

$$\frac{1}{\alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} invcost_i(t) \cdot I_i(t) + \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}}$$

$$\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_{i \in PRC} varom_i(t)$$

$$\sum_{i \in EELAZEZ} \sum_{j \in YEY} varom_i(t) \cdot P_{ij}(t)$$

$$\sum_{i \in ENCS} \sum_{j \in S} com_i(t) \cdot IMP_{kj}(t)$$

$$\sum_{i \in ENCS} \sum_{j \in S} com_i(t) \cdot IMP_{kj}(t)$$

$$price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

$$price_{ELCS}(t) \cdot EXP_{ELCS}(t)$$

Exercices de prospective à long terme du système électrique réunionnais

Sandrine SELOSSE

MINES ParisTech – Centre de Mathématiques Appliquées
Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Olivia RICCI et Sabine GARABEDIAN

Université de la Réunion - CEMOI

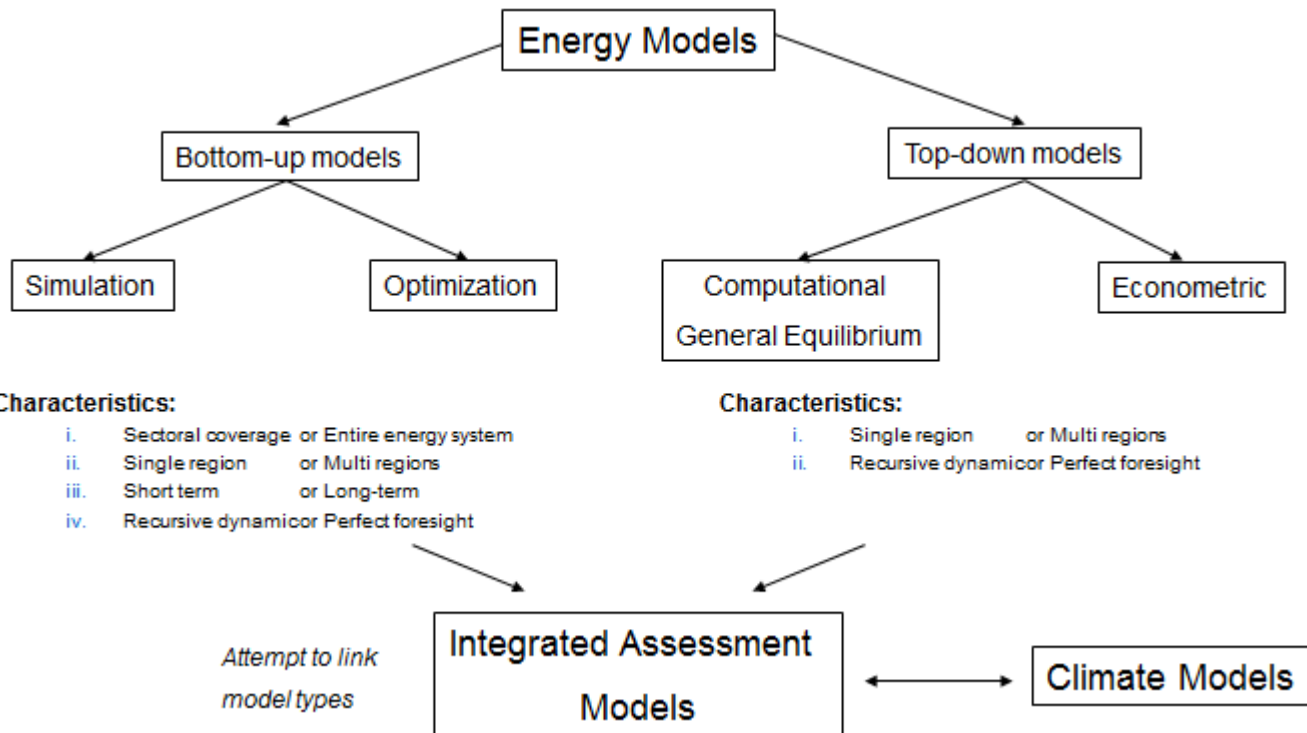
26 octobre 2017

TRANSEETER
Université de la Réunion – PIMENT-CEMOI

La modélisation prospective

Outil qui a pour ambition d'explorer et d'interroger le futur, **sans chercher à le prédire**, à partir de la connaissance du présent et du passé, et de ce qu'on pourrait envisager pour l'avenir

Eclairer pour demain les conséquences des décisions et des choix d'aujourd'hui



Modélisation prospective sous TIMES

- ETSAP (*Energy Technology Systems Analysis Program*) de l'AIE
- TIMES, un générateur de modèles : tous les modèles TIMES mettent en œuvre une structure mathématique identique
- Programmation linéaire
- Fonction objectif : minimisation du coût total actualisé du système (local, national, multirégional) sur un horizon temporel
 - avec comme données les caractéristiques du système (technologies, disponibilité des ressources)
 - Satisfaisant une demande de services (tonnes à produire, distances parcourues en véhicule, logements à chauffer, etc.)
 - Sous diverses contraintes (limites de GES, % d'EnR, etc.)
- Equilibre partiel: uniquement les secteurs de l'énergie (et matières premières), les impacts macro ne sont pas pris en compte dans le détail

Modèle bottom-up technologique

- Représentation du système
 - orientée vers l'analyse d'activités
 - très désagrégée où les différents processus technologiques y sont représentés explicitement
- Structure du modèle : système énergétique de référence
 - Riche en technologies conformément à l'analyse d'activités
 - Base de données technologiques du système dans son ensemble (extraction, production, transformation, échanges, usages)
 - Paramètres technico-économiques pour chaque technologie (coût, efficacité, durée de vie, émissions, etc.)

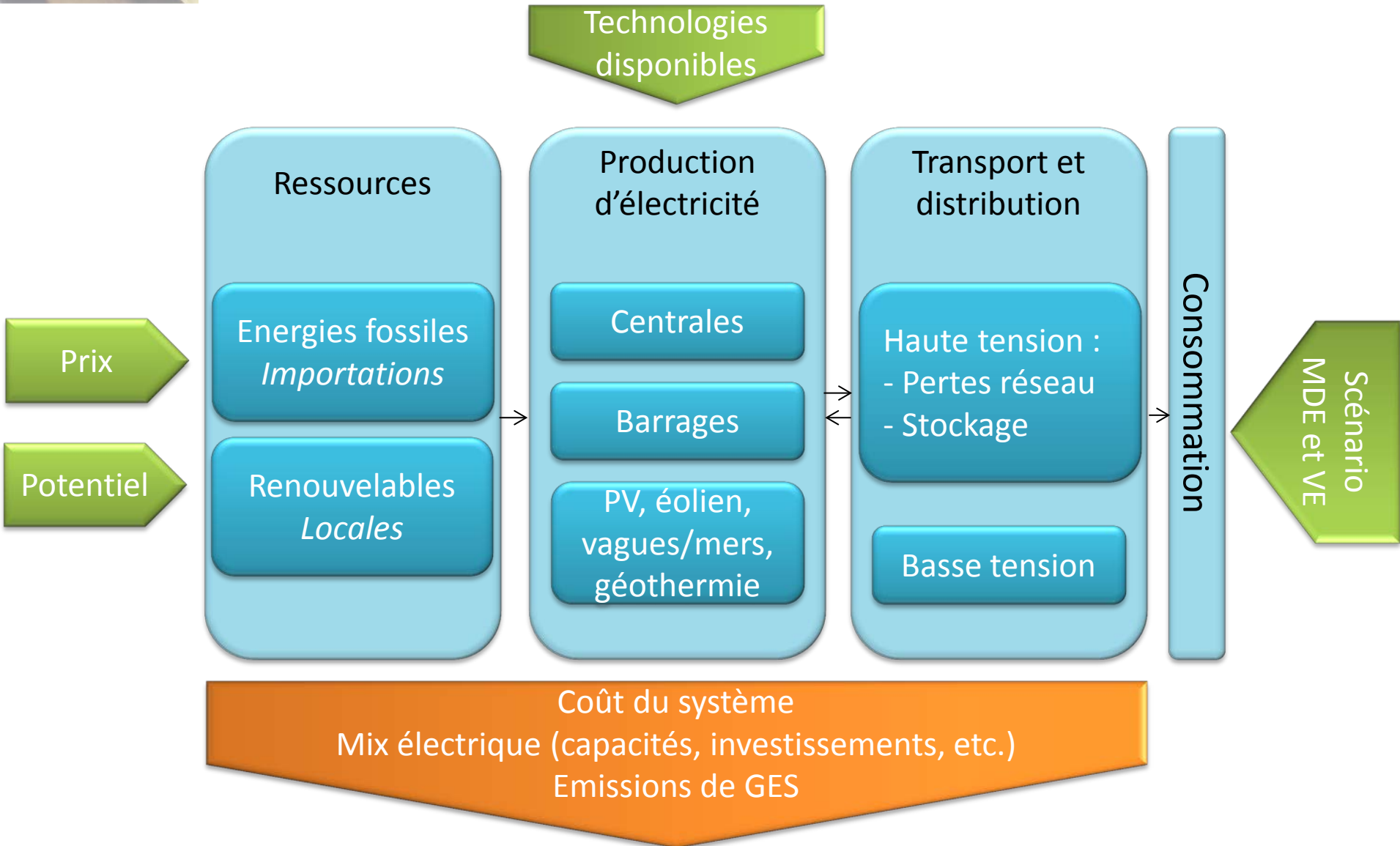
Le modèle réunionnais

- Système insulaire et isolé, faiblement maillé
- Potentiels d'énergies renouvelables élevés
- Objectif 100% renouvelables en 2030

