

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

DISPONIBILITÉ À LONG TERME DES RESSOURCES MONDIALES D'URANIUM

Antoine MONNET

Thèse soutenue le 2 Novembre 2016

Composition du jury

J.-G. DEVEZEAUX DE LAVERGNE	Examineur
J. FONTANEL	Examineur
S. GABRIEL	Encadrante
P. GEOFFRON	Rapporteur
F. LANTZ	Rapporteur
J. PERCEBOIS	Directeur de thèse

DISPONIBILITÉ À
LONG TERME DES
RESSOURCES
MONDIALES
D'URANIUM

**1. CONTEXTE ET QUESTIONS DE
RECHERCHE**

2. MÉTHODE

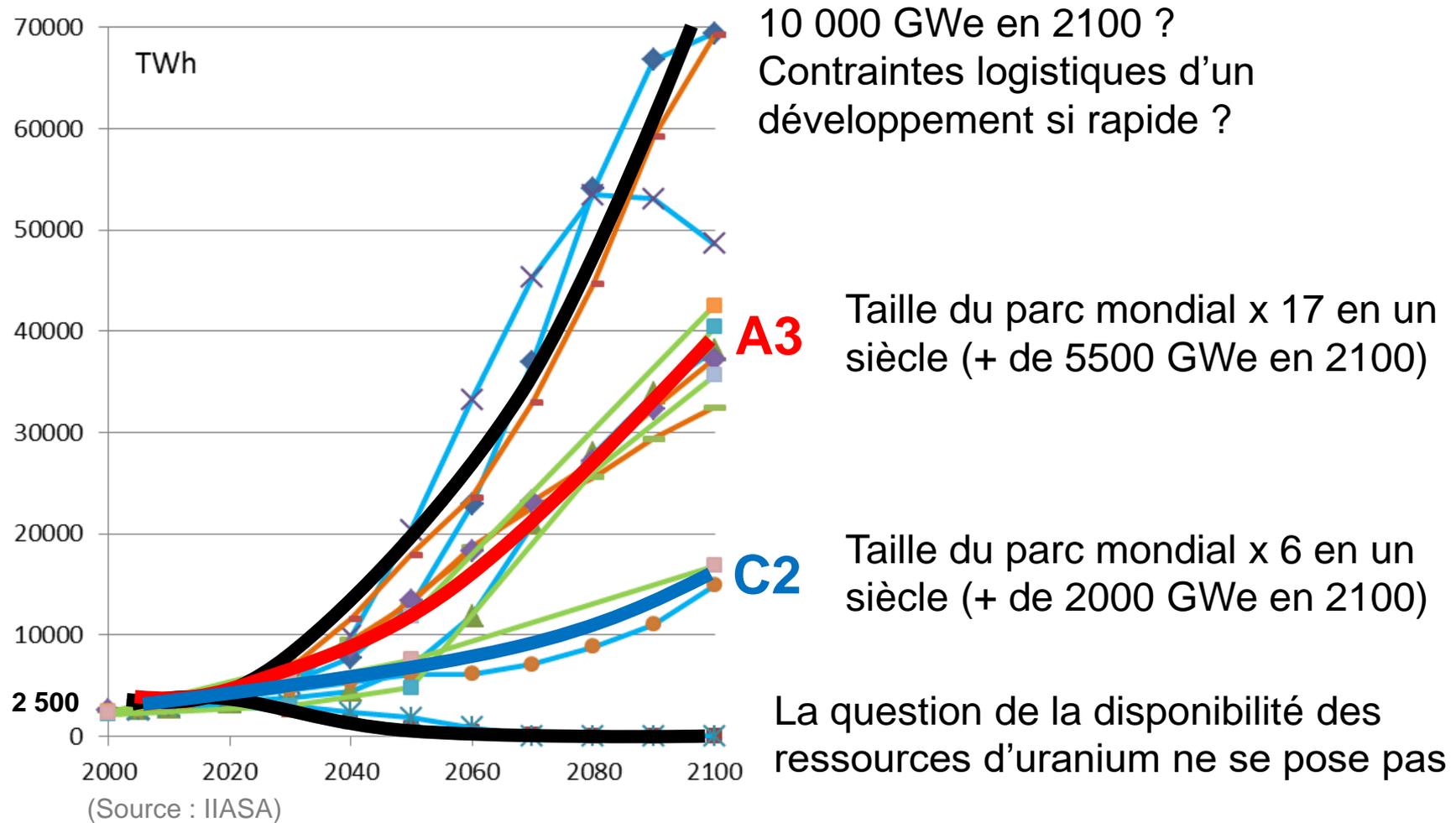
3. PRINCIPAUX RÉSULTATS

1. CONTEXTE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

**Évolution à long terme du parc
électronucléaire mondial
Scénarios de demande d'uranium
Disponibilité de l'uranium**

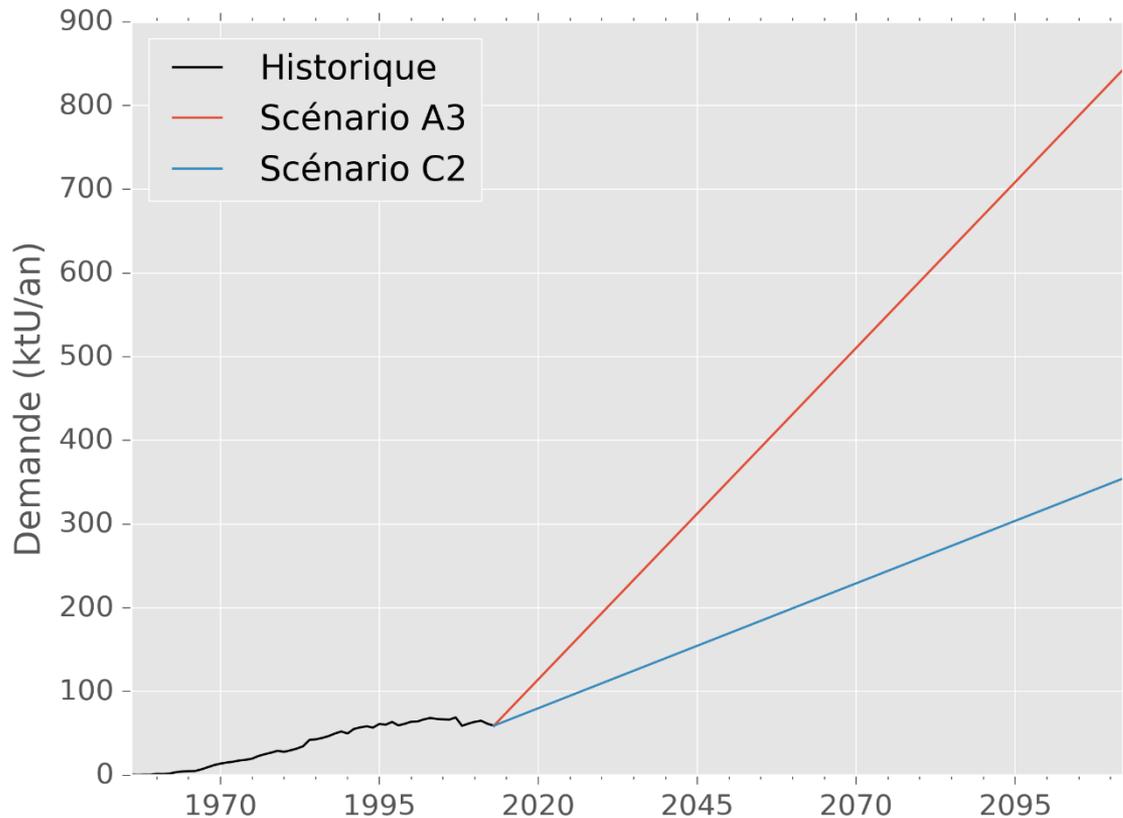
ÉVOLUTION À LONG TERME DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE MONDIAL

■ 2 500 TWh produit en 2015 et une multitude de scénarios possibles au XXIe siècle



SCÉNARIOS DE DEMANDE D'URANIUM

- Technologie REP dominante au XXIe siècle en cycle ouvert (1 GWe consomme env. 150 tU/an)



