



Journée d'étude « SRM »
Les risques et opportunités climatiques :
regards croisés Droit-Economie-Gestion



Prospective Energie - Climat

Sandrine SELOSSE

CMA – MINES ParisTech – PSL Research University

Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

28 mai 2019

Centre de Mathématiques Appliquées
MINES ParisTech – PSL Research University



Prospective vs Prévision :

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



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 ?** »

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



Histoire de la prospective

- Questionner l'avenir (synonyme d'inquiétude; réduire les angoisses)
- Anticiper l'avenir (préoccupation forte de toutes les sociétés ; en tout temps : oracles, prophéties, astrologie, prédictions scientifiques)

→ **La prospective est la forme moderne de l'anticipation**

- 2 grands courants au sortir de la seconde guerre mondiale
 - Aux Etats-Unis :
 - axe progrès technique (intérêt militaire)
 - Formalisation des méthodes : DELPHI et scénarios
 - Premières préoccupations relatives à l'approvisionnement en ressources
 - En France :
 - Gaston Berger et Bertrand de Jouvenel
 - Préoccupations plutôt humanistes et sociétales
 - Commissariat général du Plan (Pierre Massé) : Groupe 1985 lancé en 1962, « étudier, sous l'angle des faits porteurs d'avenir, ce qu'il serait utile de connaître dès à présent de la France de 1985 ».
 - Jusqu'au Club de Rome créé par Peccei au début des années 1970
 - Rapport Donella et Dens Meadows, Limits to Growth

Différentes approches (N. Maïzi)



- **Storytelling**

- Méthode de communication fondée sur une structure narrative du discours
- Faire rêver, effrayer
 - EDF et Areva accusés de greenwashing ont progressivement abandonné les vieilles formules axées sur le storytelling pour mettre en forme une communication davantage empreinte de pédagogie et de transparence, du moins dans la forme
 - Négawatt, Global Chance, Négatep (Sauvons le Climat)

- **Back-casting**

- Définir des objectifs
- Identifier les étapes intermédiaires
- Comparaison économique
- CEA, AREVA, ADEME, UFE

- **Modélisation**

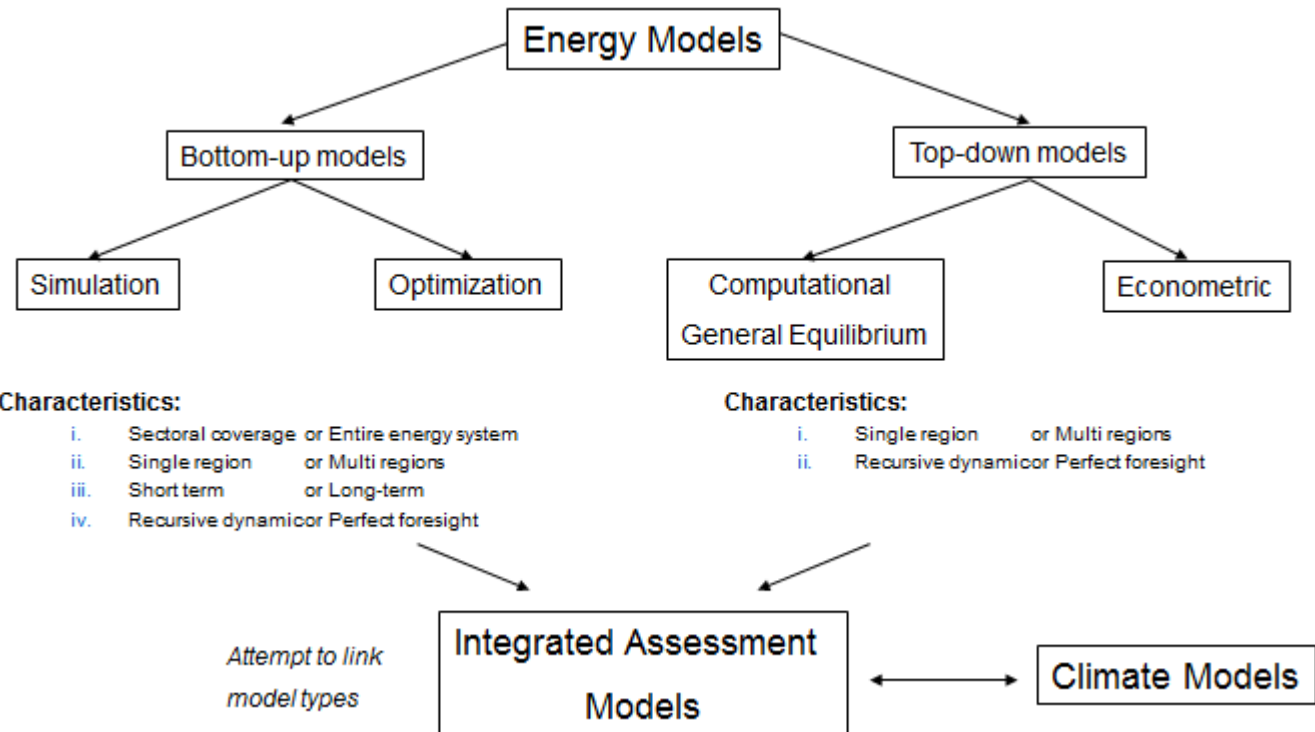
- Demande et offre : Enerdata, RTE
- Macroéconomie : MEGC
- Modèle technico-économique d'optimisation de systèmes : approche rationnelles des questions de prospective liées à l'énergie
 - Futurs investissements pour le mix?
 - Mesures pour pallier les impacts environnementaux?
 - Quelles substitutions entre ressources primaires?
 - Plausibilité technique d'un politique, d'un objectif?



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 technico-économique

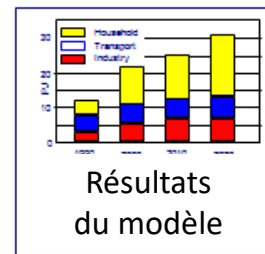
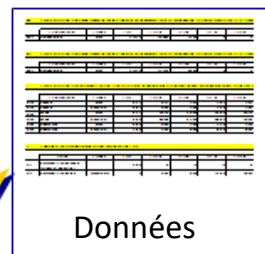
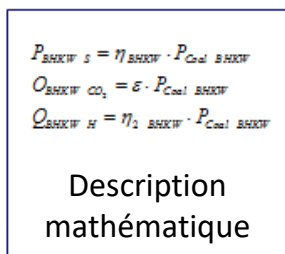
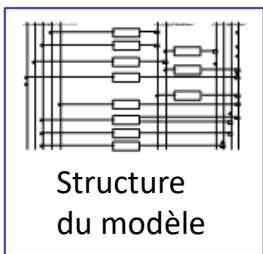
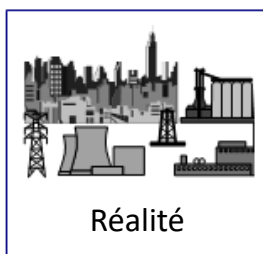


- Représentation du système
 - orientée vers l'analyse d'activités
 - très désagrégée où les différents processus technologiques y sont représentés explicitement

- 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.)