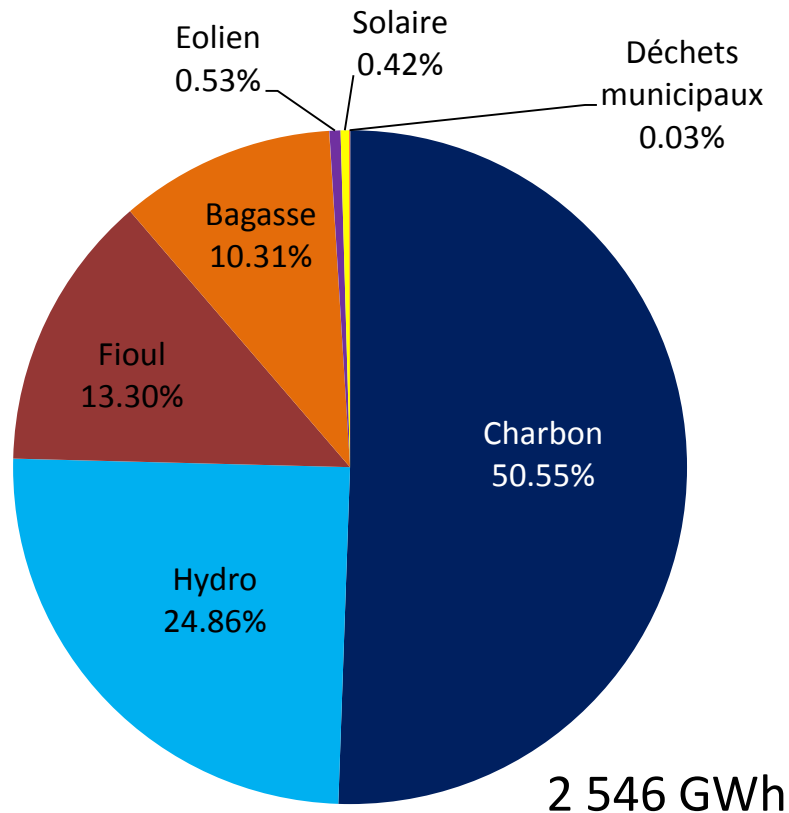


*Conception
du modèle :
Travail de
thèse de
Mathilde
DROUINEAU*

Modélisation du système électrique réunionnais



La production électrique en 2008



Source: BPPI – EDF SEI 2009

Capacités installées

- Centrales thermiques (76%)
 - 476 MW
 - Charbon, fioul, bagasse
- Hydroélectricité (20%)
 - Barrages: 109.4 MW
 - Au fil de l'eau: 11.6 MW
- Autres installations (4%)
 - Eolien: 16.8 MW
 - Solaire: 10 MW
 - Déchets municipaux: 2 MW

Résultats – Confrontation pour 2008

Sources d'énergie	Modèle (%)	EDF (%)
Charbon	14.97	50.55
Bagasse		10.31
Charbon-Bagasse	45.34	
Fioul	12.62	13.30
Hydro	21.87	24.86
Eolien	1.16	0.53
Solaire	0.43	0.42
Déchets municipaux	0.62	0.03
Production	2 545.7 GWh	2 546 GWh

Les potentiels renouvelables

Sources d'énergie	Niveau actuel	Potentiels
Biomasse	260 GWh*	400 GWh*
Hydro	121 MW 553 GWh*	177 MW (jusque 2012) 268 MW (après)
Eolien	16.8 MW	50 MW
Solaire PV	10 MW	160 MW
Thermique des mers		10 MW en 2020 100 MW en 2030
Energie des vagues		30 MW
Géothermie		30 MW
Capacités de stockage		1 MW en 2009 10 MW

Spécification des scénarios : Exercices de prospective autour de l'objectif des 100% d'EnR en 2030

Scénarios	Spécificités		
100ENR	Potentiels EnR Max 100% EnR		Déploiement solaire minimal dès 2020 – 300 MW
PV-OCE			Plus de solaire (700 MW) et d'énergie marine (150 MW)
Rupture			Plus de géothermie et 100% canne-énergie

