



Economix



université  
Paris Ouest  
Nanterre La Défense

---

# L'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone: analyses théoriques et évaluations empiriques

---

## *Jury de thèse*

*Mr. Pierre-André Jouvet*

*Mr. Pierre Mohnen*

*Mr. Julien Penin*

*Mr. Gaétan de Rassenfosse*

*Directeur de thèse: Mr. Marc Baudry*

*Thèse soutenue publiquement par*

*Clément Bonnet*

*le 14 décembre 2016 à Nanterre.*

# Problématique et plan de la présentation

- La réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) implique l'accès à une énergie bas-carbone.
- **Problématique de la thèse:** Quelles sont les conditions d'un soutien efficace à l'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone?
- **Plan de la présentation**
  - (1) Articulation des questions de recherche  
*(Chapitre 1)*
  - (2) L'évaluation des politiques de soutien à l'innovation par la demande d'électricité verte  
*(Chapitre 2, Seconde relecture à Energy Policy)*
  - (3) La mesure de la connaissance technique dans les technologies de l'énergie bas-carbone  
*(Chapitre 3, EconomiX Working Paper 2016-37)*
  - (4) L'interaction entre le système de brevet et la tarification des dommages environnementaux  
*(Chapitre 4, EconomiX Working Paper 2016-34)*
  - (5) Conclusion et perspectives de recherche

---

# (1) Articulation des questions de recherche

---

*(Chapitre 1)*

# Des politiques de soutien à l'innovation indépendantes des questions environnementales

---

- L'innovation bas-carbone est entravée par deux types de défaillances de marché.
  - Les défaillances de marché sur l'environnement.
  - Les défaillances de marché sur l'innovation.
- Corriger séparément les deux défaillances: le 'price fundamentalism' comme guide à l'intervention publique (Nordhaus, 2011).
  - L'innovation bas-carbone repose en premier lieu sur l'existence d'un signal-prix informant les individus des bénéfices environnementaux des technologies bas-carbone.
  - Une politique de soutien à l'innovation **neutre** doit être mise en place. Elle est dite neutre dans le sens où elle ne discrimine pas les technologies bas-carbone de celles conventionnelles.
- Cette théorie repose sur deux hypothèses fortes.
  - H1: Les pouvoirs publics peuvent mettre en place une tarification qui reflète parfaitement les dommages des émissions sur l'environnement.
  - H2: Les pouvoirs publics font face à une technologie homogène.

# La double externalité: la justification d'une politique de soutien à l'innovation dédiée aux technologies bas-carbone?

---

- Plusieurs auteurs soulèvent la spécificité des technologies environnementales en raison du problème de double externalité (e.g. Rennings, 2000; Jaffe et al., 2005).
  - Nécessité d'un soutien dédié à l'innovation environnementale
  - Limite: absence de consensus sur la nature des interactions.
- La double externalité dans ses versions *faibles*.
  - ⊖ **H1**: Les politiques de soutien à l'innovation doivent compenser la sous-tarifcation des externalités environnementales.
  - ⊖ **H2**: Les nouvelles technologies sont hétérogènes en termes de performances et le soutien à l'innovation est ciblé.
- La double externalité dans sa version *forte*.
  - Le caractère partiellement appropriable de la connaissance et la tarification des externalités sur l'environnement interagissent.
  - Cela induit la nécessité d'un soutien dédié aux technologies environnementales.

*Chapitre 2*  
*Evaluation des instruments de soutien par la demande*

*Chapitre 3*  
*Mesure de l'innovation*

*Chapitre 4*  
*Analyse des interactions entre les externalités*

---

## (2) L'évaluation des politiques de soutien par la demande

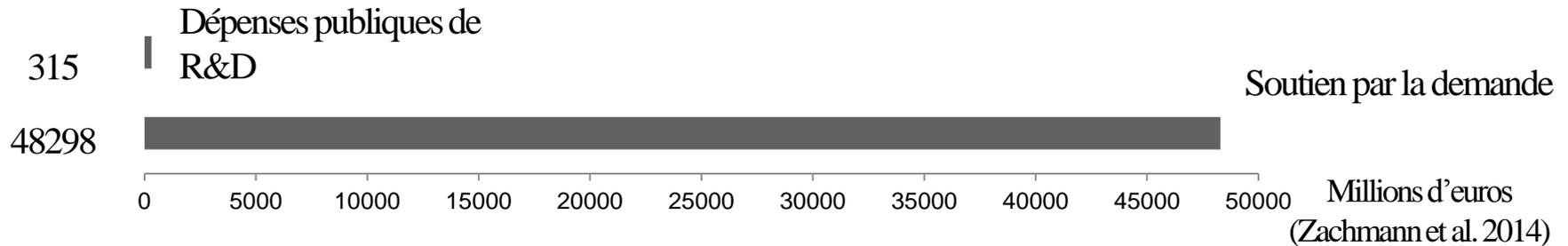
---

*(Chapitre 2)*

# Le double objectif des politiques de soutien par la demande

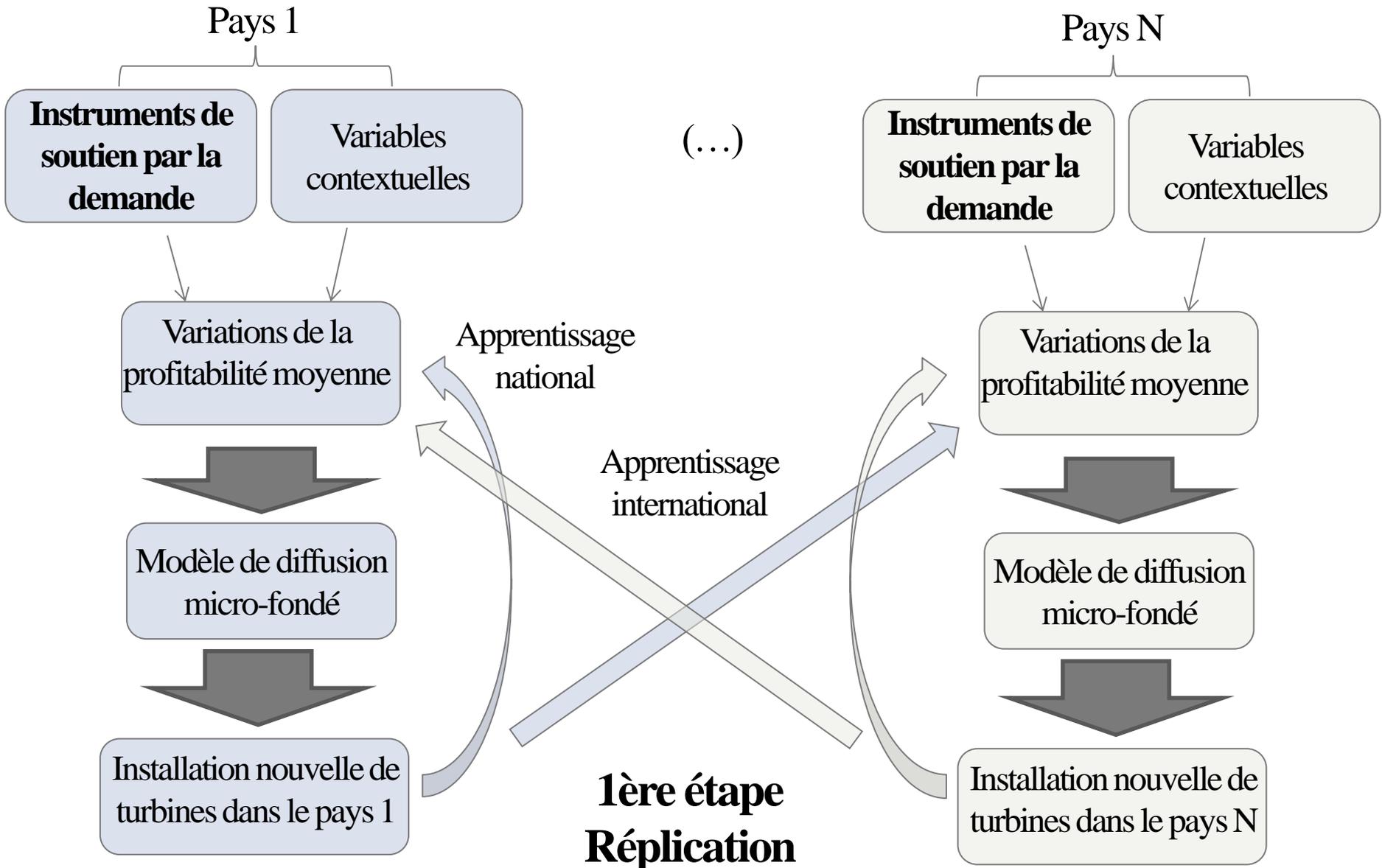
---

- Le déséquilibre entre un soutien à l'innovation par la demande et par l'offre.

