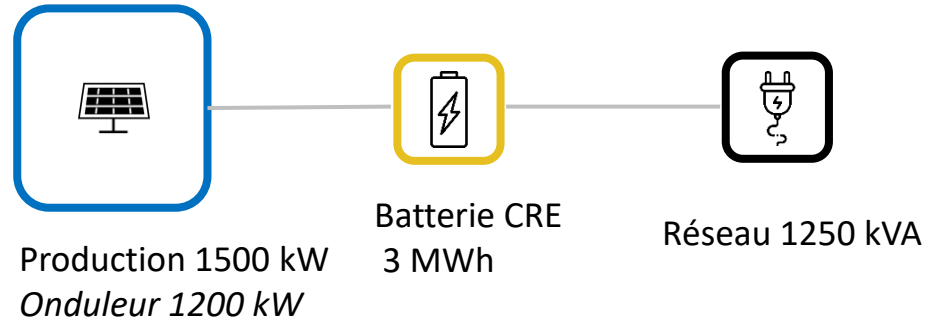
Caractéristiques	
Solaire	750 k€
Batterie	500 k€
Raccordement	0
Coût total	1'250 k€
Production	714 MWh
Facteur de charge AC	20 %

1.75  
€/MWh

Profil solaire Polynésien 500 kWp



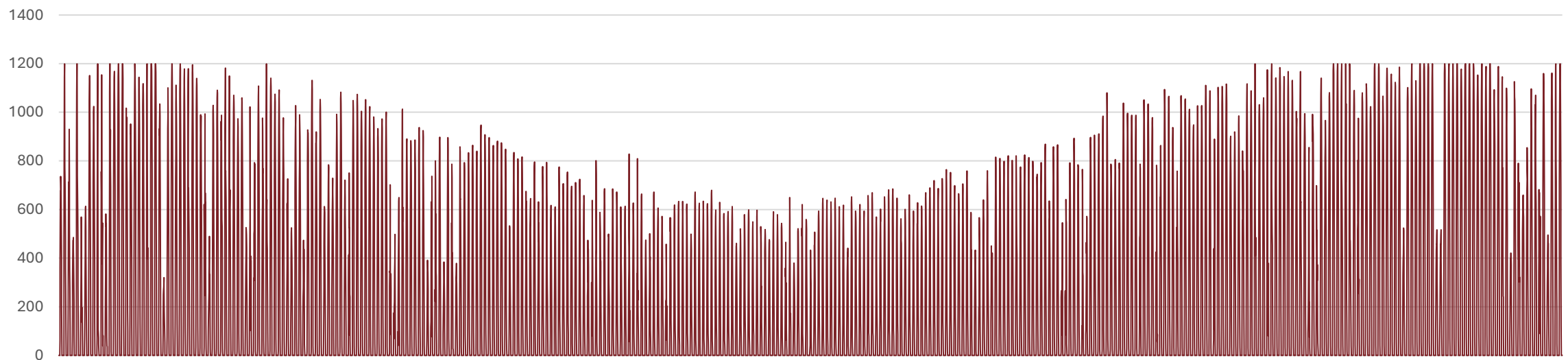
# Conception installation solaire avec renforcement



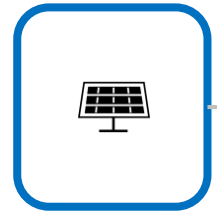
Caractéristiques	
Solaire	1'500 k€
Batterie	1'200 k€
Raccordement	500 k€
Coût total	3'200 k€
Production	2'144 MWh
Taux utilisation réseau	19.5 %