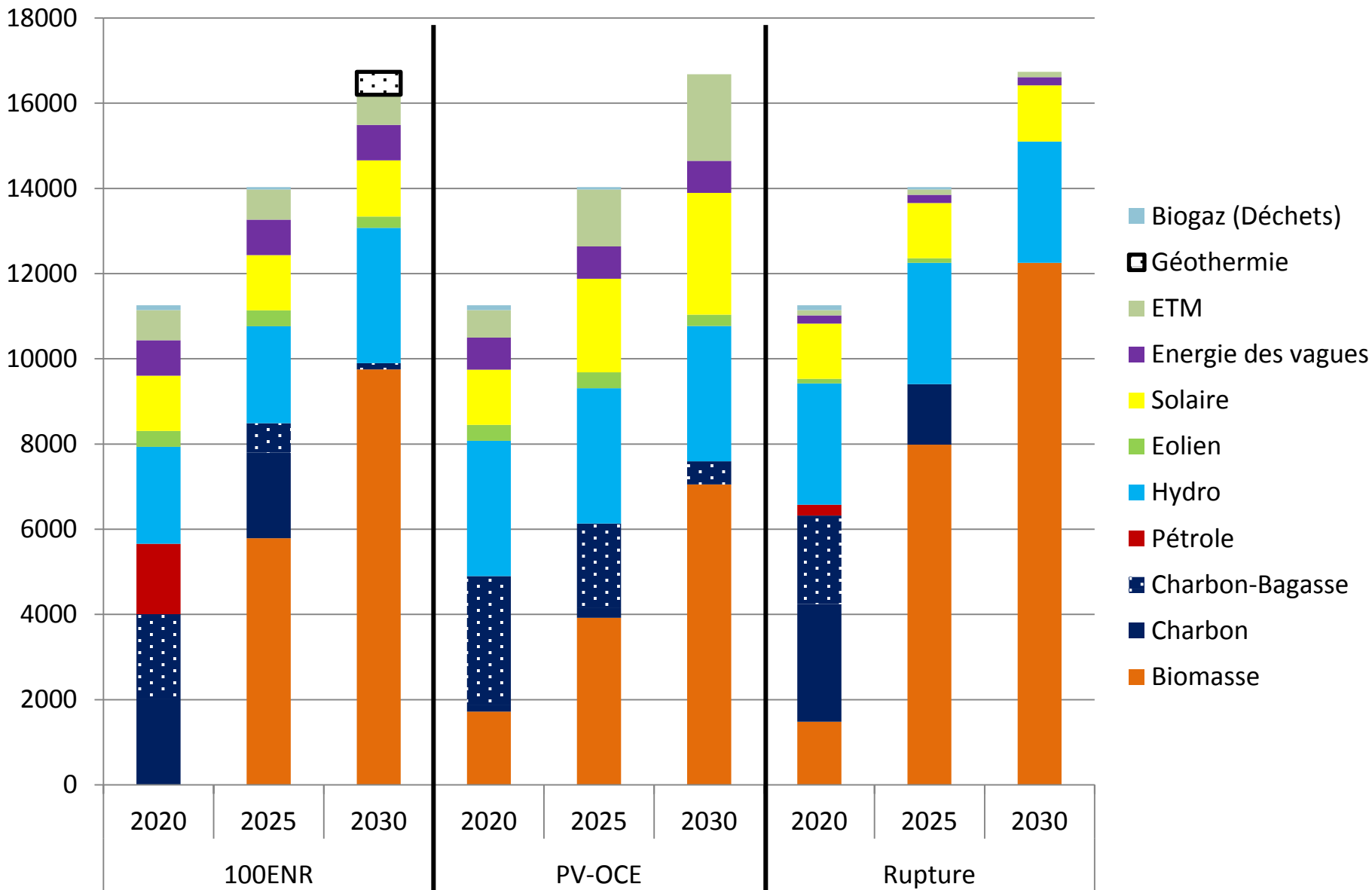
Evolution de la demande

- Scénario MDE renforcée
- Développement du véhicule électrique

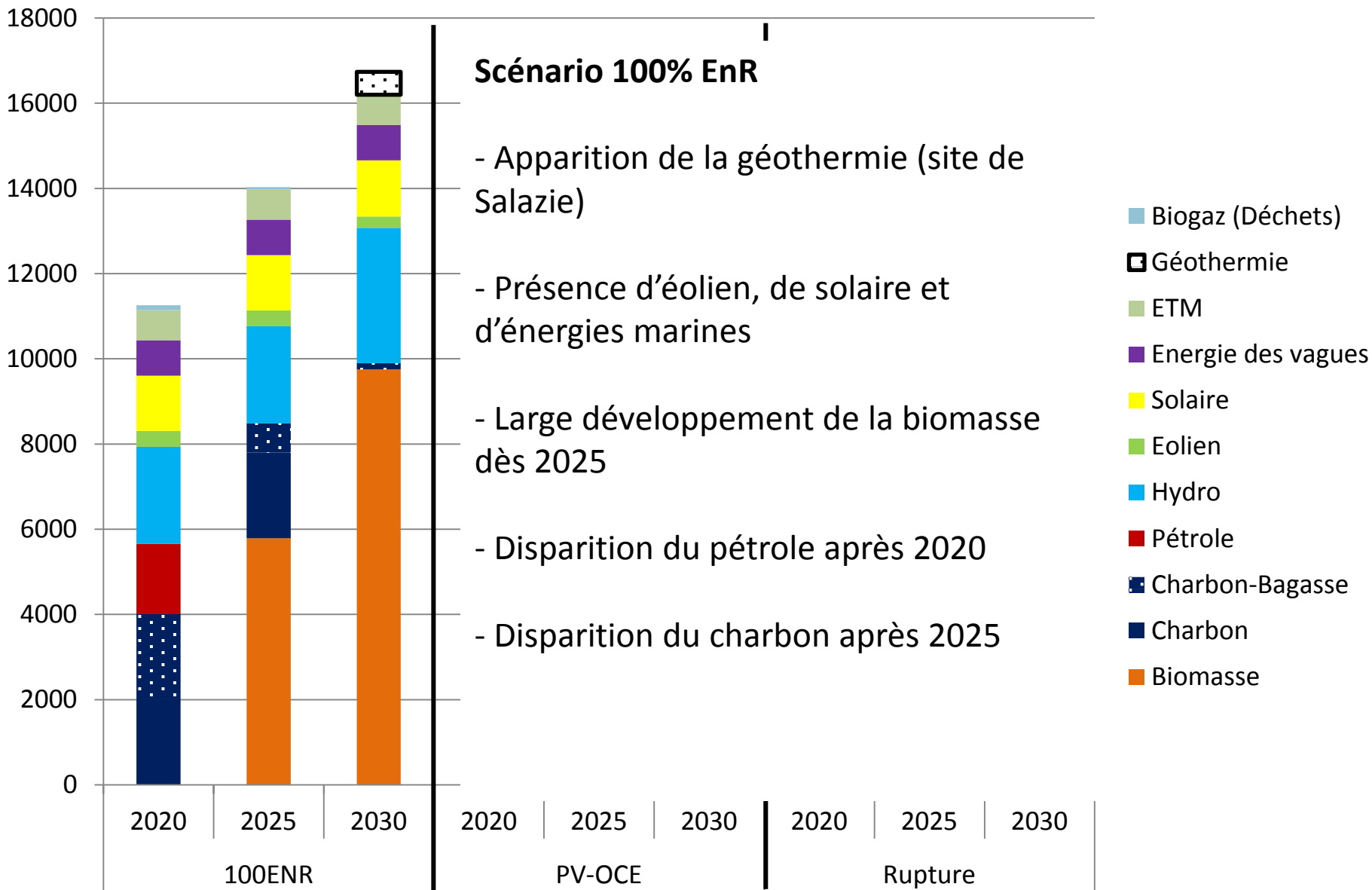
Evolution de la demande

Scénario	2008	2010	2015	2020	2025	2030
Médian						
Electricité livrée (GWh)	2546	2710	3110	3500	3805	4100
Electricité consommée (GWh)	2318	2467	2831	3187	3464	3732
TCAM (%)		3,2	2,8	2,4	1,7	1,5
Puissance de pointe (MW)	408	445	520	595	670	750
TCAM – puissance (%)		4,4	3,2	2,7	2,4	2,3
MDE - Renforcée						
Electricité livrée (GWh)	2546	2705	3020	3130	3200	3248
Electricité consommée (GWh)	2318	2463	2750	2850	2913	2957
TCAM (%)		3,1	2,2	0,7	0,4	0,3
Puissance de pointe (MW)	408	435	480	521	560	596
TCAM – puissance (%)		3,3	2	1,7	1,5	1,3
Véhicules électriques						
Electricité livrée (GWh)				0		1400

Production d'électricité (TJ) : Modification des modes de production actuels pour tendre vers un système capable de répondre aux défis énergétiques



Production d'électricité (TJ) : Modification des modes de production actuels pour tendre vers un système capable de répondre aux défis énergétiques



Production d'électricité (TJ) : Modification des modes de production actuels pour tendre vers un système capable de répondre aux défis énergétiques