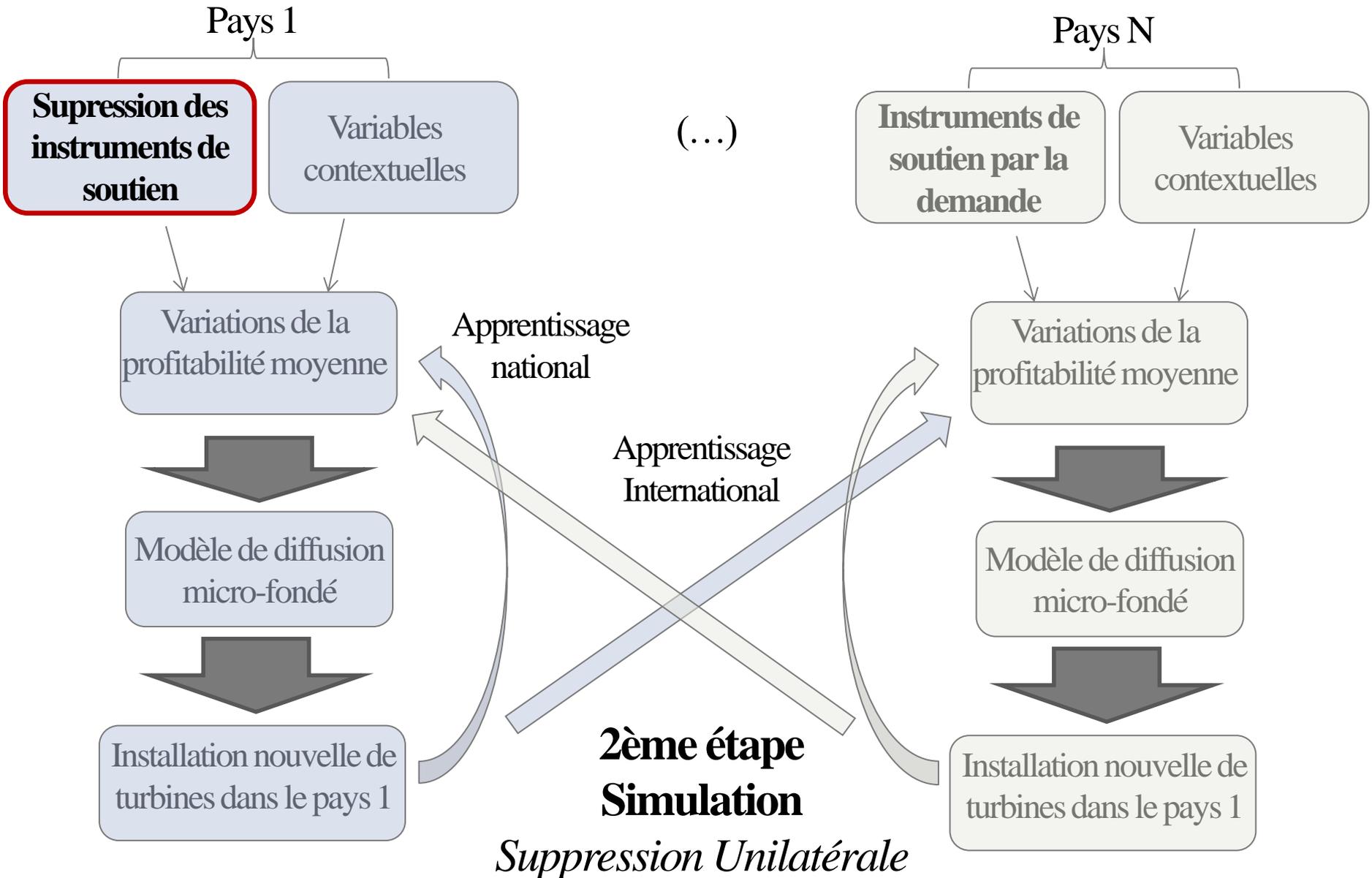


- Le soutien par la demande se voit donner le rôle de : (1) rémunérer les externalités de connaissance, (2) compenser la sous-tarification des émissions (« Externalité résiduelle », CE, 2014).
- **Question de recherche:** Quels ont été les effets de ces instruments sur la diffusion d'une technologie représentative (turbine éolienne)?
- **Contribution scientifique:**
  - Prise en compte de l'apprentissage dans la modélisation.
  - Modélisation des dynamiques de diffusion pour deux sous-groupes de pays (*Producteurs & Consommateurs* et *Consommateurs*).

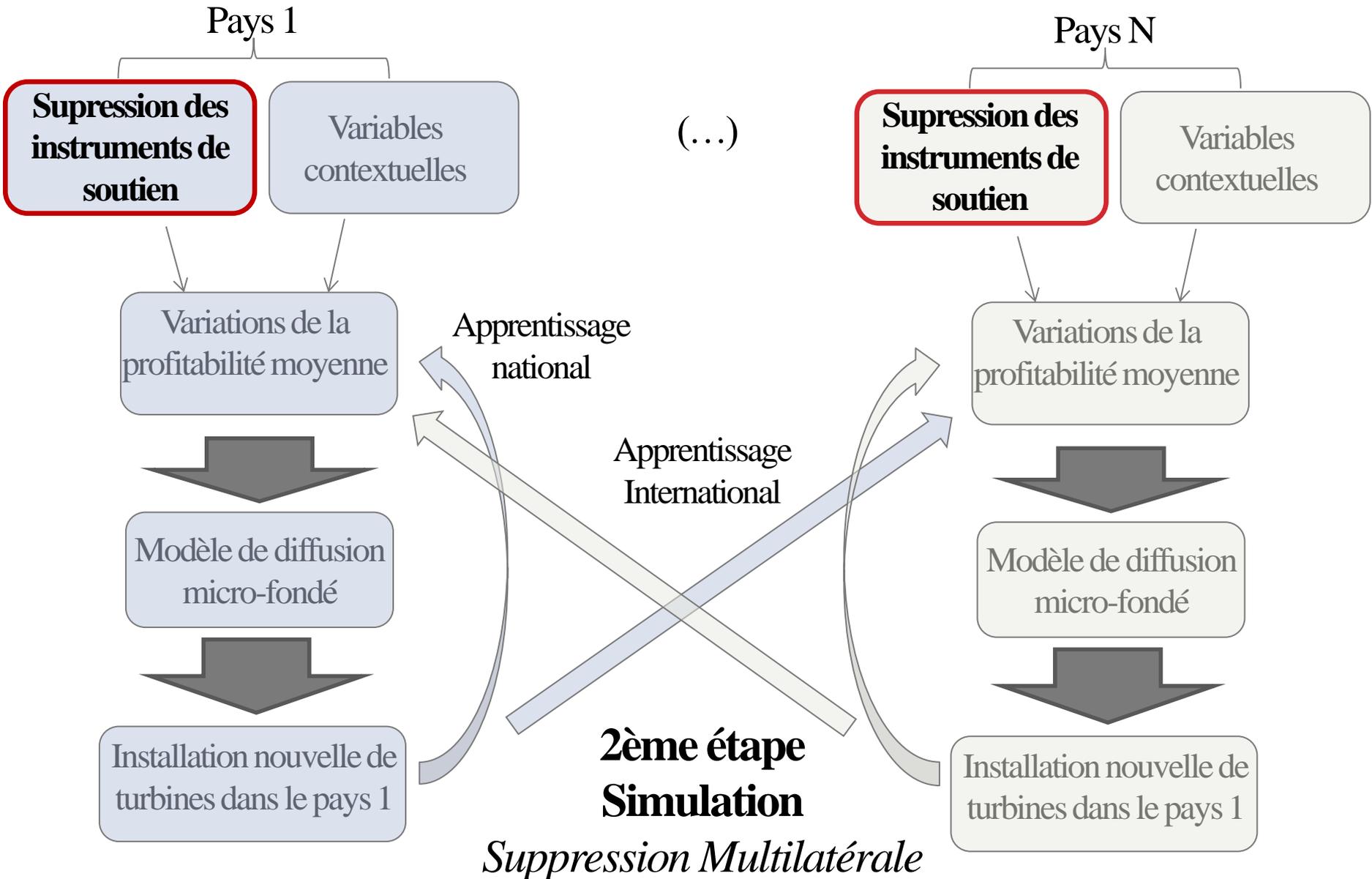
# Stratégie de recherche : l'analyse contrefactuelle de la diffusion



# Stratégie de recherche: l'analyse contrefactuelle



# Stratégie de recherche: l'analyse contrefactuelle



# Le rôle des filières industrielles dans les dynamiques de diffusion

Quel est l'effet d'une suppression en 2001 des instruments de soutien par la demande?

% MW 2012	France	Italie	Portugal	Allemagne	Danemark	Espagne
Suppr. Unilatérale	-95%	-84,5%	-71,5%	-32,4%	-34,6%	-43,3%
Suppr. Multilatérale	-96%	-86%	-84%	-41%	-41%	-54%

Diffusion fortement dépendante du soutien par la demande
Diffusion dite partiellement **auto-entrenue**

- Deux effets concourent à garantir le caractère partiellement auto-entretenu de la diffusion:
  - Un avantage de first-mover qui amorce la diffusion via un gain d'apprentissage.
  - Un poids relatif de l'apprentissage national par rapport à l'apprentissage régional (EU28) plus fort.

En palliant à l'absence de prix carbone, les instruments de soutien par la demande peuvent fortement contribuer à la diffusion d'une technologie.

- Le couplage avec une filière industrielle nationale permet de réduire la durée du soutien par la demande et d'amorcer une diffusion qui se perdure aux conditions de marché.