Analyse des systèmes énergétiques

Un modèle gouverné par les données



- 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

Source: U. Remme, IER, 2008

Variation qualitative et quantitative suivant les données d'entrée



Base de données

Technologique
Economique
Environnementale

Scénario Economique

Demandes de services
Elasticités

TIMES

Programme
linéaire

Scénario Environnemental

Limites, échanges
Taxes, subventions
Mesures spécifiques

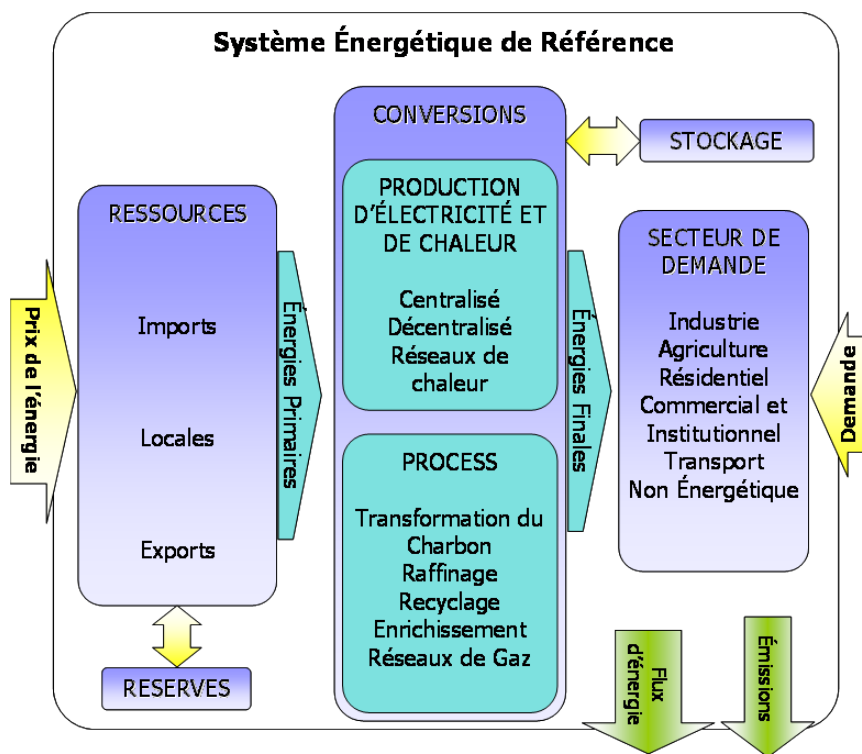
Equilibre partiel

Technologies : investissements, capacités, activités
Quantités produites, consommées, échangées pour toutes les
commodités

Coûts marginaux des énergies et des émissions
Tendances d'émissions

Le Système Énergétique de Référence (RES)

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



Inputs

- Demande exogène
- Technologies disponibles
- Ressources domestiques
- Prix des énergies

Outputs

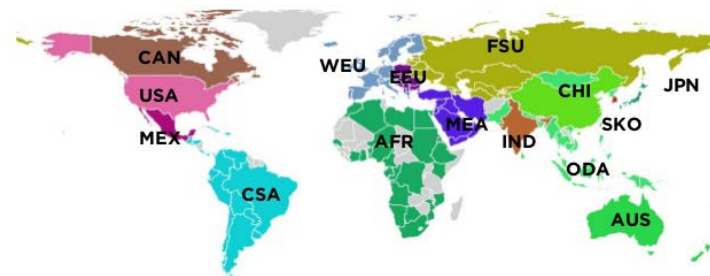
- Technologies optimales
- Moment optimal d'investissement
- Coût global
- Emissions
- La solution duale « valeur fictive » (*shadow price*) de chaque commodité

Développement de TIAM-FR pour l'analyse prospective des politiques climatiques internationales

Modèle d'évaluation intégrée (IAM) : TIAM-FR
TIMES Integrated Assessment Model



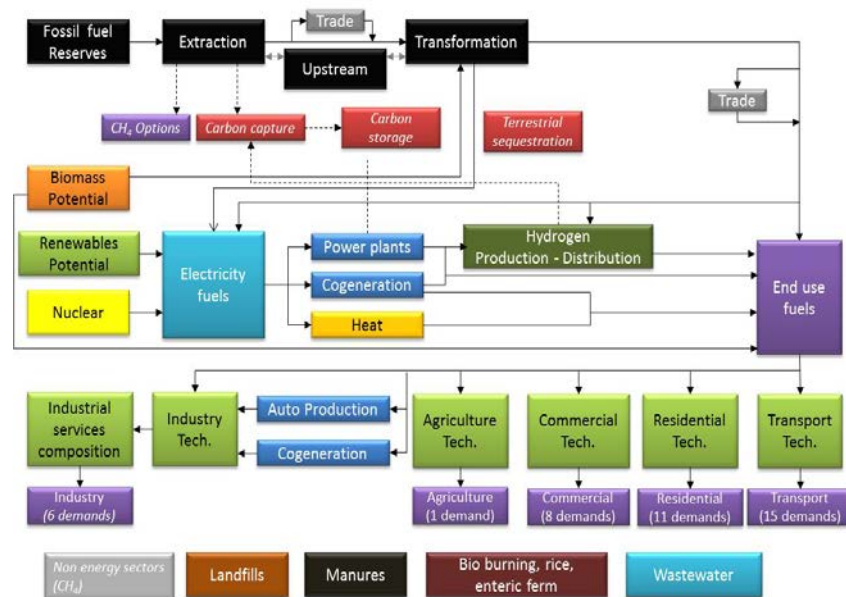
Famille TIMES de AIE/ETSAP
Energy Technology System Analysis Program



Problème d'optimisation linéaire
Minimisation du coût total actualisé du système

Bottom-up
 Long terme : **2010-2100**
 15 régions (+T-ALyC)
 6 secteurs
 42 demandes

585 729 données
 11 646 commodités (env. 770/région)
 39 817 technologies (env. 2 500/région)

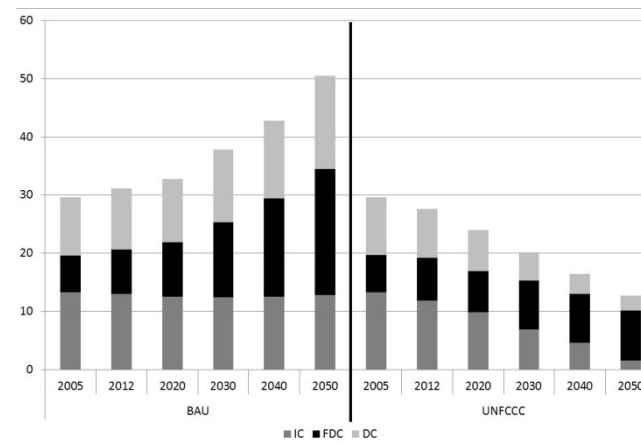
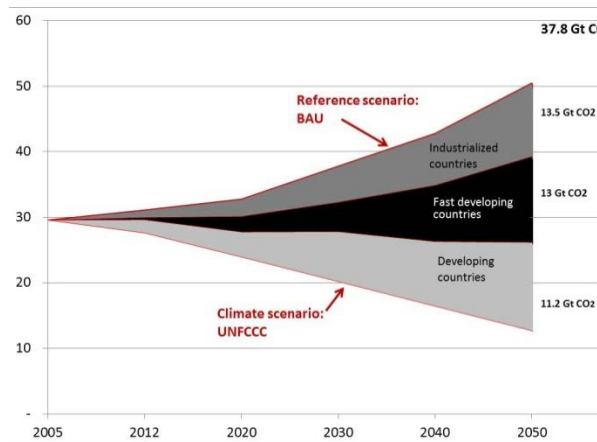


Quel futur énergétique bas carbone et durable ?