A3

+7 900 tU/an de demande supplémentaire chaque année

C2

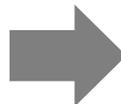
+3 000 tU/an de demande supplémentaire chaque année

La croissance du parc nucléaire mondial dépend de la disponibilité des ressources d'uranium

- Disponibilité = accessibilité technique + intérêt économique + commercialisation et échanges possibles
- Quelles quantités ultimes d'uranium peut-on extraire de la croûte terrestre ?
- Peut-on estimer leur coût de production ?
- Le marché donnera-t-il suffisamment d'incitations économiques à explorer, découvrir et extraire ces ressources ?
- Les capacités de production minières seront-elles suffisamment flexibles pour satisfaire la demande ?
- Économie des ressources minérales
 - Plusieurs théories existantes et nombreux modèles
 - Peu de travaux sur l'uranium depuis les années 1970

DISPONIBILITÉ DE L'URANIUM (2/2)

La croissance du parc nucléaire mondial dépend de la disponibilité des ressources d'uranium



D'où la nécessité d'analyser l'équilibre offre/demande du marché de l'uranium à long terme

Demande exogène

Scénarios électronucléaires mondiaux

Modèle de marché

Prix de l'U

Modèle d'offre

Ressources disponibles

Exploration

Ressources ultimes

2. MÉTHODE

Modélisation des ressources ultimes

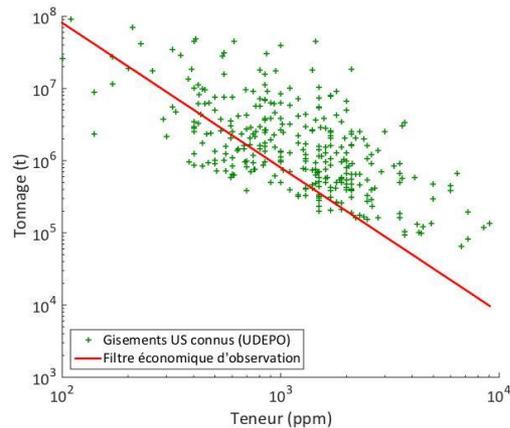
Modélisation de l'offre à l'échelle régionale

Modélisation des mécanismes de marché

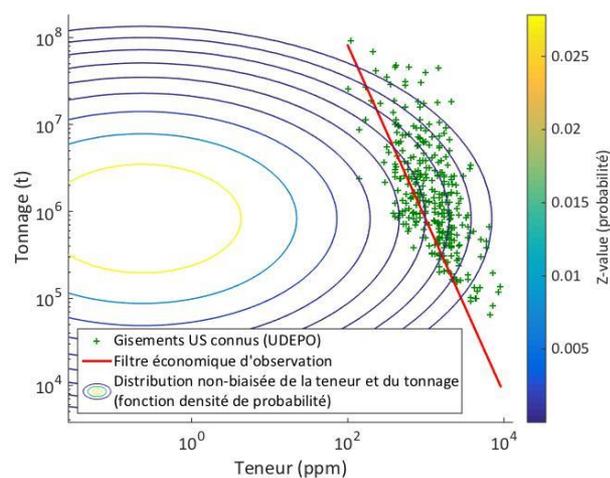
MODÉLISATION DES RESSOURCES ULTIMES

- Ressources découvertes + non découvertes : quelles quantités et à quel coût ?
- Coût de production d'un gisement : fonction de la **teneur** (g) et du **tonnage** (t) (prise en compte des économies d'échelle)

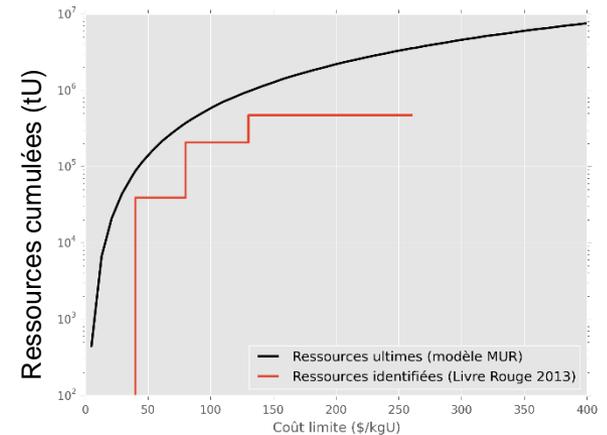
Gisements connus (teneur, tonnage)



Distribution corrigée : Gisements connus et inconnus



Courbe d'offre cumulative (Quantités, Coûts de production)



$$0.499 \ln(t) = \ln(g) - \ln(125 \text{ \$/kgU}) - 11.61$$

$$f(g, t) = \frac{\exp\left(-\frac{(\ln g - \mu_g)^2}{2\sigma_g^2} - \frac{(\ln t - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right)}{2\pi g t \sigma_g \sigma_t}$$

Biais lié à la découverte des gisements les plus gros et les plus riches en premier

➔
Filtre économique

Modèle log-normal bivarié

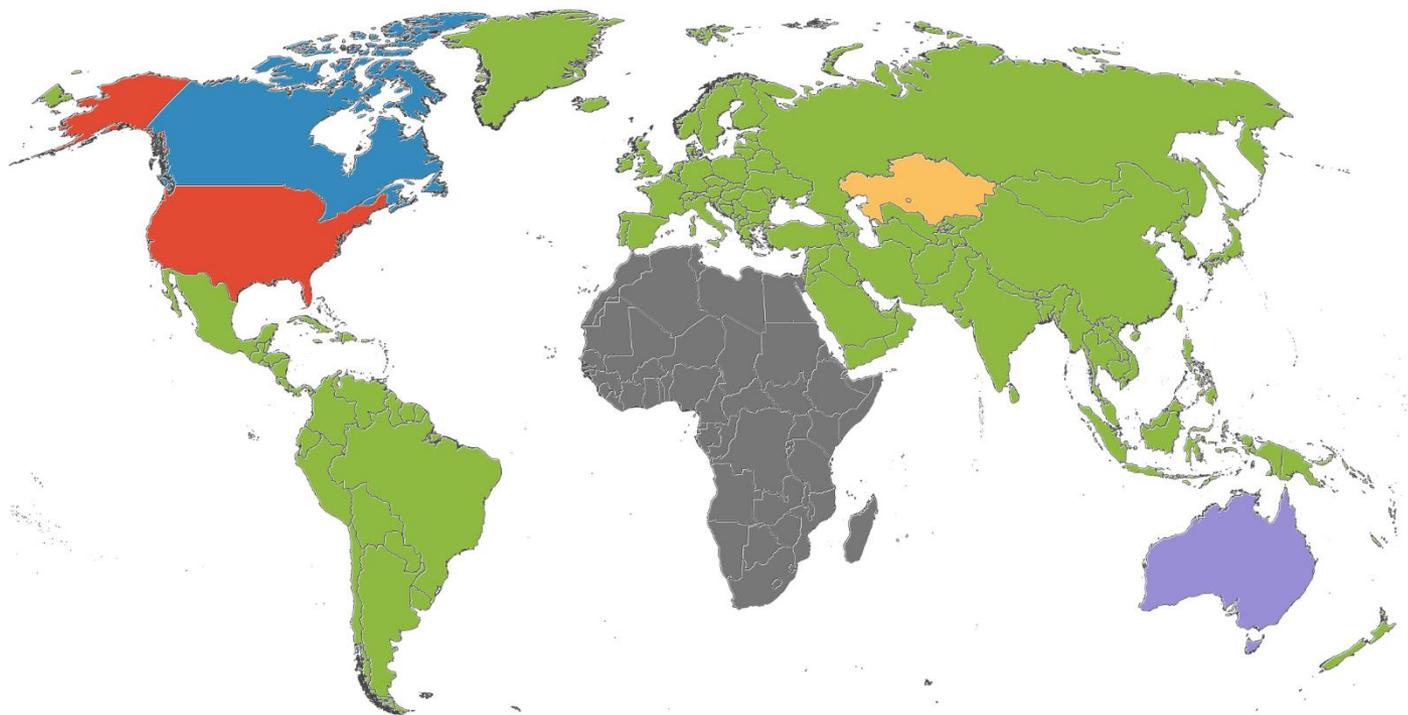
➔
Evaluation économique

Coût de l'ensemble des gisements (U,\$)

