HAL
open science

Optimalité, équité et prix du carbone : à propos de Harold Hotelling et de sa règle en économie du climat

Marion Gaspard, Antoine Missemer

▶ **To cite this version:**

Marion Gaspard, Antoine Missemer. Optimalité, équité et prix du carbone : à propos de Harold Hotelling et de sa règle en économie du climat. Revue de l'OFCE, 2022, 1 (176), pp.203-228. 10.3917/reof.176.0203 . hal-03629364

HAL Id: hal-03629364

https://enpc.hal.science/hal-03629364v1

Submitted on 18 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

OPTIMALITÉ, ÉQUITÉ ET PRIX DU CARBONE
À PROPOS DE HAROLD HOTELLING ET DE SA RÈGLE EN ÉCONOMIE DU CLIMAT

Marion Gaspard
Université Lyon 2, Triangle
Antoine Missemer
CNRS, CIRED

La règle de Hotelling, décrivant la trajectoire optimale de long terme du prix d'un actif épuisable, est utilisée de longue date en économie des ressources naturelles. Elle est aujourd'hui également centrale en économie du climat pour l'estimation de ce que serait un prix optimal du carbone. Cette règle, énoncée par Harold Hotelling en 1931, est jugée utile pour dépassionner les débats et fournir une base objective aux arbitrages inter-temporels. Sur la base de matériaux d'archives, cet article propose de revenir aux sources, à savoir l'élaboration de la règle et la conception qu'en avait Hotelling afin de questionner son statut et ses usages aujourd'hui. Nous concluons en particulier que Hotelling ne considérait pas son outil comme neutre face aux enjeux de justice sociale, intra et intergénérationnelle. Délibération collective et action publique étaient au cœur de ses préoccupations, ce qui nous invite à appréhender sous un nouveau jour la fixation des prix du carbone au XXIe siècle.

Mots clés : règle de Hotelling, prix du carbone, marchés énergétiques, ressources épuisables, histoire de la pensée économique.

Depuis les années 1990 au moins, la discipline économique a l'ambition de venir soutenir l'action publique en matière climatique. La pleine réalisation de cette ambition demeure sujette à controverses, les contributions économiques étant tantôt jugées salutaires – au moment de recevoir son prix de la Banque de Suède en mémoire d'Alfred Nobel, William D. Nordhaus a été célébré pour ses « découvertes nous permettant de mieux comprendre comment atteindre une croissance

économique soutenable » (RSAS, 2018) – tantôt délétères – la discipline économique étant parfois accusée de faire le jeu des émetteurs de gaz à effet de serre (Pottier, 2016 ; Pestre, 2020). La littérature en économie du climat ne manque pas de propositions pour accompagner la transition environnementale au XXIe siècle : donner un prix au carbone, instaurer des ajustements aux frontières ou encore mettre aux enchères des quotas d'émissions de CO_2. Nombre de ces propositions ont été traduites en actes, de la mise en place précoce d'une taxe carbone en Suède (Baudry, 2009) aux réformes successives du marché européen de quotas d'émissions EU-ETS entré récemment dans sa quatrième phase (2021-2030). Ces mesures économiques concrètes, fruits de compromis politiques, ne répondent pas toujours à toutes les exigences théoriques conçues initialement par les économistes – en témoigne la sur-allocation de quotas sur le marché EU-ETS dans ses premières phases (Quirion, 2020) – mais elles en conservent souvent l'esprit, comme la confiance dans les instruments de marché pour résoudre la crise climatique. Ces mesures reposent sur un ensemble de résultats qui, considérés conjointement, forment si ce n'est un paradigme tout du moins une boîte à outils enseignée aux étudiants et transmise de génération en génération d'économistes. On compte parmi ces outils le théorème de Coase sur l'articulation entre coûts de transaction, droits de propriété et allocation marchande, ou encore la taxe Pigou permettant un réajustement entre coût privé et coût social d'une externalité. C'est dans cette boîte à outils que l'on trouve également la règle de Hotelling (Heal & Schlenker, 2019).

La règle de Hotelling, énoncée par l'économiste-mathématicien américain Harold Hotelling en 1931, labélisée ainsi par Robert M. Solow en 1974, porte sur l'allocation inter-temporelle optimale d'une ressource finie. Elle stipule qu'à l'équilibre, en situation de libre concurrence, il y a égalisation entre le taux de croissance du prix net p de la ressource et le taux d'intérêt de marché r : $\dot{p}(t) / p(t) = r$. L'intuition derrière ce principe est simple. Le détenteur d'un stock fini de ressources a deux options devant lui : vendre son stock pour placer sur les marchés la somme reçue de la vente ou bien conserver son stock en attendant que le prix augmente en raison de la rareté accrue promise par le caractère fini de la ressource. Le point d'équilibre du producteur se situe à l'égalisation des deux rémunérations potentielles, quand l'intérêt issu du placement est identique à l'accroissement du prix de la ressource. Sous certaines hypothèses, Hotelling (1931, p. 143) ajoute que cette condition d'optimalité est aussi valable pour la maximisation

de la « valeur sociale » de la ressource, pourvu, notamment, que le monopole public prenne lui aussi comme donné le taux d'intérêt de marché. Il y aurait là, déjà chez Hotelling, une sorte de théorème du bien-être[1]. La règle de Hotelling correspondrait à une allocation inter-temporelle socialement optimale d'une ressource finie.

Resté relativement confidentiel des années 1930 aux années 1950, l'article de Hotelling a connu un regain d'intérêt à partir des années 1960 (Gaffney, 1967) et surtout à partir de sa popularisation par Solow dans les années 1970. L'économie des ressources naturelles épuisables s'est ensuite consolidée en faisant la part belle à la règle de Hotelling et à ses raffinements (e.g. Hartwick, 1977 ; Pindyck, 1978 ; Dasgupta & Heal, 1979 ; Farzin, 1984 ; voir Ferreira da Cunha, 2020)[2]. Encore aujourd'hui, la règle de Hotelling est considérée comme essentielle dans l'étude des ressources épuisables, donnant lieu à discussion dans des revues de premier plan (e.g. Okullo *et al.*, 2015; Anderson *et al.*, 2018). Dans le domaine climatique, l'application de la règle de Hotelling a suivi l'essor de la notion de budget carbone au tournant des années 1990 (Lahn, 2020). L'hypothèse d'un plafond d'émissions de CO_2 cumulées à ne pas dépasser a conduit à considérer le carbone comme une ressource finie, épuisable, et à lui appliquer un raisonnement à la Hotelling. Aujourd'hui, la règle de Hotelling occupe une place décisive dans la détermination des trajectoires de prix du carbone à long terme (e.g. Strefler *et al.*, 2021). Elle représente un outil standard, loué pour sa capacité à éclairer de façon objective et dépassionnée les arbitrages inter-temporels, loin des considérations politiques venant possiblement perturber l'optimisation économique.

Après avoir traversé ainsi la microéconomie puis la macroéconomie, l'économie théorique et l'économie appliquée, l'économie des ressources puis l'économie du climat, la règle de Hotelling semble si familière qu'on ne questionne plus vraiment ses tenants et aboutis-

1. Au sens où une allocation optimale décentralisée définirait une trajectoire de prix et de quantités identique à celle d'une allocation optimale centralisée. L'analyse initiale de Hotelling (1931, p. 144), comme nous le verrons plus loin, reste cependant menée en équilibre partiel.
2. Les modèles utilisés s'expriment parfois sous la forme de problèmes de maximisation inter-temporelle du profit tiré de la ressource par un producteur, en équilibre partiel, dans la droite ligne des premiers résultats de Hotelling. Ils s'expriment, également, à partir du milieu des années 1970, comme des modèles macroéconomiques de croissance optimale sous contrainte d'épuisement d'une ressource productive (Dasgupta & Heal, 1979). Dans ce cas, la règle de Hotelling fait intervenir un paramètre d'actualisation (une préférence subjective et/ou sociale pour le présent) qui peut, ou non, être égalisée au taux d'intérêt en vigueur.

sants, ses fondements heuristiques ou ses conséquences éthiques, ni le caractère approprié de son usage à la tarification du carbone.