---

## (3) La mesure de la connaissance dans les technologies de l'énergie bas-carbone

---

*(Chapitre 3)*

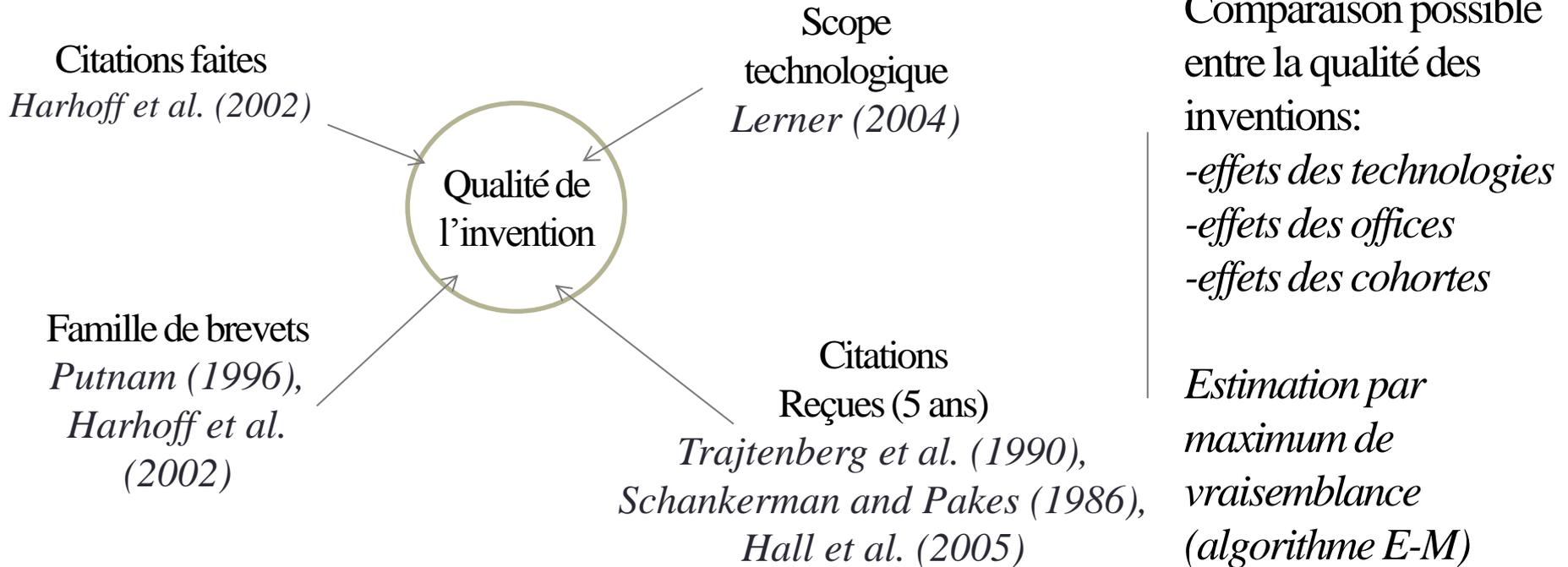
# Comment la mesure de l'innovation peut-elle guider l'allocation des fonds publics

---

- Pourquoi mesurer la connaissance?
  - (1) L'évaluation des politiques de soutien à l'innovation implique de disposer d'une mesure robuste de la connaissance.
  - (2) L'allocation du soutien à l'innovation peut se fonder sur deux critères complémentaires:
    - Les avantages technologiques dont dispose le pays dans les différents champs technologiques.
    - **Les dynamiques d'innovation propres à chaque technologie qui influencent la productivité des dépenses de R&D.**
- **Question de recherche:** Comment développer une mesure de la connaissance comparable d'un pays et d'une technologie à l'autre?
- **Contribution scientifique:**
  - Utilisation d'un Modèle à Facteur Latent appliqué aux technologies de l'énergie bas-carbone.
  - Offrir une comparaison des dynamiques d'innovation entre les technologies de l'énergie bas-carbone.

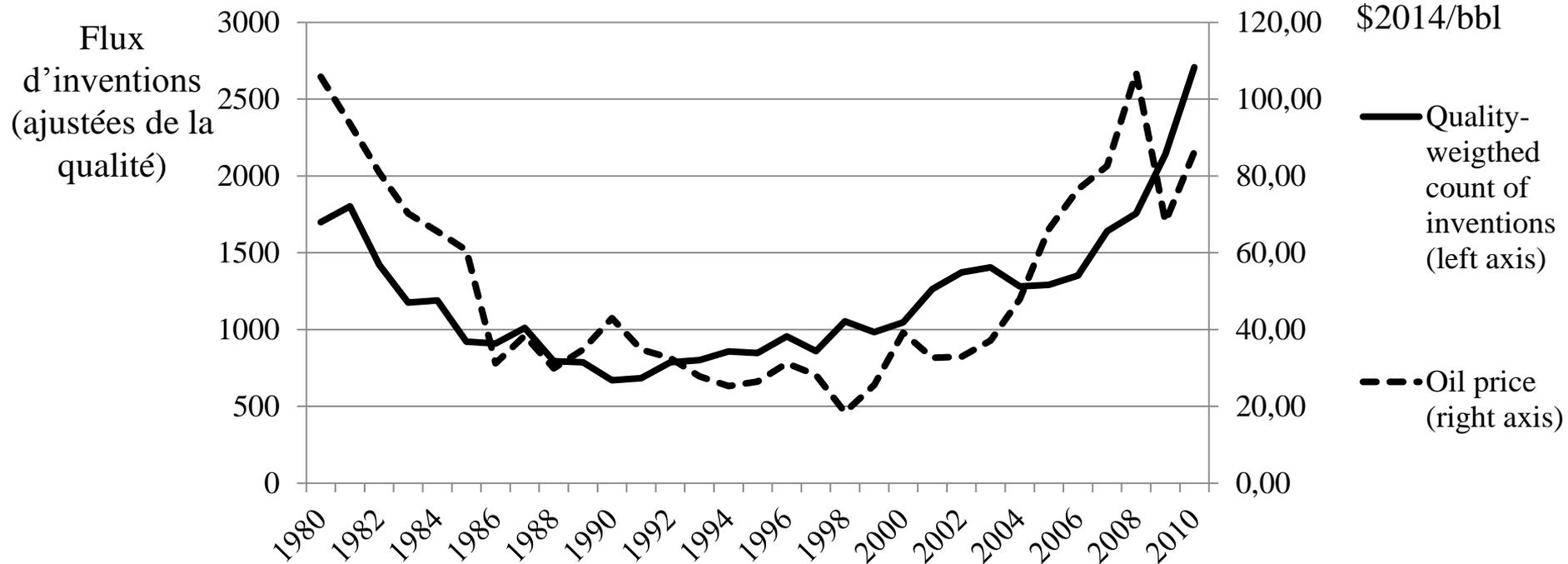
# Intuition du Modèle à Facteur Latent Commun

- Utilisation des données de brevet: la limite du compte simple



- Pour chaque invention, un indice de *qualité* est estimé.
  - Le facteur latent commun mesure le gain de valeur économique imputable au gain technique de l'invention brevetée.
- Le modèle est estimé pour un ensemble d'inventions brevetées dans les technologies de l'énergie bas-carbone entre 1980 et 2010.

