



Centre de Recherche en Economie et Droit de l'Energie

**SOUS-INVESTISSONS-NOUS DANS LA RECHERCHE
SUR L'ENERGIE NUCLEAIRE DANS LE MONDE ?
LES ENSEIGNEMENTS D'UN MODELE
MACRO-ECONOMIQUE TRANSPOSE**

N. POPIOLEK , A. ABAD, A. BERWALD et J. G. DEVEZEAUX

Cahier de recherche n° 13.10.105

28 octobre 2013

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'Energie

CREDEN – Equipe ART Dev – Université Montpellier 1
Faculté d'Economie, Av. Raymond Dugrand, C.S. 79606
34960 Montpellier Cedex 2, France
Tél. : +33 (0)4 34 43 25 04

Sous-investissons-nous dans la recherche sur
l'énergie nucléaire dans le monde ? Les
enseignements d'un modèle macro-économique
transposé

N. Popiolek*, A. Abad†, A. Berwald‡ et J. G. Devezeaux§

Mai, 2013

"If I have seen further than others, it is by standing upon the shoulders of giants." Sir Isaac Newton (1676)¹

**Expert Sénior, I-tésé*

†*Ancien stagiaire à l'I-tésé et Université de Montpellier 1, Doctorant au Centre d'Analyse de l'Effizienz et de la Performance en Economie et Management (CAE-PEM) à l'Université de Perpignan*

‡*Doctorant I-tésé et Centre de Géopolitique de l'Energie et des Matières premières (CGEMP) à Paris Dauphine*

§*Directeur de l'I-tésé*

Résumé

La puissance publique a besoin d'indicateurs pour élaborer sa politique d'innovation, notamment pour savoir si elle doit prendre des mesures qui "dopent" la R&D, et jusqu'à quel niveau? Face à cette question difficile, un modèle macro-économique mondial intégrant le choix des agents en matière d'innovation a été adapté par les auteurs au domaine de l'énergie nucléaire. Un résultat fort en ressort : il faut "doper" la recherche dans le nucléaire, à condition de veiller à une bonne coordination de l'ensemble des programmes (publics et privés) pour éviter que les subventions n'induisent une duplication des recherches. Ce résultat est toutefois à considérer comme étant issu d'un modèle macro-économique simplifié, ne tenant pas compte de toutes les réalités industrielles du secteur nucléaire.

Mots clés : modèle de C. I. Jones et J. C. Williams (2000), R&D sur l'énergie nucléaire, externalités de la recherche, effet de duplication, effet "knowledge spillovers", processus de destruction créatrice.

L'activité de R&D est présentée par de nombreux économistes comme un déterminant essentiel de la productivité des facteurs de production (capital, travail, énergie, matières premières, stock de connaissance...) et, partant, de la croissance. Pourtant, comme elle présente de nombreux effets externes mal contrôlés par son initiateur, elle atteint rarement un niveau souhaitable pour la collectivité tout entière.

Externalités de la recherche

Les externalités associées à la recherche sont bien connues et l'on dispose d'instruments comme la protection intellectuelle, des formes de subvention directes ou indirectes à la recherche etc., pour tâcher de faire converger l'optimum privé, résultant du choix des agents, avec l'optimum social (tenant compte des externalités), si tant est que l'on parvient à l'identifier.

C. I. Jones et J.C. Williams (2000)¹ ont tenté de le faire en s'appuyant sur un modèle macroéconomique de croissance endogène, c'est-à-dire dans lequel la productivité des facteurs de production résulte de décisions en matière d'investissement en R&D, source d'innovation et de progrès technique². Jones et Williams ne sont pas les seuls à recourir à ce type de modélisation pour endogénéiser le progrès technique dans le choix des agents puisque P.M. Romer a développé en 1990 un modèle qui fait référence dans le domaine³. Cependant l'originalité des travaux de Jones et Williams est de décortiquer finement les effets externes associés à la recherche en en distinguant trois :

1. l'effet "knowledge spillovers" se traduisant par l'adoption d'un comportement de type passager clandestin⁴,
2. l'effet "stepping on toes" ou de duplication conduisant les agents à faire une course aux brevets,

1. C. I. Jones and J. C. Williams (2000). "Too much of a Good Thing? The economics of investment in R-D", *The Journal of Economic Growth*.

2. G. Lafforgue et N. Taverdet-Popiolek (2012). "Faut-il subventionner la R&D dans les technologies énergétiques non carbonées? L'apport des modèles macro-économiques sur la question", *REVUE DE L'ENERGIE* N°606, mars-avril pp.119-128.

G. Lafforgue, N. Taverdet-Popiolek, A. Berwald (2013), "A note on the induced effects of carbon prices and R&D subsidies in carbon-free technologies", *Energy Studies Review*, à paraître.

3. P. M. Romer (1990). "Endogenous technological change", *The Journal of Political Economy*.

4. Comportement opportuniste qui profite de l'investissement sans y participer.

3. et le "processus de destruction créatrice" cher à Schumpeter ⁵.

Le premier de ces effets, qui met aussi en lumière le problème de "l'appropriation du surplus du consommateur" ⁶ conduisant à une sous-rémunération des dépenses de R&D pour l'investisseur, est sans doute le plus important et constitue un frein pour l'activité de recherche privée. En même temps, l'effet spillovers augmente le stock de connaissance de la société, ce qui accroît sa compétitivité économique. La politique de propriété intellectuelle doit en tenir compte en laissant circuler de la connaissance dans la sphère économique. Contrairement au premier, le second effet est un moteur pour l'investissement privé et peut conduire à des niveaux de recherche trop importants par rapport à ce qui serait souhaitable pour la collectivité. Quant au troisième, il contient lui-même deux composantes :

1. un effet "carotte" qui incite l'agent à investir dans la recherche puisqu'il espère avec son innovation détrôner les produits de ses concurrents,
2. et un effet "bâton" qui le freine dans la mesure où ses innovations peuvent rendre obsolètes ses propres produits.

Après avoir montré un exemple de résultats du modèle de Jones et Williams relatif au niveau de recherche socialement optimal dans le monde, l'objet de cet article a trait à la transposition de ce modèle au domaine de l'électricité nucléaire. Une telle transposition demeure hasardeuse : nous nous sommes toutefois risqués à la faire gardant en tête dans l'interprétation des résultats, les biais méthodologiques associés, tant à la réduction sectorielle (passage d'un secteur entier de l'économie avec tous les biens, à un secteur limité à une seule commodité électrique) qu'à la translation temporelle (le modèle de Jones et Williams a été conçu et calibré, il y a plus de 10 ans).