Quel statut et quel rôle Hotelling accordait-il à sa règle ? Dans quel but l'outil a-t-il été formulé ? A-t-il été conçu comme neutre politiquement ? Comment Hotelling concevait-il les enjeux de justice intergénérationnelle lorsqu'il étudiait l'utilisation des ressources épuisables à long terme ? Bien entendu, Hotelling ne pouvait anticiper en son temps les applications de sa règle aux enjeux climatiques. Nous pensons toutefois que ces questions sont susceptibles de fournir des éclairages précieux sur le statut et le périmètre de validité de la règle, ainsi que sur sa capacité à informer l'action publique, aussi en économie du climat.

Cet article livre les résultats d'une enquête historique appuyée par des matériaux d'archives issus des documents personnels (brouillons, correspondance) de Harold Hotelling, entreposés à l'Université de Columbia (New York). Parmi les quelques 3 000 documents consultés, quelques dizaines – une trentaine de brouillons manuscrits, une douzaine d'extraits de correspondance, une demi-douzaine de rapports d'activités[3] – permettent d'éclairer significativement la trajectoire de Hotelling dans les années 1920-1930 sur la question des ressources épuisables et les développements qu'il avait en tête de son modèle des années 1930 aux années 1950. La consultation de ces documents met en évidence le regard circonstancié de Hotelling sur sa condition d'optimalité, loin de l'interprétation trop hâtivement descriptive qui en a parfois été faite en économie des ressources, loin aussi de l'interprétation prescriptive clé-en-main qui semble parfois poindre en économie du climat.

L'enjeu n'est pas ici de passer au crible toute la littérature inspirée par le travail de Hotelling ni de retracer la longue histoire de la règle de Hotelling, des années 1930 aux années 1960 et 1970, puis des années 1970 à aujourd'hui – ce serait là un projet de recherche en soi. Il s'agit d'une part de retracer les usages qui sont faits aujourd'hui de la règle de Hotelling en économie du climat et d'examiner d'autre part le cheminement originel de Hotelling, susceptible d'interroger ces mêmes usages. La section qui suit retrace donc la façon dont la littéra-

3. Le catalogue complet des archives Hotelling est disponible à : https://findingaids.library.columbia.edu/ead/nnc-rb/ldpd_4078401. Il nous est possible de communiquer, sur demande par email, les documents que nous avons pu numériser.

ture en économie du climat a progressivement mobilisé la règle de Hotelling dans l'appréhension des trajectoires optimales de prix du carbone. La section 2 revient sur le parcours de Hotelling, des années 1910 aux années 1960, pour situer son travail sur les ressources épuisables dans le cadre plus général de ses contributions à la science économique – une mise en contexte essentielle pour mieux comprendre le statut heuristique de son modèle. La section 3 explore plus précisément les considérations éthiques et politiques que Hotelling associait à sa règle, pour en tirer quelques leçons de prudence pour nos usages contemporains.

1. Prix du carbone et règle de Hotelling

La notion de budget carbone, désignant aujourd'hui la quantité de CO_2 (ou de gaz à effet de serre convertie en équivalents CO_2) pouvant encore être émise dans l'atmosphère tout en respectant certains objectifs climatiques (e.g. contenir le réchauffement à +1,5°C, voire +2°C, par rapport à l'ère préindustrielle), est apparue au tournant des années 1980 dans des travaux sur les cycles biochimiques à l'échelle d'un milieu particulier (océan, forêt tropicale, etc.) ou à l'échelle globale. Elle renvoyait alors à un équilibre comptable entre des flux entrants et sortants de carbone (e.g. Broecker *et al.*, 1979). Il n'était pas véritablement question, à l'époque, de stock d'émissions pouvant encore être émis pour atteindre un objectif climatique donné. C'est au tournant des années 1990 que l'idée de plafond d'émissions a émergé, le budget carbone apparaissant comme une métaphore efficace pour opérer un lien entre sciences climatiques et action publique (Krause *et al.*, 1989; Wigley *et al.*, 1996 ; voir Lahn, 2020). Avec la consolidation, dans les années 2000, de l'objectif de +2°C de réchauffement, la notion de budget carbone a connu un succès sans précédent (Aykut & Dahan, 2011). En consacrant un objectif encore plus ambitieux (+1,5°C), l'Accord de Paris de 2015 a donné lieu à de nouvelles estimations du budget encore disponible, inévitablement revues à la baisse – les estimations les plus récentes oscillent fortement, avec une valeur médiane autour de 400-500 GteCO_2.

Nonobstant les difficultés de calcul, une fois le budget carbone connu, il semble raisonnable de le considérer comme un stock fini à allouer dans le temps, jusqu'à épuisement. À travers sa métaphore budgétaire, le carbone prend les traits d'une ressource épuisable et il

n'est donc pas surprenant que l'on soit tenté de lui appliquer une règle de Hotelling, comme clé de répartition inter-temporelle permettant la maximisation d'une fonction de bien-être collectif ou la minimisation d'un coût social.

Une première série de travaux, dans le prolongement des débats des années 1970 et 1980, a rapidement fait usage du modèle de Hotelling pour étudier la taxation optimale des hydrocarbures afin d'en limiter l'usage et les émissions de gaz à effet de serre associées (e.g. Sinclair, 1994). Dans ces travaux, le carbone n'apparaissait toutefois qu'indirectement. Une seconde série de travaux, plus inédits, a cherché à forger au même moment une expertise spécifiquement dédiée au carbone, à la suite des alertes et initiatives des années 1980 sur le changement climatique (National Research Council, 1983), et dans le contexte des réponses à apporter au volontarisme politique exprimé lors du Sommet de la Terre de Rio en 1992. Presque concomitamment à l'apparition de la notion de budget carbone, on voit poindre dans la littérature une association forte entre émissions de CO_2, ressources épuisables et modèles à la Hotelling. En 1992, dans l'un des premiers ouvrages consacrés à la question du plafond d'émissions, Alan S. Manne et Richard G. Richels l'expriment clairement, en précisant que la catégorie des ressources épuisables inclut les émissions de CO_2 :

> *Much as in the Hotelling literature, there are expectations that influence the time path and the extraction profile of exhaustible resources. (Exhaustible resources are defined here to include not only conventional hydrocarbons but also the rights to emit CO_2.)* (Manne & Richels, 1992, p. 120)

La règle de Hotelling définit avant tout des trajectoires de prix à long terme pour les actifs épuisables. Ce qui importe le plus dans l'application de la règle à la question du carbone, c'est donc la détermination du prix du carbone, en miroir de l'allocation inter-temporelle optimale du budget encore disponible. C'est bien dans cette direction que la référence à Hotelling a été la plus utilisée en économie du climat. Au milieu des années 1990, en écho aux débats européens et américains sur l'opportunité de mettre en place une fiscalité spécifique sur le carbone, la littérature économique a embrassé la question de la taxation optimale des émissions de CO_2, ne manquant alors pas d'appliquer la règle de Hotelling (e.g. Farzin & Tahvonen, 1996). Depuis, ces développements et applications se sont poursuivis, multipliés et diversifiés, confiant à la règle de Hotelling un rôle toujours plus structurant dans l'étude des enjeux climatiques (e.g. Strefler *et al.*, 2021).

Arrêtons-nous un instant sur les modalités de justification de l'usage de cette règle comme solution simple à la question de l'allocation d'un budget carbone.

