

---

# DÉCARBONATION DE SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Coûts, besoins de stockage et couplage des secteurs

---



Niklas Hartmann, Christoph Kost,  
Hans-Martin Henning

Fraunhofer Institute for Solar Energy  
Systems ISE

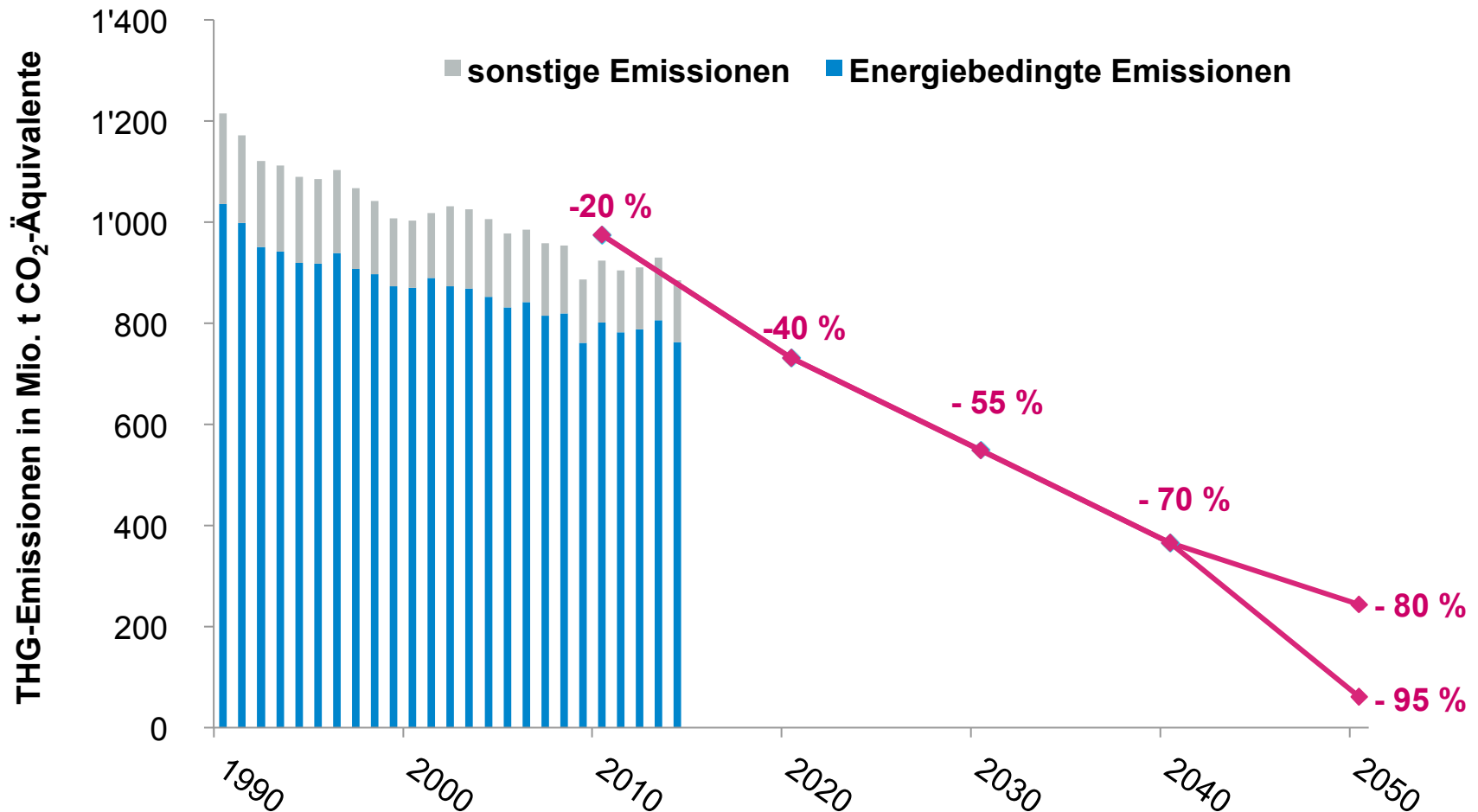
Congrès AEE Suisse 2018

20 mars 2018

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

- 
- Objectifs de protection du climat en Allemagne
  - Méthodologie
  - Résultats pour l'Allemagne
  - Report sur la Suisse
  - Récapitulatif et conclusion