5. J. A. Schumpeter (1942). "Capitalism, Socialism and Democracy", Harper and Brothers.

6. T. Bresnahan (1986) analyse l'impact des innovations dans l'industrie des ordinateurs sur le surplus des consommateurs. Il montre que les prestataires de services financiers (banques, assurances etc.) ont retiré un avantage compris entre 225 et 417 millions de dollars grâce à la baisse des prix des services informatiques. Cet avantage est beaucoup plus important que la somme que les prestataires ont payé pour les services informatiques (68 millions de dollars) et que les dépenses de R&D mises en oeuvre par le secteur informatique. Par conséquent, l'avantage collectif retiré de la R&D dans le secteur informatique s'est avéré supérieur à l'avantage privé de la R&D pour les fabricants informatiques.

Modèle de Jones et Williams

Les auteurs cherchent à estimer le ratio allocation socialement optimal des ressources en R&D sur l'allocation privée afin de savoir si la puissance publique doit "doper" la recherche ou non. Ils démontrent que ce ratio est fonction de l'effet duplication noté λ ainsi que de différents paramètres économiques comme la part du travail dans la production totale mondiale, le taux de croissance de la productivité des facteurs de production, le taux de croissance des dépenses de R&D, le taux de croissance de la force de travail, le taux d'intérêt réel, l'élasticité de substitution entre les biens de production⁷ et enfin la durée de vie de ces biens.

Le choix (ou calibrage) de ces paramètres économiques au niveau mondial couplé à des niveaux plus ou moins importants de duplication dans la recherche λ conduisent à des résultats intermédiaires notamment concernant l'effet knowledge spillovers noté ϕ , le processus de destruction créatrice noté ψ ainsi que d'autres variables économiques non détaillées ici. La figure 1 ci-dessous montre comment les inputs et outputs du modèle sont structurés pour conduire au ratio recherché et la figure 2 donne un exemple de simulations en fonction de l'effet duplication λ qui est d'autant plus fort qu'il est proche de 0.

Les agents économiques sous-investissent dans la R&D (ratio > 1) lorsque l'effet de duplication est faible ($\lambda \mapsto 1$) et cette relation est d'autant plus marquée que le taux d'intérêt est peu élevé. Par exemple, pour optimiser le bien-être social, si le taux d'intérêt est autour de 4% et λ de 0,5, il faudrait que les agents consentent 3 fois plus de dépenses de recherche qu'ils ne sont disposés à le faire. En revanche, si les entreprises réalisent une course aux brevets avec duplication des programmes de recherche, l'effet peut s'inverser, et ce d'autant plus vite que les taux d'intérêts sont forts.

7. Soit ξ l'élasticité de substitution. Lorsque le prix relatif d'un bien A par rapport à un bien B augmente de 1%, la demande relative du bien A diminue de $\xi\%$.

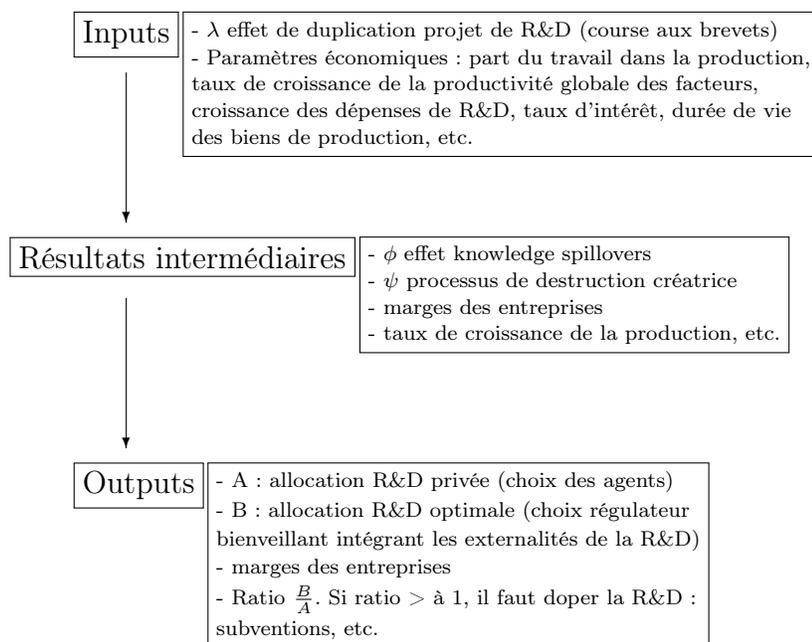


FIGURE 1 – Relation entre les paramètres du modèle de Jones et Williams

Modèle de Jones et Williams transposé à l'électricité nucléaire

Nous ne détaillons pas ici la manière dont le modèle a été transposé, ni la liste des limitations méthodologiques à cette transposition⁸. Nous nous contentons de donner la valeur des paramètres estimés (Tableau 1) ainsi que quelques résultats issus des nombreuses simulations effectuées pour s'assurer de la robustesse du modèle à des variations "raisonnables" des inputs. Nous tâcherons ensuite d'en tirer quelques leçons pour la recherche mondiale⁹ dans le nucléaire en restant tout de même très humbles dans l'interprétation des résultats d'un tel modèle macroéconomique que l'on a transposé à un unique

8. Cf. "Evaluation des effets externes de la R&D dans les énergies non carbonées : une application du modèle de C. I. Jones et J. C. William (2000) au secteur de l'électricité nucléaire français" A. Abad, I-tésé (2012) p. 48-49.

9. Les valeurs prises par les paramètres du modèle constituent une référence mondiale. Elles sont issues du rapport de la cour des comptes, concernant le coût de la filière électronucléaire en France qui s'appuie sur les comptes d'EDF, premier exploitant mondial de centrales nucléaires, de la base de données Power Reactor Information System (PRIS) de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et de celle de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) concernant les dépenses de R&D des différents pays membres.