18000

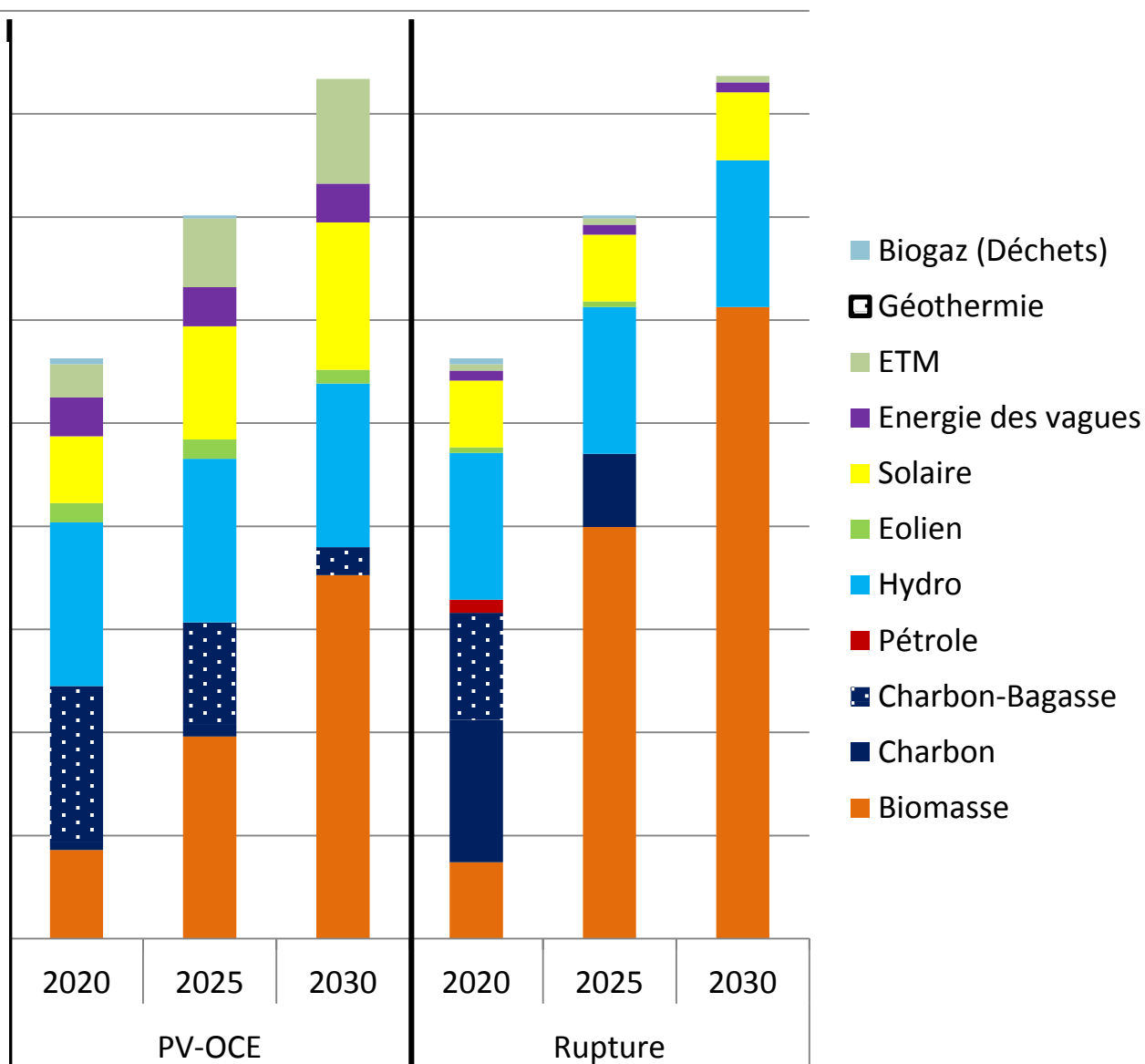
Scénario PV-OCE

- Mix à 50% ENR après 2015

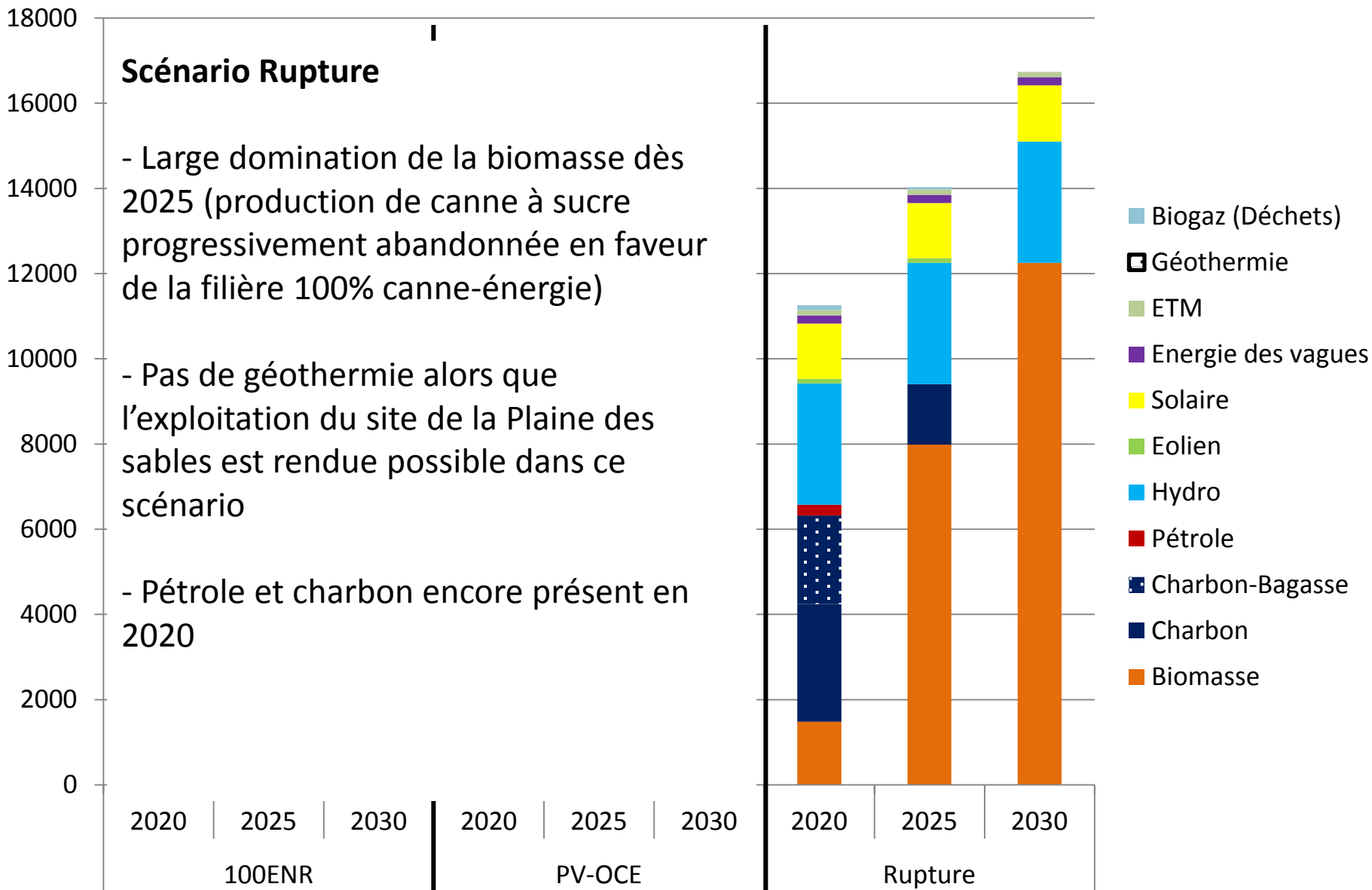
- Large développement de la biomasse dès 2020 (nouvelle variété de cannes à sucre + canne-énergie)

- Déploiement plus important du solaire et ETM (30% du mix)

- Eoliennes (non remplacées) disparaissent car moins compétitives face aux investissements contraints dans les autres EnR



Production d'électricité (TJ) : Modification des modes de production actuels pour tendre vers un système capable de répondre aux défis énergétiques

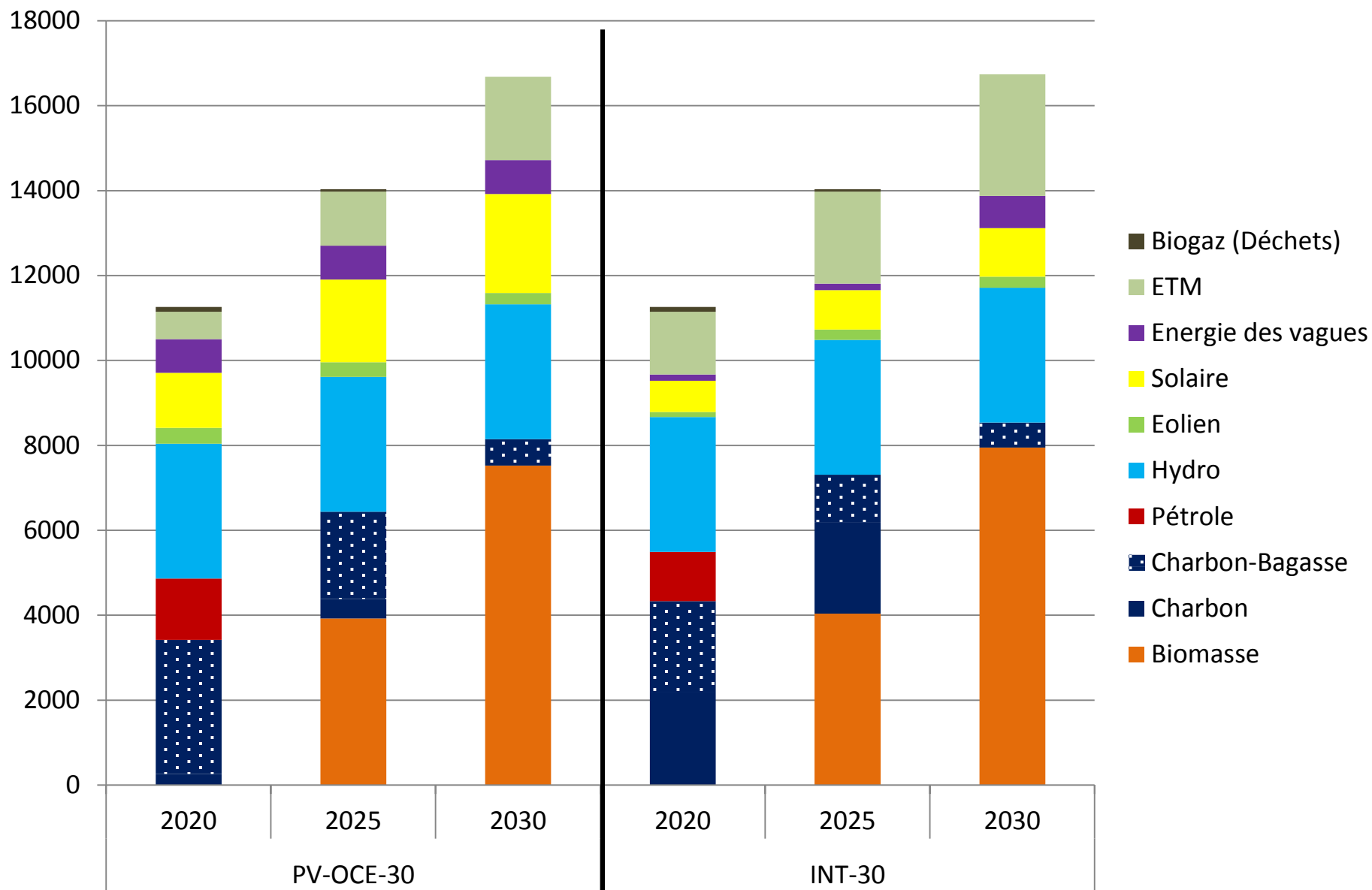


Gestion de l'intermittence

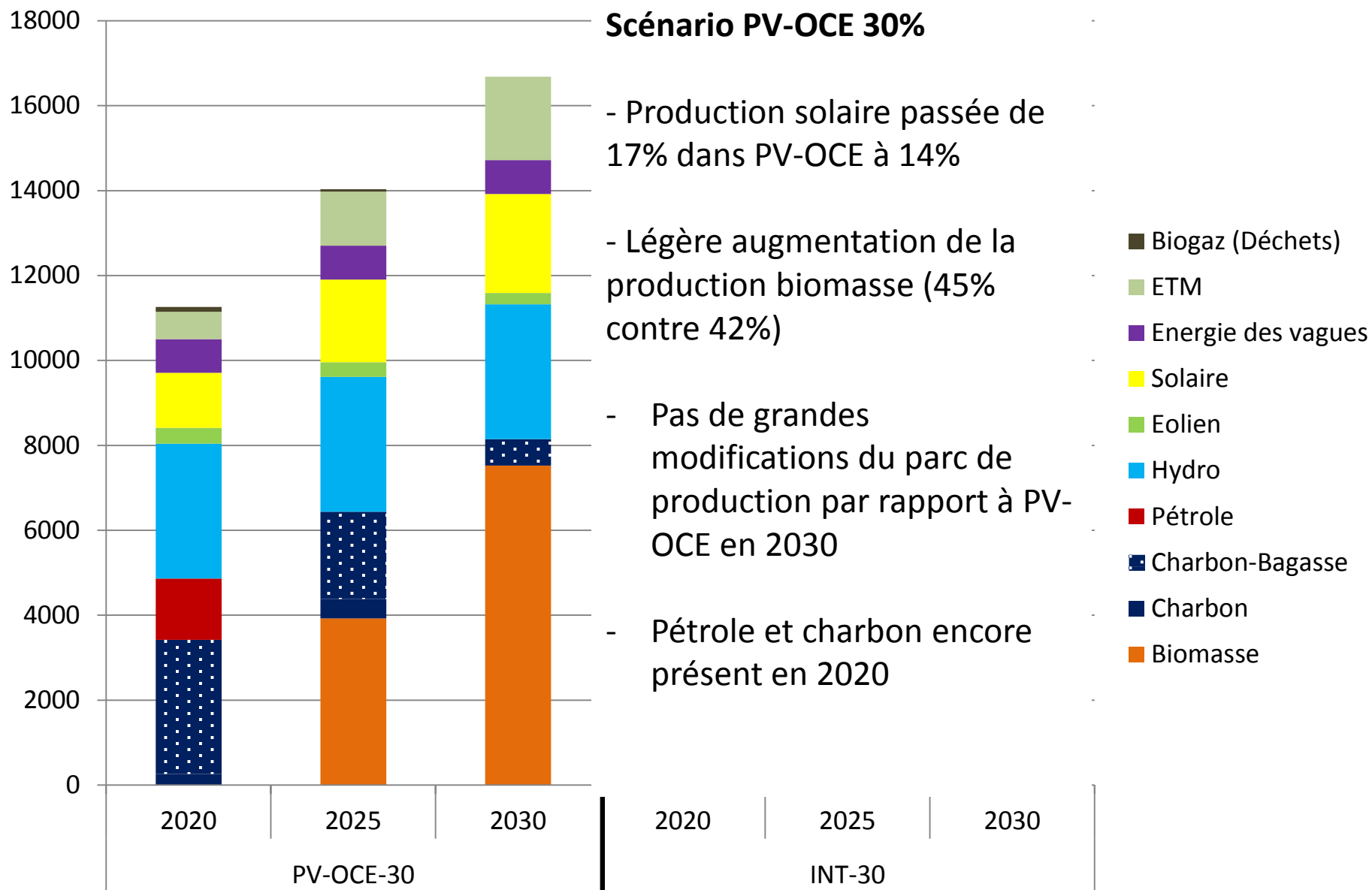
Scénarios	Spécificités		
100ENR	Potentiels EnR Max	100% EnR	Déploiement solaire minimal dès 2020 – 300 MW
PV-OCE			Plus de solaire (700 MW) et d'énergie marine (150 MW)
Rupture			Plus de géothermie et 100% canne-énergie
PV-OCE 30%			PV-OCE + Règle des 30 % d'exploitation du système électrique
INT 30%			Règle des 30 % + contrainte solaire plus cohérente avec la règle d'exploitation (175 MW en 2020 et 260 en 2030, selon EDF)