Implémentation de scénarios des futurs énergétiques possible à long terme

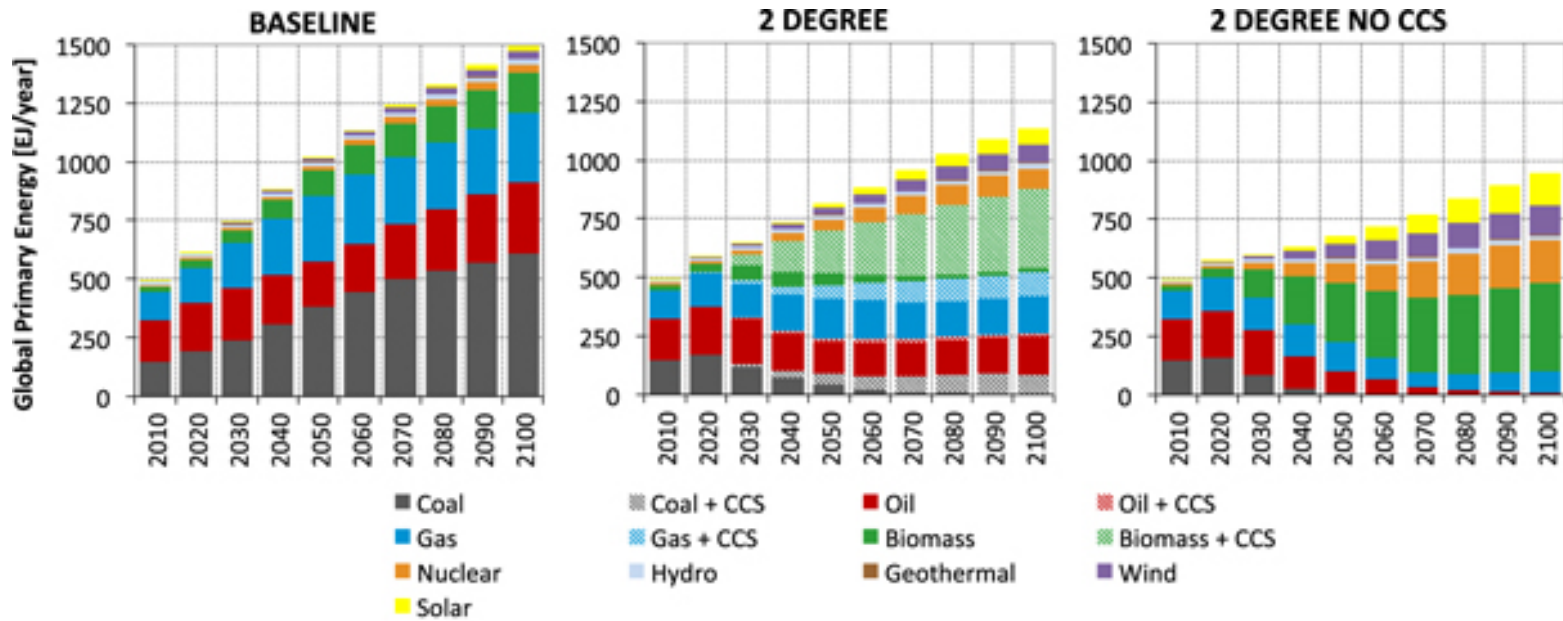
• Contraintes climatiques

- Objectif de 2°C (cibles d'émissions [Gt CO₂], de forçage radiatif [W/m²], de concentration atmosphérique [ppm]) (Objectif de 1,5°C)
- Accord de Paris

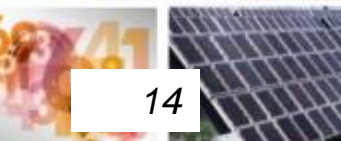


Contribution par groupe de pays à l'effort d'atténuation de CO₂

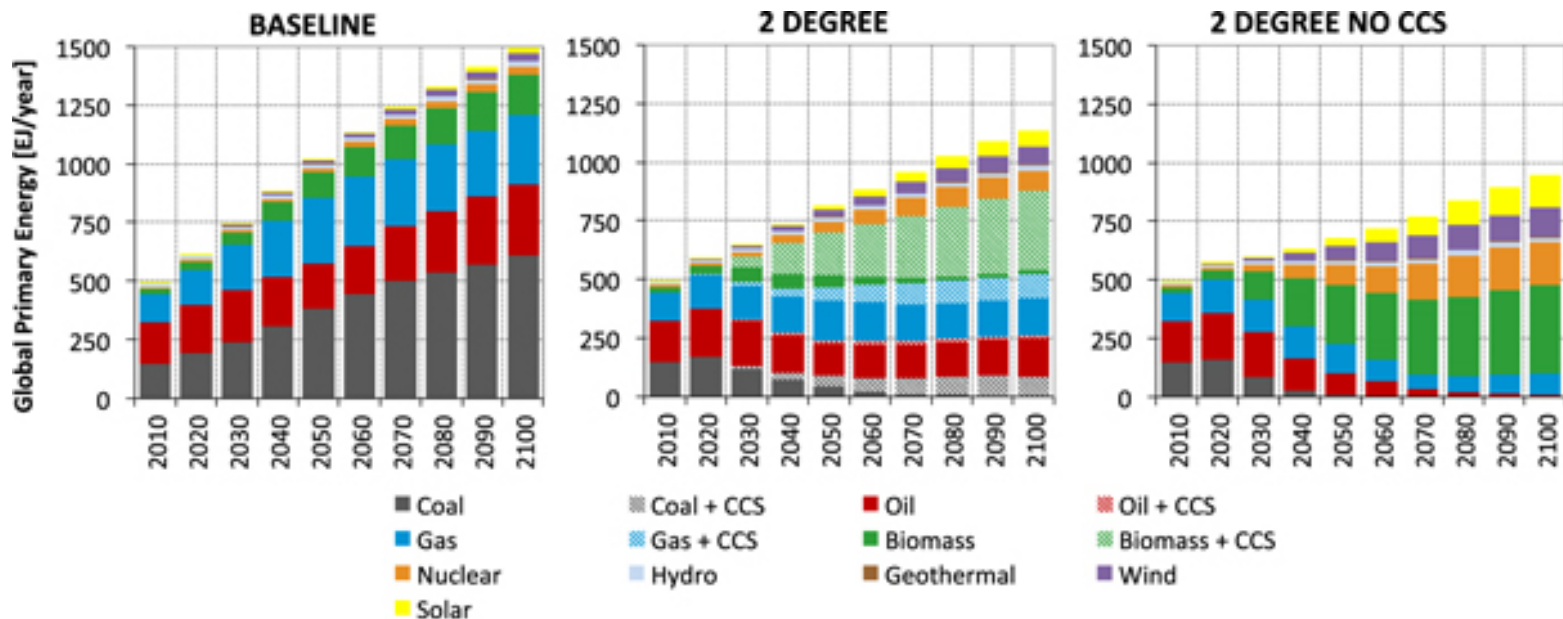
Choix technologiques pour une stabilisation climatique



Muratori et al. (2016) - <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/095004>



Choix technologiques pour une stabilisation climatique



Muratori et al. (2016) - <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/095004>

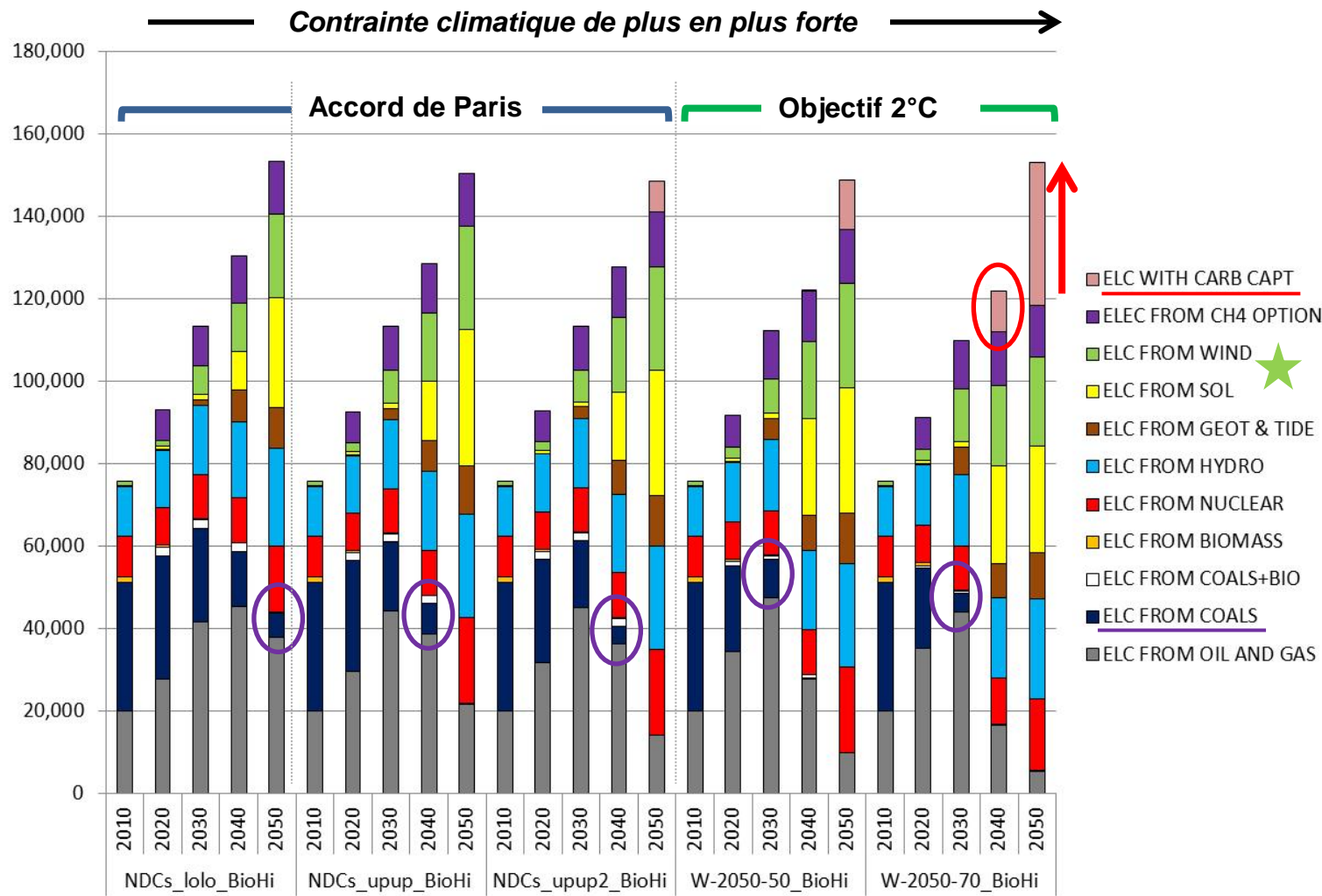
AR5 : 101 des 116 scénarios limitant le niveau de concentration Atmosphérique à 430-480 ppm repose sur le développement de la Biomasse + CSC