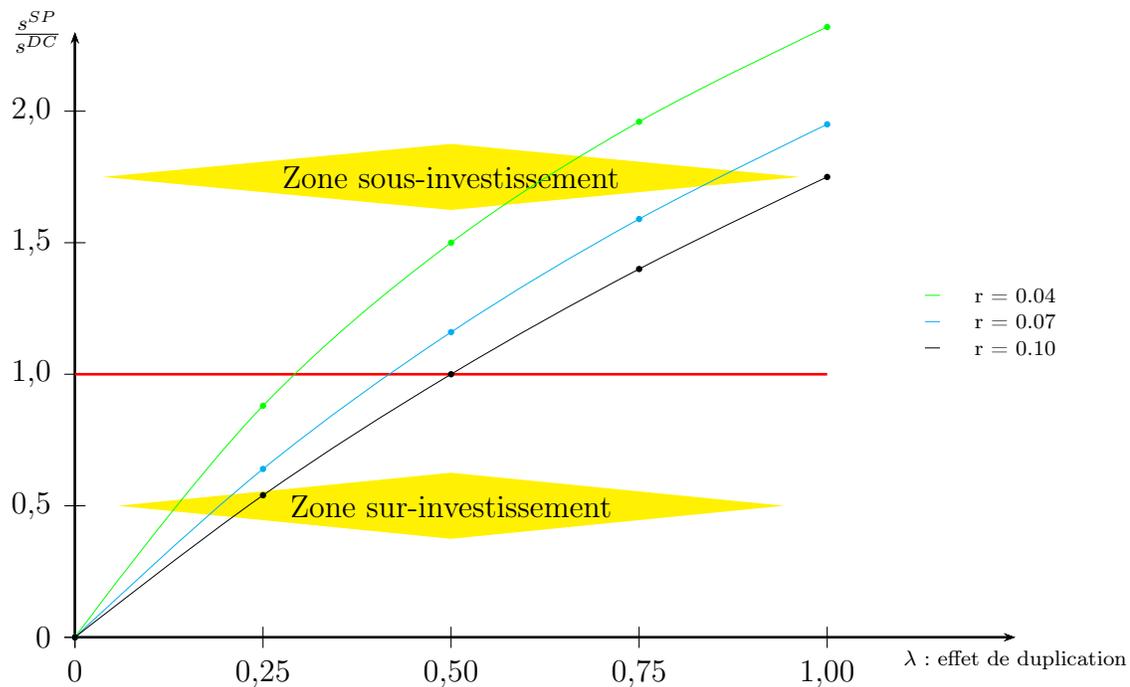


FIGURE 2 – Ratio allocation socialement optimale des ressources en R&D sur l’allocation privée ($\frac{s^{SP}}{s^{DC}}$) pour $\rho = 1$, $\xi = 1,56$ et différentes valeurs de r (taux d’intérêt, i.e. coût du capital dans le modèle)

secteur industriel!

Tableau 1. Paramètres d’entrée du modèle adapté au secteur de l’électricité nucléaire

λ_{NUC}	effet de duplication dans le nucléaire	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1	Hypothèses permettant de distinguer l’ampleur de l’effet de duplication
-----------------	--	-----------------------	---

Paramètres économiques	Définition	Valeur	Source de l'estimation	Valeur Jones et Williams (tous secteurs confondus)
α_{NUC}	part du travail dans la production d'électricité nucléaire	0.36	Rapport de la cour des comptes sur le coût de la filière électronucléaire en France (2012) ¹	0,64
$gTFP_{NUC}$	taux de croissance de la productivité globale des facteurs de production dans le nucléaire	0.003	Power Reactor Information System (PRIS), AIEA : taux de croissance annuel moyen de la disponibilité en France entre 1972-2011 ² , majoré pour tenir compte des heures pendant lesquelles le nucléaire n'est pas appelé à sa capacité disponible.	0,0125
gR_{NUC}	taux de croissance des dépenses de R&D nucléaire	0.01	Taux de croissance annuel moyen des dépenses de R&D dans le nucléaire pour l'ensemble des pays membres de l'AIE entre 2000 et 2010 ³	0,0347
n_{NUC}	taux de croissance de la force de travail dans le nucléaire	0.01	Rapport de la cour des comptes (2012) ⁴ : évolution de la force de travail spécialisée dans le nucléaire chez EDF entre 2008 et 2010	0,0144
r_{NUC}	Coût du capital dans le nucléaire	0.035-0.06	rapport de la cour des comptes (2012) ⁵	0,04 - 0,14
ρ_{NUC}	Paramètre conditionnant l'élasticité de substitution ξ_{NUC} entre les biens de production dans le nucléaire (centrales nucléaires)	Variant de 0,5 à 1,2	Echelle de valeur permettant de mettre en évidence une élasticité de substitution plus ou moins importante	0,5 - 2,77
ξ_{NUC}	Elasticité de substitution entre les biens de production dans le nucléaire	Variant de 1,5 à 4	Paramètre conditionné par ρ_{NUC} et α_{NUC} ⁶	Variant de 1,5 à une valeur très haute
τ_{NUC}	durée d'exploitation des biens de production dans le nucléaire	40	Rapport de la cour des comptes (2012) ⁷	10

Comme résultats intermédiaires, les simulations montrent que l'effet knowledge spillovers ϕ_{NUC} est légèrement plus élevé que dans le modèle multi-secteurs de Jones et Williams, quelque soit l'ampleur du phénomène de duplication λ_{NUC} (Tableau 2). On constate aussi que, compte tenu du calibrage effectué sur les paramètres, le processus de destruction créatrice au sein du secteur de l'électricité nucléaire ($\psi_{NUC} = 0,5$) est beaucoup plus faible que dans le modèle de Jones et Williams ($\psi_{NUC} = 5,4$).