Dans les deux scénarios, développement élevé des énergies marines conservé (≥ 100 MW pour ETM et ≥ 50 MW pour Energie des vagues)

Production d'électricité (TJ) : Gestion de l'intermittence



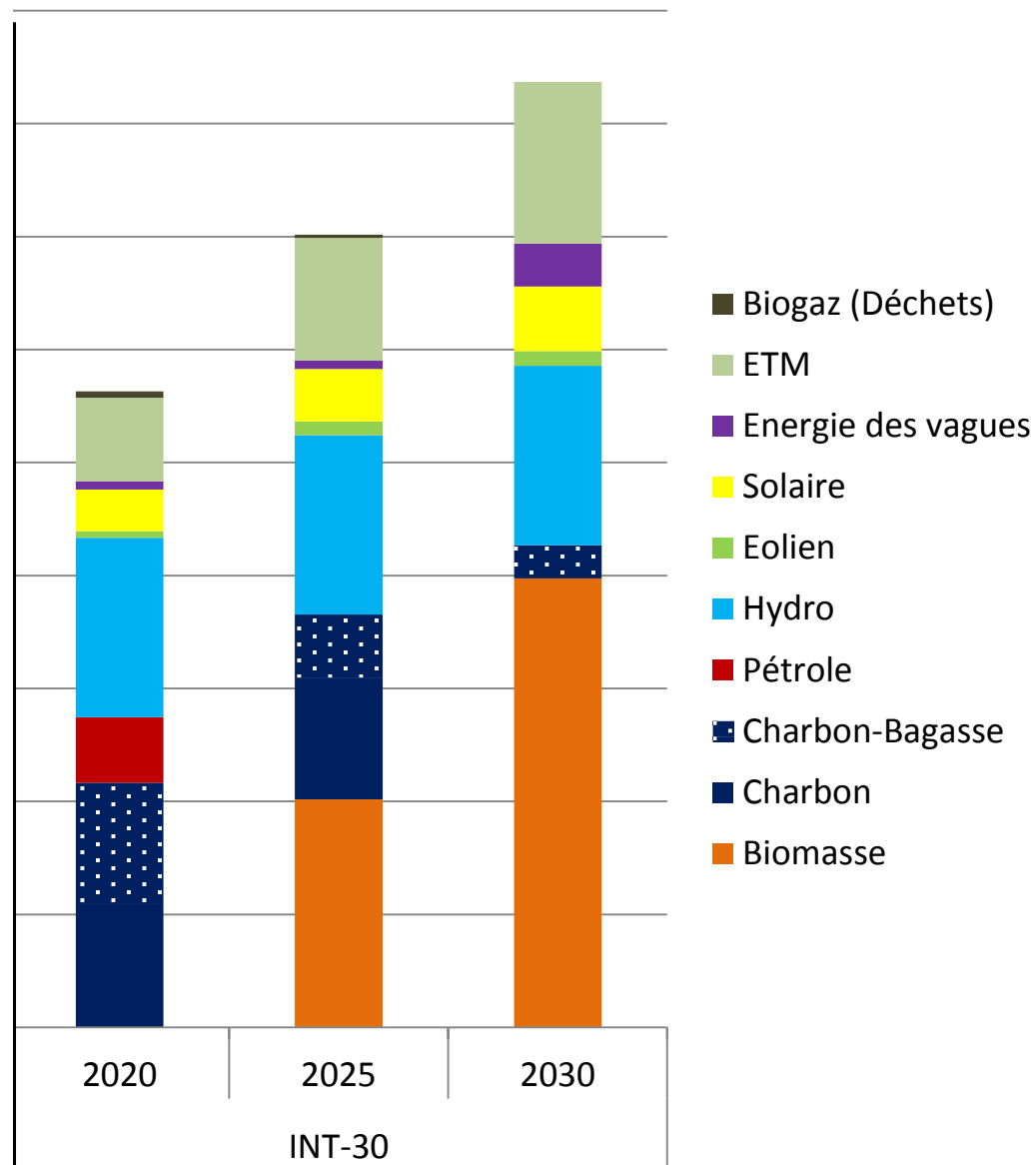
Production d'électricité (TJ) : Gestion de l'intermittence



Production d'électricité (TJ) : Gestion de l'intermittence

Scénario INT-30

- Production solaire représentant 7% et celle de la biomasse près de 48%
- Mix électrique plus impacté en raison de la limitation du solaire
- Recours plus important au centrale thermique : charbon et biomasse
- Développement plus important de ETM
- Pétrole en 2020
- Charbon en 2025



Challenges d'une transition énergétique et de l'autonomie des territoires

- Modes de production de l'électricité face aux défis énergétiques
 - Quels modes privilégier ?
 - Quand investir ?
 - Conception des politiques énergétiques (mesures incitatives)
 - Maîtrise de la demande électrique (incluant la gestion de la pointe)
- Forte participation d'énergies renouvelables et notamment de production variable
 - Fiabilité de l'approvisionnement en électricité: la capacité du système à résister à des perturbations soudaines
 - Intermittence et capacités de stockage
 - Technologies et infrastructures coûteuses
- Architecture moins hiérarchisée des systèmes électriques
 - Développement de moyens décentralisés
 - Gestion plus efficace et concertée de la demande et des moyens de production
- Recours massif de la biomasse
 - Quels potentiels de la biomasse? Utilisation soutenable.
 - Quels types de biomasse? Avenir des filières.
 - Quid de la valorisation énergétique des déchets?



Merci pour votre attention!



Annexes

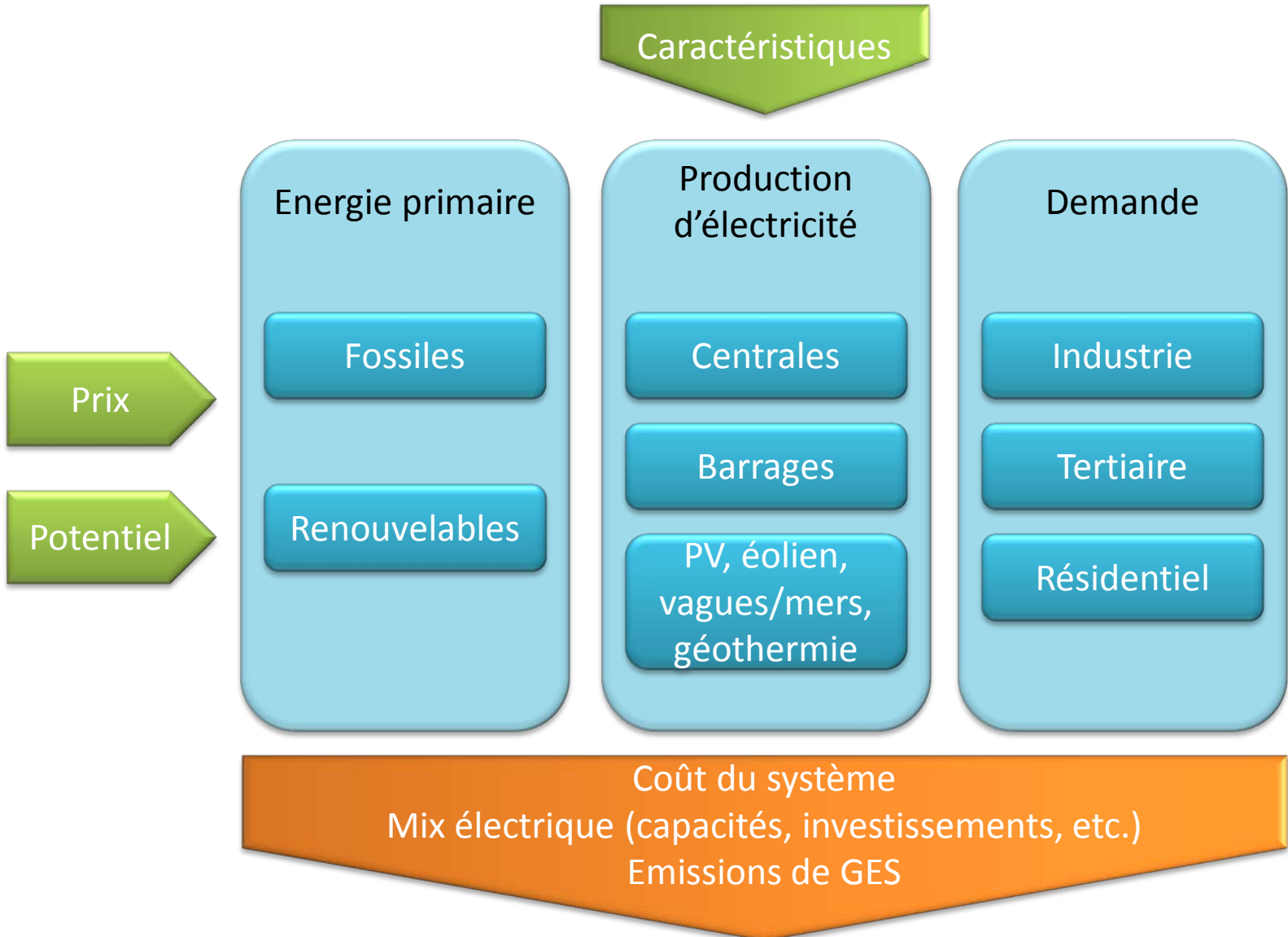
« La loi de causalité nous dit que si nous connaissons le présent, nous pouvons prédire le futur. Mais prenons garde, dans cette formulation, ce n'est pas la conséquence qui est fautive, c'est la prémisse. Car par principe, nous ne pouvons pas connaître tous les éléments qui caractérisent le présent. »