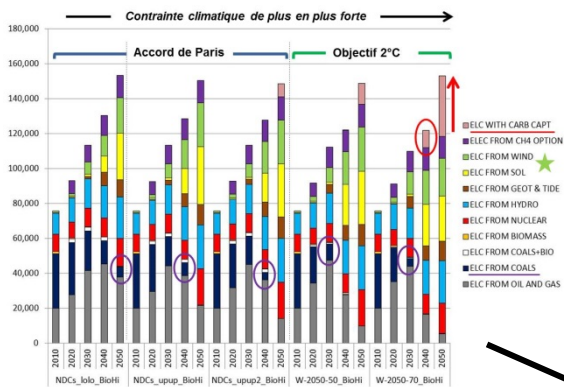
67% de ces scénarios ont une part de BECCS dans l'énergie primaire supérieure à 20% en 2100

(Fuss et al. (2014), Nature Climate Change)



Production électrique mondiale (PJ)



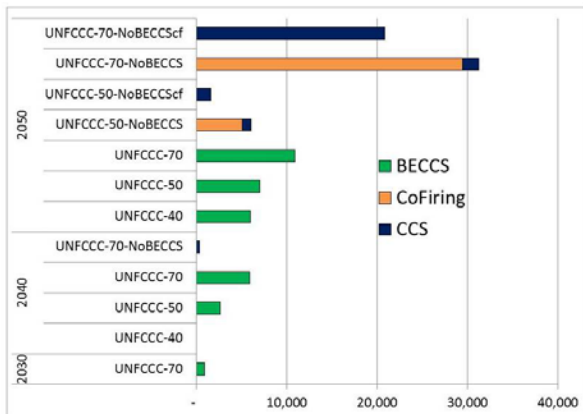


Pays industrialisés

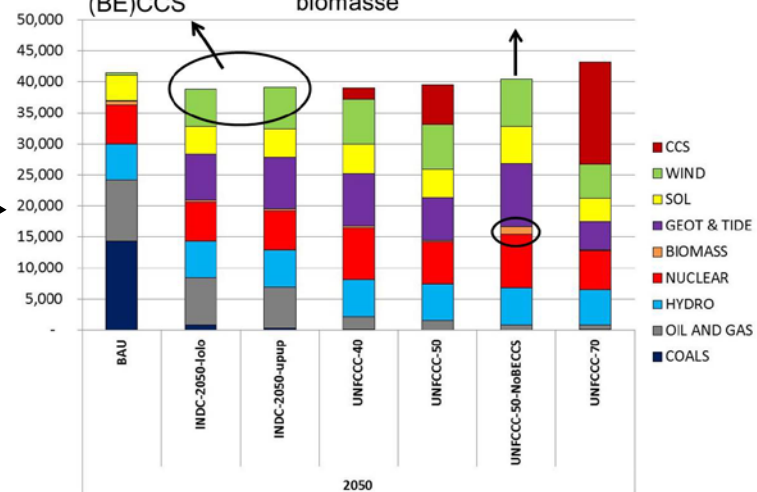
Pays émergents

Scénarios NDCs : pas de CCS mais électricité à partir de centrales biomasse plus important

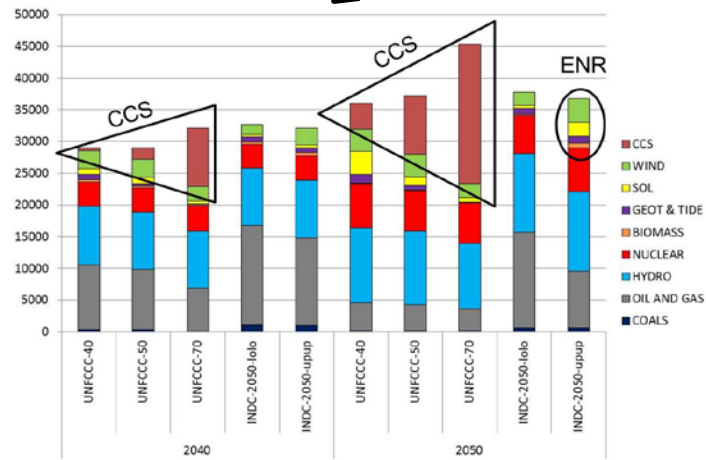
UNFCCC-70-NoBECCS : système électrique décarboné (solaire)



Pas de BECCS = pas de CCS mais investissement dans des centrales biomasse



Pays en développement



Quel futur énergétique bas carbone et durable ?

- **Cibles climatiques ambitieuses atteintes si :**
 - Contribution des pays en développement
 - Contribution ambitieuse des émergents
 - Décarbonation quasi-totale des pays industrialisés
 - Déploiement important du CCS
 - Recours aux émissions négatives avec la BECCS

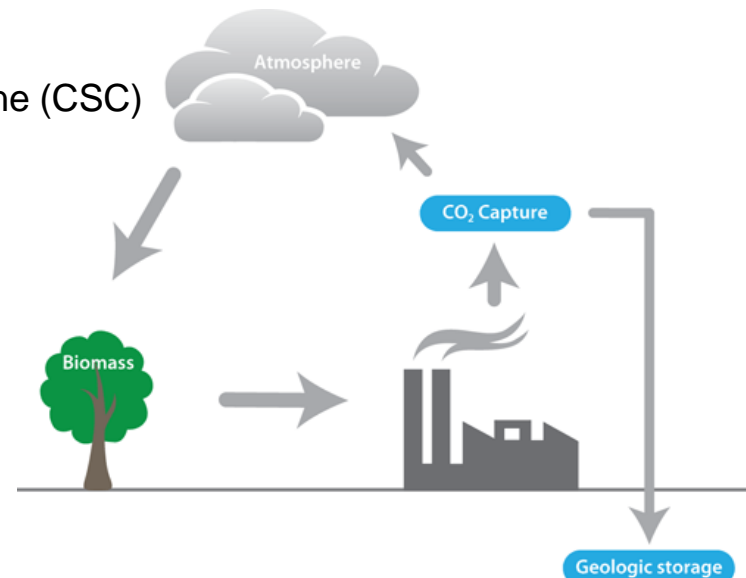


Quel futur énergétique bas carbone et durable ?