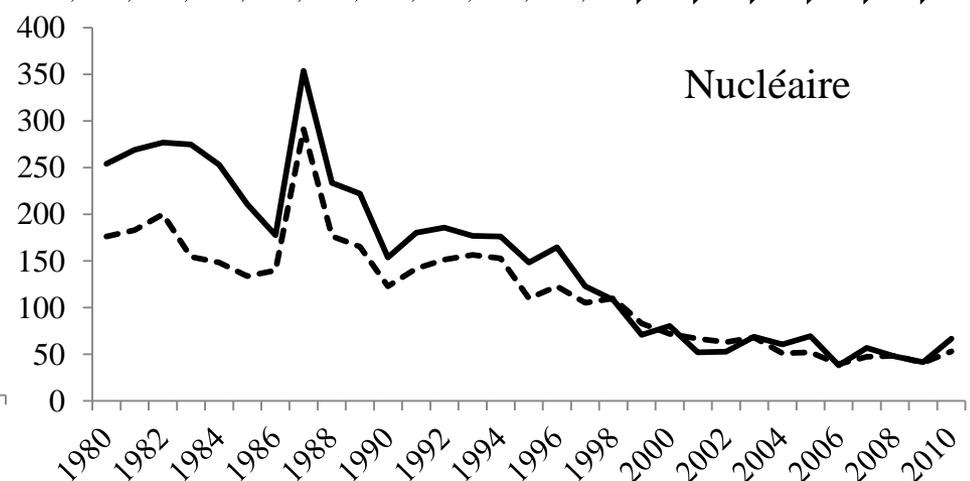
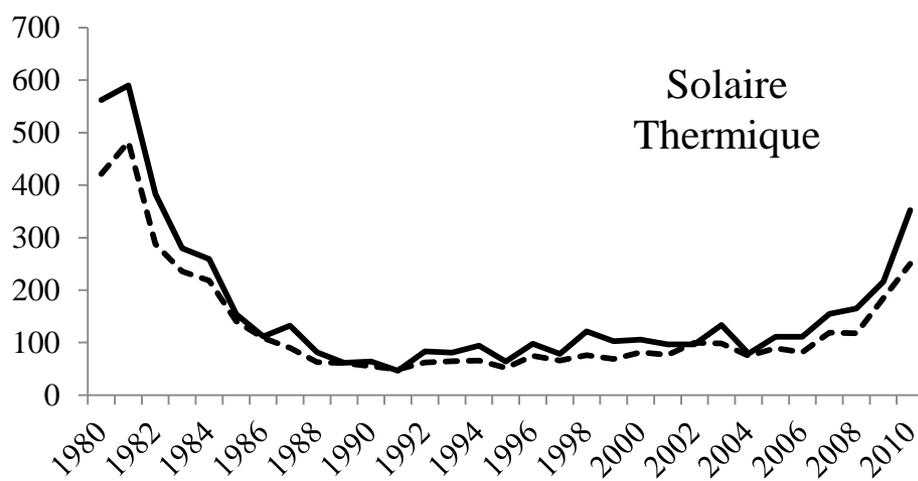
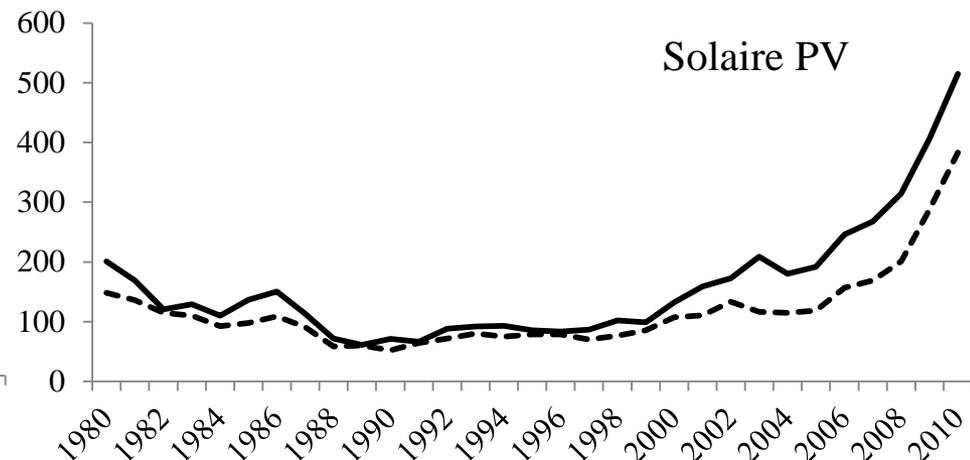
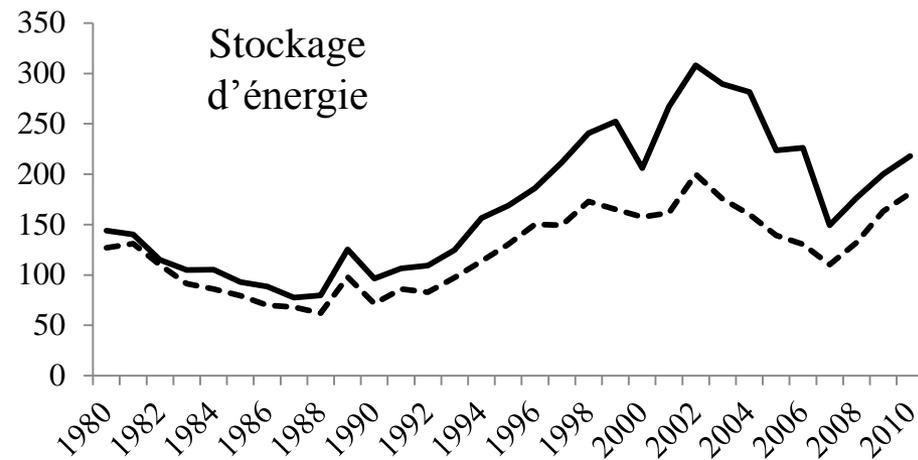
# La dynamique d'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone



- Forte corrélation avec le prix du pétrole (changement technique induit).
- Toutes technologies confondues, la qualité moyenne des inventions reste stable dans le temps (varie entre 1,2 et 1,4).
  - Les gains de qualité dans des technologies compensent la diminution de la qualité des inventions dans d'autres technologies.

# L'hétérogénéité des performances des technologies

- Les dynamiques d'innovation des différentes technologies présentent une forte hétérogénéité.



- L'allocation du soutien à l'innovation peut s'adresser en priorité aux technologies dans lesquelles les inventions gagnent en qualité.

---

# (4) Un système de brevet optimal dédié aux technologies environnementales

---

*(Chapitre 4)*

# Appropriation de la connaissance et externalité environnementale

---

- Pourquoi mettre en place un système de brevet?
  - Une fois la connaissance créée, la situation optimale est sa diffusion la plus large.
  - Mais en situation de laissez-faire, les entreprises vont (1) attendre de profiter des externalités de connaissance, ou (2) maintenir un secret sur leurs inventions.
  - Le brevet constitue une forme de contrôle social de la connaissance pour assurer sa création et sa divulgation.
- **Intuition:** L'objectif d'une taxe environnementale est d'induire un signal prix, la répercussion de ce signal prix dans l'économie dépend de la structure de la concurrence, cette dernière étant influencée par le système de brevet.
- **Question de recherche:** Dans un modèle simple, peut-on conclure à des interactions entre le système de brevet et la taxation environnementale?
- **Contribution scientifique:**
  - Extension de la littérature sur le système optimal de brevet aux inventions environnementales.
  - Formalisation d'un cas d'interaction entre les deux externalités.

# Le système optimal de brevet: application aux inventions environnementales

---

(1) On pose le problème du régulateur associé à la mise en place d'un système de brevet.

- Le brevet est défini en vue de minimiser le coût social temporaire du pouvoir de marché dont dispose son détenteur,
- Sous condition de garantir à ce dernier un revenu suffisamment incitatif pour induire les investissements en R&D souhaités.

(2) **Cas général:** deux types d'interactions.

- La taxe optimale payée par le détenteur du brevet est plus faible que celle qui aurait prévalu en l'absence d'un système de brevet.
- La taxe optimale payée par le détenteur du brevet corrige son pouvoir de marché et annihile ainsi le coût social temporaire du système de brevet.

➤ Dans les deux cas, le système de brevet doit être défini conjointement avec la politique de taxation environnementale.

(3) Deux applications sont proposées.

- Une taxation environnementale plus faible que la taxe Pigouvienne pour le détenteur du brevet permet de réduire la protection garantie par le brevet et ainsi d'améliorer l'efficacité du soutien.

---

## (5) Conclusion et perspectives de recherche

---

# Conclusion

---

*Le soutien efficace à l'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone implique la mise en place de politiques d'innovation qui leurs sont dédiées.*

- Dans l'attente d'une tarification des émissions de GES, les politiques de soutien à l'innovation peuvent contribuer au déploiement des technologies bas-carbone.
  - Une approche fondée exclusivement sur un soutien par la demande ne sera pas répliquable aux autres technologies bas-carbone en raison de son coût.
  - La diffusion des technologies peut être stimulée par (1) un gain d'apprentissage au début de la diffusion et (2) un soutien de plus long terme à l'offre.
  - La prise en compte de l'hétérogénéité des technologies contribue à améliorer l'efficacité de l'intervention.
- Le besoin de politiques dédiées à l'innovation bas-carbone perdure en présence d'une tarification des externalités environnementales.
  - Un système de brevet dédié aux technologies bas carbone est plus efficace.
  - les politiques de soutien à l'innovation ne peuvent pas être pensées indépendamment des politiques de tarification des externalités environnementales.

# Perspectives de recherche

---

(1) Définir le mix optimal entre soutien par la demande et soutien par l'offre.

- Amélioration de l'indice de qualité pour ne mesurer que la dimension purement technologique des inventions brevetées.
- Comparaison avec des technologies dites conventionnelles.
- Estimer les apports respectifs du déploiement de la technologie et des dépenses de R&D (*learning-by-searching* versus *learning-by-doing*).

(2) Interaction entre les deux externalités au cœur de l'innovation bas-carbone.

- Etendre l'analyse à l'innovation séquentielle.
- Elargir l'analyse à d'autres instruments de soutien à l'innovation (eg subventions à la R&D).
- Etablir la faisabilité d'un système de brevet dédié, associé à un crédit de taxe environnementale.

---

Merci pour votre attention

Questions

---

## Chapitre 2: Rôle de la Chine et des USA (1)

---

- Pourquoi ne pas les avoir inclus:
  - USA: politiques de soutien à l'échelle des Etats et non à l'échelle fédérale.
  - Chine: la diffusion décolle après 2005 (loi sur la transition énergétique) et les exigences de contenus locaux implique de modifier la structure de l'apprentissage.

- Quel impact?