La règle de Hotelling est couramment présentée comme la garantie d'une certaine objectivation de l'orientation de la politique climatique en matière de fixation d'un prix du carbone : décrivant clairement une trajectoire de prix à taux constant, elle permettrait d'ancrer les anticipations, d'éviter toute incohérence temporelle et serait, pour les autorités, aisée à implémenter (Nordhaus, 2010 ; Strefler *et al.*, 2021). Sa légitimité repose également sur le fait que la règle décrirait, depuis Hotelling (1931), des trajectoires optimales d'épuisement d'une ressource finie (ici, un budget carbone). Dans sa défense de la taxation du carbone, Christian Gollier (2019) ne manque pas, par exemple, d'en appeler à Hotelling pour décrire sa trajectoire de prix :

> *Comment la France devrait-elle allouer son budget carbone sur les trente prochaines années ? Il s'agit de répartir l'effort entre aujourd'hui et 2050 pour minimiser la valeur actuelle du coût financier de ces efforts. La meilleure manière d'y arriver est de faire croître le prix du carbone au taux d'actualisation, de manière qu'à la marge, une réallocation de ces efforts dans le temps n'ait pas d'effet sur la valeur actuelle de leur coût. On doit cet argument à l'économiste et statisticien américain Harold Hotelling, mort en 1973, qui l'a appliqué aux ressources naturelles non renouvelables. Donc, un taux de croissance du prix du carbone de 4 % paraît justifié.* (Gollier, 2019, p. 321-322)

De même, dans le récent rapport de la Commission Quinet sur la valeur tutélaire du carbone, l'intérêt de recourir à une règle de Hotelling est clairement énoncé. Ce serait là une « règle de bonne gestion d'une ressource épuisable » pour le long terme (France Stratégie, 2019, p. 13) : toute autre trajectoire serait irrationnelle ou inefficiente, puisque par définition, un producteur aurait intérêt à extraire plus vite une ressource (ou ici, à reporter ses coûts d'atténuation) et à placer la somme récoltée sur les marchés financiers (p. 55).

La question de la tarification du carbone impose cependant que l'on s'éloigne, au moins un temps, du cadre microéconomique à taux d'intérêt donné dans lequel s'est établie initialement la règle de Hotelling. Il s'agit bien ici de corriger, ou tuteurer ce que serait le prix du carbone dans une économie décentralisée qui, laissée à elle-même, ne permettrait pas de limiter suffisamment les émissions. La détermination d'une trajectoire de prix cible, à même de définir les niveaux d'imposition des émissions de CO_2 permettant de répartir équitablement le budget carbone entre les générations impose le choix d'un

paramètre d'actualisation qui n'est plus nécessairement le taux d'intérêt ou la productivité marginale du capital, mais une valorisation subjective ou sociale des générations présentes par rapport aux générations futures. Un paramètre *a priori* normatif auquel le succès environnemental et l'acceptabilité politique de la taxation du carbone sont particulièrement sensibles[4]. L'enjeu est alors d'objectiver ce taux[5].

Les auteurs du rapport de la commission Quinet ont opté pour un taux d'actualisation « socio-économique » relativement élevé, estimé à 4,5 % (France Stratégie, 2019, p. 55). Gollier (2019) a lui retenu un taux d'actualisation de 4 %. Ces valeurs sont fondées (parfois implicitement) sur le recours à une règle de Ramsey. De l'équation d'Euler d'un modèle de croissance optimale à la Ramsey – dans sa version utilitariste escomptée – définissant initialement le rythme de croissance optimal de la consommation dans le temps à préférences et taux d'intérêt (productivité marginale du capital) donnés, la littérature extrait un taux d'actualisation qui respecterait cette condition d'Euler, cette fois à rythme de croissance exogène de la consommation (Arrow *et al.*, 1996, 2014 ; Gollier, 2012). Le taux d'actualisation (devenu taux de rendement social de la substitution inter-temporelle de la consommation) est ainsi défini par la combinaison de sous-paramètres représentant les caractéristiques de la fonction de bien-être social (préférence pure pour le présent, aversion aux inégalités de revenus entre générations, aversion au risque) avec le rythme, supposé exogène, de croissance de la consommation, approximé par la croissance du PIB (ou du PIB potentiel). Bien qu'il existe un débat sur le choix de la valeur de ces sous-paramètres, et que de grandes d'incertitudes prévalent dans l'exercice d'estimation, une contrainte semble s'imposer : choisir, dans des four-

4. Choisir un taux d'actualisation élevé tend à différer les efforts d'atténuation, non seulement parce que cela témoigne d'une valorisation intrinsèque des générations présentes en début de trajectoire mais également parce que cela autorise la fixation d'un prix initial relativement faible. L'argument principal est que les générations futures profiteront de l'effet richesse apporté par la croissance. Le risque est cependant de s'engager dans une trajectoire de prix fortement croissante et à terme insoutenable conduisant au dépassement du budget carbone (Heal & Schlenker, 2019). À l'inverse, avec un taux d'actualisation faible, les générations présentes sont appelées à faire des efforts importants pour lutter contre le changement climatique et sont soumises, dès la mise en place d'une taxation des émissions, à des taux élevés, portant un risque politique et social à court terme.

5. Dans l'histoire de la pensée économique, la question de l'actualisation a fait l'objet d'innombrables débats, notamment sur son caractère éthique ou non, sur ses justifications, et sur ses implications théoriques et pratiques (Frederick *et al.*, 2002). En économie du climat, les controverses se sont accentuées dans les années 2000, autour de la publication du rapport de Nicholas Stern (2006) sur le changement climatique, où le taux choisi (en-dessous de 2 % par an) a paru à certains particulièrement faible, ouvrant de nombreux débats sur les questions de justice climatique intergénérationnelle (voir plus récemment Heal, 2017 ; Chichilnisky *et al.*, 2020 ; Hartwick & Mitra, 2020).

chettes crédibles, les valeurs numériques de ces sous-paramètres qui paraissent objectives, donnant un fondement réaliste, pour ainsi dire, à la valeur retenue pour le taux d'actualisation[6].

L'usage de la règle de Hotelling dans la littérature sur la tarification du carbone repose ainsi sur une double condition d'optimalité : une règle de Ramsey paramétrant une règle de Hotelling. Une double condition qui introduit, dans la règle de Hotelling, une représentation utilitariste et agrégée de la valorisation de la ressource (une fonction de bien-être social) et ne se contente pas, donc, d'utiliser un simple principe d'arbitrage financier. Ce serait dans ce cas l'objectivation du taux retenu, assortie à l'objectivité de la règle, qui permettrait de décrire convenablement, en toute neutralité éthique et politique, les trajectoires du prix du carbone servant à guider, ensuite, des décisions décentralisées[7].

L'attachement de la Commission Quinet à la neutralité supposée de la règle de Hotelling peut surprendre : l'exercice de construction d'une valeur tutélaire consiste précisément à intégrer des considérations éthiques, ou de délibération politique, dans le calcul du prix du carbone (Gadrey & Lalucq, 2015) – la valeur tutélaire du carbone désigne d'ailleurs davantage la « valeur de l'action pour le climat » (France Stratégie, 2019, p. 10) que le prix du carbone *stricto sensu*. Pourquoi intégrer une règle de Hotelling, prétendument objective et neutre, dans un tel exercice ?[8] Plus globalement, face aux enjeux de justice intergénérationnelle, face à l'ampleur des effets du changement climatique à long terme en termes d'inégalités, de distribution des efforts d'atténuation ou encore de dommages subis (Pottier *et al.*, 2017 ; Guivarch & Taconet, 2020 ; Méjean *et al.*, 2020), et face aux probables transformations du contrat social (en particulier le consentement à l'impôt) qu'impliquent les impératifs de transition

6. Des prévisions de croissance du PIB potentiel sont alors nécessaires pour estimer l'impact de l'effet richesse, tandis que des enquêtes empiriques ou des expériences de pensée visent à estimer la valeur de l'aversion au risque ou de l'aversion aux inégalités inter-temporelles (voir par exemple Gollier, 2012 ; Arrow *et al.*, 2014).

7. Il est toujours possible d'opter pour un taux différent, mais il est courant de lire que tout taux alternatif doit nécessairement trouver une justification tout aussi objective, ou des raisons de déroger à la règle par des règles de Hotelling modifiées (Strefler *et al.*, 2021).