1.49  
€/MWh

Profil solaire Polynésien 1500 kWp



# Conception installation solaire bridée



Production 1500 kW  
Onduleur 1200 kW



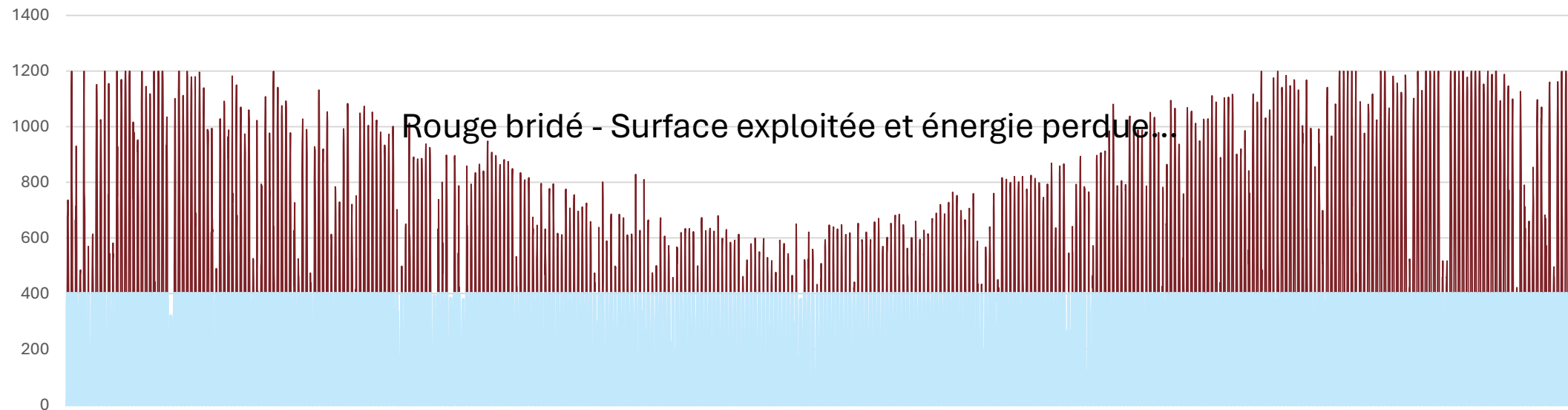
Réseau 400 kVA  
(26% puissance DC)

## Caractéristiques

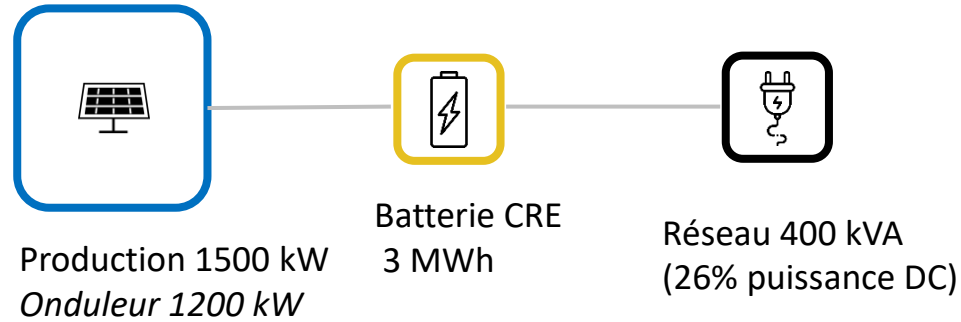
Solaire	1'500 k€
Batterie	0 k€
Raccordement	0 k€
Coût total	1'500 k€
Production	1'297 MWh
Taux utilisation réseau	37 %

1.15  
€/MWh

## Profil solaire Polynésien bridé



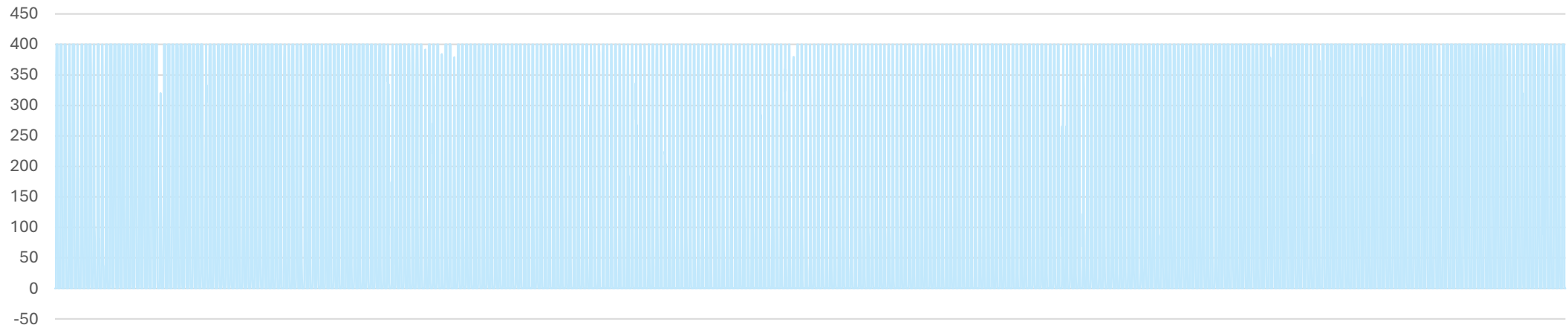
# Conception installation solaire bridée stockée



Caractéristiques	
Solaire	1'500 k€
Batterie	1'200 k€
Raccordement	0 k€
Coût total	2'700 k€
Production	1'744 MWh
Taux utilisation réseau	50 %