# Objectifs climatiques d'ici 2050 : réduction de 80 à 95% des émissions de GES



# Modèle d'énergies renouvelables »REMod«

Limitation des coûts de transformation →

Production et stockage d'électricité



Combustibles (y compris biomasse et power-to-hydrogene/gas/fuel)



REMod-D  
Renewable  
Energy Model –  
Deutschland

- Optimisation technico-économique
- Résolution temporelle horaire 2015-2050

Transports  
(différents  
concepts de  
motorisation)



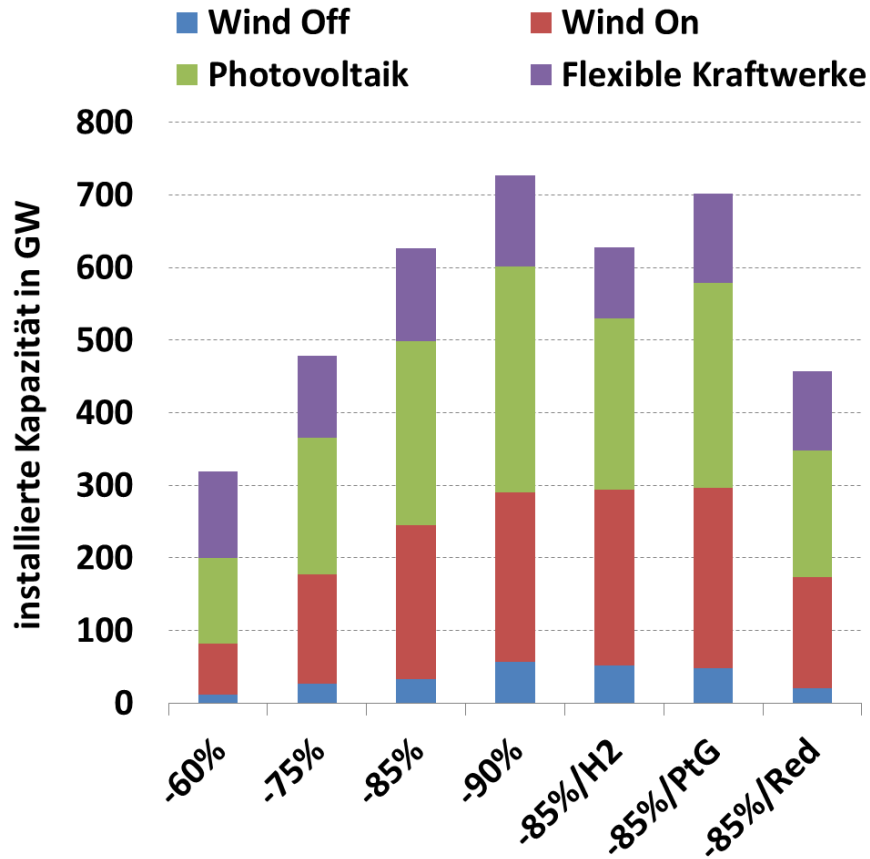
Chauffage  
(bâtiment, y  
compr. chauffage  
à distance et  
stockage)



Processus dans  
le commerce et  
l'industrie



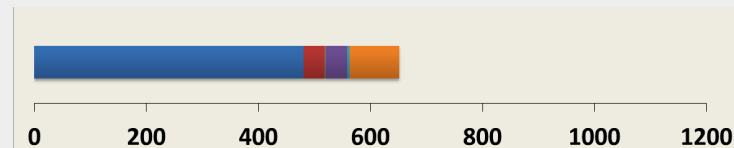
# Résultats centraux – Production d'électricité en 2050



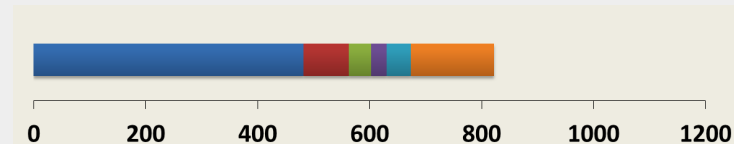
- La capacité installée des convertisseurs d'énergies renouvelables intermittentes (soleil, vent) dépend fortement des objectifs de protection du climat.
- La capacité installée des centrales thermiques flexibles est toujours similaire (80-100 GW) mais il y a des différences dans les heures à pleine charge.
- L'objectif de 85% sans réduction de la consommation, l'efficacité côté utilisation et l'abandon progressif des centrales au charbon, etc. sont difficilement réalisables avec des capacités installées d'énergies renouvelables intermittentes qui semblent socialement acceptables.