8. Les participants à la Commission Quinet ont considéré qu'il fallait faire la distinction entre deux horizons temporels : l'horizon de court terme, avec 2030 comme cible, et l'horizon de long terme, vers 2050. Dans le premier cas, des choix, notamment politiques, peuvent conduire à fixer une trajectoire de valeur tutélaire du carbone différente de celle suggérée par la règle de Hotelling. Dans le second cas, à plus long terme donc, cette trajectoire est appelée à « s'aligne[r] progressivement sur une règle de Hotelling » (France Stratégie, 2019, p. 11).

environnementale (Hourcade & Combet, 2017), cet emploi de la seule règle de Hotelling comme arbitre de toute considération politique et éthique peut interroger. Comme si le long compagnonnage de l'économie des ressources naturelles et de l'environnement avec la règle de Hotelling était la garantie d'avoir défini l'outil adéquat pour traiter de la répartition d'un budget carbone et suffisait à dépassionner les débats et dépasser les questions éthiques et politiques. Comme si l'outil était le gage d'une objectivité établie de longue date, depuis 1931. À la lumière des archives et de la conception qu'avait Hotelling de son propre travail, on peut douter cependant qu'il eut lui-même défendu l'usage de son résultat mathématique comme la solution idoine pour trancher de telles questions.

2. Retour sur Hotelling (1931)

Harold Hotelling (1895-1973) est habituellement présenté comme un mathématicien venu à l'économie (Samuelson, 1960 ; Darnell, 1990). Ses aptitudes avancées en analyse, algèbre et topologie, acquises à l'Université de Washington (Seattle), puis à Princeton, au début des années 1920, semblent indiquer un tel pedigree. À y regarder de plus près, toutefois, il semble que ce soit son intérêt pour l'économie qui l'ait conduit à faire un détour par l'étude des mathématiques. Dans ses écrits autobiographiques, il souligne son attrait précoce, dès les années 1910, pour certains sujets économiques et sociaux, notamment l'organisation et la tarification des services publiques dans les métropoles (Hotelling, 1948). En 1924, Hotelling rejoint le *Food Research Institute* de Stanford pour y mener des travaux quantitatifs sur les dynamiques agricoles. C'est à ce moment-là qu'il lance son propre programme de recherche, à cheval entre la statistique théorique, en collaboration avec Ronald A. Fisher, et l'économie mathématique, en écho aux travaux émergents de Griffith C. Evans ou encore Charles F. Roos. En 1931, Hotelling saisit l'opportunité offerte par Wesley Mitchell de rejoindre l'Université de Columbia pour occuper un poste de professeur d'économie[9].

Les contributions de Hotelling à l'économie mathématique apparaissent, rétrospectivement, particulièrement significatives. Ses

9. Il y enseignera l'économie mathématique pendant près de quinze ans avant de rejoindre l'Université de North Carolina en 1946 pour la mise sur pied d'un important département de statistiques.

quelques articles ont été fondateurs dans plusieurs sous-champs de l'analyse économique, de la théorie de la dépréciation (1925) à la théorie du bien-être (1938), en passant par la concurrence spatiale et l'analyse de la concurrence monopolistique (1929), les fonctions de demande (1932), et donc l'économie des ressources épuisables (1931)[10]. L'exploration des documents personnels de Hotelling, en particulier de ses brouillons, suggère que ces différents chantiers de recherche ont été explorés simultanément. Rétrospectivement, deux thématiques semblent avoir transcendé ses objets de recherche : l'étude des conséquences de la structuration institutionnelle de certaines industries spécifiques (les formes possibles de la concurrence) sur le bien-être social d'une part, l'évaluation des politiques fiscales d'autre part. La cohérence d'ensemble du projet de Hotelling peut être définie ainsi : mettre les mathématiques au service d'une clarification des hypothèses et des raisonnements des économistes, pour comparer différents régimes de propriété et scénarios alternatifs de politiques publiques (Gaspard & Missemer, 2019 ; Gaspard & Mueller, 2021).

Le sujet des ressources épuisables apparaît pour la première fois dans les archives de Hotelling à l'automne 1924, sept ans donc avant la publication de « The Economics of Exhaustible Resources »[11], comme prolongement de son travail sur la dépréciation du capital productif publié quelques mois plus tard (Hotelling, 1925). Après quelques développements succincts à l'hiver 1925 dans lesquels il formalise le problème de la valorisation inter-temporelle d'une mine selon qu'elle se situe en monopole ou en libre concurrence (et dans lesquels on trouve déjà une énonciation de la règle), Hotelling semble laisser de côté son projet pour plusieurs années pour y revenir ensuite en 1928-1929. Disposant alors d'une théorie des formes de la concurrence et de la concurrence monopolistique (Hotelling, 1929), il explore plus avant les implications en termes d'utilité sociale de la structuration des industries extractives. Il faut attendre l'été 1930 pour voir Hotelling terminer son article[12].

10. Ce sont ces articles, complétés de classiques de l'économie mathématique, que Hotelling enseignait à Columbia dans les années 1930, formant toute une génération d'économistes-mathématiciens : Kenneth Arrow, Robert Dorfman, Milton Friedman, Gabriel Preinreich ou William Vickrey, pour n'en citer que quelques uns.
11. « Exhaustible Assets under Competition », HHP, Box 10, AMS Reports and Correspondence (3).
12. Lettre de Hotelling à Ronald A. Fisher, 23 juillet 1930 (RAFP, version disponible en ligne) et lettre de Hotelling à Edward Chamberlin, 8 août 1930 (Guicherd, 2017, p. 179).

Si « The Economics of Exhaustible Resources » constitue la seule publication de Hotelling sur le sujet des ressources épuisables, on trouve trace dans ses documents personnels d'un intérêt prolongé pour cette question. Plusieurs brouillons postérieurs à 1931 explorent de nouvelles extensions de son modèle, y compris une application aux ressources biologiques[13]. Les dernières pages consacrées par Hotelling aux ressources épuisables datent de juin 1959. Est alors laconiquement rappelé que le prix net *p* de la ressource doit s'entendre coûts d'extraction, de transport et de marketing déduits[14].

La reconstitution de l'itinéraire de travail de Hotelling sur la question des ressources épuisables conduit à déplacer le regard que l'on a habituellement sur son article fondateur. Tout d'abord, il apparaît que la réflexion de Hotelling n'a pas été conçue initialement comme une réponse au mouvement conservationniste américain, contrairement à ce que peuvent laisser penser l'introduction de l'article publié (Hotelling, 1931, p. 137) ou plusieurs interprétations tardives (Solow, 1974 ; Gaudet, 2007 ; Livernois, 2009). On ne trouve trace de la question du conservationnisme sur aucun des brouillons ou fragments disponibles avant la version finale. Plus significativement, l'introduction de l'article semble avoir été modifiée dans les dernières semaines de rédaction, peut-être même à la demande de l'éditeur ou des rapporteurs de la revue. Les archives contiennent en effet une version préliminaire de l'introduction datant de décembre 1929. Dans cette version, l'enjeu mis en avant dans les premières lignes est celui des structures de concurrence, leur impact sur le rythme d'exploitation des ressources et leurs implications du point de vue de l'intérêt collectif – contrairement à la version de 1931, nulle trace du conservationnisme dans ce premier paragraphe[15] :

> *Contemplation of the world's disappearing supplies of minerals, forests, and other exhaustible assets has led to demands for regulation of their exploitation, by taxation or otherwise. On the other hand the existence of monopolies and quasi-monopolies has raised the same problems of excessively curtailed production here as in other industries, but in a more complex form. The economics of the exploitation, that is, the study of the rates of exploitation which on the one hand tend to take*

13. « The Dynamics of Exhaustible Biological Resources », HHP, Box 45, Misc. Problems, Dated 1931-1933. Voir aussi Crabbé, 1986.
14. « Exhaustible Resources Example », HHP, Box 45, Misc. Problems, Dated 1957-1959.
15. « The Economics of Exhaustible Assets by Harold Hotelling (abstract) », HHP, Box 42, Exploitation of Irreplaceable Assets. Pour une discussion détaillée de ce brouillon, voir Ferreira da Cunha et Missemer (2020).