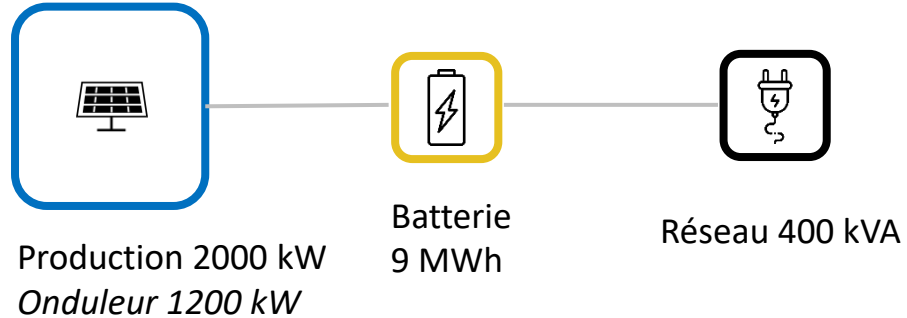
1.55  
€/MWh

Profil solaire PV Syst Polynésien (Vue réseau)





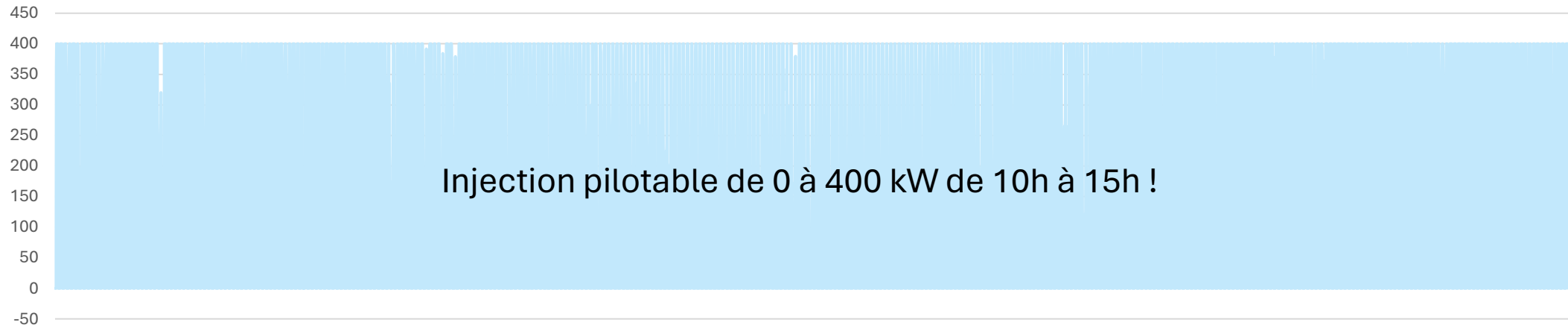
# Conception installation solaire anti-pic



Caractéristiques	
Solaire	1'800 k€
Batterie	2'000 k€
Raccordement	0 k€
Coût total	3'800 k€
Production	2'667 MWh
Taux utilisation réseau	76 %

1.49  
€/MWh

Profil solaire PV Syst Polynésien (Vue réseau)





# Potentiel programme : mise en œuvre solaire et stockage

Caractéristiques îles		
Consommation	40 GWh	
Puissance	2 à 9 MW	
Etape 1 : Solaire facile	2 MW – 3 GWh – 7.5 %	Idéal : autoconsommation privés
Etape 2 : Solaire stockage (centralisé ou décentralisé)	2 MW – 3 GWh – 7.5 %	Idéal : Autoconsommation privés
Etape 3 : Solaire bridé réseau existant	4 MW - 25 GWh – 60 %	Centrales solaires anti-pic et plug-in privé
Etape 4 : Solaire Grid Forming central	9 MW – 10 GWh – 20/25%	Centrale(s) substitution fossile (stockage hydrogène – appoint mix énergétique)



# Conclusions

- Les batteries LFP résolvent une large partie des craintes liées aux batteries (pas d'explosion, pas de matériaux contraints) et constituent un couple idéal avec le solaire
- Les études et scénarios d'il y a 4 ans peuvent déjà être revues tant la baisse des coûts du PV et des batteries est spectaculaire
- Les stockages créent une nouvelle donne pour le solaire – actuellement dans des îles, un raccordement à 20-30% de la puissance peut être l'optimal – et il diminue avec la réduction de prix des batteries
- Des centrales solaires anti-journalières / anti-pic / crème solaire ne produisant pas à midi libèrent de la place pour le solaire sans renforcement des réseaux (cumul stockage / orientation des panneaux / bridage) et ouvre de nouvelles perspectives d'ingénierie renouvelable



Merci pour votre attention !

Lionel Perret

[www.planair.ch](http://www.planair.ch)

Neuchâtel Fribourg Genève Jura Valais Vaud