Heisenberg, 1969, « Der Teil und das Ganze » (La partie et le tout)

Sources: *Futuribles*, n°376, juillet-août 2011
N. Bret-Rouzaut, IFP school, 2011

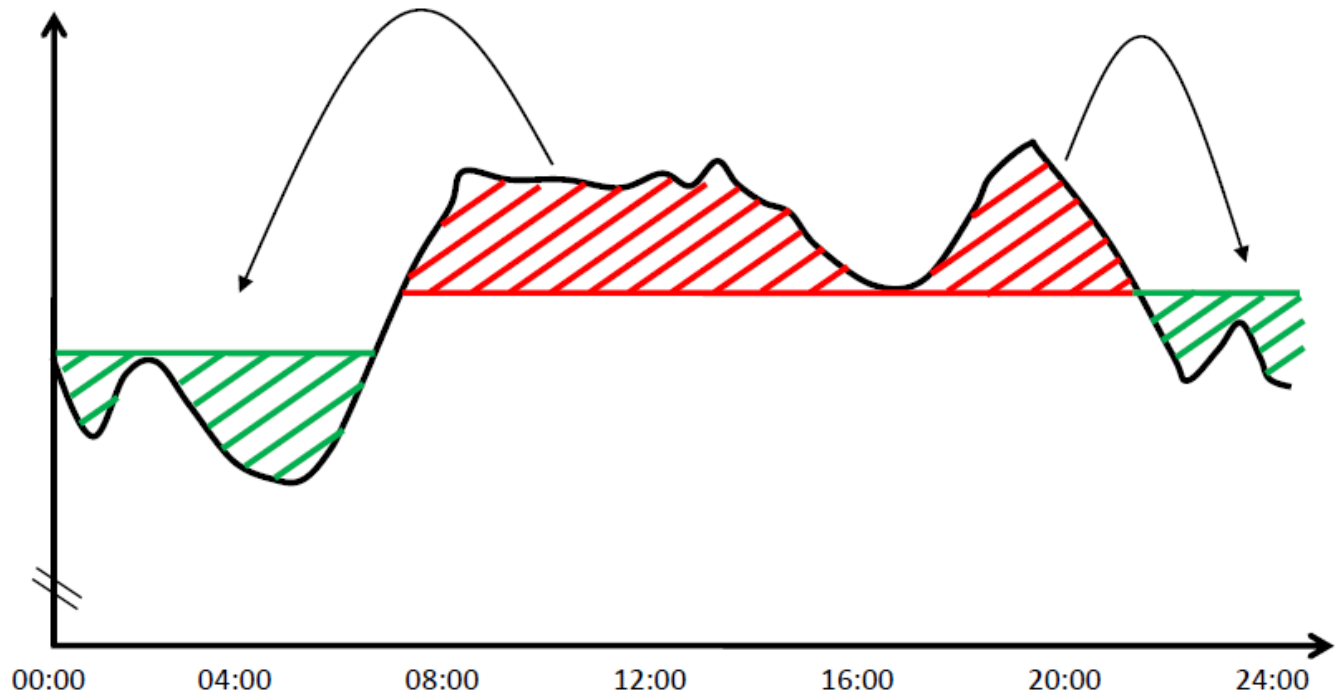
Modélisation du système électrique réunionnais

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in EEL} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var_i$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s cost_k$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price$$



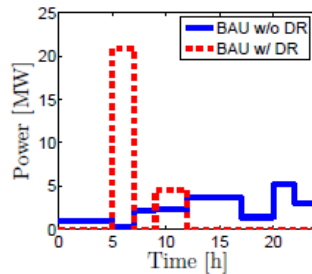
Etes-vous prêts à vous effacer?

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$
$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$
$$+ \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var_i$$
$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s co$$
$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$
$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y}$$

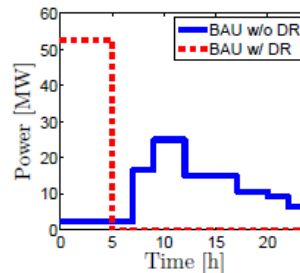


Courbes de charge – 4 usages

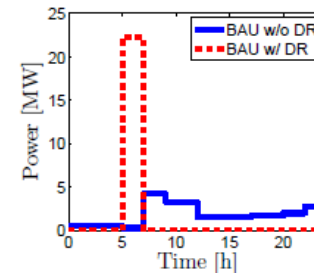
Lave-vaisselle



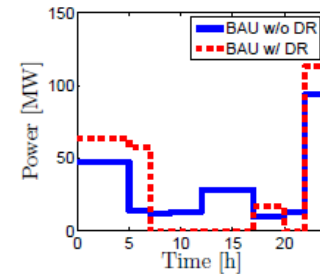
Machine à laver



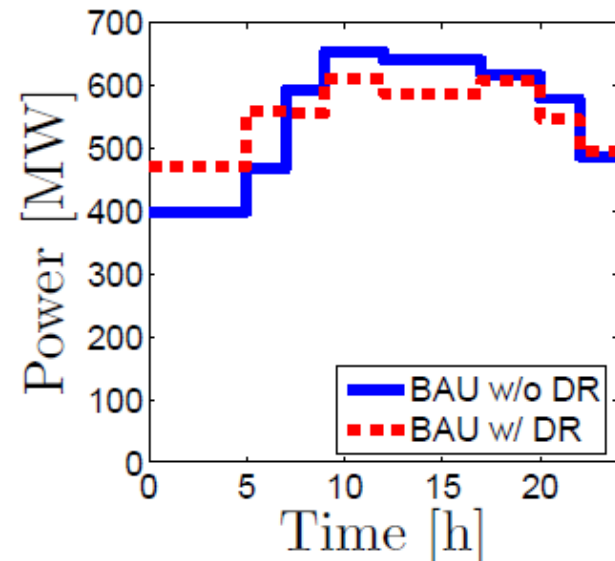
Sèche-linge



Chauffe-eau



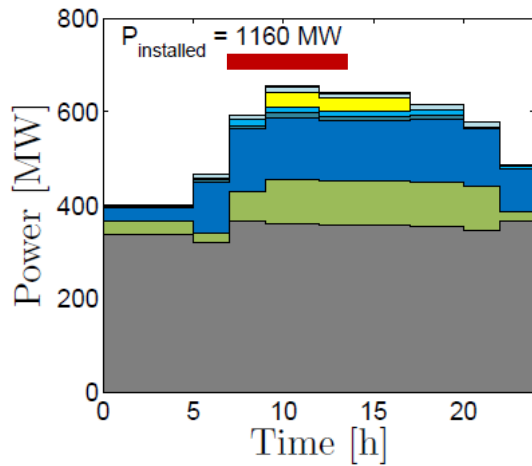
Demande totale



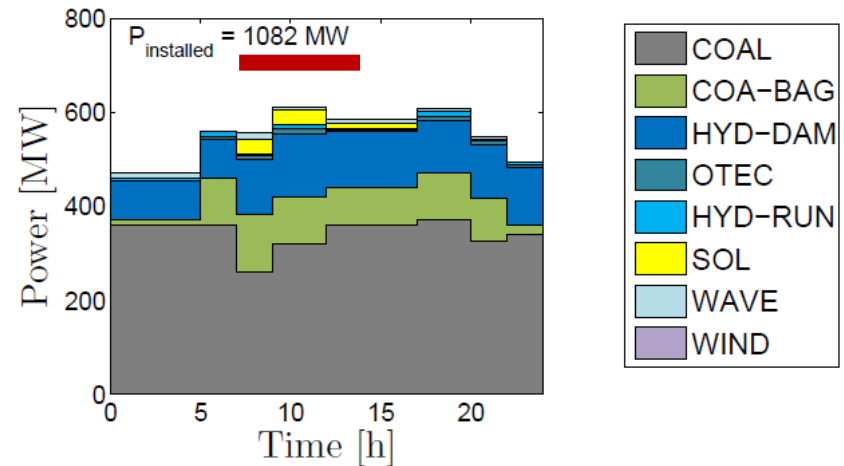
Décalage
et report
d'usages
d'appareils
électriques



Sans Demand Response



Avec Demand Response



Mix de production d'électricité d'un jour typique d'été en 2030 (BAU)

Mais quel apport ?