> *place under commercial conditions, and of those which on the other hand ought in the public interest to take place, has however received no serious attention.*

En réalité, ce sont davantage les enjeux de répartition du revenu plutôt que les enjeux de conservation qui sont à l'origine de l'attention portée par Hotelling aux ressources épuisables. En témoignent les sources ultimes de son intérêt pour le sujet. Il ne fait en effet pas de doute que ce sont des lectures préparatoires sur les questions de dépréciation qui l'ont mis sur le chemin des ressources épuisables. Parmi ces lectures, l'ouvrage d'Earl A. Saliers (1922) a joué un rôle décisif en donnant à voir à Hotelling les implications politiques, voire morales, associées à la dépréciation des actifs en général et à la taxation des activités minières en particulier (Missemer *et al.*, 2022).

Autre enseignement issu des matériaux d'archives, le suivi pas à pas de la rédaction de l'article de 1931 révèle que Hotelling a suivi de front deux pistes de recherche avant d'en arriver à « The Economics of Exhaustible Resources » : d'une part un travail théorique, et plutôt normatif, sur l'exploitation optimale des « *actifs* épuisables » (*exhaustible assets*) ; d'autre part un travail plus empirique, plus descriptif aussi, sur les trajectoires de production et de coûts des « *ressources* irremplaçables » (*irreplaceable resources*). Alors que la condition d'optimalité connue sous le nom de règle de Hotelling avait vocation à s'appliquer à une catégorie d'actifs caractérisés par leur seule finitude – on pourrait parler d'actifs épuisables *purs* comme il est coutume de parler, dans un tout autre domaine, de biens publics purs –, les ressources naturelles concrètes (pétrole, gaz, charbon, etc.), soumises à d'innombrables frictions (contraintes géologiques, dispersion spatiale, etc.), n'étaient pas supposées tomber dans le champ d'application de la règle, selon Hotelling lui-même (Ferreira da Cunha & Missemer, 2020 ; Missemer, 2022). Quelques documents d'archives en témoignent[16]. Surtout, la partie finale de l'article de 1931 s'en fait l'écho, à partir de la section 8, quand Hotelling (1931, p. 152, 164, 174) mentionne explicitement des contraintes géologiques – les coûts croissants au fur et à mesure que la mine gagne en profondeur (« *the cost of extraction increases as*

16. Certains documents, comme les brouillons intitulés « Monopoly of an Exhaustible Asset » et « Integrals and Characteristic Curve », renvoient au travail d'abstraction des actifs épuisables mené par Hotelling pour en tirer des raffinements de son modèle élémentaire, tandis que d'autres, comme le courrier échangé avec Stanley C. Herold le 7 juillet 1930, témoignent de son intérêt parallèle pour les coûts concrets dans l'industrie pétrolière. HHP, Box 10, AMS Reports and Correspondence (3) & HHP, Box 42, Exploitation of Irreplaceable Assets.

the mine goes deeper »), certains coûts non linéaires (« *the cost of accelerating production at the beginning* »), et les incertitudes sur la taille véritable des gisements (« *the problems of exhaustible resources involve the time […] as bringing increased information […] as to the physical extent and condition of the resource* ») – faisant diverger la réalité des marchés énergétiques de son modèle générique. Il n'est donc pas surprenant que la règle de Hotelling, même amendée, ait souvent échoué aux tests empiriques en économie des ressources naturelles (e.g. Halvorsen & Smith, 1991 ; Livernois, 2009 ; Slade & Thille, 2009 ; Hart & Spiro, 2011 ; Gaugler, 2015 ; Karp, 2017) : elle n'était pas faite pour prédire les trajectoires de prix de ces ressources, seulement pour définir quelles seraient les trajectoires optimales de prix d'actifs purs et la nature des rentes associées dans différentes configurations institutionnelles ou fiscales.

À la lumière de ces observations, comment appréhender les applications de la règle de Hotelling en économie du climat ? Le carbone constitue un actif environnemental qui ne souffre a priori d'aucune friction – il est homogène et non soumis aux contraintes géologiques des ressources énergétiques. Ainsi, il semble un parfait candidat au titre d'actif épuisable pur tel qu'envisagé, selon notre reconstruction, par Hotelling pour l'application de son modèle élémentaire. Les trajectoires de prix du carbone à long terme constitueraient donc, de prime abord, un cas d'école pour une application de la règle de Hotelling. On ne peut cependant pas en rester là. Comme le suggère la primauté des enjeux de répartition dans les motivations de Hotelling, il n'est pas certain que les applications courantes de la règle en économie du climat rendent pleinement justice aux questionnements éthiques et politiques que Hotelling avait en tête au moment de bâtir son modèle.

3. Actualisation, éthique et politique chez Harold Hotelling

Au début du XXe siècle, la littérature conservationniste considérait avec attention la problématique de l'actualisation face à des stocks de ressources naturelles, voire d'aménités environnementales, finis (Smith, 1982 ; Ramos Gorostiza, 2003 ; Missemer, 2017 ; Franco *et al.*, 2019). Lewis C. Gray (1913, 1914) estimait que le taux d'intérêt, servant de taux d'actualisation, devait être piloté par les autorités publiques pour qu'il soit moins élevé dans les secteurs mobilisant beaucoup d'intrants naturels. Richard T. Ely (1918) et John Ise (1925), tout en soulignant le

caractère impératif d'une gestion plus rationnelle des ressources naturelles, considéraient que la question du taux d'escompte devait être subordonnée à une réflexion philosophique, individuelle et collective, analysant clairement la nature de nos devoirs vis-à-vis de l'avenir de l'humanité[17].

En développant son analyse en marge de ces débats conservationnistes, Hotelling semble avoir été le premier à accepter sans état d'âme un taux d'actualisation fondé sur une analyse exclusivement économique et financière. C'est peut-être la simplicité de ce choix, et l'énonciation claire et mathématique d'une règle d'optimisation qui a fait de lui, ultérieurement, le fondateur de l'analyse économique des ressources (Solow, 1974). Le taux choisi, à savoir le taux d'intérêt de marché, constitue a priori un taux objectif, observable, qui plus est valable aussi bien pour la maximisation du profit tiré de la ressource par un producteur (en libre concurrence ou en monopole) que pour la maximisation de la « valeur sociale » de la mine (Hotelling, 1931, p. 138-139, 144, 158). Face aux arguments éthiques également mis en avant à l'époque par Frank P. Ramsey (1928) pour renoncer à un taux d'escompte positif, Hotelling (1931, p. 145) ne paraît viser que l'optimum économique.

À la lecture des raisons pour lesquelles Hotelling choisit d'escompter les valeurs futures de l'utilité sociale au taux d'intérêt, on découvre toutefois une position assez nuancée :

> *The discounting of future values of* u *may be challenged on the ground that future pleasures are ethically equivalent to present pleasure of the same intensity. The reply to this is that capital is productive, that future pleasures are uncertain in a degree increasing with their remoteness in time, and that* V *and* u *are concrete quantities, not symbols for pleasure. They measure the social value of the mine in the sense concerned with the total production of goods, but not properly its utility or the happiness to which it leads, since this depends upon the distribution of wealth, and is greater if the products of the mine benefit chiefly the poor than if they become articles of luxury. A platinum mine is of greater general utility when platinum is used for electrical and chemical purposes than when it is pre-empted by the jewelry trade.* (Hotelling, 1931, p. 145)

17. Pour Ely (1918, p. 36), il était cependant possible de prendre provisoirement et arbitrairement pour référence « le taux d'intérêt le plus bas possible payé par un État prospère et bien géré, disons 2% » (« *the lowest possible rate of interest paid by a prosperous state with well-managed finances, say two per cent* »). Ise (1925) estimait lui que l'incertitude imposait un taux d'escompte positif, mais que les économistes ne pouvaient le choisir seul.