- **Cibles climatiques ambitieuses atteintes si :**
 - Contribution des pays en développement
 - Contribution ambitieuse des émergents
 - Décarbonation quasi-totale des pays industrialisés
 - Déploiement important du CCS
 - Recours aux émissions négatives avec la BECCS

- **Contraintes technologiques et de ressources**

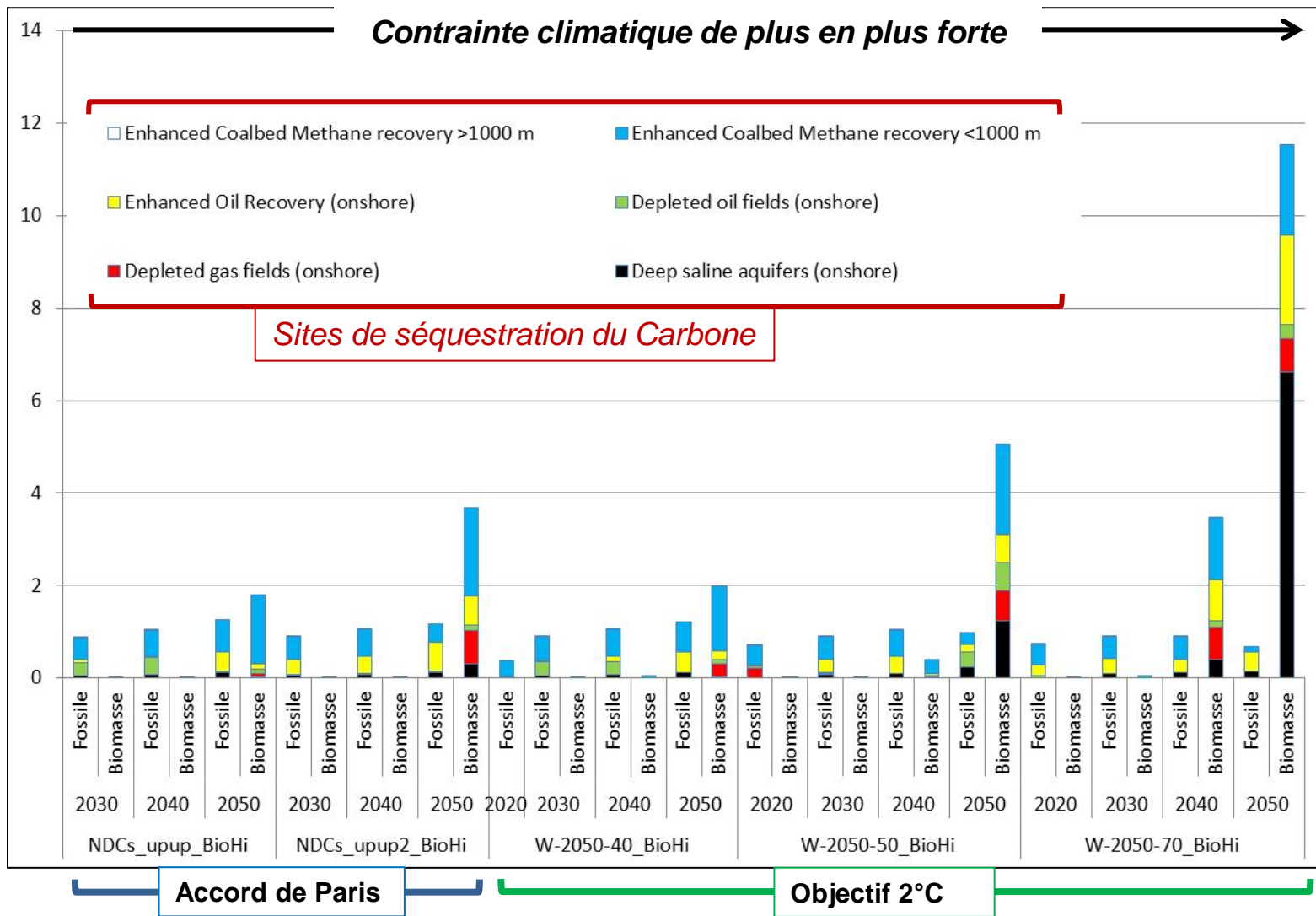
- Disponibilité des technologies
 - Capture et séquestration du carbone (CSC)
 - Disponibilité de stockage *onshore*
- Potentiel de ressources
 - Stockage du carbone
 - Ressources biomasses



Place de la CSC
et de la BECCS



Le stockage du carbone en question.... (Gt)

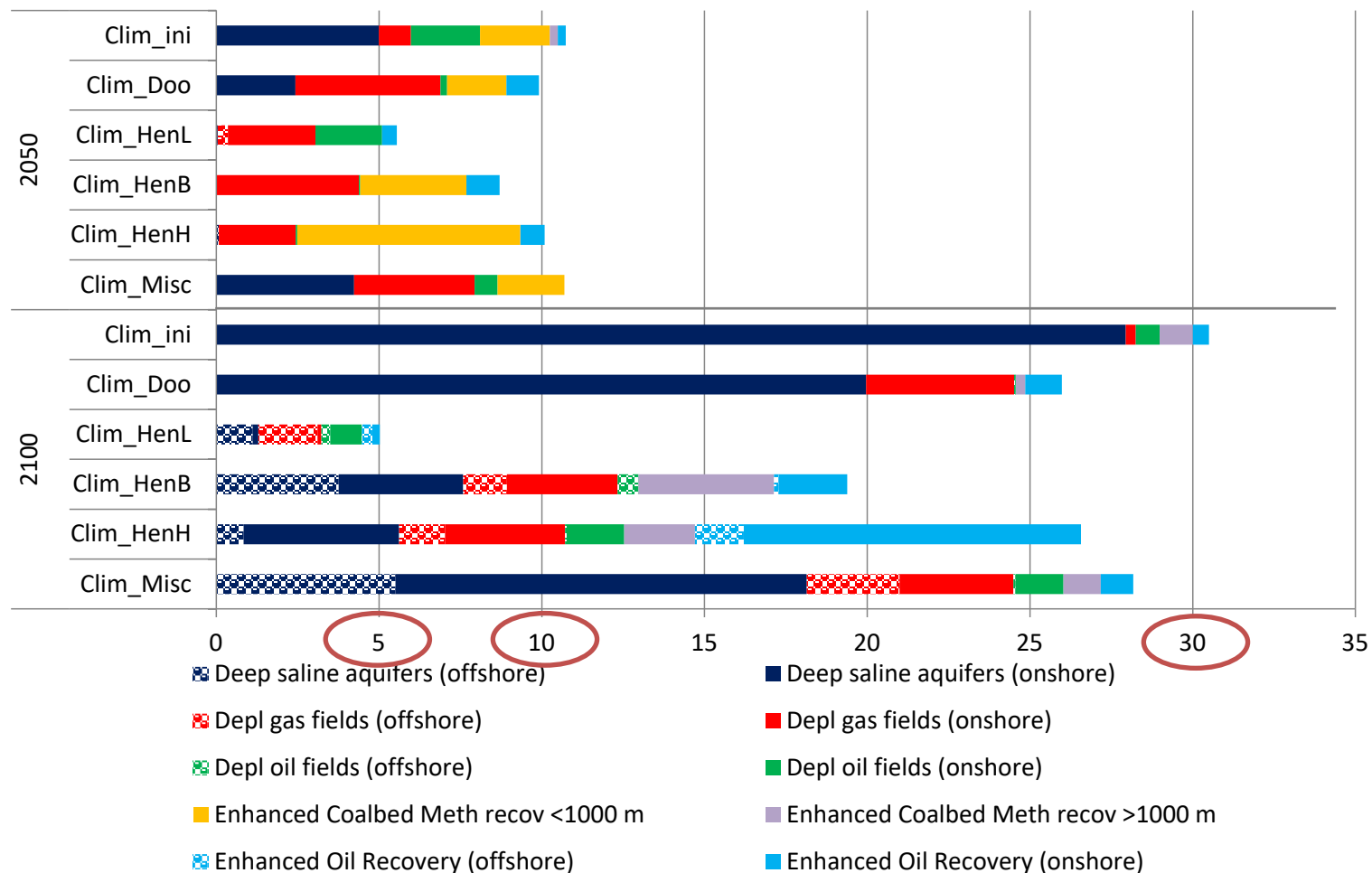


- **Analyse de Scénarios**
(sous contraintes climatiques)
 - Potentiels de stockage
 - Initial TIAM – 9,392 Gt
 - Recueil de diverses bases de données – 10,142 Gt
 - Ref. Dooley – 10,655 Gt
 - Ref. Hendriks – 572 Gt / 1,706 Gt / 5,864 Gt
 - Arbitrage onshore/offshore