Agrégation des ressources par coût croissant

MODÉLISATION DE L'OFFRE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

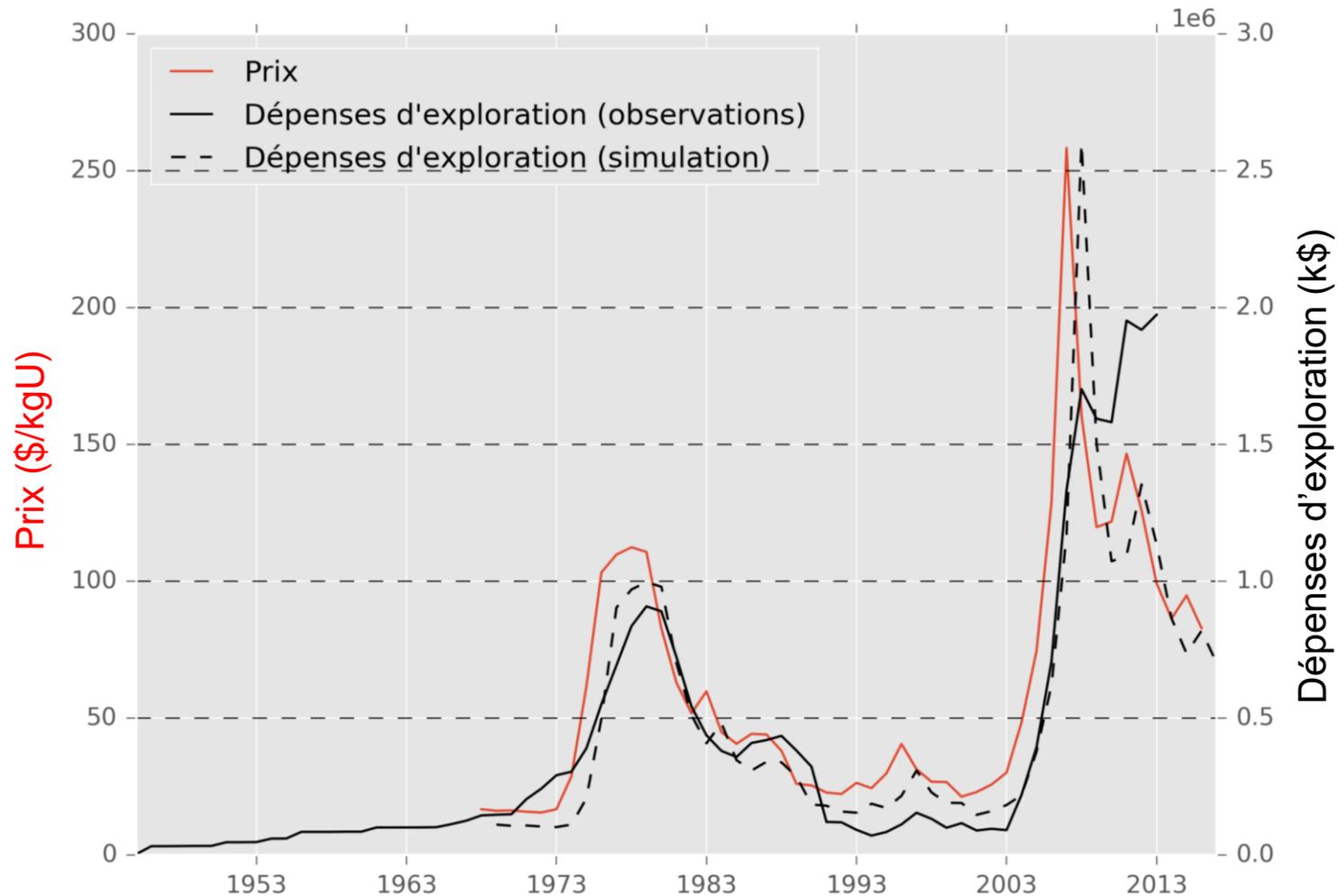
- 5 régions représentent + de 80% des réserves et de la production actuelle
- Les données disponibles contraignent le choix du découpage (statistique, continuité géologique/économique)



- Le découpage est conservé pour la modélisation du marché

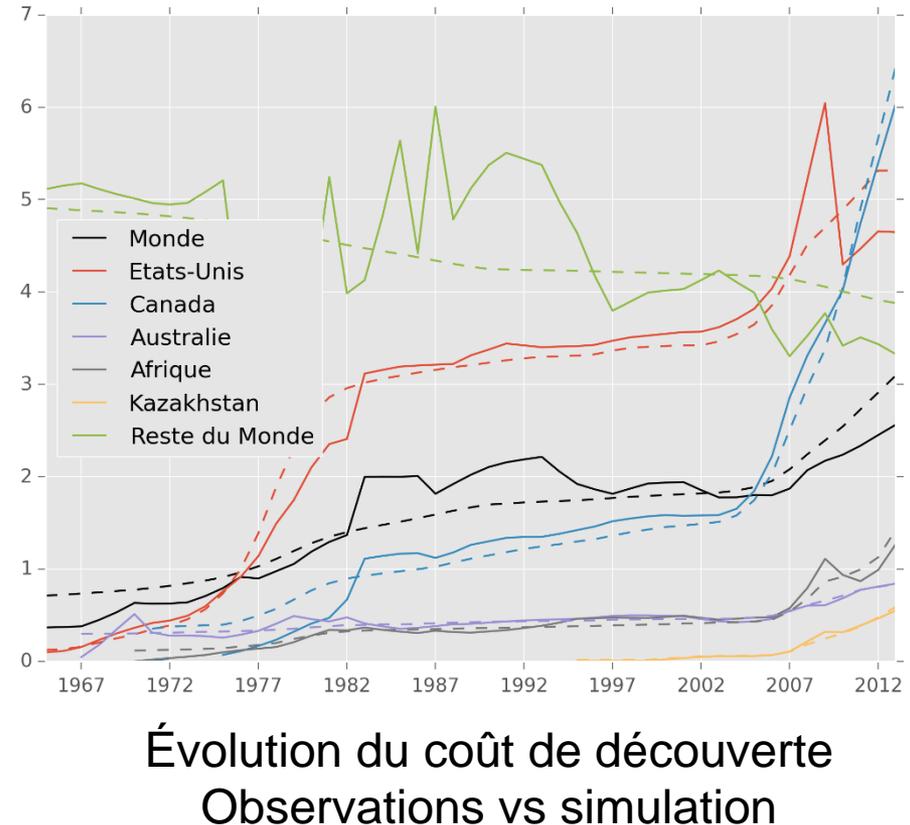
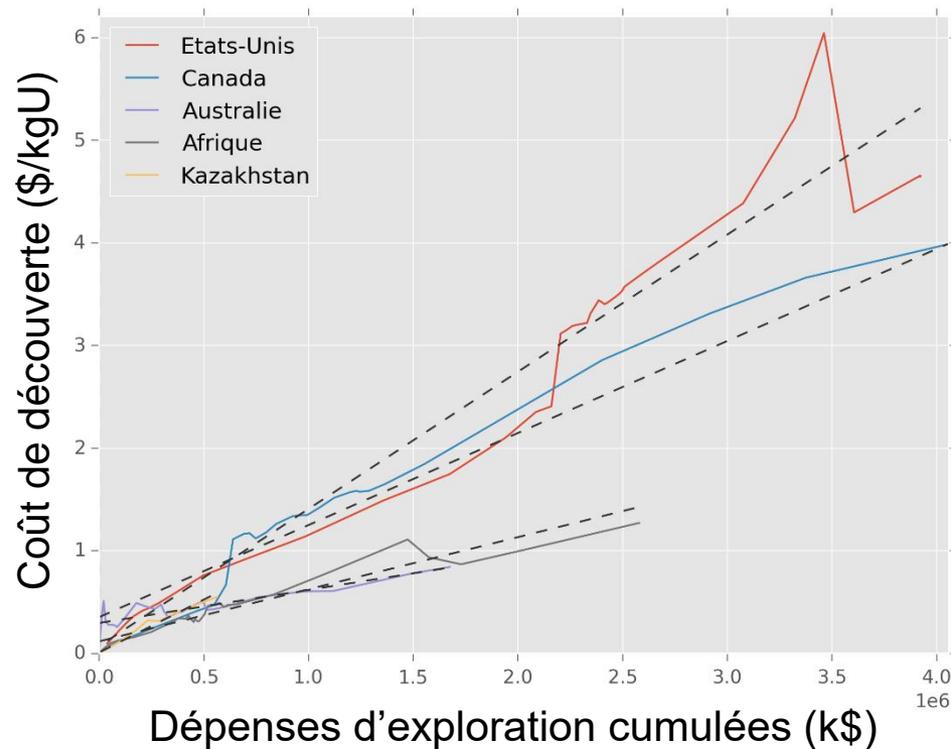
- Lien prix – dépenses d'exploration : le court terme influence la disponibilité long terme