Hotelling, ici en 1931 mais comme dans ses autres articles, utilise comme indicateur d'utilité agrégée le surplus des consommateurs, tel qu'extrait de la fonction de demande. Son indicateur d'utilité est un surplus monétaire, conceptualisé littéralement comme un « profit net », individuel ou collectif (Hotelling, 1932, p. 590-591), dont on suppose qu'il pourrait éventuellement être placé ailleurs que dans la consommation de la ressource épuisable. Il ne s'agit en aucun cas d'une fonction d'utilité subjective ou d'une fonction de bien-être social telle que la pensait Ramsey ou telle qu'on peut la conceptualiser en économie de la croissance optimale et, par extension, dans la littérature macroéconomique sur la soutenabilité ainsi que dans les travaux à la recherche d'une « règle d'or verte » (*green golden rule*) (Chichilnisky *et al.*, 1995). Dans la représentation de Hotelling, le taux d'intérêt qui paramètre la règle rémunère autant le temps que l'incertitude et s'applique à toute forme de montant *monétaire*, y compris, donc, à cette utilité-profit au sens de Hotelling.

Hotelling (1932, 1938) n'a jamais considéré comme sérieuses les fonctions utilitaristes d'utilité ou de bien-être social. Au sujet des ressources épuisables, dans le passage précité, il estime ne pas être en mesure de juger de ce que serait un indice de bien-être social tiré de la ressource dès lors qu'il ne dispose pas d'une représentation claire de la répartition des revenus au sein de la société. Les inégalités au sein de la population induisent une satisfaction et des usages différenciés d'une même ressource, empêchant également d'objectiver un taux d'actualisation social. Autrement dit, introduire, comme on le fait aujourd'hui, une règle de Ramsey dans une règle de Hotelling (pour tenter une objectivation des taux d'actualisation) revient à introduire une représentation subjective ou *welfariste* des préférences sociales, option à laquelle Hotelling ne souscrivait pas.

Deuxième point méritant notre attention, Hotelling précise que l'usage du même taux d'intérêt pour actualiser les profits ou actualiser les valeurs futures des utilité-surplus se justifie par le fait qu'est considéré le marché d'une ou deux ressources productives *parmi d'autres*, en équilibre partiel. Leur épuisement n'est pas susceptible de bouleverser significativement les grands équilibres économiques. La situation serait différente si nous étions proche de l'épuisement des ressources de l'ensemble de la Terre : à la veille de l'effondrement, pour parler en termes anachroniques, quand l'humanité serait réduite à la pauvreté extrême, on lui pardonnerait l'usage de taux d'intérêt très élevés (Hotelling, 1931, p. 145) (et ce, en dépit d'un effet richesse nul). Le taux

d'intérêt dépendrait ici d'un ensemble de paramètres parmi lesquels s'immisceraient, notamment, le niveau de richesse d'une société (plus que ses perspectives de croissance) ou le temps restant à l'humanité. Ce faisant, ce taux ne serait pas nécessairement constant sur le long terme.

Dans le cas du budget carbone, quelles leçons en tirer ? Quelles positions Hotelling aurait-il été amené à prendre sur le sujet ? Aurait-il milité pour que soit introduite une valorisation différenciée des émissions de carbone ou une valorisation différenciée des coûts d'atténuation, en fonction de la nature des biens produits ou en fonction d'une hiérarchisation de biens premiers ? Aurait-il également considéré des effets richesse fonctionnant à rebours (les générations futures étant amenées à être moins riches que les générations présentes) ? Nous ne pouvons pas apporter de réponse définitive à ces questions, bien entendu, mais remarquons que la condition d'optimalité proposée par Hotelling en 1931, et ce même lorsque la valeur sociale de la mine est en jeu, ne semble pas proportionnée à un défi collectif ou global, comme celui de l'usage d'un budget carbone, et sans doute pas, non plus, destiné à définir une norme de long terme à taux d'actualisation constant. Le cadre d'analyse de Hotelling n'était pas celui d'un équilibre général ou macroéconomique. Le théorème de l'économie du bien-être que nous évoquions en introduction permettant à Hotelling de comparer la valeur de la ressource en libre concurrence et son exploitation optimale par un monopole public repose justement sur le fait que le monopole public prendrait lui-aussi comme donné, dans un cadre d'équilibre partiel, le taux d'intérêt du marché comme taux d'actualisation. Même dans une acception restreinte, le résultat ne serait pas tout à fait équivalent à un théorème d'économie du bien-être. Comme le remarque Solow (1974, p. 7), ce ne serait le cas que si l'on parvenait à montrer que « la société souhaite escompter les surplus futurs au même taux que les producteurs de mines escomptent leurs propres profits futurs » (« *society wishes to discount future consumer surpluses at the same rate that mine owners choose to discount their own future profits* »). Or justement, en 1931, Hotelling ne se prononce pas sur ce que « souhaite la société ».

De l'été 1931 aux années 1950, Hotelling n'aura de cesse d'envisager des compléments à son modèle initial, pour les ressources biologiques comme mentionné plus haut, pour un stock de ressources n'arrivant finalement pas à épuisement[18], ou encore pour la combinaison de deux ressources épuisables dans le même modèle[19]. Rétrospectivement, on constate que ces compléments se sont déployés

en parallèle d'une mise au point plus précise de sa propre analyse (non subjective) du bien-être (Hotelling, 1938) et d'un système de propositions de réformes fiscales à même de corriger les inégalités de répartition engendrées par le capitalisme monopolistique[20]. Retravaillant la question de l'impact de différents systèmes de taxation dans les industries extractives, abordée à la fin de l'article de 1931, Hotelling est conduit à considérer qu'un impôt proportionnel et anticipé sur la valeur des profits miniers aurait le même impact qu'une augmentation du taux d'intérêt – accélérer l'exploitation, mais aussi réduire le surplus des consommateurs – et que si l'objectif est de préserver la ressource, il vaudrait mieux opter pour des impôts sur la production. Ce faisant transparaissent des formes d'interventionnisme fiscal ouvrant la voix à des modifications du taux d'actualisation.

Des notes préparatoires rédigées pour un séminaire donné à l'École des Mines de Paris, à l'invitation de Maurice Allais au printemps 1951, montrent que Hotelling a poursuivi sa réflexion dans cette voie[21]. Face aux enjeux de justice intergénérationnelle, Hotelling envisage alors explicitement une intervention visant à modifier le taux d'intérêt pour peser sur la vitesse d'exploitation et l'utilité sociale de la ressource. Au moment de donner ses conditions d'optimisation, il définit le taux d'actualisation γ non plus comme le seul taux d'intérêt de marché, mais comme « la force de l'intérêt + une taxe sur la valeur + une provision pour le risque » (« *force of interest* + *tax rate on value* + *allowance for risk* ») (voir aussi Franco *et al.*, 2019). L'incorporation d'une provision pour le risque fait écho aux nombreuses incertitudes qui président à l'exploitation des ressources épuisables. La question de la taxe sur la valeur répond, elle, à une logique beaucoup plus politique, ou éthique, l'État devant être le garant d'une justice entre générations. Hotelling écrit ainsi quelques lignes plus loin :

> *The ethical question remains unsolved: what value of* $\jmath$ *should a wise and beneficent state use?*

18. « Exhaustible Resources, not all utilized when a is large », HHP, Box 45, Misc. Problems, Dated 1934.
19. « Monopoly of 2 Minerals (Coal + Iron) », HHP, Box 45, Misc. Problems, Dated 1957-1959.
20. Ses propositions de réformes fiscales visent à substituer les impôts indirects, réputés distordre les prix, par des impôts forfaitaires sur la terre et les ressources naturelles d'une part, par des impôts progressifs sur le revenu et l'héritage d'autre part. Hotelling défend sur ce point un agenda de réformes dans la lignée des propositions de Henry George (Franco *et al.*, 2019 ; Mueller, 2021).
21. « Light on Mineral Economics Shown by the Calculus of Variations », HHP, Box 13, Econometric Society (2).