1. Cf. p 54 tableau "Coût total du personnel", p 56 tableau "Les dépenses de consommations externes, hors combustibles", p 58 tableau "Le coût des fonctions centrales et supports" et p 335 tableau "Comparaison des résultats des méthodes d'évaluation du coût de production de l'électricité nucléaire"

2. Cf. Annexe 1

3. Cf. Annexe 2

4. Cf. p 52 tableau "Personnel pris en compte dans le coût de production nucléaire"

5. Cf. p 33

6. Cf. Annexe 3

7. Cf. p 208 "1 - Quelle est la durée de fonctionnement d'une centrale?"

Tableau 2. Effet knowledge spillovers pour $\rho_{NUC} = 1$

Effet de duplication dans le nucléaire λ_{NUC}	Effet knowledge spillovers ϕ_{NUC}	Effet knowledge spillovers, Jones et Williams ϕ
0.25	0.70	0.56
0.50	0.40	0.11
0.75	0.10	-0.33
1.00	-0.20	-0.78

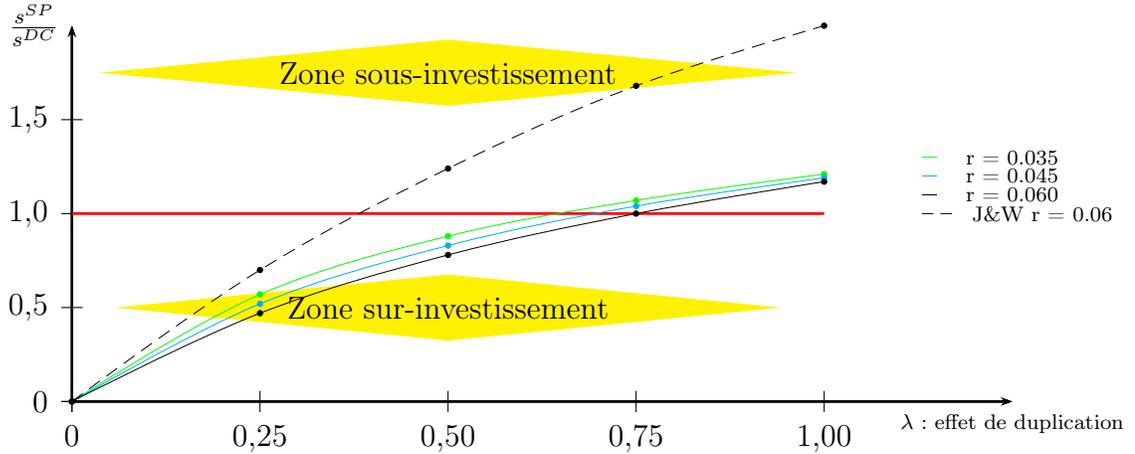


FIGURE 3 – Ratio allocation socialement optimale des ressources en R&D sur l’allocation privée ($\frac{s^{SP}}{s^{DC}}$) pour $\rho = 1$, $\xi = 2,78$ et différentes valeurs de r (taux d’intérêt, i.e. coût du capital) dans le nucléaire avec en pointillés Jones et Williams (J&W)

L’organisation de la R&D nucléaire au niveau mondial étant orchestrée depuis plusieurs dizaines d’années par un nombre restreint d’organismes de recherche et de grands groupes industriels, on peut penser que l’effet de duplication y est faible ($\lambda_{NUC} \rightarrow 1$). On déduit alors de notre modélisation qu’on serait au niveau mondial dans une situation de sous-investissement dans la R&D nucléaire. On note toutefois, que par rapport au modèle mondial, tous biens confondus, la zone de sous-investissement dans la recherche est moins large et que, au vu des résultats, le pilotage de la recherche pour éviter la duplication des programmes de recherche prend toute son importance. Hormis l’effet duplication, d’autres paramètres exercent une influence sur le résultat. C’est ce que tâchent de montrer les simulations présentées ci-après.

Influence des principaux paramètres

La durée de vie

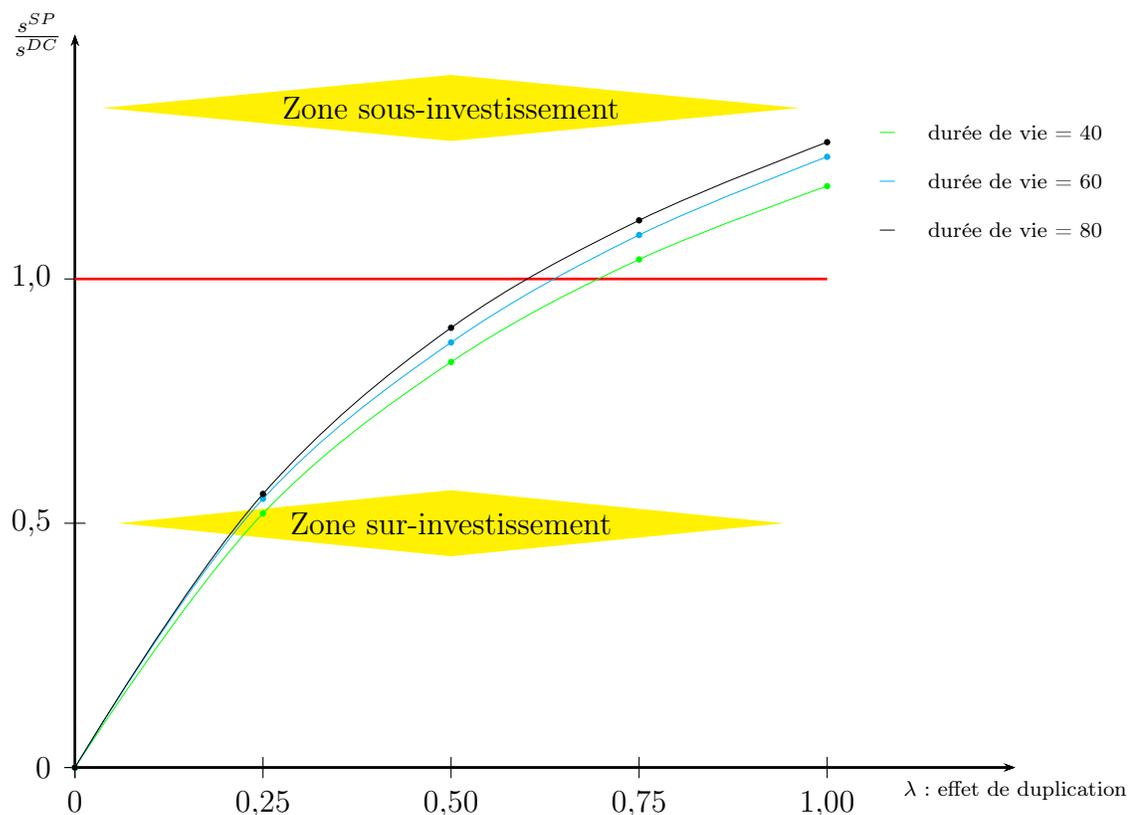


FIGURE 4 – Ratio allocation socialement optimale des ressources en R&D sur l'allocation privée ($\frac{s^{SP}}{s^{DC}}$) pour différentes valeurs de τ_{NUC} (durée de vie des centrales nucléaires), pour $\rho_{NUC} = 1$ ($\xi_{NUC} = 2,78$) et $r_{NUC} = 0,045$

On constate qu'augmenter la durée de vie des centrales est une raison supplémentaire pour "doper" la R&D nucléaire. Cette augmentation n'a pas d'influence sur l'effet knowledge spillovers mais fait diminuer le paramètre de destruction créatrice ψ_{NUC} .