$$\log(EXPLO(t)) = 1,15 \times \log(PRIX(t - 1)) + 8,37 \quad (R^2 = 0,76)$$



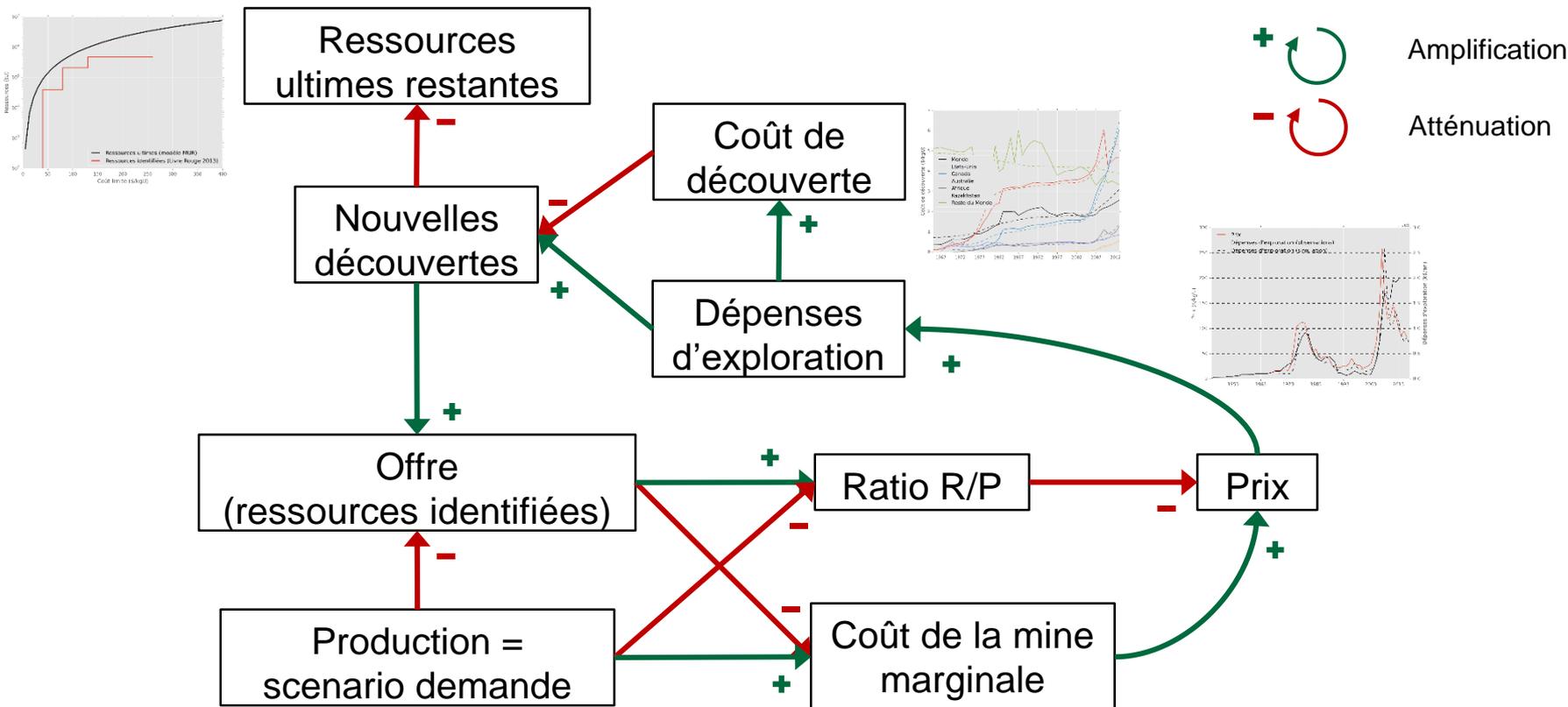
- Augmentation du coût de découverte : contrainte régionale de long terme

$$DISC_COST = a \times CUM_EXPLO + b$$



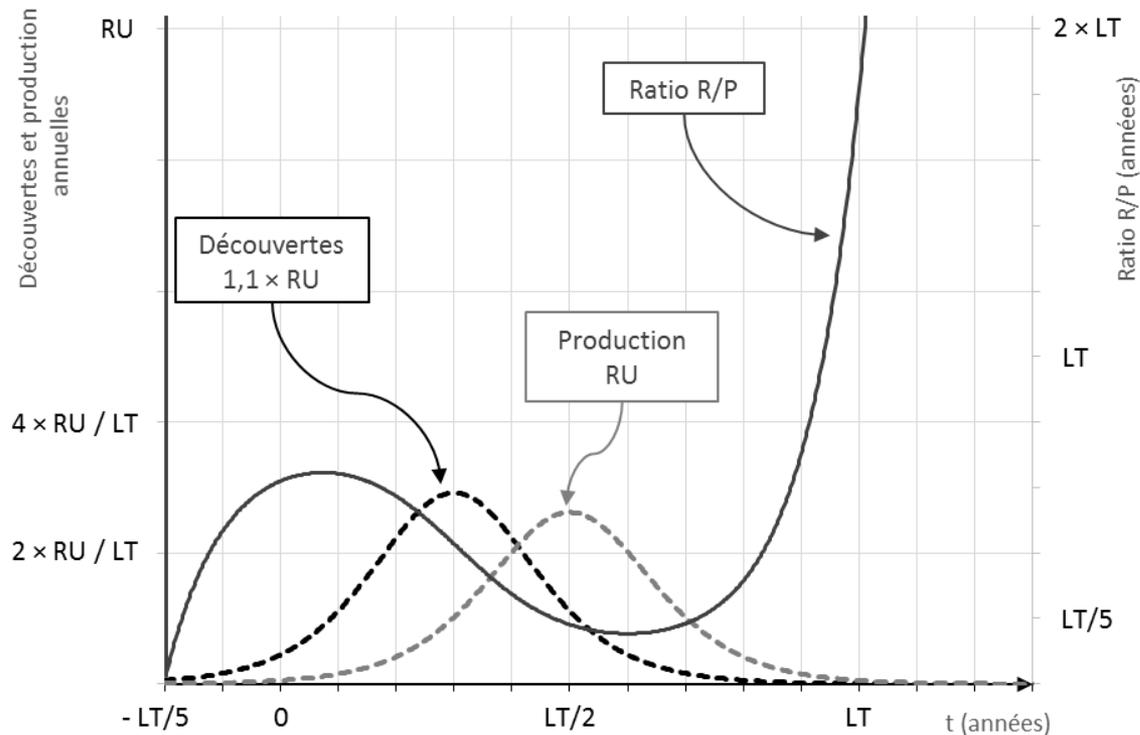
MODÉLISATION DES MÉCANISMES DE MARCHÉ (3/4)

- Contraintes dynamiques intégrées dans un modèle d'oligopole sans collusion
- Modèle de marché en **équilibre partiel** et **déterministe**



- Utilisation originale du **ratio R/P** : indicateur de rareté & contrainte de capacité régionale

- Rente de rareté liée au ratio R/P mondial
- Théorie de Hubbert → le ratio R/P passe nécessairement par un minimum



- Valeur du minimum liée à l'anticipation de la demande mondiale par les consommateurs. Des contraintes plus locales interviennent également (garanties financières des producteurs, échelonnement de l'exploration,...)