Cette phrase nous rappelle les tenants et aboutissants de la règle de Hotelling dans l'esprit de son concepteur. Le facteur d'actualisation, qui paraissait initialement donné, devient amendable, pour inclure des éléments plus politiques relevant, pour reprendre les mots de Hotelling, d'une « question éthique ». À aucun moment on ne trouve trace chez Hotelling d'un quelconque chiffrage de ce taux corrigé : son travail d'économiste-mathématicien se limite à montrer quelles seraient les implications, en termes de répartition intra- et inter-temporelle des revenus, d'un taux d'actualisation rendu ainsi plus ou moins élevé par la politique économique[22]. Seules la délibération politique et la prise en compte de considérations éthiques sont à même de donner une trajectoire acceptable pour la société. L'économiste pourra alors alerter si ce choix s'avère réellement pertinent au regard des objectifs visés ou s'il faut se méfier de potentiels effets inattendus[23].

Ainsi, considérer la règle de Hotelling comme une clé technique, mécanique de répartition d'une ressource finie entre en dissonance avec son sens profond, en particulier au regard des propositions de Hotelling lui-même. Il n'y a ainsi pas de raison de s'interdire d'insérer des critères de justice, des critères politiques, dans la détermination des trajectoires de prix du carbone à long terme. Depuis le début des années 2000, quelques tentatives sont allées dans ce sens, comme la contribution de Godard (2009) au premier rapport Quinet où l'on voit que l'optimisation inter-temporelle est adaptée à des critères éthiques comme l'altruisme ou, plus significativement encore, l'impératif catégorique kantien. Cette direction semble plus en phase avec l'esprit de la règle de Hotelling que la recherche de seuls critères dits objectifs d'actualisation, même différents du seul taux d'intérêt de marché.

4. Conclusion

Connaître les origines et fondements des outils que l'on emploie peut en révéler les atouts et les faiblesses ou du moins aider à expliciter

22. En ce sens, les analyses contemporaines cherchant à évaluer l'impact d'une taxation du carbone sur la répartition dynamique des rentes et des surplus et sur la probabilité de rester dans le cadre du budget carbone semblent plus cohérentes avec la méthode hotellinienne (Heal & Schlenker, 2019).

23. À Columbia, Hotelling enseignait à ses étudiants que l'économie mathématique n'avait pas tant vocation que cela à établir des résultats. Son rôle était plutôt d'exploiter l'univocité de la relation logique reliant hypothèses et conclusions, pour éclairer certains choix de politique publique (HHP, Box 46, Lectures by Hotelling). Ici, la volonté de taxer les profits dans une recherche d'équité se traduirait par une augmentation du taux d'actualisation aux effets potentiellement contre-productifs sur le bien-être des générations futures.

la façon dont ils peuvent ou non informer l'action publique. L'enjeu n'est bien entendu pas de figer les usages, chaque outil théorique pouvant évoluer avec le temps, mais bien plutôt d'en rappeler la richesse parfois gommée par l'habitude et la transmission. Pour ce qui est de la règle de Hotelling, l'histoire nous rappelle que la règle n'était qu'une première exploration : une condition d'optimalité exprimée en équilibre partiel et servant à discuter des implications de la structuration des industries extractives sur le rythme d'exploitation, et sur la répartition intra- et inter-temporelle des revenus issus de cette exploitation. Hotelling lui-même ne concevait cette exploration que comme un premier pas, devant être complété par une analyse fine des contraintes concrètes d'extraction d'une part et d'autre part par une étude des politiques fiscales proportionnées aux choix éthiques retenus par un pouvoir politique.

Alors que la règle de Hotelling est aujourd'hui utilisée comme clé de répartition d'un budget carbone, quelques observations s'imposent. Son emploi à une échelle si agrégée requiert sans doute prudence et application, quand on se remémore que le résultat de Hotelling était avant tout heuristique, et microéconomique. Les variables d'optimisation retenues (utilité inter-temporelle, utilité-surplus, variable monétaire, etc.) nécessitent également d'être attentivement considérées, quand on connaît le scepticisme originel de Hotelling pour les fonctions utilitaristes de bien-être social. Le choix des facteurs d'actualisation, enfin, n'est pas forcément qu'affaire d'économistes, les efforts d'objectivation se heurtant dans tous les cas à la complexité des enjeux, en particulier distributifs. Sur tous ces sujets, une vigilance particulière semble requise pour que la règle de Hotelling puisse être mobilisée à bon escient au service de la décision publique.

De façon générale, l'exploration des documents personnels de Hotelling montre son attachement à la délibération politique et à la justice intergénérationnelle, bien au-delà de la réputation habituellement faite à la règle qui évacuerait tout autre critère que l'efficacité économique. La règle de Hotelling, dont le dimensionnement n'était pas originellement celui seyant à des enjeux globaux et systémiques comme ceux du changement climatique, n'a donc pas vocation à remplacer tout choix collectif dans la détermination des prix de long terme, en particulier du carbone. Au contraire même, Hotelling invitait ses lecteurs à réfléchir à l'articulation entre enjeux économiques, politiques et éthiques – une invitation éminemment d'actualité face à la complexité des problématiques socio-économiques associés à l'action climatique.

Remerciements

Certains des résultats présentés dans ce papier sont issus d'un projet collectif intitulé « Bifurcations in Natural Resource Economics (1920s-1930s) » et financé par la European Society for the History of Economic Thought (Grant 2017-19). Nous tenons à remercier Roberto P. Ferreira da Cunha, Thomas M. Mueller, Franck Nadaud et Marco P. Vianna Franco pour les discussions conduites au sein du groupe de travail. Merci aussi à Meriem Hamdi-Cherif pour ses encouragements dans ce projet, ainsi qu'aux rapporteurs anonymes qui ont contribué à l'amélioration de ce texte.

Archives

HHP : Harold Hotelling Papers, Rare Book and Manuscript Library, Columbia University, New York, USA.

RAFP : Ronald A. Fisher Papers, Special Collections Library, University of Adelaide, Australia (e-versions).

Références

Anderson S. T., Kellogg R., & Salant S. W., 2018, « Hotelling under Pressure », *Journal of Political Economy*, vol. 126, n° 3, pp. 984-1026.

Arrow K. J., Cline W. R., Mäler K.-G., Munasinghe M., Squitieri R., & Stiglitz J. E., 1996, « Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency », in J. P. Bruce, H. Lee & E. F. Haites (Éds.), *Climate Change 1995?: Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of WWIII to the Second Assessment Report of the IPCC* (p. 125-144), Cambridge University Press.

Arrow K. J., Cropper M. L., Gollier C., Groom B., Heal G., Newell R. G., Nordhaus W. D., Pindyck R. S., Pizer W. A., Portney P., Sterner T., Tol R., & Weitzman M., 2014, « Should Governments Use a Declining Discount Rate in Project Analysis? », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 8, n° 2, pp. 145-163. https://doi.org/10.1093/reep/reu008

Aykut S. & Dahan A., 2011, « Le régime climatique avant et après Copenhague : Sciences, politiques et l'objectif des deux degrés », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 19, n° 2, pp. 144-157.

Baudry S., 2009, « La taxe carbone : un bilan de l'expérience suédoise », *Regards croisés sur l'économie*, vol. 6, n° 2, pp. 142-144.

Broecker W. S., Takahashi T., Simpson H. J. & Peng T.-H., 1979, « Fate of Fossil Fuel Carbon Dioxide and the Global Carbon Budget », *Science*,

vol. 206, n° 4417, pp. 409-418. https://doi.org/10.1126/science.206.4417.409

Chichilnisky G., Hammond P. J. & Stern N., 2020, « Fundamental Utilitarianism and Intergenerational Equity with Extinction Discounting », *Social Choice and Welfare*, n° 54, 397-427. https://doi.org/10.1007/s00355-019-01236-z

Chichilnisky G., Heal G. & Beltratti A., 1995, « The Green Golden Rule », *Economic Letters*, vol. 49, n° 2, pp. 175-179. https://doi.org/10.1016/0165-1765(95)00662-Y

Crabbé P. J., 1986, « Unpublished Fragments on Natural Resources Economics and Excerpt from an Autobiography by Harold Hotelling », *Cahiers de recherche du GREEN*, n° 8601.