# Résultats centraux – Consommation d'électricité en 2050

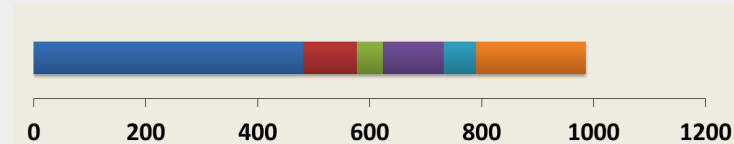
## - 60% de CO<sub>2</sub>, optimisation libre



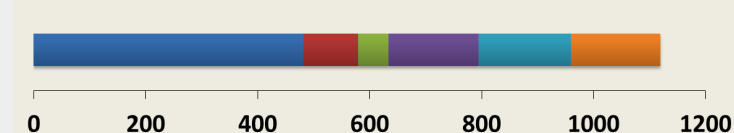
## - 75% de CO<sub>2</sub>, optimisation libre



## - 85% de CO<sub>2</sub>, optimisation libre



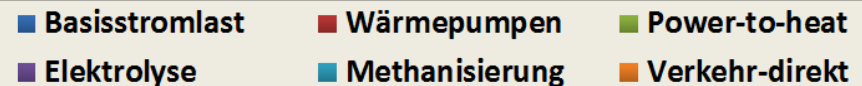
## - 90% de CO<sub>2</sub>, optimisation libre



- La consommation d'électricité augmente significativement avec les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (env. 650 TWh à - 60% ; env. 1150 TWh à - 90%)

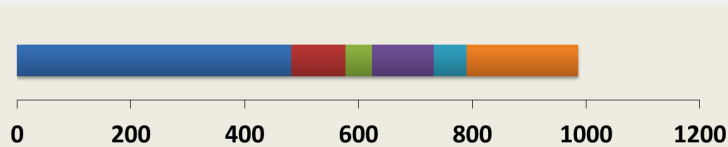
### Couplage des secteurs

- D'abord principalement par l'utilisation directe de l'électricité (pompes à chaleur, utilisation directe pour le transport)
- Pour des objectifs supérieurs de réduction du CO<sub>2</sub>, recours accru à l'hydrogène (utilisation directe et conversion en power-to-fuel) et au power-to-gas

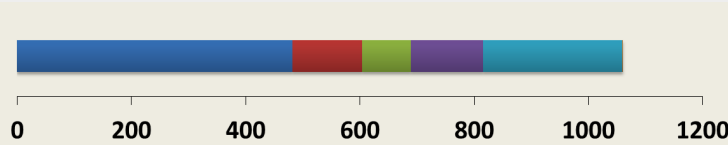


# Résultats centraux – Consommation d'électricité en 2050

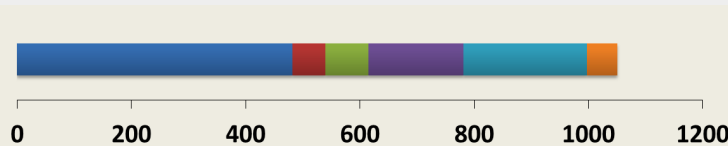
## - 85% de CO<sub>2</sub>, optimisation libre



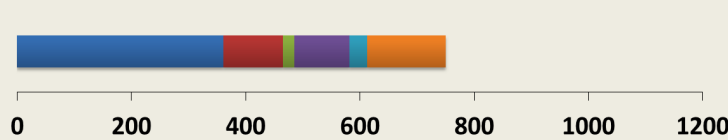
## - 85% de CO<sub>2</sub>, hydrogène



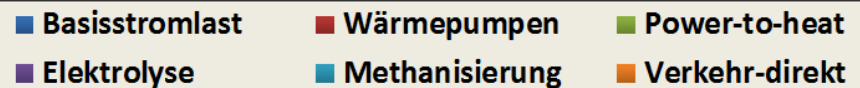
## - 85% de CO<sub>2</sub>, power-to-gas/fuel