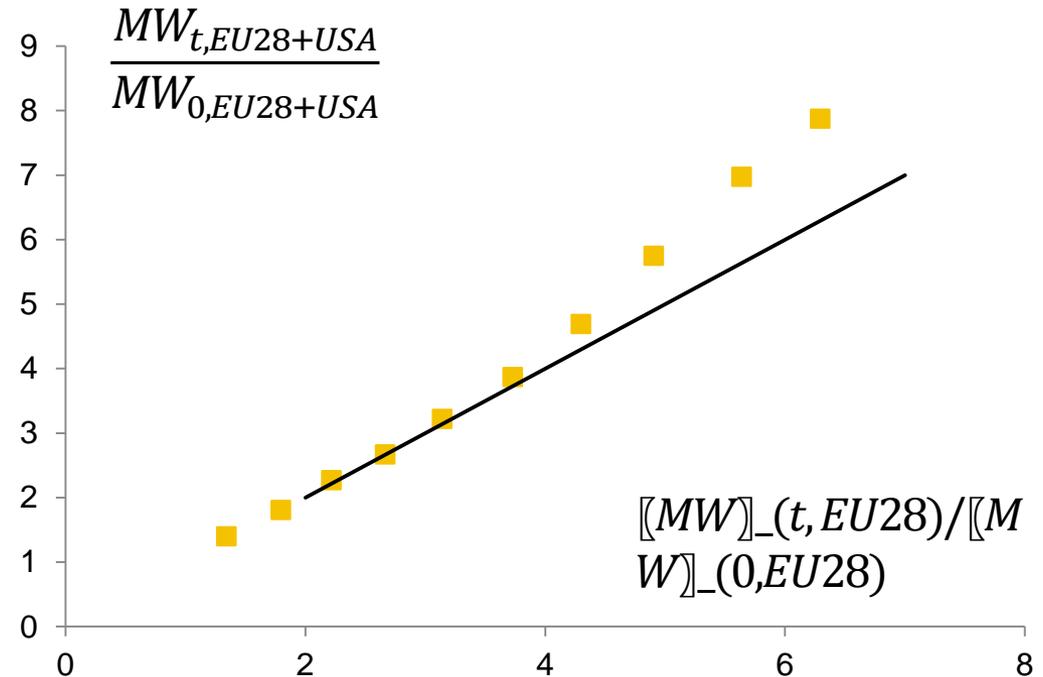
$$IC_{pays,t} = IC_{ajusté,t} * \left(\frac{MW_{t,pays}}{MW_{0,pays}}\right)^{-\beta} \left(\frac{MW_{t,EU28}}{MW_{0,EU28}}\right)^{-\sigma}$$


- Inclure des marchés supplémentaires va jouer sur le dernier terme.
  - Ce n'est pas la capacité absolue qui dicte le rythme d'apprentissage mais la capacité relative à la puissance installée en t=0 (ie 2000).
  - L'ampleur de l'impact va dépendre des écarts entre les rythmes de diffusion en EU28, EU28+USA et EU28+USA+CN.

## Chapitre 2: Rôle de la Chine et des USA (2)

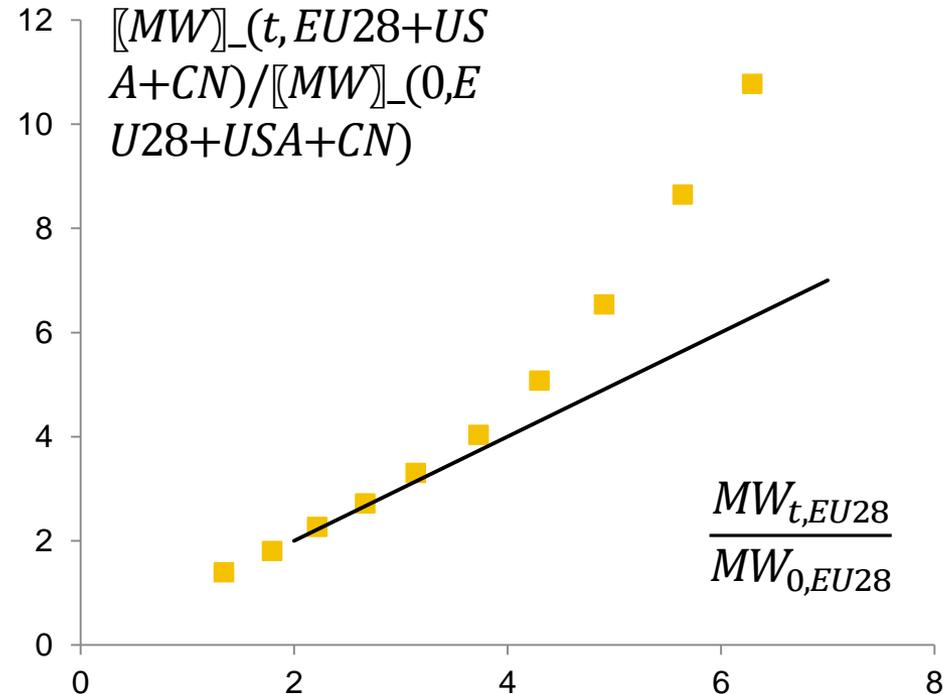
---

- Inclure les USA ne change pas radicalement le rythme de diffusion (uniquement sur les trois dernières années).



## Chapitre 2: Rôle de la Chine et des USA (3)

- Inclure la Chine aurait significativement impacté le rythme de diffusion après 2005 (début de la forte diffusion en Chine).

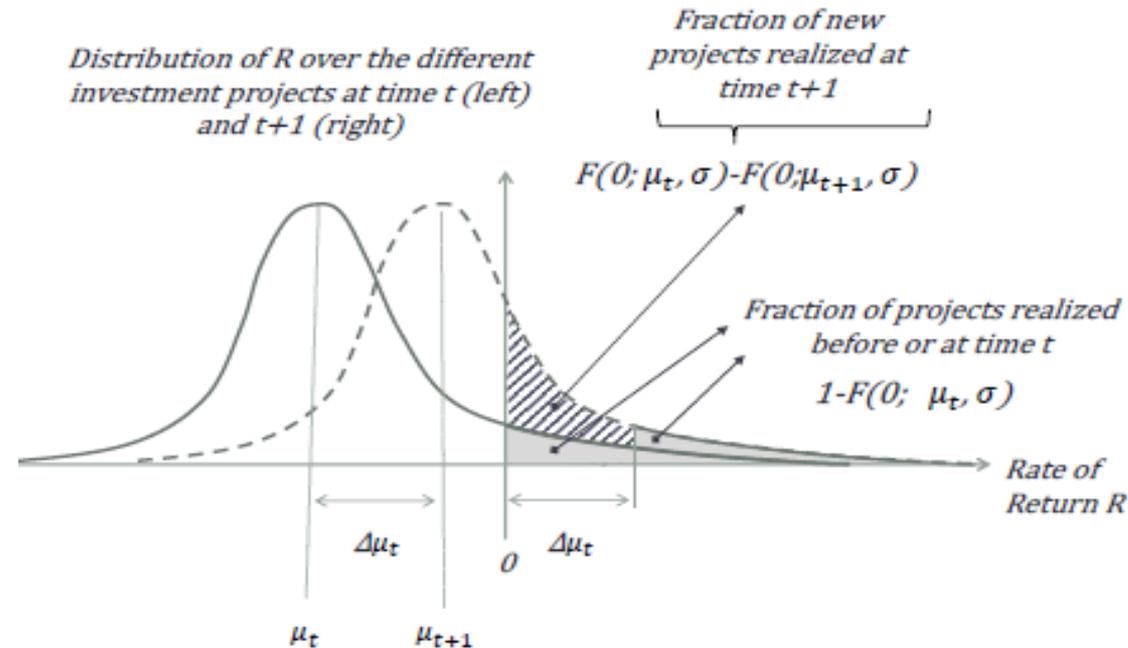


### Bilan

- Ces deux pays auraient pu contribuer à stimuler la diffusion sur les dernières années dans les pays consommateurs.
- L'apprentissage acquis via ces marchés aurait permis à la diffusion dans les pays producteurs & consommateurs de résister d'avantage à la suppression des instruments de soutien (renforce le caractère auto-soutenu des diffusions).

## Chapitre 2: $\sigma$ invariant dans le temps

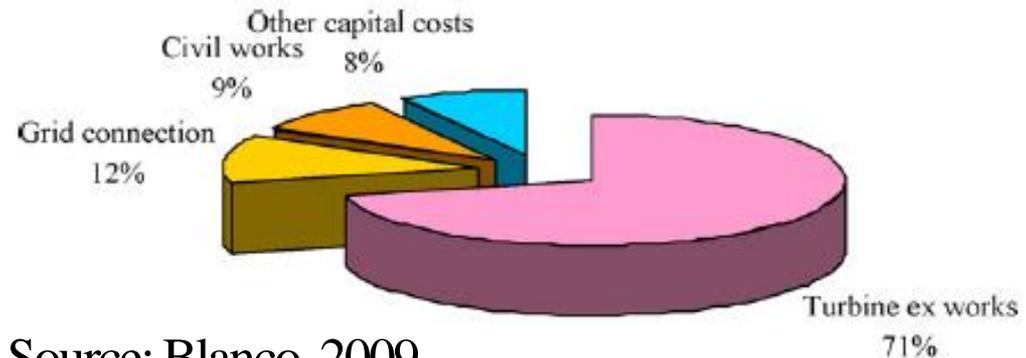
- Ce paramètre représente l'hétérogénéité des sites en termes de profitabilité au sein d'un même pays.



- Il reflète principalement:
  - Les différences de conditions climatiques et les différences d'accessibilité aux sites.
  - Au niveau microéconomique, pas de risque sur l'investissement (il est réalisé quand il est positif).
  - Les écarts de rentabilité se réduisent au fil de la diffusion (sites les plus rentables développés en premier).

## Chapitre 2: Unidimensionnalité de la connaissance dans l'éolien

- L'expérience acquise via le déploiement n'affecte pas de la même manière toutes les composantes des coûts d'investissement.



Source: Blanco, 2009

Fig. 1. Estimated capital cost distribution of a wind project in Europe.

- (1) Diviser le coût d'investissement en différentes composantes et leur appliquer des taux d'apprentissage différents.
  - Les pondérations varient d'un pays à l'autre et on ne dispose pas des données.
  - Multiplication des paramètres d'apprentissage.
- (2) Introduire une hétérogénéité dans l'apprentissage en distinguant l'apprentissage national et l'apprentissage Européen.
  - Principale limite: les deux sources d'apprentissage impactent la totalité du cout d'investissement (mais pas avec la même importance).