La part du travail dans la production d'électricité nucléaire

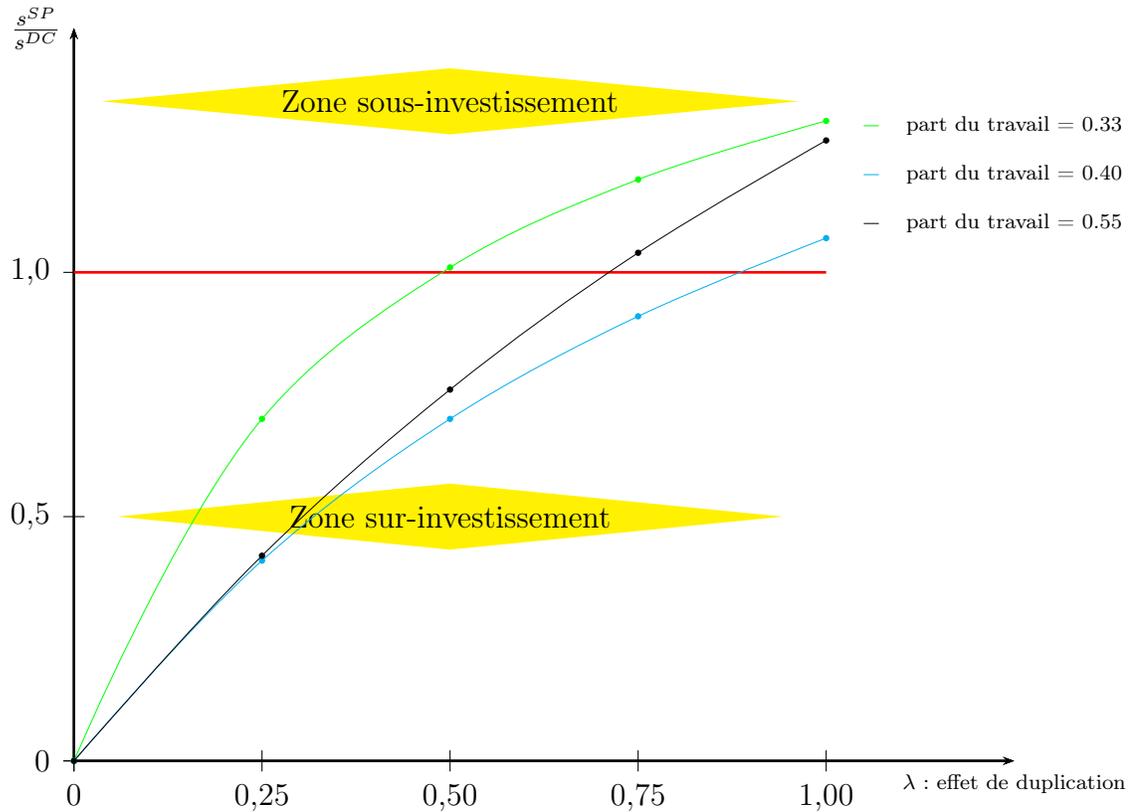


FIGURE 5 – Ratio allocation socialement optimale des ressources en R&D sur l'allocation privée ($\frac{s^{SP}}{s^{DC}}$) pour différentes valeurs de α_{NUC} (part du travail), pour $\rho_{NUC} = 1$ ($\xi_{NUC} = 2,78$) et $r_{NUC} = 0,045$

En restant proche de la valeur de référence, on constate que diminuer la part du travail dans la production d'électricité nucléaire est une raison supplémentaire pour "doper" la R&D nucléaire. Cette diminution fait augmenter légèrement l'effet knowledge spillovers et diminuer le paramètre de destruction créatrice ψ_{NUC} .