## - 85% de CO<sub>2</sub>, réduction de la

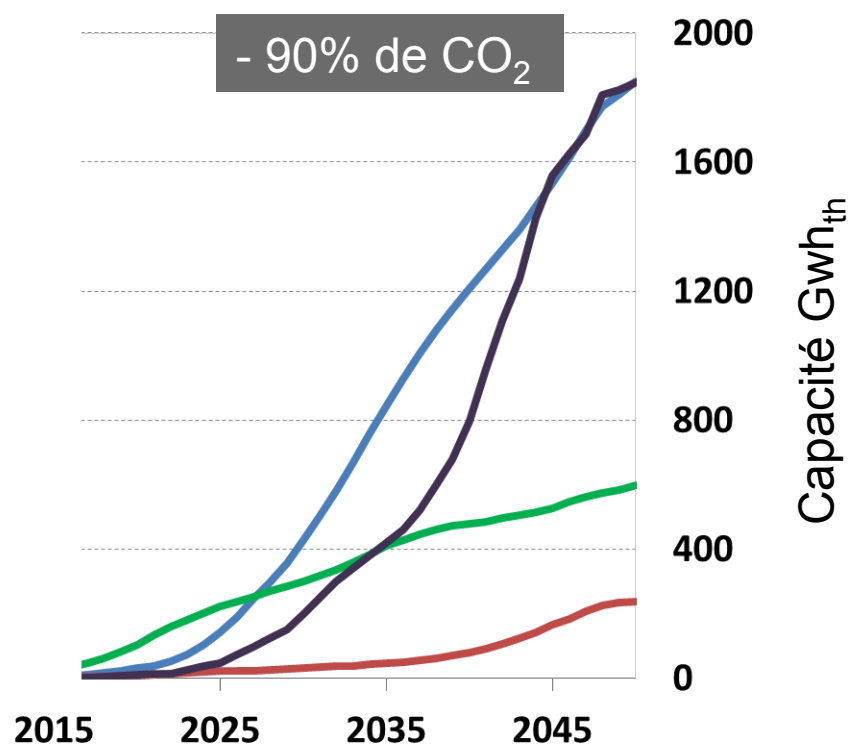
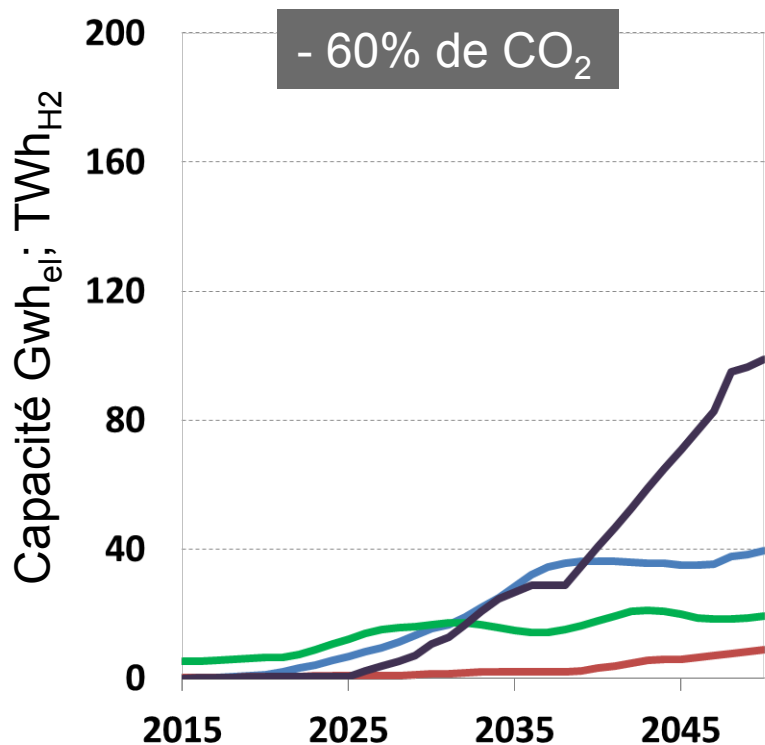