## Chapitre 3: Le facteur latent commun, qualité ou valeur économique?

---

- **Réponse** : l'unique facteur qui peut influencer communément les valeurs prises par les métriques

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{1,i} = \mu_1 + \alpha_{1,1}z_{1,i} + \dots + \alpha_{1,k}z_{k,i} + \lambda_1 \mathbf{y}_i + e_{1,i} \\ \dots \\ X_{p,i} = \mu_p + \alpha_{p,1}z_{1,i} + \dots + \alpha_{p,k}z_{k,i} + \lambda_p \mathbf{y}_i + e_{p,i} \end{array} \right.$$

- La valeur économique d'une invention est fonction:
  - De la qualité de l'invention.
  - De facteurs de marché.
- Pris isolement de la qualité, les facteurs de marché peuvent influencer:
  - La taille de la famille, le nombre de citations reçues (nombre d'inventions futures).
  - Ils n'influenceront pas la largeur du scope technologique et le nombre de citations *backwards*.
- On mesure donc la valeur imputable à un gain de qualité technique (seul facteur susceptible d'influencer les quatre métriques).

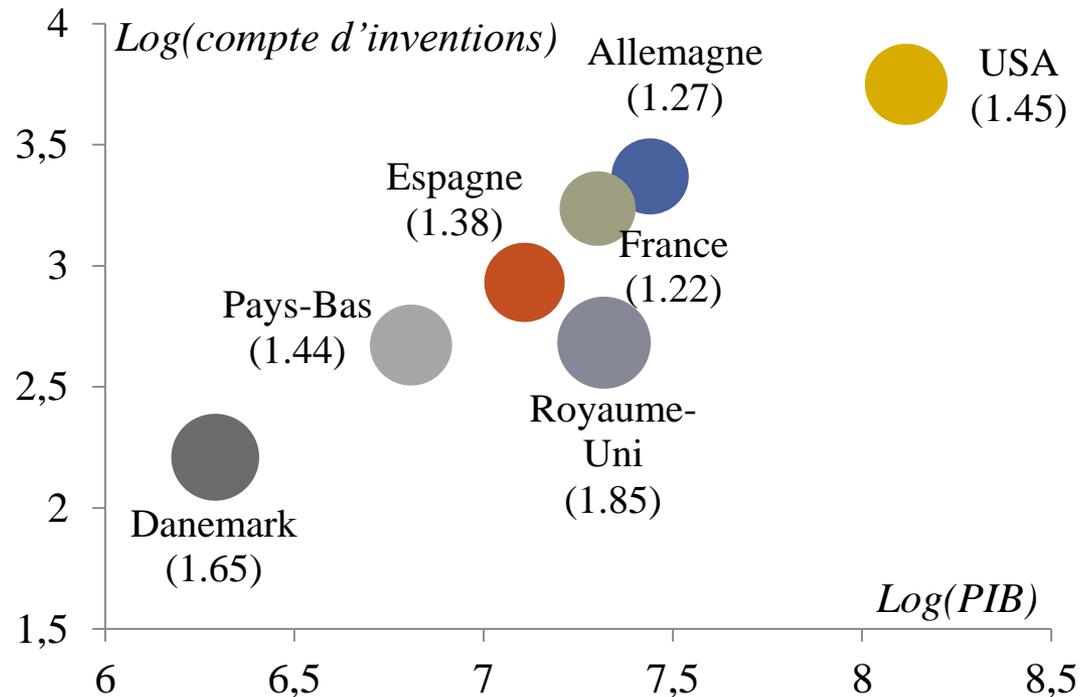
## Chapitre 4: Comment mettre en place la politique optimale?

---

- Dans des économies où les externalités environnementales sont tarifées.
- Le Chapitre 4 propose de coupler une taxation environnementale plus faible à un système de brevet dédié.
  - Une taxation environnementale plus faible peut être mise en place sous la forme d'un crédit de taxe environnementale.
  - L'intérêt de cet instrument est qu'il laisse le temps au régulateur d'évaluer les bénéfices environnementaux de l'invention après sa mise en œuvre.
- L'exemple des "patent-box" (eg Royaume-Uni, Luxembourg, Belgique)
  - Régime d'incitation fiscale conduisant les revenus de brevets à être taxés à un taux plus faible que les revenus courants.
  - L'instrument est transposable à des entreprises polluantes.

# La répartition des avantages technologiques au sein des pays

- Rapporté au PIB, le nombre d'inventions et leur qualité sont relativement stables d'un pays à l'autre.
  - La prise en compte de la qualité compense le plus faible nombre d'inventions au Royaume-Uni.
  - Le Danemark ressort comme un innovateur majeur.



- On observe une forte hétérogénéité des stocks d'avantages technologiques nationaux.

## Allemagne

Eolien, Solaire PV, Nucléaire,  
Solaire thermique et Stockage

## France

Nucléaire et Stockage

## Danemark

Eolien, Bio-carburants et  
Energie des mers

# Figures(1)

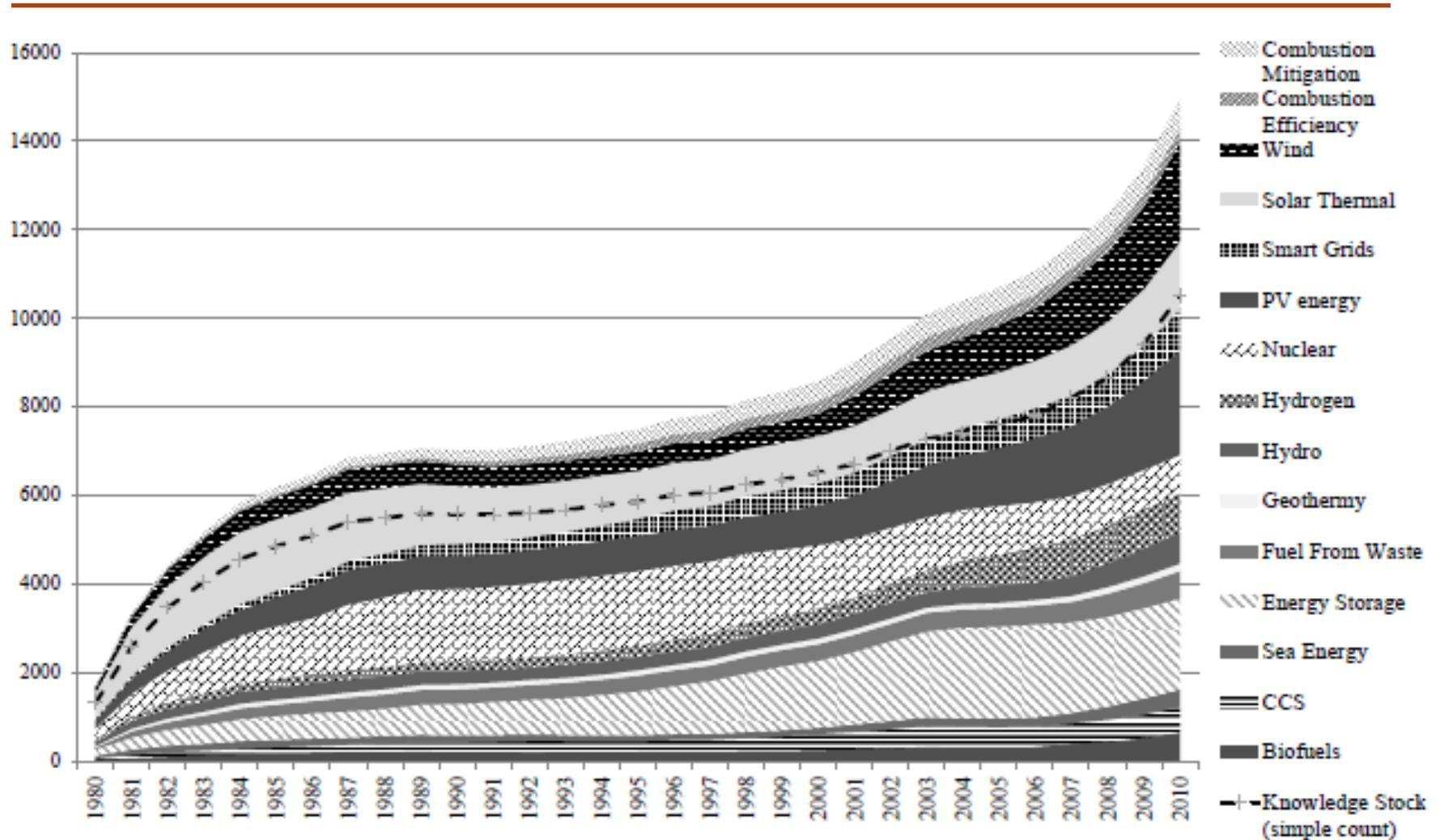


Figure 3.2: Quality-weighted stocks of knowledge, all countries taken together.