La productivité globale des facteurs de production dans le nucléaire

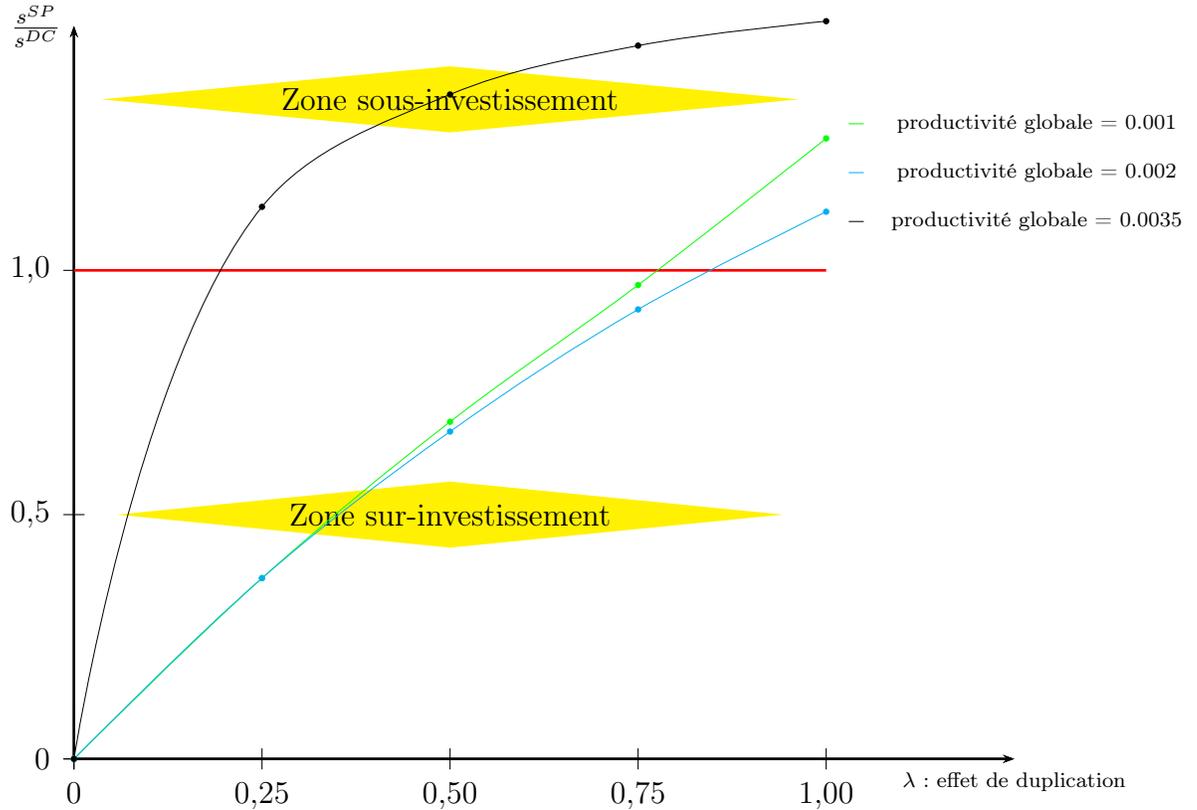


FIGURE 6 – Ratio allocation socialement optimale des ressources en R&D sur l'allocation privée ($\frac{s^{SP}}{s^{DC}}$) pour différentes valeurs de $g_{TFP_{NUC}}$ (productivité globale des facteurs) pour $\rho_{NUC} = 1$ ($\xi_{NUC} = 2,78$) et $r_{NUC} = 0,045$

Augmenter la productivité globale des facteurs dans le domaine nucléaire jouerait en faveur du "dopage" de la recherche dans ce secteur. Cette augmentation fait augmenter l'effet knowledge spillovers et diminuer le paramètre de destruction créatrice ψ_{NUC} .

L'élasticité de substitution entre les biens de production dans le nucléaire

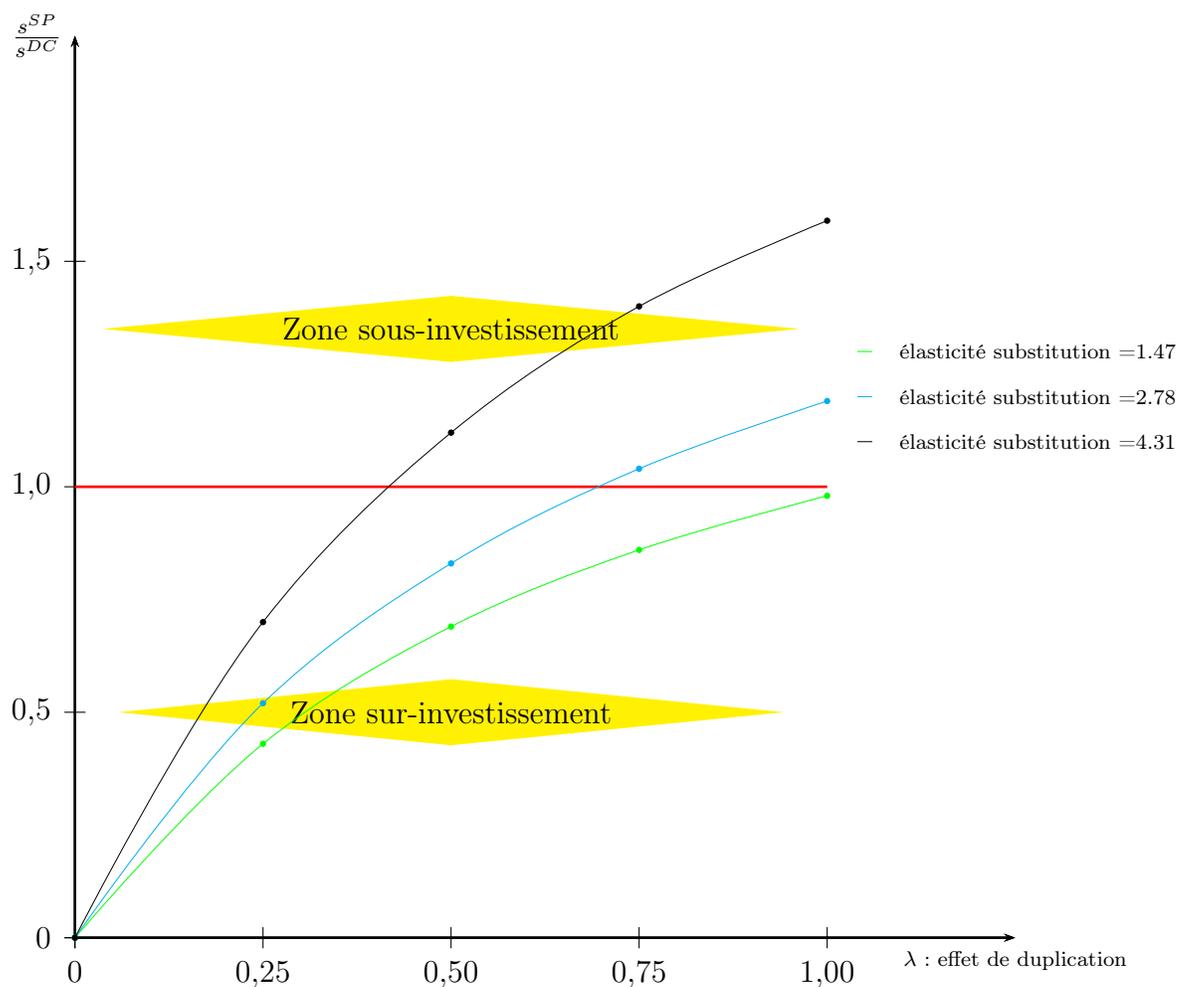


FIGURE 7 – Ratio allocation socialement optimale des ressources en R&D sur l'allocation privée ($\frac{s^{SP}}{s^{DC}}$) pour différentes valeurs de ξ_{NUC} (élasticité de substitution), $\alpha_{NUC} = 0,36$ et $r_{NUC} = 0,045$

Augmenter l'élasticité de substitution dans le domaine nucléaire jouerait en faveur du "dopage" de la recherche dans ce secteur. Cette augmentation fait augmenter l'effet knowledge spillovers et diminuer le paramètre de destruction créatrice ψ_{NUC} .