- Utilisation de l'électricité autour de 1000 TWh sauf en conditions limites « modérées » (environ 750 TWh)
- Environ 50% de l'électricité produite est absorbée grâce aux technologies de couplage des secteurs
- En conditions « modérées », l'utilisation directe de l'électricité prime sur la conversion en H<sub>2</sub> et le power-to-gas/fuel



# Résultats centraux – Développement des accumulateurs d'énergie

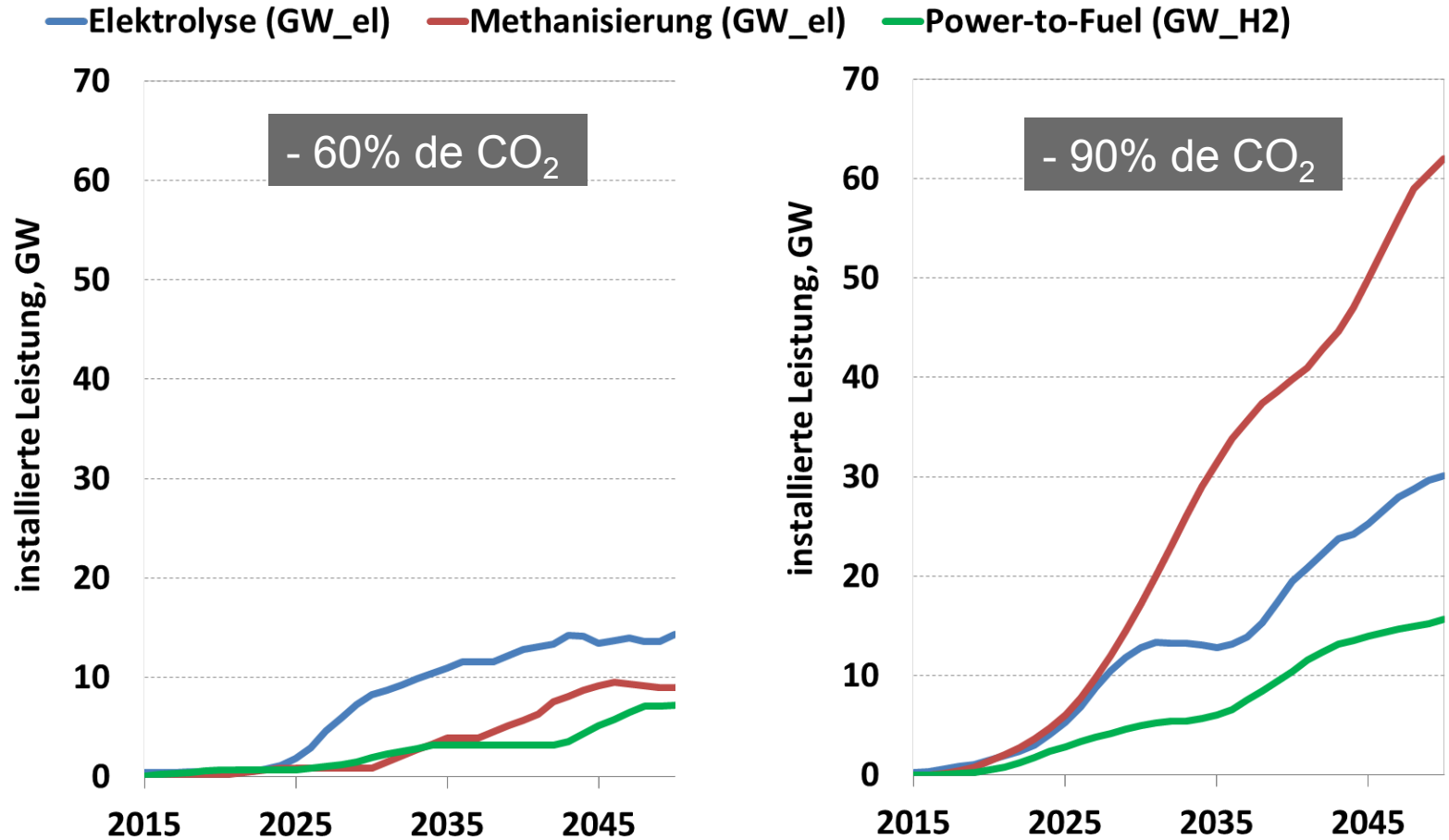
- stat. Batteriespeicher (GWh<sub>el</sub>)
- Th. Speicher Einzelgebäude (GWh<sub>th</sub>)
- H2-Speicher (TWh<sub>H2</sub>)
- Th. Speicher Wärmenetze (GWh<sub>th</sub>)