3. PRINCIPAUX RÉSULTATS

Ressources ultimes régionales

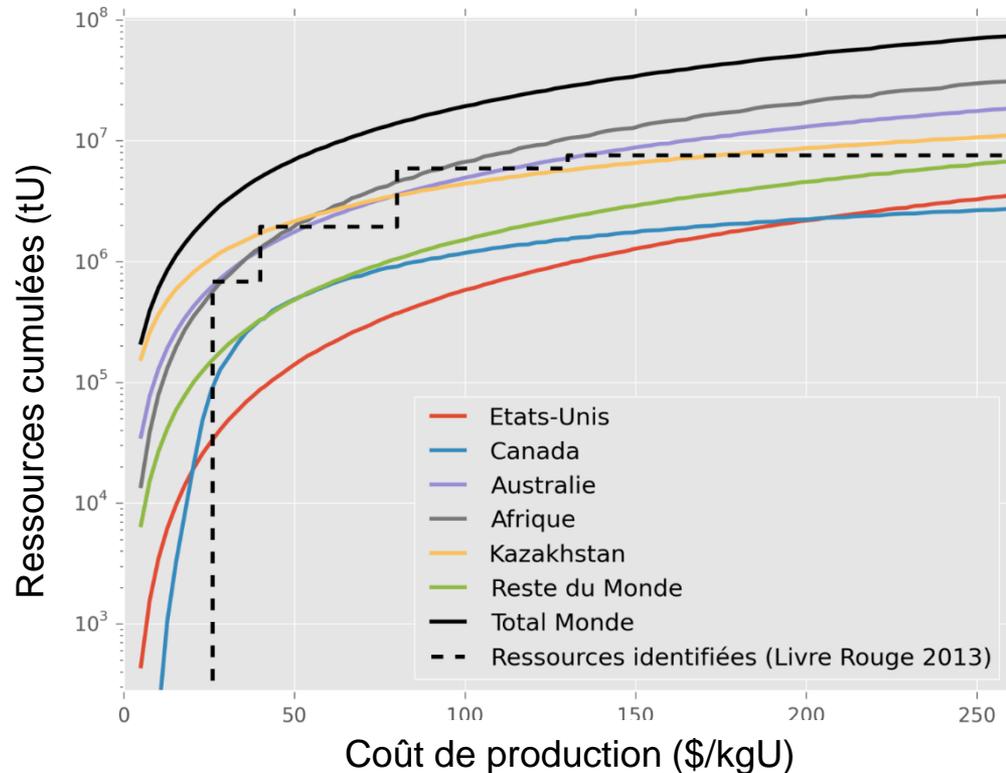
Résultats « type » du modèle de marché

Évolution du prix à long terme

Quelques cas d'études prospectives

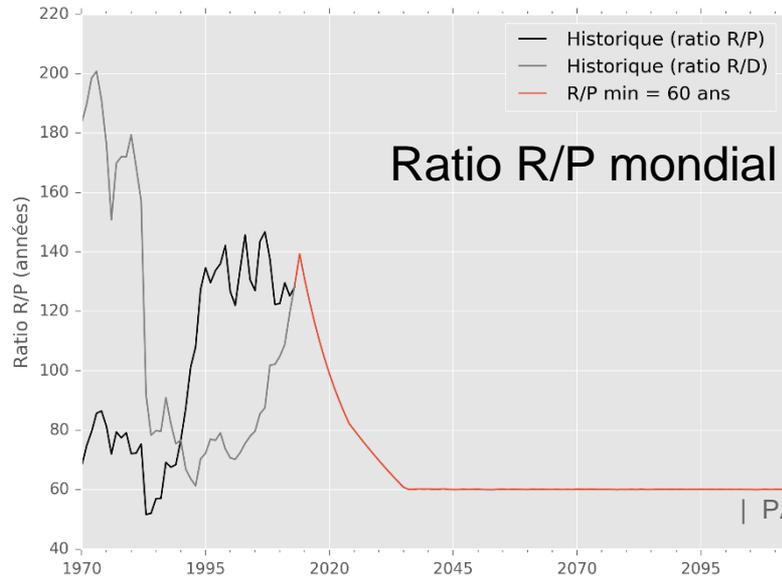
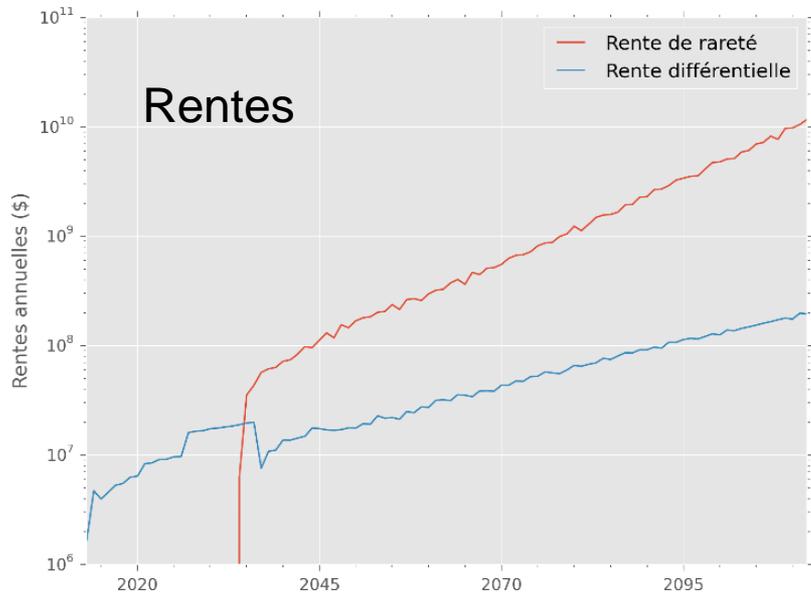
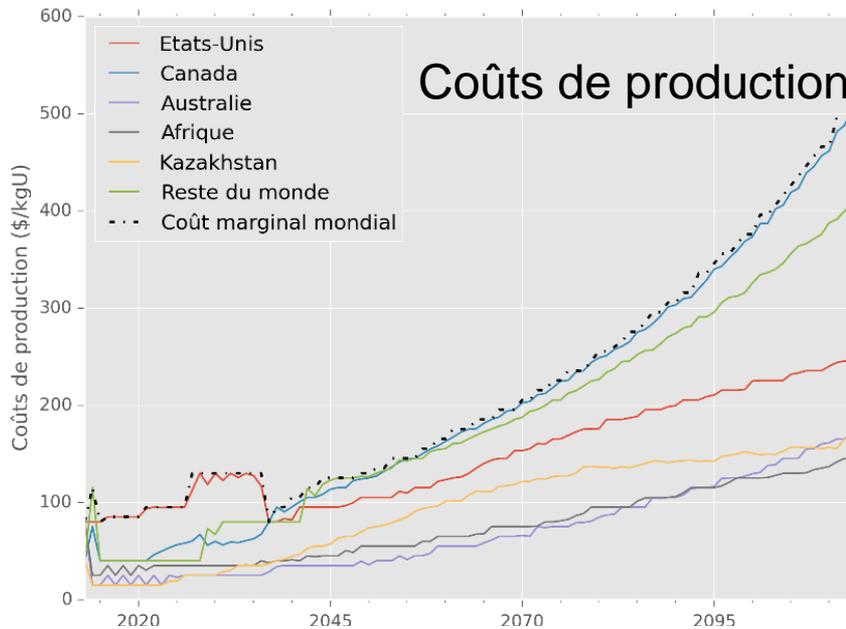
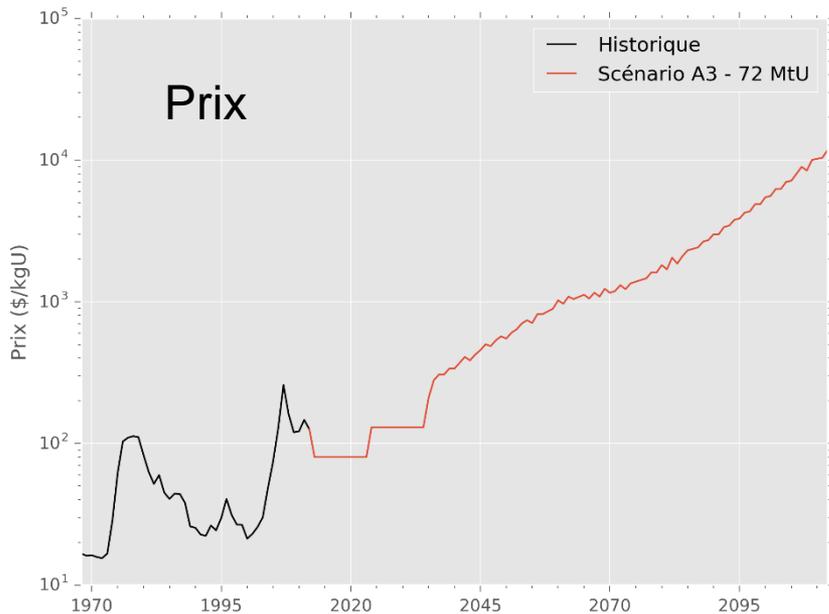
Perspectives