Le taux de croissance des dépenses de R&D nucléaire

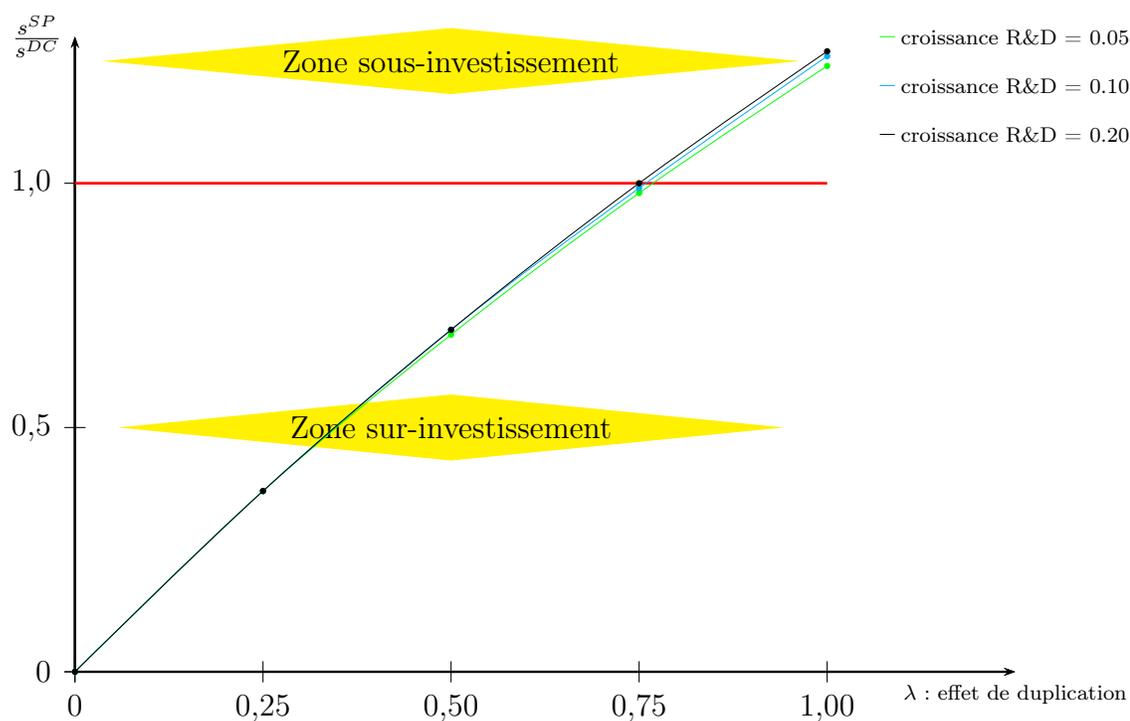


FIGURE 8 – Ratio allocation socialement optimale des ressources en R&D sur l'allocation privée ($\frac{s^{SP}}{s^{DC}}$) pour différentes valeurs de g_{RNUC} (dépenses de R&D) pour $\rho_{NUC} = 1$ et $r_{NUC} = 0,045$

L'effet de la croissance de la R&D dans le nucléaire sur le ratio "R&D optimale sur R&D privée" est ambigu dans la mesure où il dépend de l'effet duplication. Pour un effet duplication faible (λ proche de 1), observer un taux de croissance de la R&D plus fort devrait conduire à "doper la R&D" davantage. Cette augmentation fait diminuer l'effet knowledge spillovers et augmenter le paramètre de destruction créatrice ψ_{NUC} .

Conclusion

Ces dernières décennies, on assiste dans le champ énergétique à un accroissement de ce que Palmer Putnam¹⁰ nommait dans les années 50, le taux global d'efficacité de conversion qui est le ratio entre toutes les énergies appelées (renouvelables ou non) et les services énergétiques rendus à la société. J. M. Martin¹¹ attribue en premier lieu cet accroissement d'efficacité au changement technique mais il est aussi le fruit d'une meilleure organisation du système énergétique dans son ensemble. On constate aussi une augmentation de la variété technologique, plus de flexibilité dans les installations, un coût d'approvisionnement global plus faible et une meilleure compatibilité environnementale, SO_2 , NO_X (laissant encore beaucoup de marge d'amélioration concernant le CO_2).

La R&D est à l'origine de ces progrès techniques et organisationnels qui, si l'on en croit les résultats des modèles de croissance endogène, vont de paire avec le développement économique et le bien-être (croissance de la production et diminution de la concentration de pollution dans l'atmosphère, CO_2 principalement).

Le modèle de Jones et Williams (2000) est de ceux là bien qu'il ne s'occupe pas des aspects environnementaux car il met la sophistication de ses équations au service d'une compréhension plus fine des externalités de recherche : effets "knowledge spillovers", "stepping on toes" ou de duplication et "processus de destruction créatrice" comme nous l'avons expliqué dans cet article. Nous avons "détourné" son usage, pour évaluer non pas le besoin de R&D tous secteurs confondus mais celui qui serait nécessaire dans le nucléaire. Cela conduit à des biais inévitables :

1. Premier biais. Comme on le dit ci-dessus, par construction, le modèle ne tient pas compte des avantages en termes de CO_2 de cette technologie énergétique. La problématique du "facteur 4" est ignorée alors que l'énergie nucléaire est bas carbone.
2. Second biais. La question de la valeur optimale d'investissement dans la R&D énergétique ne peut pas trouver une réponse endogène : pour le décideur politique, il convient plutôt de savoir si un euro placé dans

10. P. Putnam (1953). Energy in the future, Baltimore

11. J.-M. Martin (2000). " Le changement des technologies de l'énergie : genèse, modalités et hypothèses explicatives ", in BOURGEOIS B. et al., Energie et changement technologique, Economica, pp. 17-61.

l'énergie rapporte plus qu'un euro en médecine ou dans l'automobile. Il faudrait pouvoir travailler en relatif par rapport à d'autres grands secteurs industriels, ce que le modèle agrégé de Jones et Williams ne permet pas de faire. Il pourrait être intéressant, en vérifiant avec des experts la robustesse des hypothèses, de comparer les résultats obtenus dans différents secteurs pour appréhender (sur le plan économique uniquement et compte-tenu des simplifications) dans quel domaine l'euro investi serait le plus efficace.