■ Besoins de stockage à partir de 2025

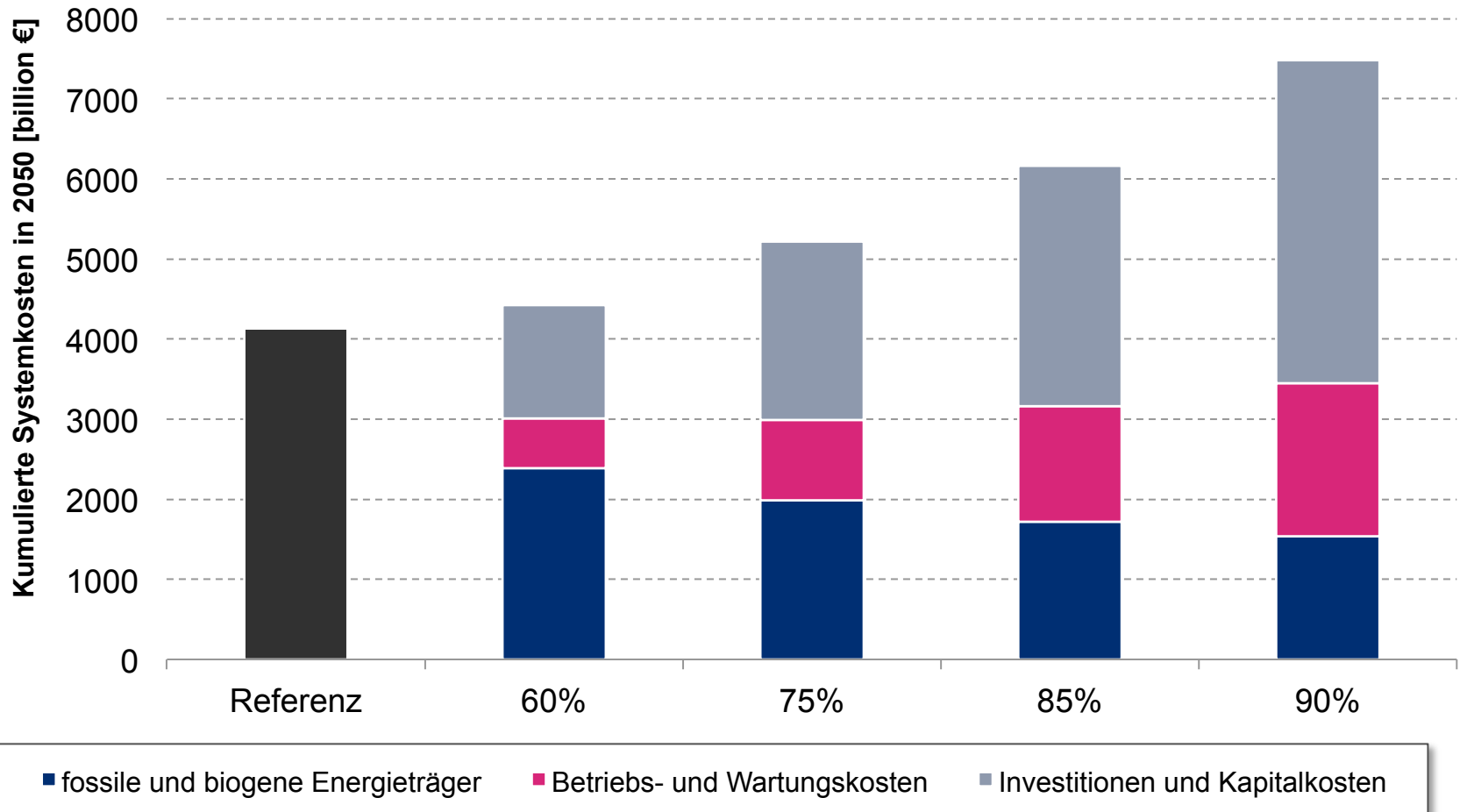


# Résultats centraux – Développement des techniques power-to-gas/fuel



■ Besoins de stockage à partir de 2025

# Résultats centraux – Coûts des systèmes



■ Un surcoût annuel de l'ordre de 1 à 2% du PIB actuel est possible

# Conclusion (intermédiaire)

- Des objectifs climatiques ambitieux nécessiteront probablement un fort **développement des installations de production d'énergie renouvelable** (photovoltaïque, éolien).
- Dans le même temps, un **parc souple de centrales électriques** est nécessaire (mais : peu d'heures à pleine charge)
- Un surcoût annuel de l'ordre de **1 à 2% du PIB actuel** est possible
- Même avec une réduction de 60% des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie, le **couplage des secteurs** représente déjà un élément essentiel de la solution système
  - D'abord l'**utilisation directe de l'électricité** (pompes à chaleur, power-to-heat, batteries/moteurs électriques dans les voitures) prédomine
  - Mais, même avec une réduction de 60%, des **solutions de stockage à long terme** sont nécessaires
- Des **instruments réglementaires** sont nécessaires pour répondre aux exigences (effet d'incitation intersectoriel, « équité »)

## Attention :

- Les questions d'**acceptation sociale** peuvent jouer un rôle décisif
- La longévité technique de certains composants peut entraîner des « **effets de lock-in** »

# Report sur la Suisse I

## Renouvelable ?, souplesse ?, acceptation ?

- Objectifs de réduction des GES par rapport à 1990