- Répartition inégale des ressources ultimes (spécificités géologiques et technico-économiques)



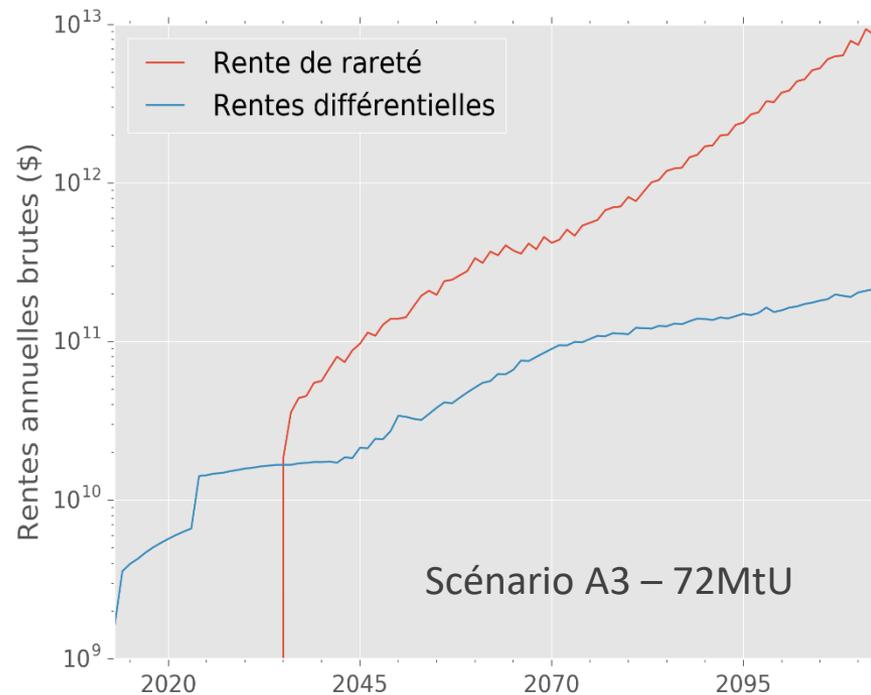
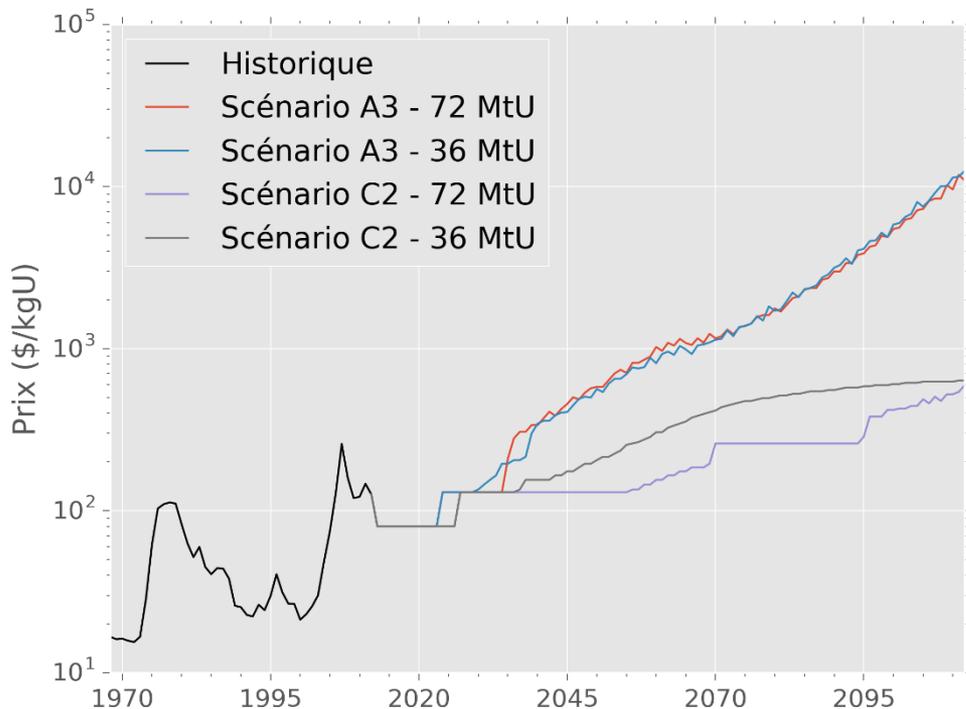
- Incertitudes sur les estimations : 2 scénarios retenus pour le modèle de marché (36 et 72 MtU < 260\$/kgU)
- Ressources en partie indisponibles (pas encore découvertes, déjà extraites)

RÉSULTATS « TYPE » DU MODÈLE DE MARCHÉ



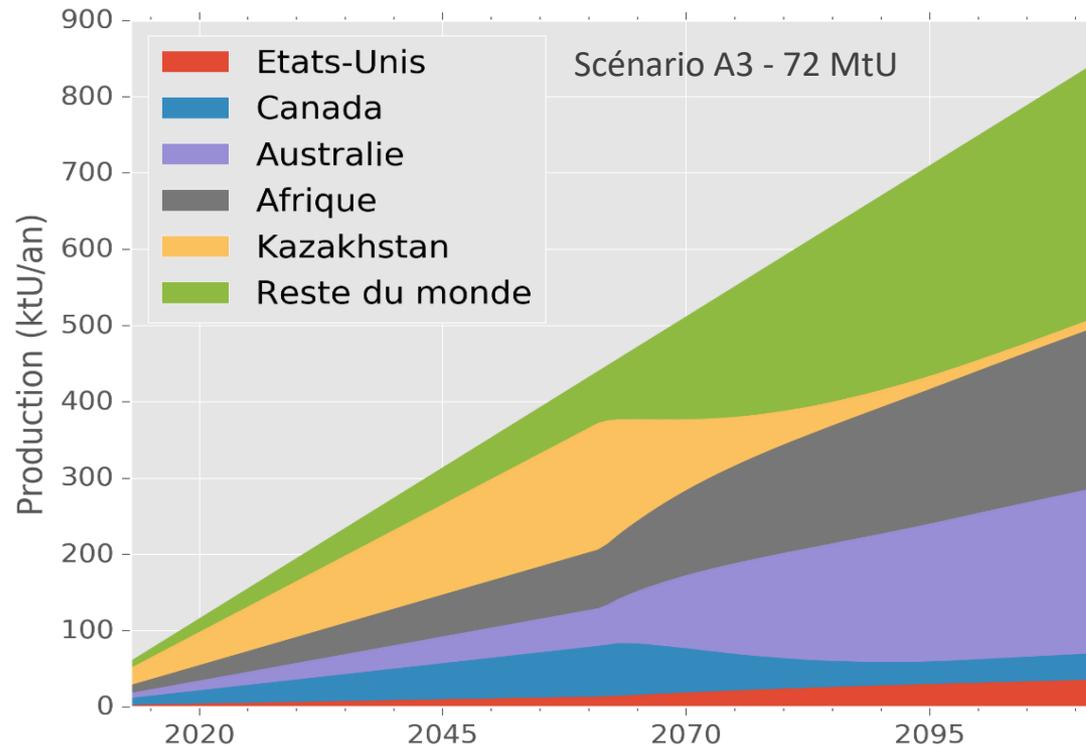
ÉVOLUTION DU PRIX À LONG TERME

- Augmentation de prix pour tous les scénarios étudiés (demande croissante)
- Principalement liée à la rente de rareté
- En l'absence de rente de rareté, exploration insuffisante pour renouveler les ressources disponibles (risque de pénurie)
- Influence limitée de l'estimation des ressources ultimes