Gestion de la pointe

Meilleur usage du mix électrique

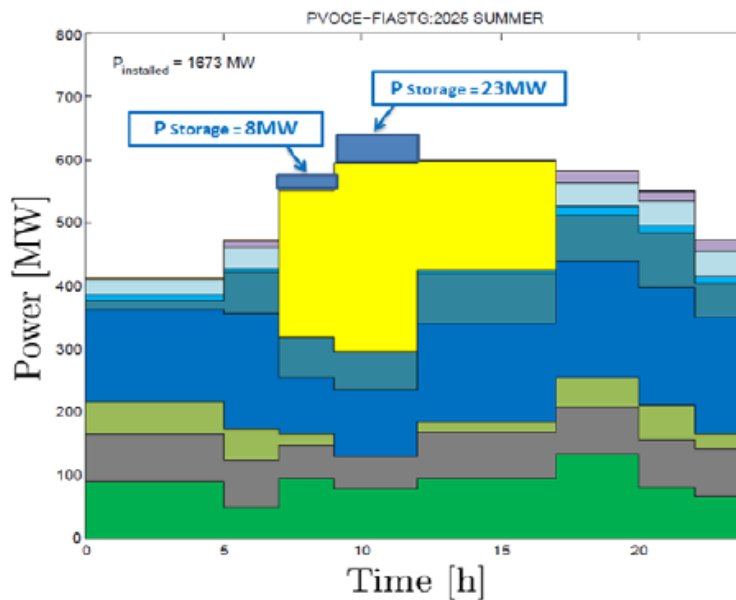
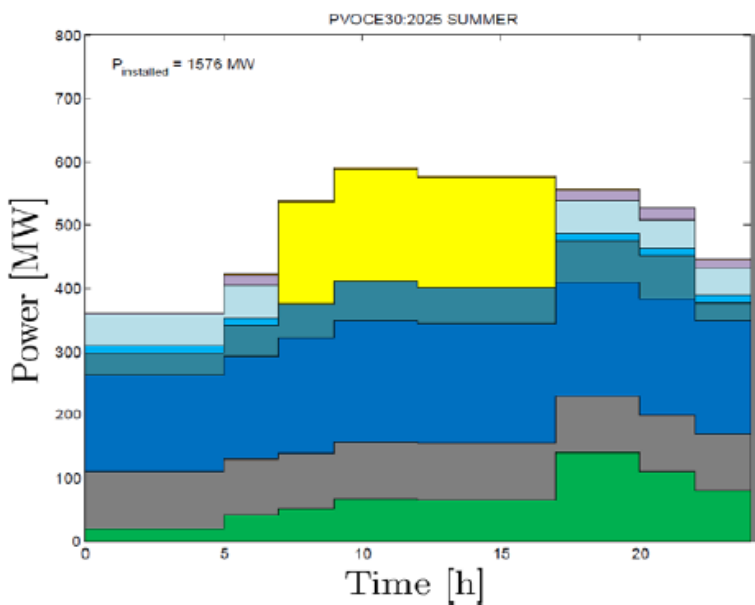
Moins de capacités installées

Implémentation massive d'énergie intermittente sous contrainte de fiabilité avec intégration de technologies de stockage

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

Mix de production journalière, été 2025



La production intermittente atteint 50% avec stockage

Prévision

de consommation d'énergie

Projection la plus probable
pour un contexte donné

Horizon court terme

Modèle mathématique :
donnée de départ + tendances
(+x?)

But opérationnel (décision
d'investissement)

Prospective

Mise en perspective, valeurs
relatives (BAU)

Horizon de plus long terme

Scénarios pouvant intégrer des
ruptures

Réalité future supposée
encadrée par des scénarios
extrêmes

Modèle mathématique
possible, « histoire qu'on
raconte »

Études exploratoires répondant
à une question type « **Si on
prend telle décision, quels sont
les impacts énergétiques ?** »

Deux visions du futur pour deux contextes différents

Prévision : Approche extrapolatoire

Extrapoler les tendances et étudier leurs interactions

Du présent vers le futur

Présent = ce qui suit le passé

Analyse statistique

PRESENT

FUTUR

Prospective : Approche exploratoire

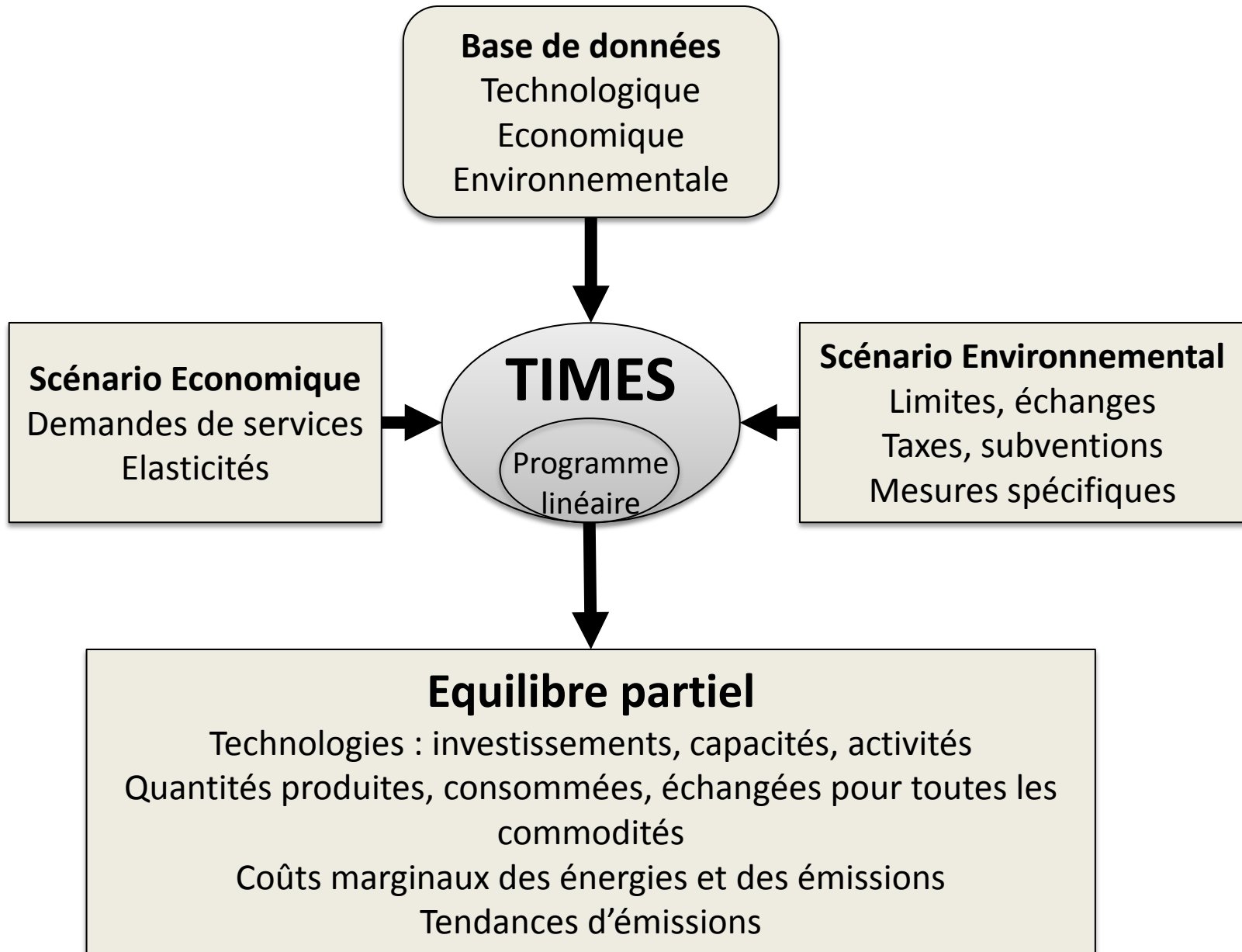
Explorer l'évolution du contexte et étudier les possibilités d'adaptation