  - - 20% jusqu'en 2020
  - - 50% jusqu'en 2050
  - Abandon de l'énergie nucléaire d'ici 2050
- Part des énergies renouvelables
  - 64% de la consommation d'électricité
  - 22% de la consommation d'énergie finale
- Souplesse
  - Déjà assurée par les centrales de pompage-turbinage
  - Mais : balance du commerce extérieur négative en 2016
  - À quoi servent les centrales à accumulation par pompage et les lacs d'accumulation ?

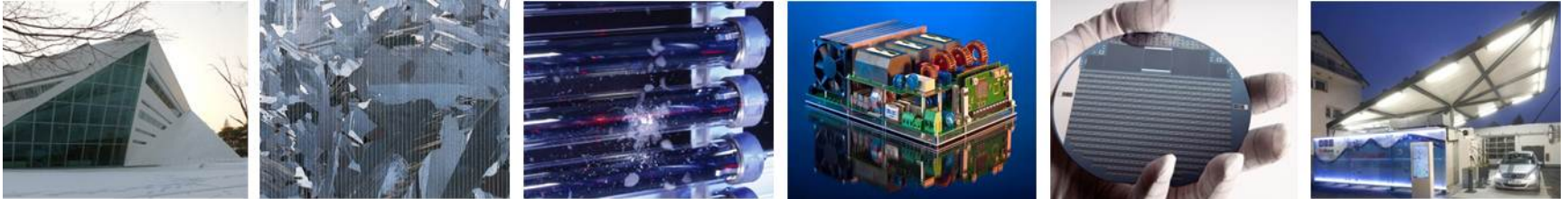
# Report sur la Suisse II

## Renouvelable ?, souplesse ?, acceptation ?

- Couplage des secteurs
  - Certainement pertinent pour la décarbonation de tous les secteurs
  - Utilisation du power-to-heat et du power-to-gas, avant tout dans les régions municipales
  - Peut améliorer l'acceptation
- Coût de la transformation de l'approvisionnement énergétique
  - Possibilités de rendement actuellement limitées en Suisse pour les centrales de pompage-turbinage
  - Utilisation de la Suisse comme centrale à accumulation pour les énergies renouvelables étrangères ?

# Merci de votre attention !

Photos © Fraunhofer ISE



**Source** : Ausfelder et al. : Couplage des secteurs - Considérations et réflexions sur le développement d'un système énergétique intégré (en allemand : Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017). ISBN : 978-3-9817048-9-1.

Institut de recherche sur les systèmes énergétiques solaires Fraunhofer ISE

Dr. Niklas Hartmann

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

[niklas.hartmann@ise.fraunhofer.de](mailto:niklas.hartmann@ise.fraunhofer.de)

14