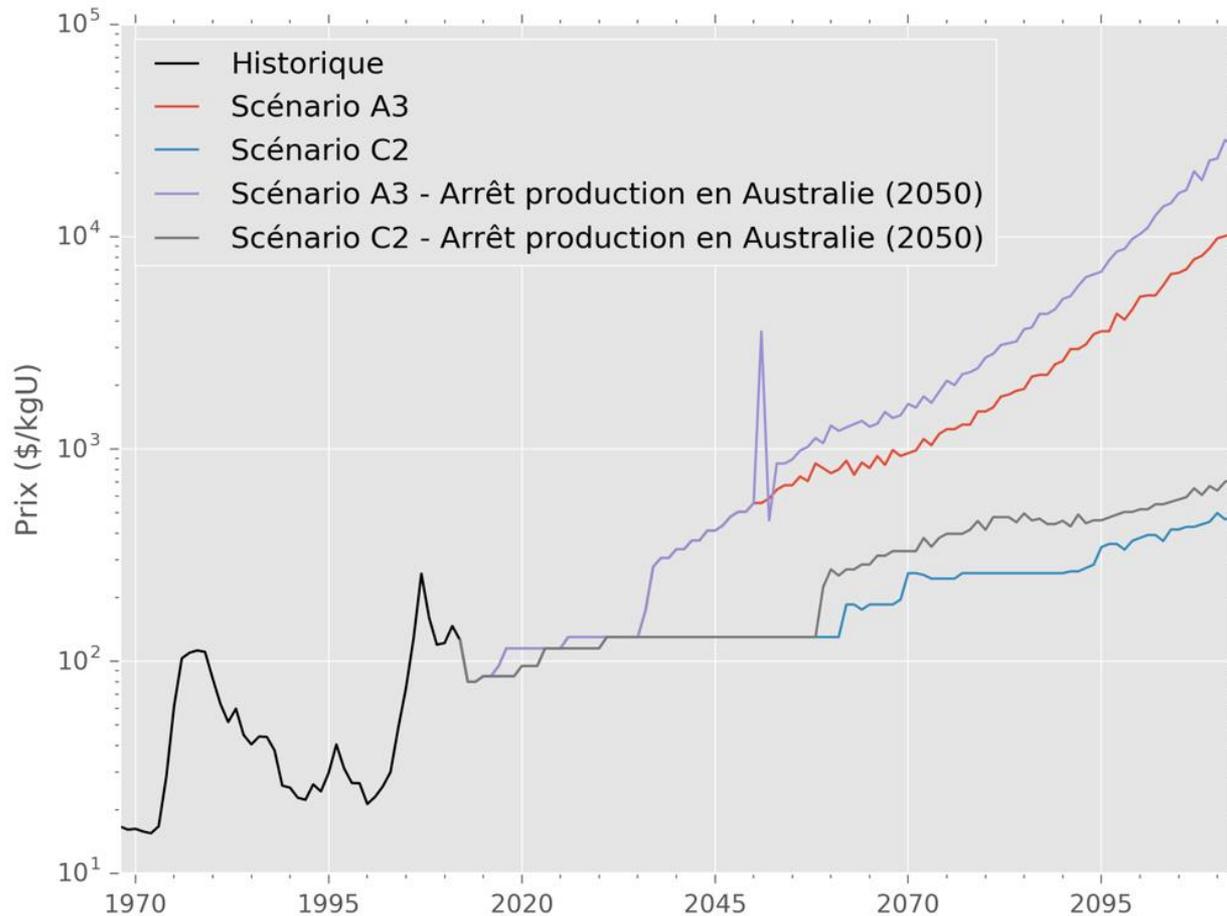


QUELQUES CAS D'ÉTUDES PROSPECTIVES (1/4)

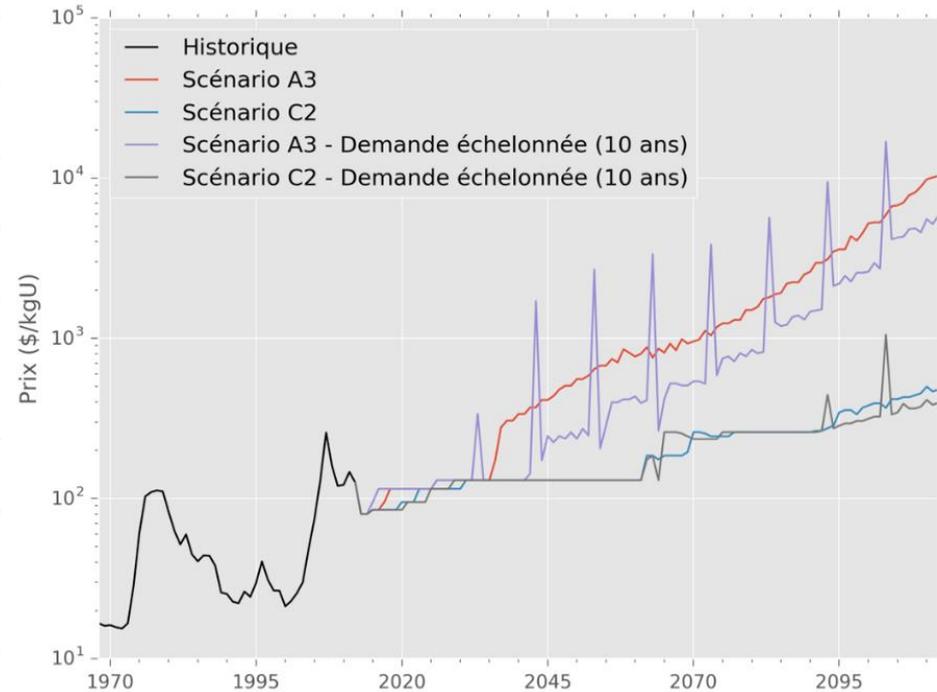
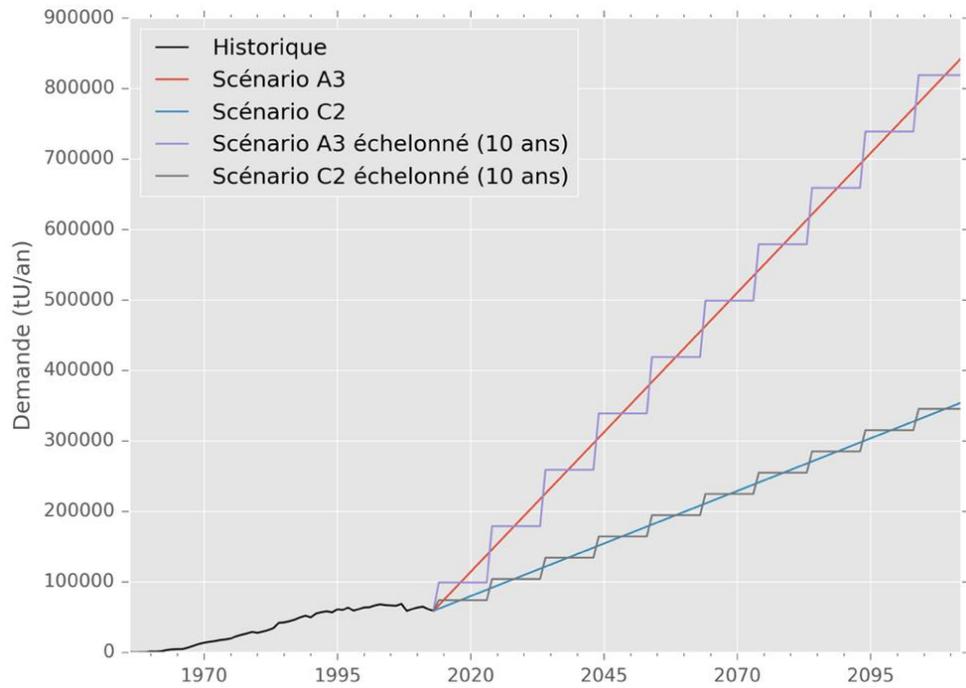
- Dans tous les scénarios étudiés : contribution forte de l'Australie, l'Afrique et le « reste du monde » qui inclut des acteurs importants (Russie, Chine).