Du futur vers le présent

Présent = ce qui précède le futur

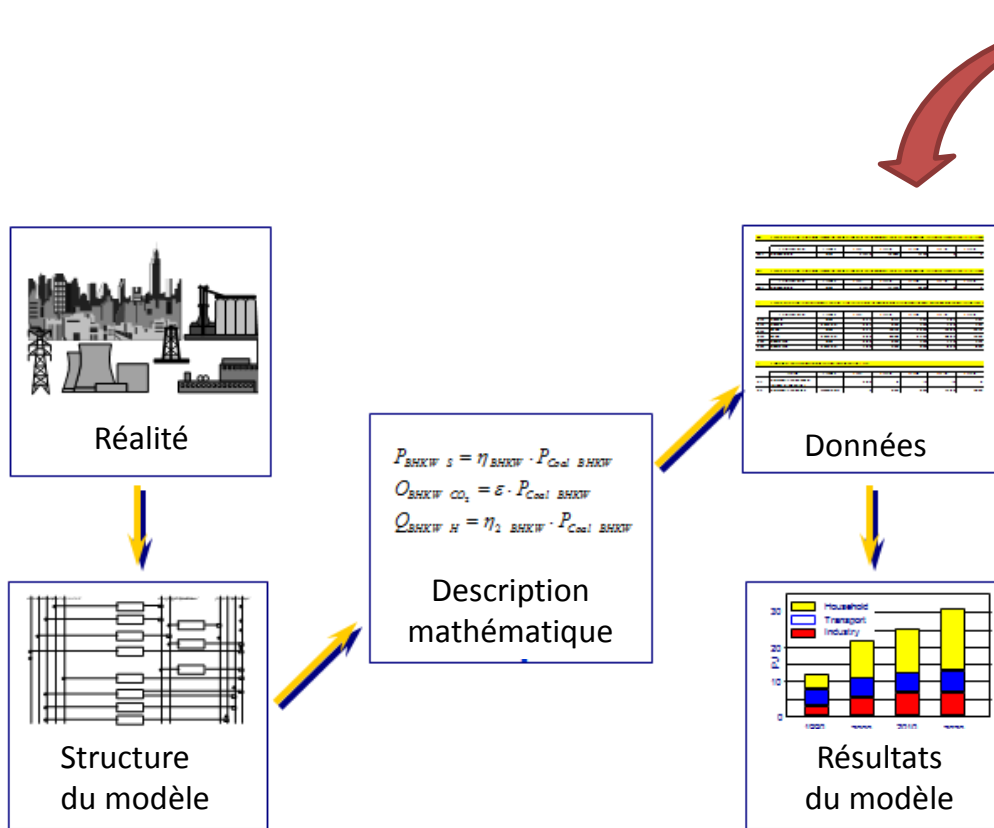
Modélisation, simuler l'adaptation au contexte futur

Source: Y. Lusignan, Ciblexpert



Analyse des systèmes énergétiques

Un modèle gouverné par les données



Source: U. Remme, IER, 2008

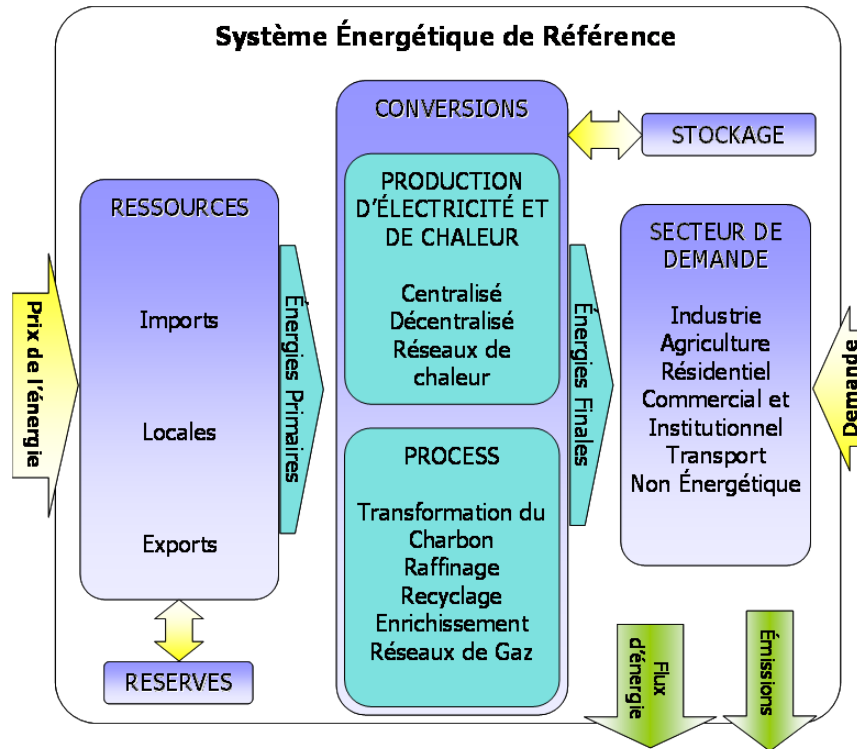
- Vecteurs énergétiques
- Liste de technologies
- Les émissions dont il faut tenir compte
- Le périmètre géographique et temporel
- Valeurs des paramètres technologiques et économiques spécifiques à chaque technologie, région, période

Variation qualitative et quantitative suivant les données d'entrée

Scénario de référence

- Il peut être
 - projection sans intégrer de nouvelle mesure de politique énergétique. Les consommations suivent alors l'évolution structurelle des secteurs de consommation
 - prolongation des tendances passées ou qui intègre des actions non encore programmées mais qui sont dans la tendance (envisagées). Par ex. des actions d'économie d'énergie non encore mises en place
- Il a peu de chance d'être le scénario le plus probable
 - parce que la tendance passée pose des problèmes et qu'on veut s'en démarquer : ce scénario de référence peut justement être utilisé comme un « repoussoir » pour nous convaincre qu'il faut faire quelque chose
 - il est dans la continuité sans ruptures ni changements alors qu'on sait qu'il y aura des changements

Le Système Énergétique de Référence (RES)



- Inputs
 - Demande exogène
 - Technologies disponibles
 - Ressources domestiques
 - Prix des énergies
- Outputs
 - Technologies optimales
 - Moment optimal d'investissement
 - Coût global
 - Emissions

- Modèle technologique guidé par la demande énergétiques
- Minimisation du coût global actualisé du système énergétique

Les technologies utilisées

(Paramètres issues de RES 2020)

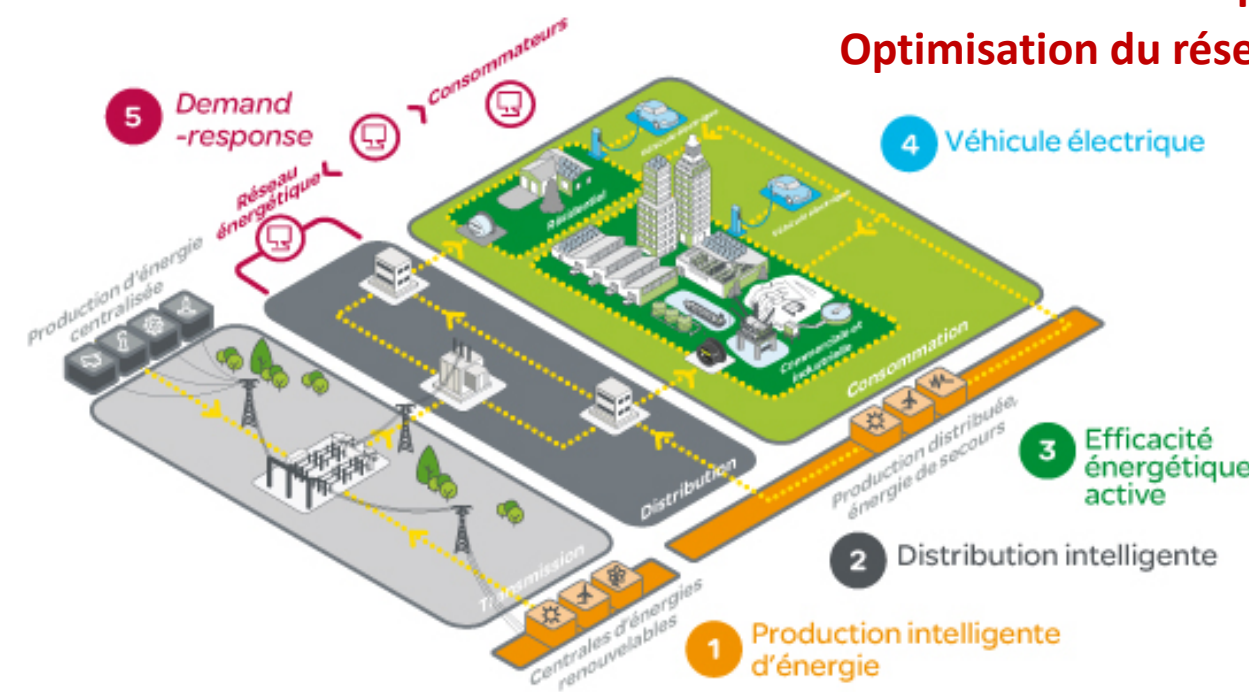
Ressources	Technologies	Capacité d'une unité (MW)
Fioul lourd	Turbines vapeur	10 à 80
	Moteurs diesel (au Port)	3 × 18,3
	Turbines diesel	10 à 80
Fioul domestique	TAC	10 à 80
Charbon	Turbines vapeur	20 à 80
	IGCC (gazéification)	20 à 80
Charbon / Bagasse / Canne fibre	Turbines vapeur	20 à 80
Bagasse / Canne fibre	Turbines vapeur	20 à 80
Biomasse	Turbines vapeur	20 à 80
	IGCC	20 à 80
Hydroélectricité	Fil de l'eau	≤ 5
	Barrages	5 à 30
Éolien	<i>Onshore</i>	–
Solaire	Toitures PV	–
	Champs PV	–
	Thermodynamique à concentration	5 à 80
Géothermie	Turbines vapeur	5 à 40
	Roches chaudes sèches	5 à 20
Énergies marines	Houlomotrice	3 à 60
	Énergie thermique des mers	1 à 55

Annexe d'ouverture

SMART GRIDS

Modélisation prospective
du secteur électrique

Réseau intelligent Optimisation du réseau en temps-réel



Top 10 (2010) des investissements publics dans les Smart Grids



Source: Zpryme Research & Consulting

$$\frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} in$$

$$\times \left(\sum_{i \in TCH} fixom_i(t) \right)$$

$$+ \sum_{i \in EEA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} var_{i,z,y}$$

$$+ \sum_{k \in ENC} \sum_s com_{k,s}$$

$$+ \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{z,y}$$

$$- \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} price_{z,y}$$