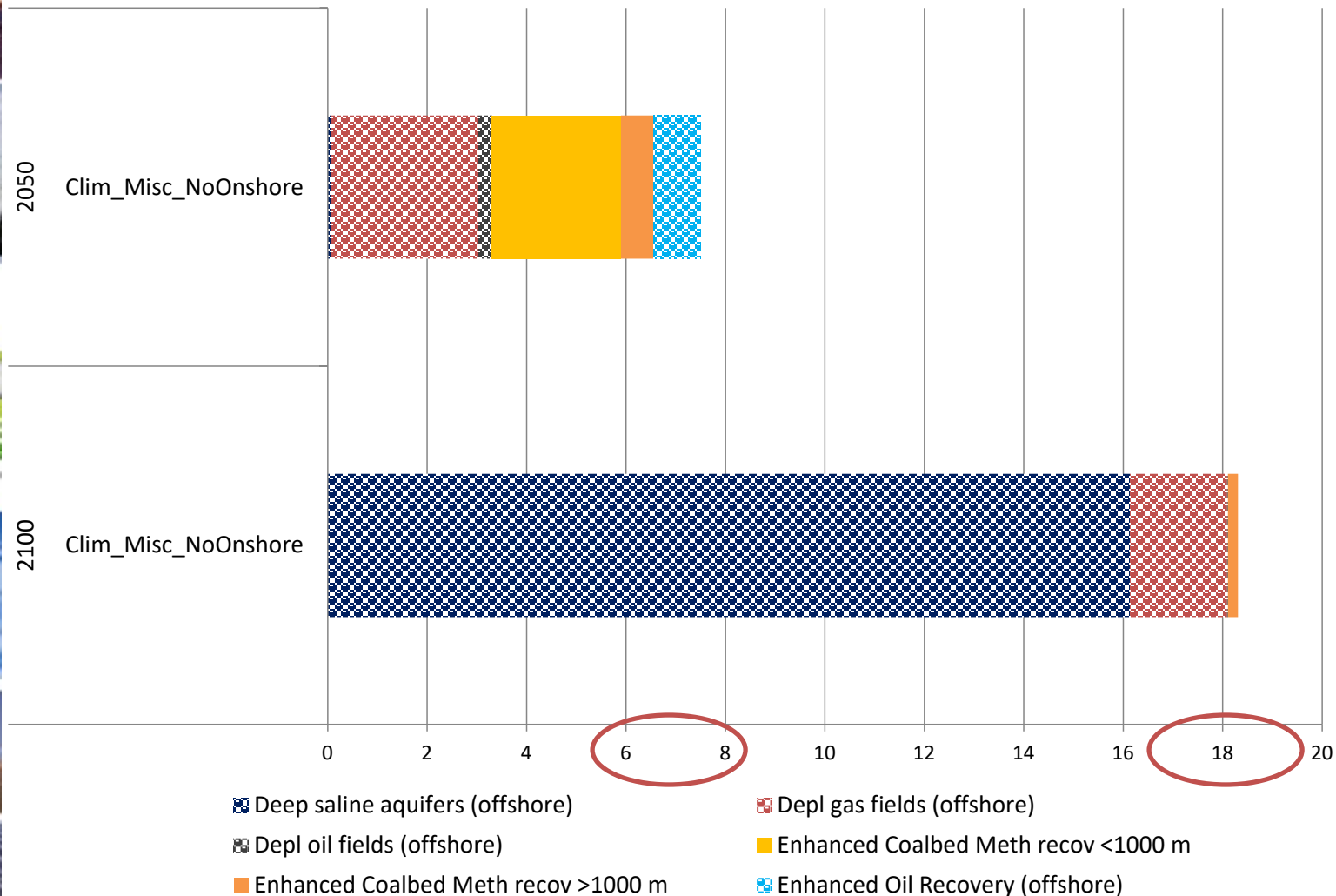
Carbone à stocker par an pour atteindre une contrainte climatique en ligne avec l'objectif de 2 °C (forçage radiatif, 2,6 W/m², 2100)

Variation de la possibilité de stockage du carbone par site et par scénario (Gt CO₂)

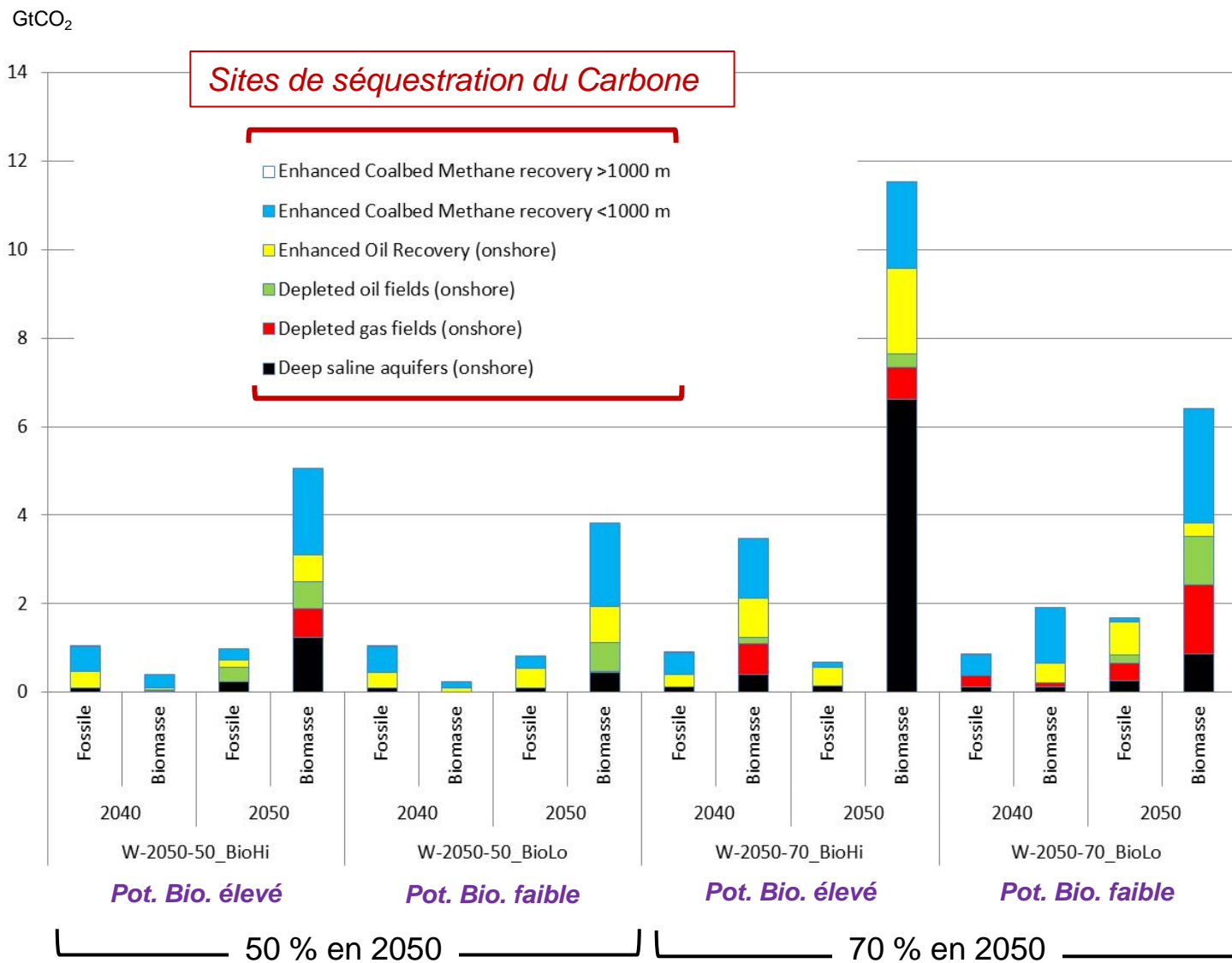


Impact d'une interdiction de stockage onshore sur le potentiel de stockage du carbone

Stockage du carbone par site (Gt CO₂)



Impact d'un potentiel de biomasse contrasté sur la quantité de carbone séquestré

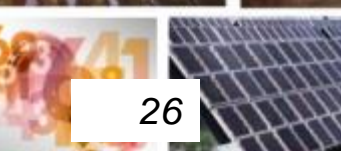


Trajectoires bas carbone alternatives



Scenario	Targeted year	Climate constraint	Carbon storage	Biomass 2050 potential
2050-70-ccsHi-BioMid	2050	70% GHG mitigation	10,142 Gt	215 EJ
2050-70-ccsHi-BioHi				328 EJ
2050-70-ccsHi-BioLo				70 EJ
2050-70-ccsMid-BioMid			1,706 Gt	215 EJ
2050-70-ccsMid-BioHi				328 EJ
2050-70-ccsMid-BioLo				70 EJ
2050-70-ccsLo-BioMid			572 Gt	215 EJ
2050-70-ccsLo-BioHi				328 EJ
2050-70-ccsLo-BioLo				70 EJ
2100-2D-ccsHi-BioMid			2100	2°C temperature increase limit
2100-2D-ccsHi-BioHi	328 EJ			
2100-2D-ccsHi-BioLo	70 EJ			
2100-2D-ccsMid-BioMid	1,706 Gt	215 EJ		
2100-2D-ccsMid-BioHi		328 EJ		
2100-2D-ccsMid-BioLo		70 EJ		
2100-2D-ccsLo-BioMid	572 Gt	215 EJ		
2100-2D-ccsLo-BioMHi		328 EJ		
2100-2D-ccsLo-BioLo		70 EJ		