■ Étude de cas : arrêt de production d'une région (Australie)

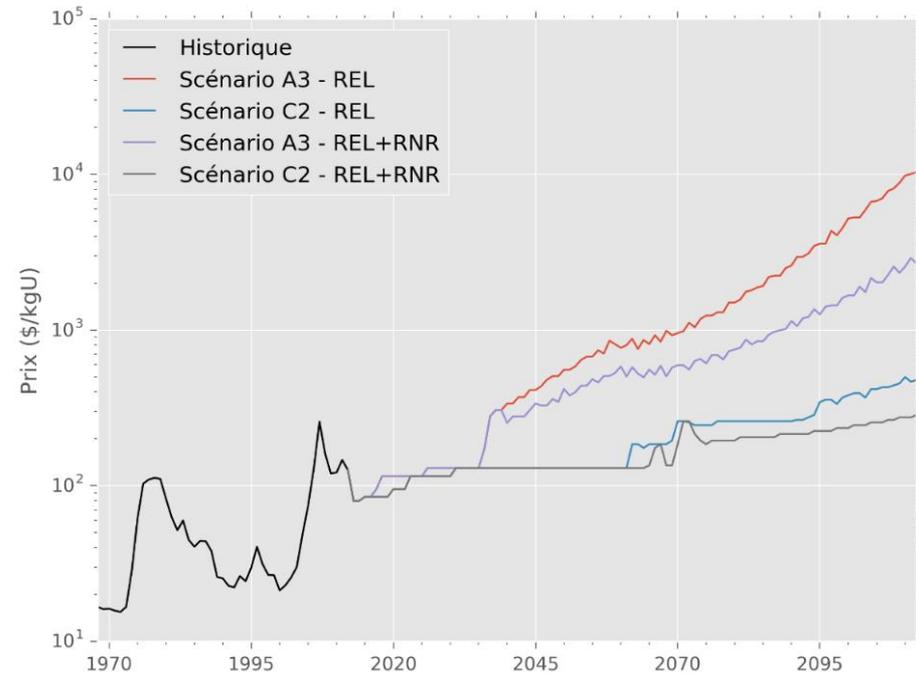
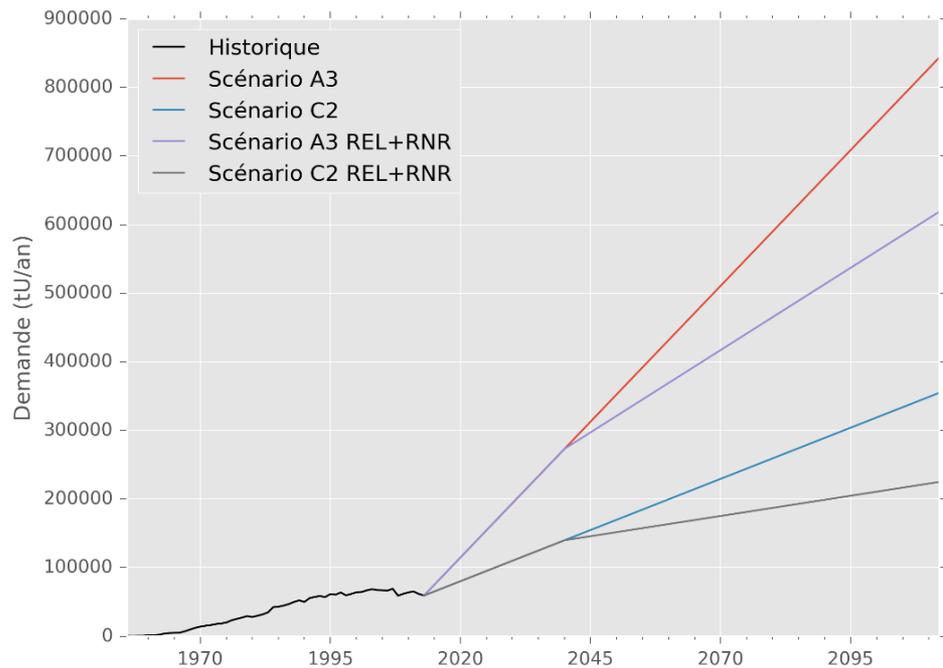


- Étude de cas : déploiement de réacteurs par parcs
Augmentation de la demande d'uranium par paliers



QUELQUES CAS D'ÉTUDES PROSPECTIVES (4/4)

- Étude de cas : déploiement de réacteurs à neutrons rapides (RNR) à partir de 2040
 - Sous contrainte de disponibilité du plutonium :
RNR déployés prioritairement. En cas d'indisponibilité de plutonium pour leur démarrage, des réacteurs à eau légère (REL) sont déployés pour assurer une production électronucléaire équivalente.
 - En recyclant la totalité du combustible utilisé des REL pour fournir le plutonium nécessaire aux RNR



- Perspectives d'utilisation du modèle
 - Aide à la décision (producteurs miniers, électriciens, décideurs politiques)
 - Fondements d'études de compétitivité (entre technologies nucléaires et autres technologies de production d'électricité)

- Originalités
 - Évaluation régionale des ressources ultimes, avec économies d'échelle
 - Modèle de marché intégrant des contraintes dynamiques de court et long terme pour identifier les principaux paramètres de la disponibilité à long terme
 - Intégration originale de la rente de rareté

- Améliorations possibles : discrétisation des mines et modélisation des producteurs (industriels implantés dans plusieurs régions) et scénarios de demande régionaux
 - Possibilité d'étudier des jeux d'acteurs plus complexes côté offre (industriels implantés dans plusieurs régions)
 - Simulation de stratégies d'approvisionnements diversifiées (auto-consommation dans certaines régions, approvisionnement auprès de producteurs privilégiés, segmentation du marché)

THANK YOU

Publications

A. Monnet, et al., *Assessing the potential production of uranium from coal-ash milling in the long term*, Resources Policy, vol. 45, pp. 173-182, 2015.

A. Monnet, et al., *Statistical model of global uranium resources and long-term availability*, EPJ-N, vol. 2, p. 17, 2016.

A. Monnet, et al., *Analysis of the long-term availability of uranium: the influence of dynamic constraints and competition on the market* (39th IAEA International Conference, Bergen 2016, à paraître dans Energy Policy).

CONTACT US



LGI Headquarters

13 Rue de Marivaux 75002 Paris - France



+33 (0)1 8416 3073



contact@lgi-consulting.com

antoine.monnet@lgi-consulting.com



www.lgi-consulting.com

LGi

sustainable innovation

Publications

A. Monnet, et al., *Assessing the potential production of uranium from coal-ash milling in the long term*, Resources Policy, vol. 45, pp. 173-182, 2015.

A. Monnet, et al., *Statistical model of global uranium resources and long-term availability*, EPJ-N, vol. 2, p. 17, 2016.

A. Monnet, et al., *Analysis of the long-term availability of uranium: the influence of dynamic constraints and competition on the market* (39th IAEE International Conference, Bergen 2016, soumis à Energy Policy).

Merci pour votre attention

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)7 70 11 67 86 | antoine.monnet@mines-paris.org

Direction Générale
Direction des Analyses Stratégiques
I-Tésé