# Figures(2)

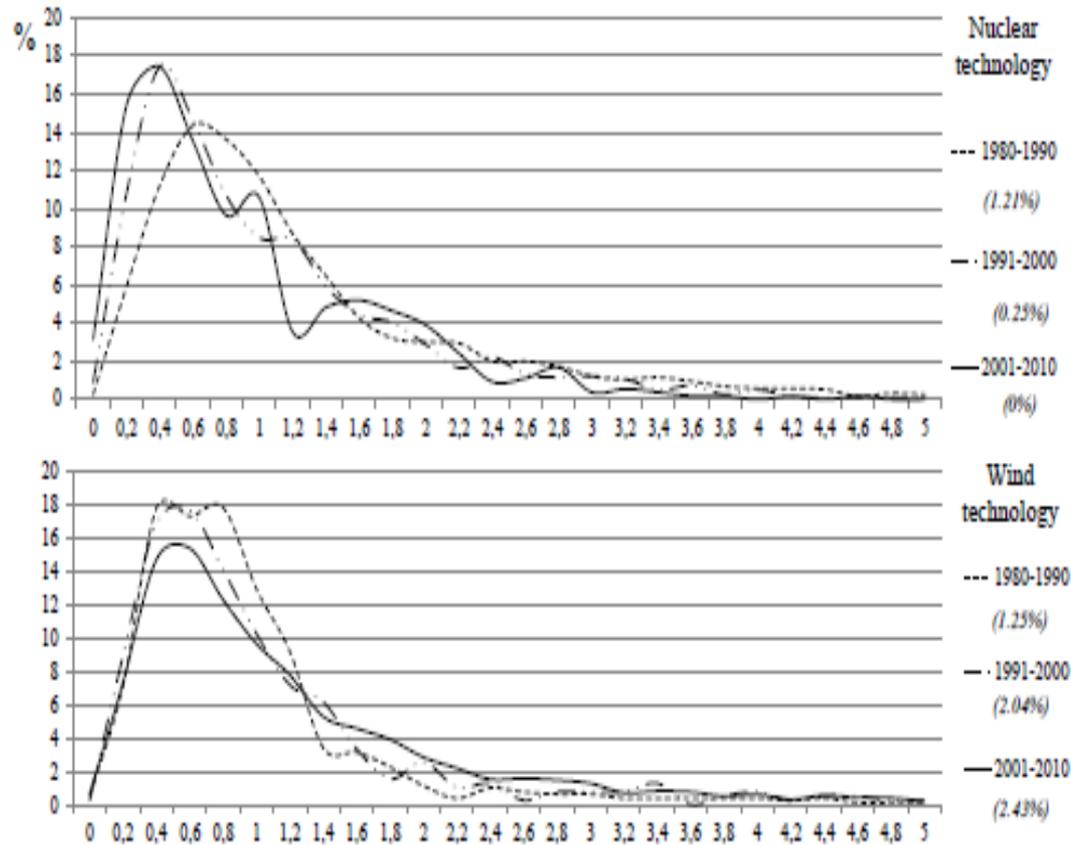


Figure 3.5: Distributions of the quality of inventions for three decades (Nuclear technology and Wind technology).

# Figures(3)

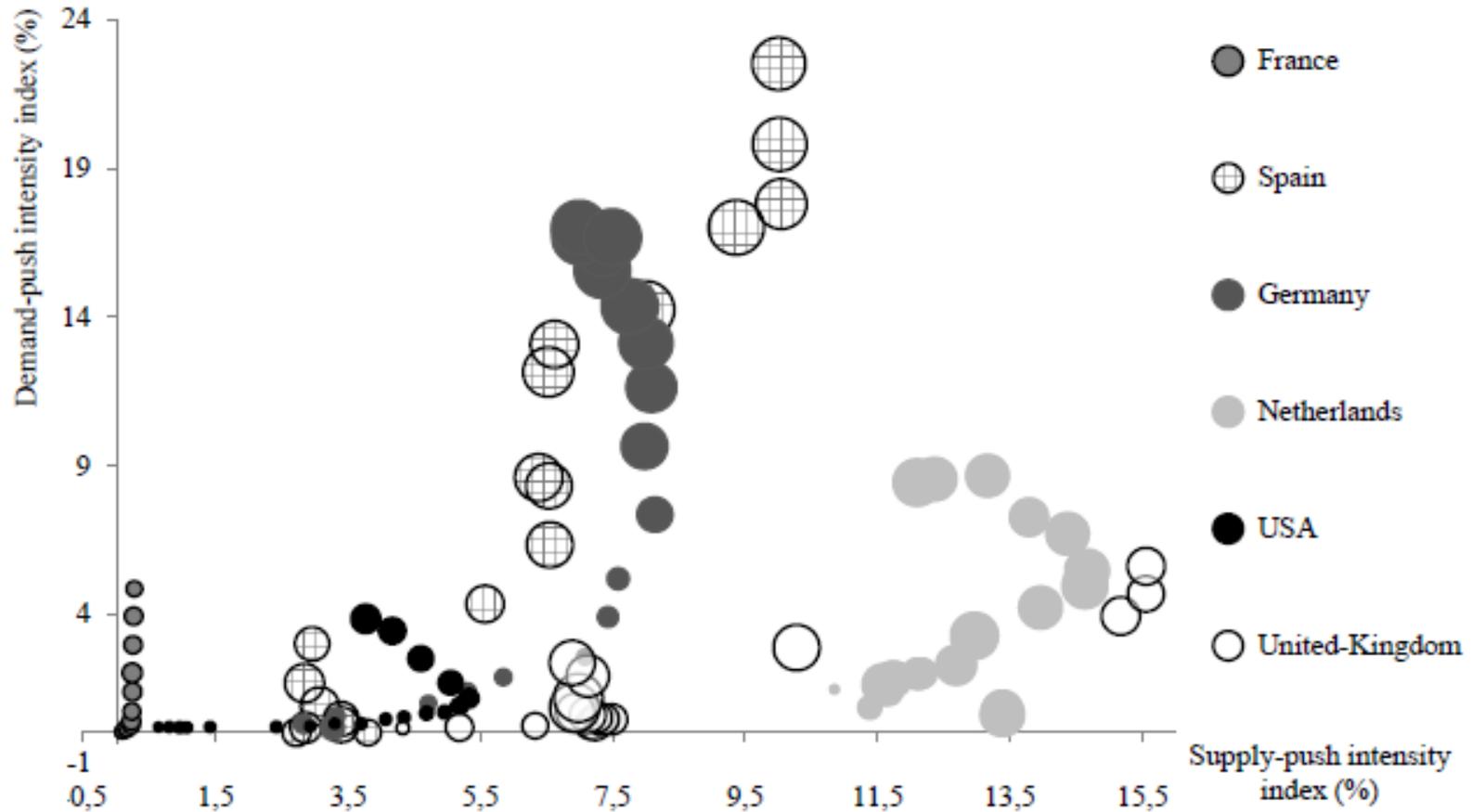


Figure 3.7: Relation between demand-pull, supply-push and knowledge (diameter) intensity indexes in wind power during 1990-2010.

## Figures(4)

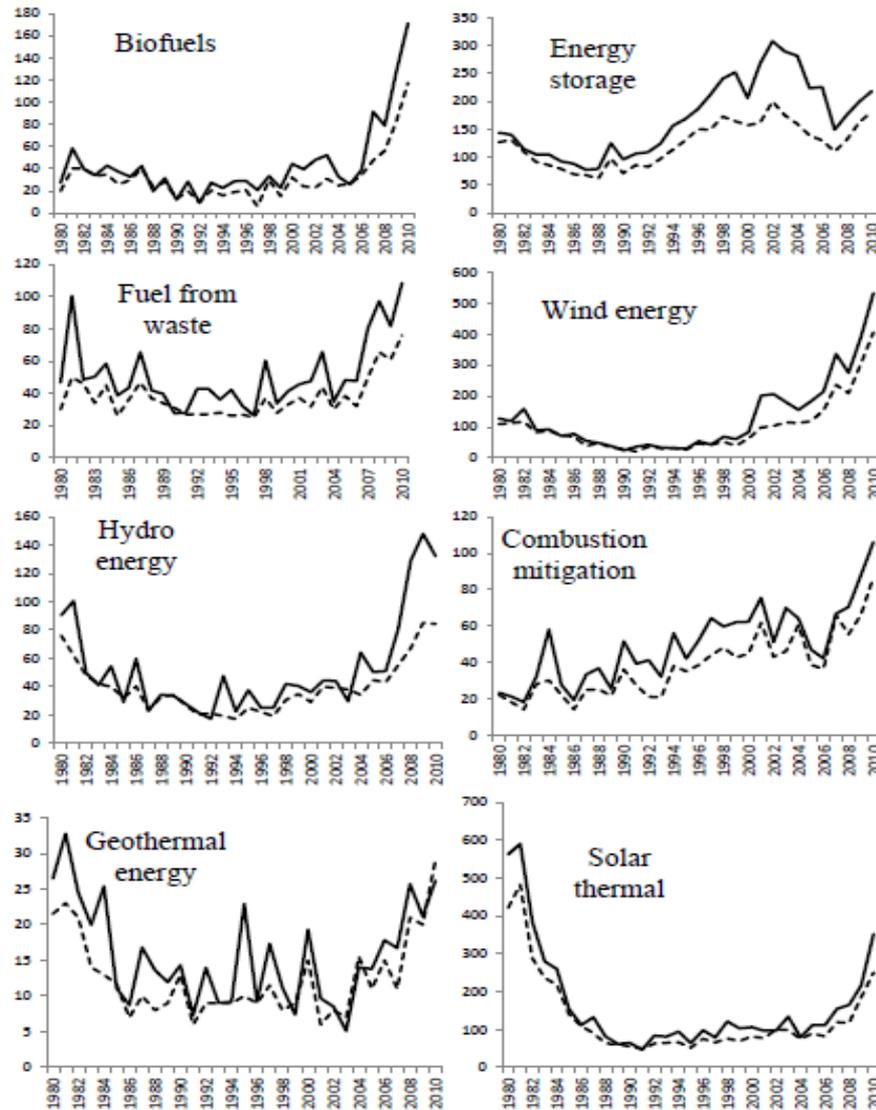


Figure 3.C.1: Evolutions of quality-weighted flow versus unweighted flow of inventions, all countries taken together (part 1).