La liste des biais n'est pas exhaustive mais cet exercice nous a tout de même montré que pour favoriser la croissance économique mondiale (supposée corrélée à la croissance de la production d'électricité¹²), il apparaissait pertinent de "doper" la recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire, à condition d'organiser les filières industrielles et la recherche de manière à éviter la duplication des programmes. Si l'effet duplication est faible, aider la recherche est d'autant plus intéressant que les taux d'intérêt sont bas, ce qui implique de rechercher des modes de financements peu onéreux pour les investissements énergétiques. De même, la puissance publique aura d'autant plus intérêt à "doper" la recherche dans le nucléaire que la durée d'exploitation des centrales est longue, la part du travail dans la production d'électricité nucléaire faible, la productivité globale des facteurs de production importante, l'élasticité de substitution entre les biens de production forte et le taux de croissance de la R&D élevé.

Les résultats plus détaillés des figures présentées dans ce papier, auraient encore besoin d'être confrontés à l'avis d'experts des domaines concernés, ce qui permettrait en sus d'affiner le calibrage des paramètres et d'améliorer le *working paper*.

12. Hypothèse forte mais indispensable à la transposition du modèle de Jones et Williams

Annexe 1 : taux de disponibilité des centrales nucléaires (moyenne pondérée) en France par années

Year	UCF (Weighted Average)
1972	90.09
1973	59.74
1974	56.66
1975	68.78
1976	62.1
1977	68.6
1978	72.82
1979	60.96
1980	68.22
1981	68
1982	61.43
1983	68.88
1984	78.89
1985	80.66
1986	78.29
1987	73.8
1988	74.42
1989	70.7
1990	72.07
1991	70.34
1992	69.31
1993	80.67
1994	79.26
1995	80.95
1996	81.33
1997	82.47
1998	80.59
1999	79.15
2000	80.97
2001	80.93
2002	82.22
2003	82.55
2004	82.94
2005	83.49
2006	83.57
2007	80.16
2008	79.12
2009	77.88
2010	78.46
2011	80.74

Annexe 2 : taux de croissance annuel des dépenses de R&D nucléaire pour l'ensemble des pays membres de l'AIE

Années	Total R&D in Million Euro (2010 prices and exc. rates)	Taux de croissance annuel
2000	3850	0.02284803
2001	3622	-0.05922078
2002	4002	0.10491441
2003	4004	0.00049975
2004	3774	-0.05744256
2005	4198	0.11234764
2006	4040	-0.03763697
2007	4136	0.02376238
2008	4087	0.0118472
2009	4088	0.00024468
2010	4076	-0.00293542

Annexe 3 : élasticité de substitution entre les biens de production dans le nucléaire (ξ_{NUC})

Les valeurs prises par ξ_{NUC} sont défini par ρ_{NUC} et α_{NUC} selon l'hyperbole suivante : $\xi_{NUC} = \frac{1}{1-\rho_{NUC}(1-\alpha_{NUC})}$

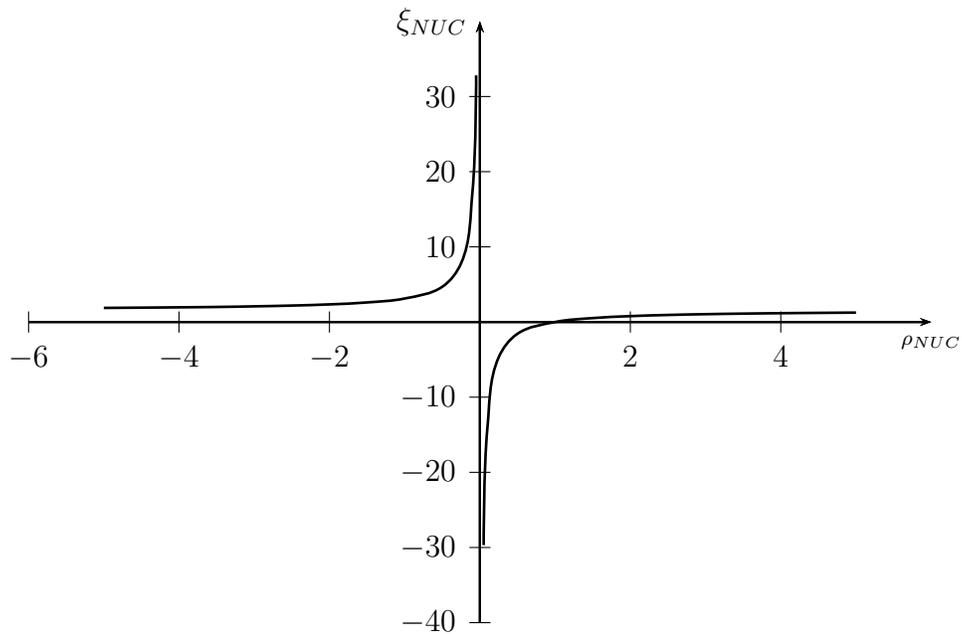


FIGURE 9 – Elasticité de substitution entre les biens de production dans le nucléaire (ξ_{NUC}) pour différentes valeurs de ρ_{NUC} et $\alpha_{NUC} = 0,36$

Références bibliographiques

A. Abad (2012). "Evaluation des effets externes de la R&D dans les énergies non carbonées : une application du modèle de C. I. Jones et J. C. William (2000) au secteur de l'électricité nucléaire français", I-tésé.

T. Bresnahan (1986). "Measuring the spillovers from technical advance : mainframe computers in financial services", *American Economic Review*.

C. I. Jones and J. C. Williams (2000). "Too much of a Good Thing? The economics of investment in R-D", *The Journal of Economic Growth*.

G. Lafforgue et N. Taverdet-Popiolek (2012). "Faut-il subventionner la R&D dans les technologies énergétiques non carbonées? L'apport des modèles macro-économiques sur la question", *REVUE DE L'ENERGIE*.

G. Lafforgue, N. Taverdet-Popiolek, A. Berwald (2013). "A note on the induced effects of carbon prices and R&D subsidies in carbon-free technologies", *Energy Studies Review*, à paraître.

J. M. Martin (2000). "Le changement des technologies de l'énergie : genèse, modalités et hypothèses explicatives", in BOURGEOIS B. et al., *Energie et changement technologique*, *Economica*.

N. Popiolek (2011). "Faut-il subventionner la R&D pour les technologies énergétiques décarbonées : que nous disent les modèles macro-économiques", *Lettre I-tésé*, juillet.

P. Putnam (1953). *Energy in the future*, Baltimore.

P. M. Romer (1990). "Endogenous technological change", *The Journal of Political Economy*.

J. A. Schumpeter (1942). "Capitalism, Socialism and Democracy", Harper and Brothers.