Influence des potentiels de stockage du carbone et de biomasse sur les futurs développements de la BECCS



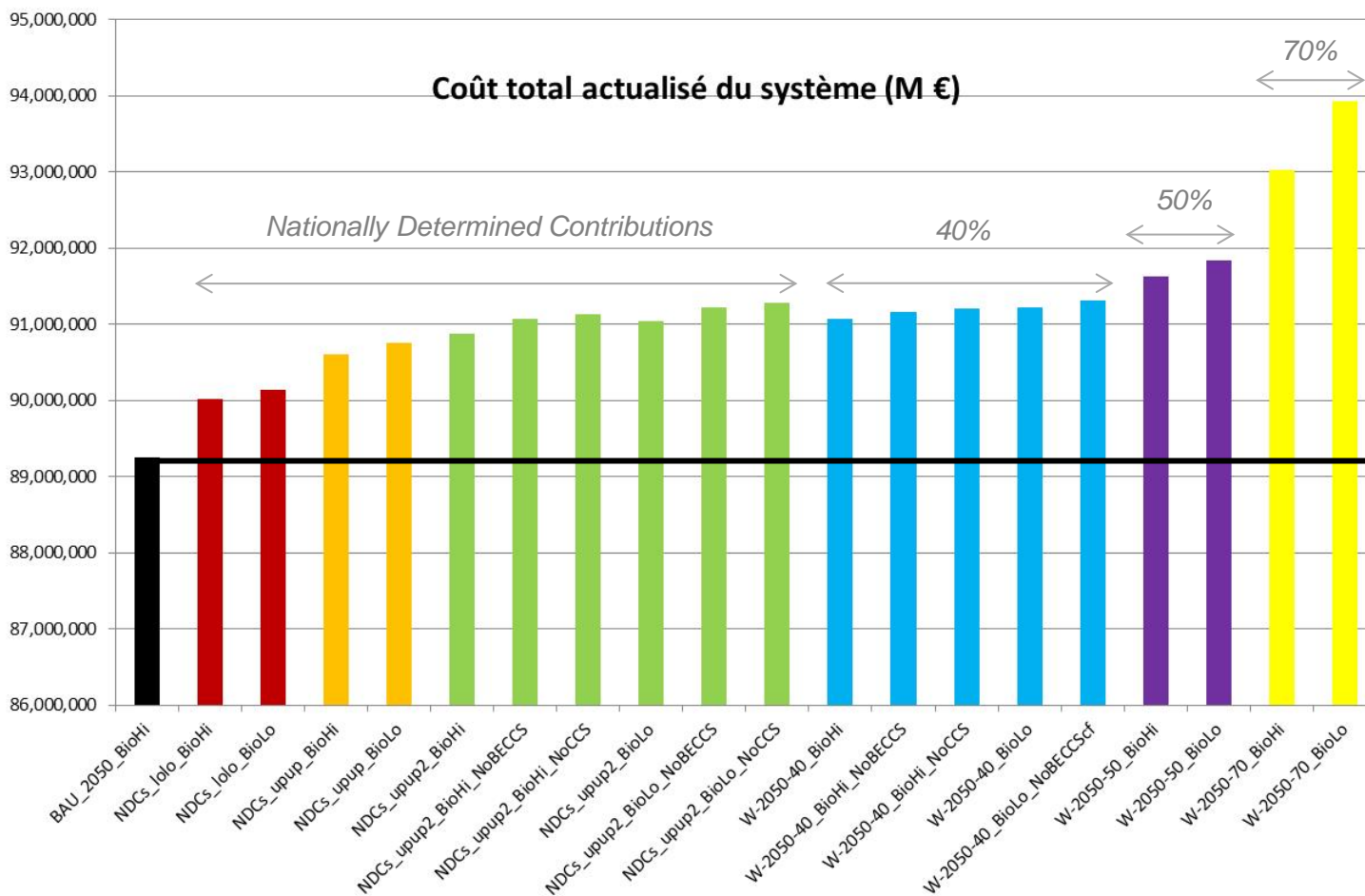
Part du CCS dans la production électrique mondiale en 2050

Réduction des émissions de GES de 70 % d'ici 2050		Potentiel de biomasse		
		Elevé	Moyen	Bas
Potentiel de stockage du carbone	Elevé	45% (BECCS: 70%)	39% (BECCS: 55.9%)	27% (BECCS: 18.1%)
	Moyen	45% (BECCS: 69.8%)	39% (BECCS: 56.3%)	27% (BECCS: 18.2%)
	Bas	33% (BECCS: 93.9%)	28% (BECCS: 76.7%)	15% (BECCS: 33.5%)

Gigatonnes de carbone séquestrées par an en 2050 dans le monde

Réduction des émissions de GES de 70 % d'ici 2050		Potentiel de biomasse		
		Elevé	Moyen	Bas
Potentiel de stockage du carbone	Elevé	12 Gt	8.8 Gt	2.8 Gt
	Moyen	12 Gt	8.9 Gt	2.8 Gt
	Bas	11 Gt	7.7 Gt	2.2 Gt

Comparaison des coûts totaux actualisés du système en fonction des contraintes



Profusion de scénarios et donc de trajectoires

- Qui gomment ou amplifient l'urgence et l'incertitude de la catastrophe
- Qui estompent les réalités locales pour donner une vision globale
 - Méthane des rizières
 - CO₂ des transports
- « *They are multiple scenarios with a range of technical and behavioral options, with different characteristics and implications for sustainable development, that are consistent with different levels of mitigation. For this assessment, about 900 mitigation scenarios have been collected in a database based on published integrated models.* » (IPCC, 2014)
 - Difficulté d'interprétation sans précision
 - Positionnement par rapport au futur
 - Clés du raccordement des trajectoires proposées au réel



Constat : Limites des approches existantes

Des progrès majeurs sont nécessaires pour :