# Figures(5)

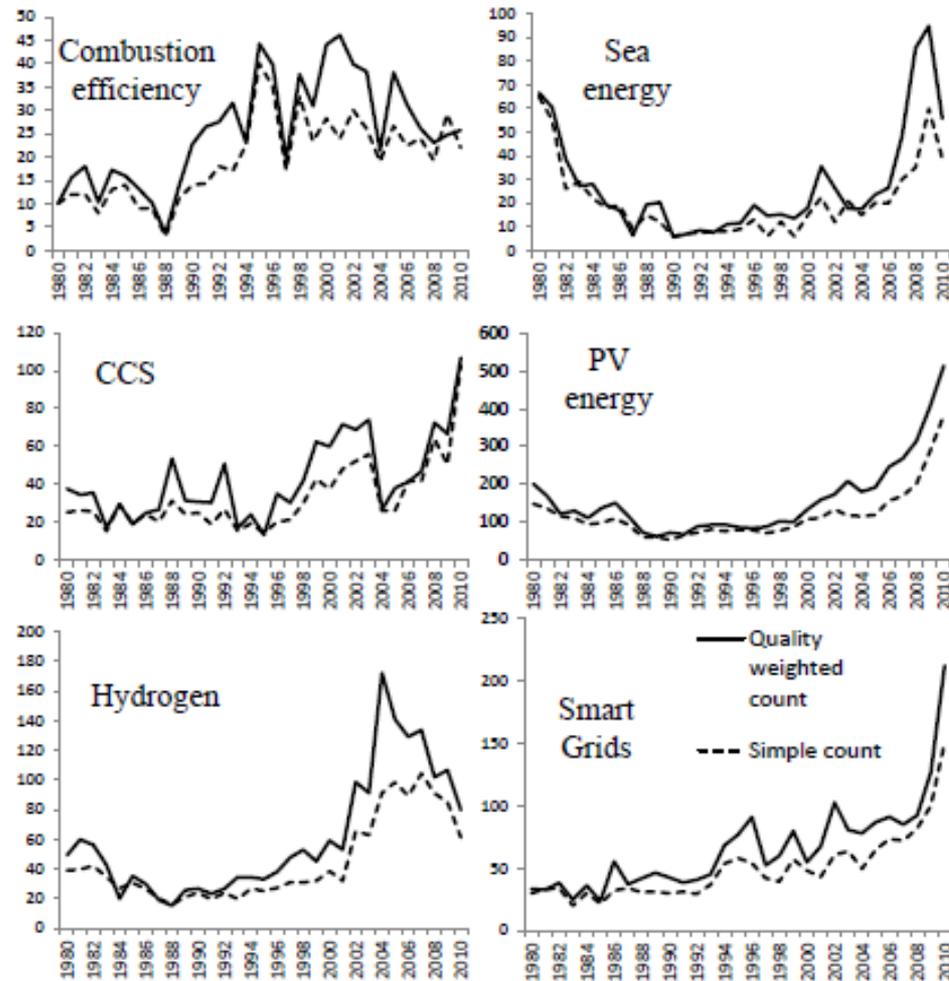


Figure 3.C.2: Evolutions of quality-weighted flow versus unweighted flow of inventions, all countries taken together (part 2).

# Figures(6)

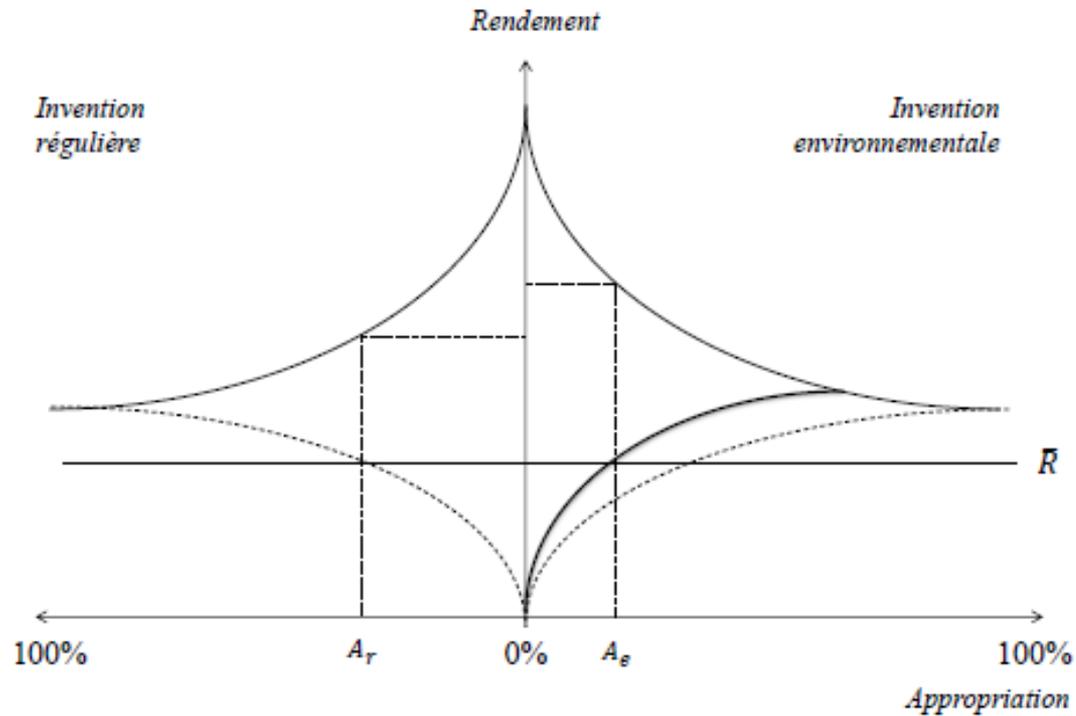


Figure 5.2: Illustration de l'interaction entre la taxation environnementale et l'appropriation d'une invention.

# Définitions: les deux défaillances

---

- Défaillances de marché sur l'environnement.
  - Les comportements de production et de consommation engendrent des externalités négatives sur l'environnement.
  - En l'absence de signal-prix les agents n'ont aucune incitation à prendre en compte ces externalités négatives.
  - Donc les bénéfices environnementaux des technologies bas-carbone ne sont pas reconnus dans une économie de marché.
- Défaillances de marchés sur l'innovation.
  - L'innovation repose sur la création de connaissance nouvelle.
  - Or, la connaissance est un bien qui n'est que partiellement appropriable: autrement dit un individu qui va créer de la connaissance nouvelle ne pourra pas contrôler pleinement sa diffusion. La conséquence est que d'autres individus pourront bénéficier de cette connaissance sans compenser l'individu créateur.
  - On considère donc qu'il y a une défaillance de marché sur la connaissance puisque:
    - La meilleure situation, une fois la connaissance produite, est que sa diffusion soit la plus large.
    - Mais pour qu'elle soit produite il faut inciter l'agent à investir.

Deux solutions: accroître l'appropriabilité (le détenteur du brevet est rémunéré pour l'utilisation de la connaissance) et/ou réduire le coût de "production" de la connaissance.

## Définitions: tarification parfaite des émissions

---

- Ce que Nordhaus appelle une tarification parfaite ou correction des externalités environnementales est une tarification qui fait porter aux individus le coût du dommage environnemental marginal associé aux émissions de CO<sub>2</sub>.
  - Selon Nordhaus cette taxe est optimale.
  - C'est vrai au prix d'une hypothèse de concurrence pure et parfaite (Nordhaus raisonne à l'échelle de la planète).
  - Or, le paradoxe est que l'innovation modifie la structure de marché (acquisition d'avantage technique) et que le système de brevet lui-même modifie la structure de marché.
  - Il n'y a pas de raison de penser que dans un monde avec de l'innovation la taxe optimale soit une taxe pigouvienne.

## Définitions: soutien à l'innovation neutre

---

- Politique de soutien qui ne discrimine pas les technologies environnementales des technologies conventionnelles (définies comme des technologies rétribuées via des marchés pré-existants).

# Définitions: Demand pull vs supply push

---

- Demand-pull
  - Stimule l'innovation par la demande. Cette approche prend la forme d'instruments économiques qui visent à créer un marché artificiel plus avantageux dédiés à un certain type de technologies.
- Supply-push
  - Stimule l'innovation en renforçant les capacités techniques d'un secteur et en favorisant les spillovers de connaissances (ex: crédit d'impôts sur la R&D).

## Définitions: Arbitrage du système de brevet

---

- Le régulateur part de l'existence d'un dilemme de la connaissance:
  - Une fois la connaissance créée, la situation optimale (diffusion la plus large) est celle qui réduit le plus le revenu de l'inventeur.
  - Dans une situation de laisser faire, l'inventeur sera tenté par le secret, on impose donc une forme de contrôle social de la connaissance en mettant un système de brevet.
  - Le système de brevet est un instrument dit de second rang :
    - Il cherche à maximiser le bien-être social provenant de la nouvelle invention.
    - Tout en garantissant un revenu suffisamment incitatif à l'inventeur pour que celui-ci investisse dans la création de connaissance.