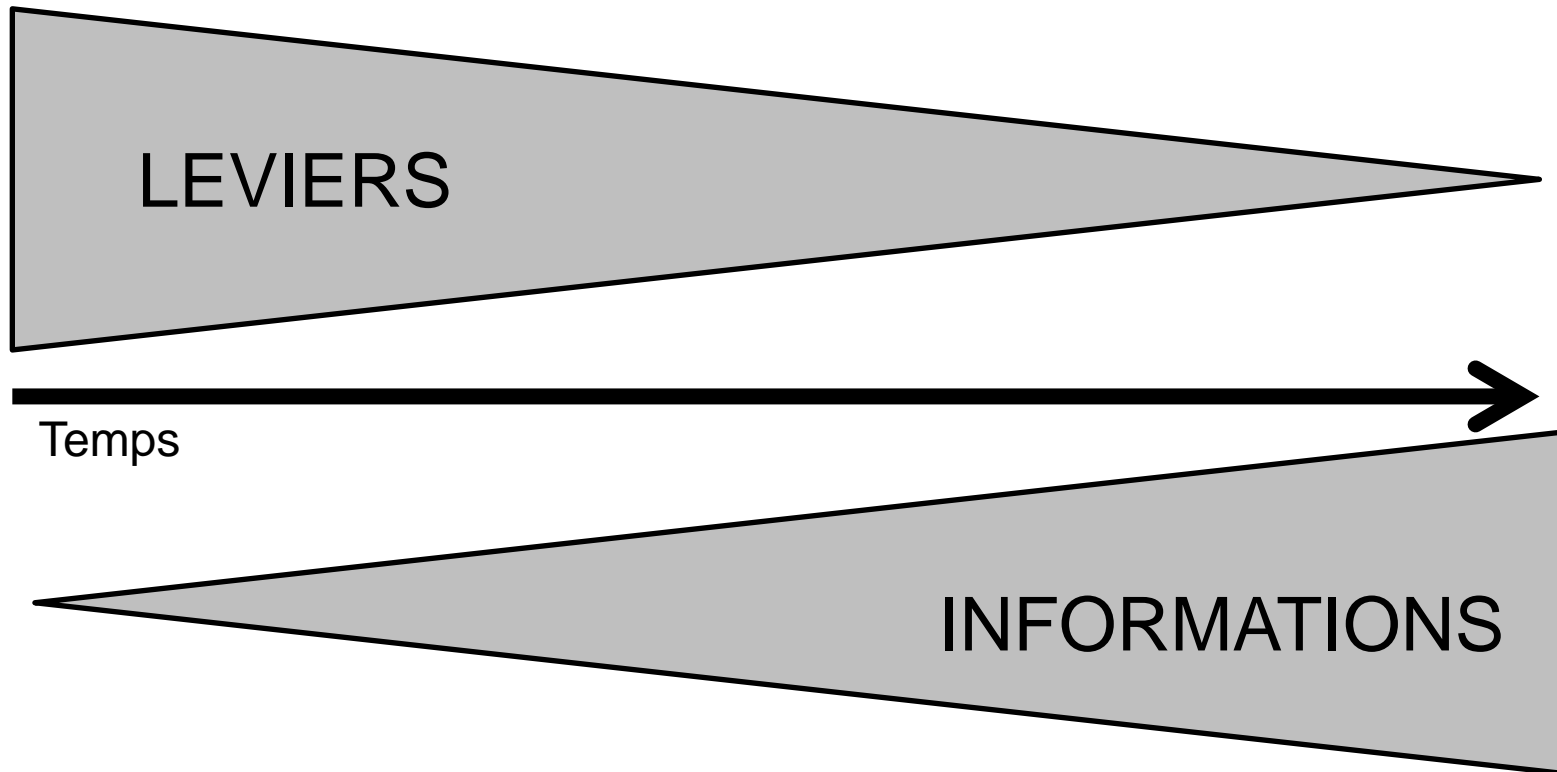
- (i) représenter les interdépendances entre le secteur énergétique, les autres secteurs importants pour un développement durable et la macroéconomie ;
- (ii) représenter les liaisons entre le dossier climat, les questions de sécurité énergétique et les autres dossiers clefs du développement durable ;
- (iii) et enfin dépasser la simple juxtaposition de prospectives technologiques, économiques et sociales en facilitant le dialogue entre sciences de l'ingénieur, économie et sciences sociales.





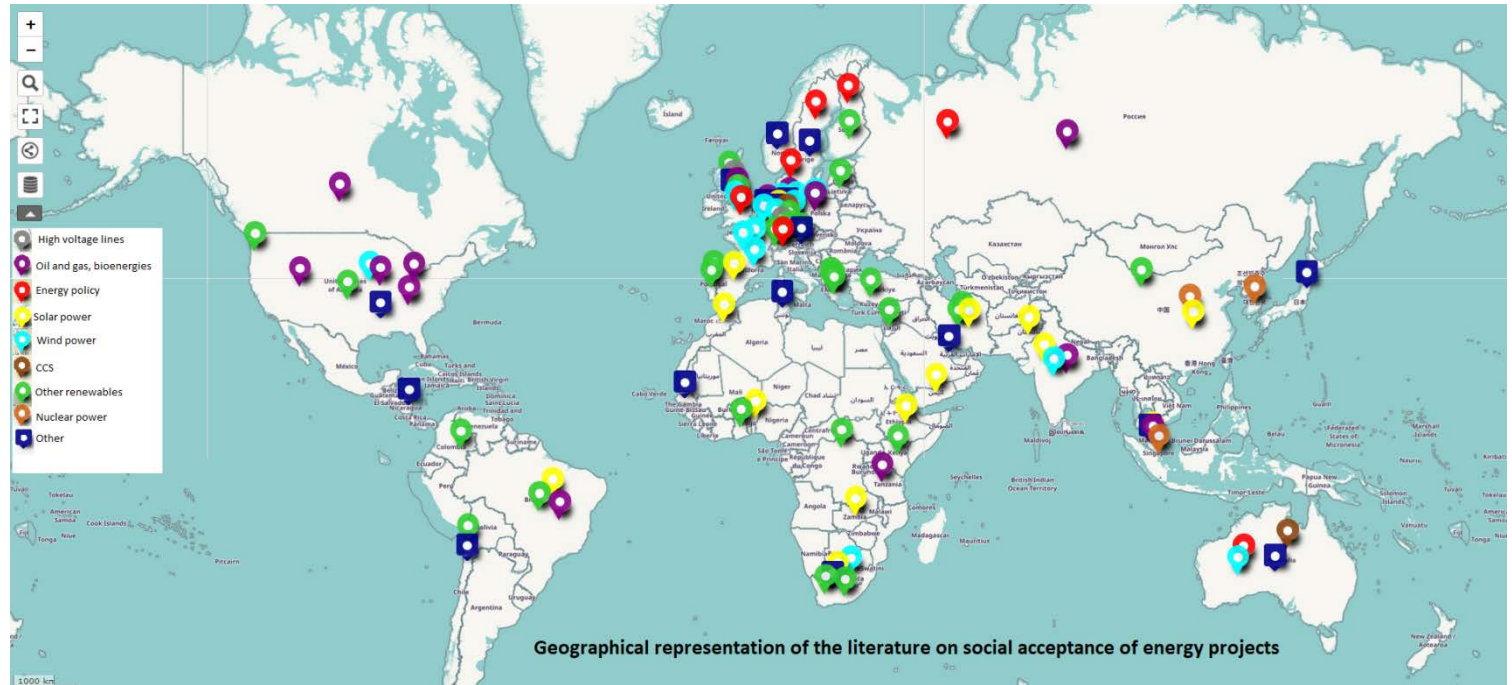
Evolution des systèmes énergétiques :

Décisions d'ordre politique, technique, économique, climatique, etc.



Aborder l'acceptation sociale dans la prospective

Thèse Mathilde Tessier (N. Maizi & S. Selosse)



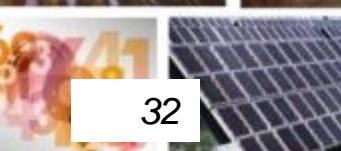
Acceptation sociale des projets énergétiques: un focus géographique basé sur la littérature (basé sur l'analyse de 96 articles)

Zones les plus étudiées : Europe occidentale, Moyen-Orient, Amérique du Nord
Zones moyennement étudiées : Amérique du Sud et Océanie
Zones moins étudiées : Afrique, Asie, ex-URSS

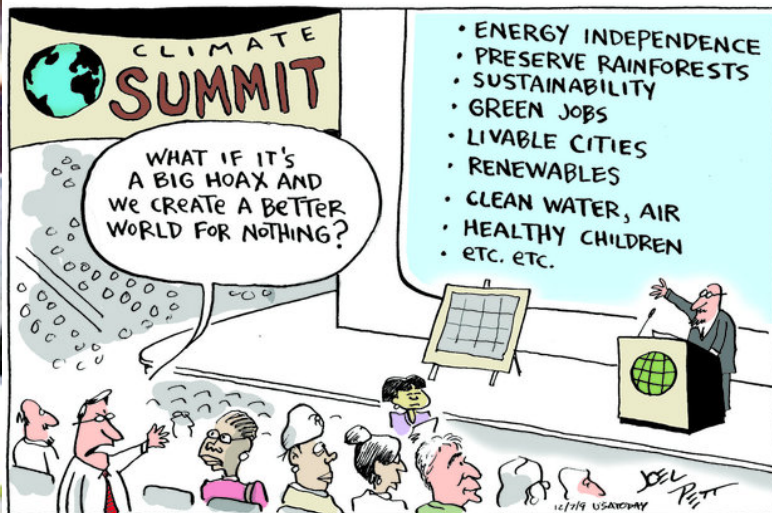
Nucléaire : principalement en Asie
Eolien : en Europe occidentale
Solaire : dans les pays en développement
Politiques énergétiques : dans les pays développés
Amérique du Nord : principalement du pétrole et du gaz et des bioénergies



A explorer ...



Prendre en compte les risques financiers des projets énergétiques ... ?



Joel Pett

Merci !

sandrine.selosse@mines-paristech.fr

28 mai 2019

Centre de Mathématiques Appliquées
MINES ParisTech – PSL Research University