Darnell A. C., 1990, « The Life and Economic Thought of Harold Hotelling », in *The Collected Economics Articles of Harold Hotelling* (p. 1-28), Springer-Verlag.

Dasgupta P. S. & Heal G., 1979, *Economic Theory and Exhaustible Resources*, James Nisbet Co. and Cambridge University Press.

Ely R. T., 1918, « Conservation and Economic Theory » in R. T. Ely, R. H. Hess, C. K. Leith & T. N. Carver (Éds.), *The Foundations of National Prosperity. Studies in the Conservation of Permanent National Resources*, Macmillan, pp. 1-92.

Farzin Y. H., 1984, « The Effect of the Discount Rate on Depletion of Exhaustible Resources », *Journal of Political Economy*, vol. 92, n° 5, pp. 841-851.

Farzin Y. H. & Tahvonen O., 1996, « Global Carbon Cycle and the Optimal Time Path of a Carbon Tax », *Oxford Economic Papers*, vol. 48, n° 4, pp. 515-536. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.oep.a028582

Ferreira da Cunha R. P., 2020, « Non-Renewable Resource Economics and Geological Constraints: A Review », *Œconomia – History | Methodology | Philosophy*, vol. 10, n° 3, pp. 507-519. https://doi.org/10.4000/oeconomia. 9697.

Ferreira da Cunha R. P. & Missemer A., 2020, « The Hotelling Rule in Non-Renewable Resource Economics: A Reassessment », *Canadian Journal of Economics*, vol. 53, n° 2, pp. 800-820. https://doi.org/10.1111/caje.12444

France Stratégie, 2019, *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet*, France Stratégie.

Franco M. P. V., Gaspard M. & Mueller T. M., 2019, « Time Discounting in Harold Hotelling's Approach to Natural Resource Economics: The Unsolved Ethical Question », *Ecological Economics*, vol. 163, pp. 52-60. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.005

Frederick S., Loewenstein G. & O'Donoghue, T., 2002, « Time Discounting and Time Preference: A Critical Review », *Journal of Economic Literature*, vol. 40, n° 2, pp. 351-401.

Gadrey J. & Lalucq A., 2015, *Faut-il donner un prix à la nature ?,* Les Petits matins.

Gaffney M. (Éd.), 1967, *Extractive Resources and Taxation*, University of Wisconsin Press.

Gaspard M. & Missemer A., 2019, « An Inquiry into the Ramsey-Hotelling Connection », *European Journal of the History of Economic Thought*, vol. 26, n° 2, pp. 352-379. https://doi.org/10.1080/09672567.2019.1576059

Gaspard M. & Mueller T. M., 2021, « Building Comparison Spaces?: Harold Hotelling and Mathematics for Economics », *Journal of Economic Methodology*, vol. 28, n° 3, pp. 255-273. https://doi.org/10.1080/1350178X.2021.1936597

Gaudet G., 2007, « Natural Resource Economics under the Rule of Hotelling », *Canadian Journal of Economics*, vol. 40, n° 4, pp. 1033-1059. https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.00441.x

Gaugler T., 2015, « What Drives Resource Prices?? A Qualitative Review with Recommendations for Further Development of the Hotelling Model », *Mineral Economics*, vol. 28, n° 1-2, pp. 37-51.

Godard O., 2009, « Hotelling or not Hotelling?? Comment calibrer la valeur tutélaire de la tonne de gaz à effet de serre de 2010 et 2050?? », in *La valeur tutélaire du carbone. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet,* Centre d'analyse stratégique, pp. 317-335.

Gollier C., 2012, « Actualisation et développement durable : en faisons-nous assez pour les générations futures? », *Annals of Economics and Statistics*, HS1, pp. 57-96. https://doi.org/10.2307/23646353

Gollier C., 2019, *Le climat après la fin du mois*, Presses universitaires de France.

Gray L. C., 1913, « The Economic Possibilities of Conservation », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 27, n° 3, pp. 497-519. https://doi.org/10.2307/1883375

Gray L. C., 1914, « Rent under the Assumption of Exhaustibility », *Quarterly Journal of Economics*, n° 28, n° 3, pp. 466-489. https://doi.org/10.2307/1884984

Guicherd T., 2017, *Essai sur la genèse de la théorie de la concurrence monopolistique d'Edward H. Chamberlin. Entre histoire subjective et reformulation d'une théorie,* University of Lyon 2, [PhD Thesis].

Guivarch C. & Taconet N., 2020, « Inégalités mondiales et changement climatique », *Revue de l'OFCE*, n° 165(1), pp. 35-70.

Halvorsen R. & Smith T. R., 1991, « A Test of the Theory of Exhaustible Resources », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 106, n° 1, pp. 123-140.

Hart R. & Spiro D., 2011, « The Elephant in Hotelling's Room », *Energy Policy*, vol. 39, n° 12, pp. 7834-7838.

Hartwick J. M., 1977, « Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources », *American Economic Review*, vol. 67, n° 5, pp. 972-974.

Hartwick J. M. & Mitra T., 2020, « On Intertemporal Equity and Efficiency in a Model of Global Warming », in G. Chichilnisky & A. Rezai (Éds.), *Handbook on the Economics of Climate Change*, Edward Elgar Publishing, , pp. 326-396

Heal G., 2017, « The Economics of the Climate », *Journal of Economic Literature*, vol. 55, n° 3, pp. 1046-1063. https://doi.org/10.1257/jel.20151335

Heal G. & Schlenker W., 2019, « Coase, Hotelling and Pigou: The Incidence of a Carbon Tax and CO2 Emissions », *NBER Working Paper*, n° 26086. https://doi.org/10.3386/w26086

Hotelling H., 1925, « A General Mathematical Theory of Depreciation », *Journal of the American Statistical Association*, vol. 20, n° 151, pp. 340-353. https://doi.org/10.1080/01621459.1925.10503499

Hotelling H., 1929, « Stability in Competition », *Economic Journal*, vol. 39, n° 153, pp. 41-57. https://doi.org/10.2307/2224214

Hotelling H., 1931, « The Economics of Exhaustible Resources », *Journal of Political Economy*, vol. 39, n° 2, pp. 137-175. https://doi.org/10.1086/254195

Hotelling H., 1932, « Edgeworth's Taxation Paradox and the Nature of Demand and Supply Function », *Journal of Political Economy*, vol. 40, n° 5, pp. 577-616. https://doi.org/10.1086/254387

Hotelling H., 1938, « The General Welfare in Relation to Problems of Taxation and of Railway and Utility Rates », *Econometrica*, vol. 6, n° 3, pp. 242-269. https://doi.org/10.2307/1907054

Hotelling H., 1948, *Western Hotelling and Allied Families. An Epic of Migration*.

Hourcade J.-C. & Combet E., 2017, *Fiscalité carbone et finance climat. Un contrat social pour notre temps*, Les Petits Matins & Institut Veblen.

Ise J., 1925, « The Theory of Value as Applied to Natural Resources », *American Economic Review*, vol. 15, n° 2, pp. 284-291.

Karp L., 2017, *Natural Resources as Capital*. MIT Press.

Krause F., Bach W. & Koomey J., 1989, *Energy Policy in the Greenhouse. From Warming Fate to Warming Limit*, International Project for Sustainable Energy Paths (IPSEP).

Lahn B., 2020, « A History of the Global Carbon Budget », *WIREs Climate Change*, vol. 11, n° 3, pp. 1-9. https://doi.org/10.1002/wcc.636

Livernois J., 2009, « On the Empirical Significance of the Hotelling Rule », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 3, n° 1, pp. 22-41. https://doi.org/10.1093/reep/ren017

Manne A. S. & Richels R. G., 1992, *Buying Greenhouse Insurance. The Economic Costs of CO2 Emission Limits*, MIT Press.

Méjean A., Pottier A., Fleurbaey M. & Zuber S., 2020, « Catastrophic Climate Change, Population Ethics and Intergenerational Equity », *Climatic Change*, n° 163, pp. 873-890.

Missemer A., 2017, *Les Économistes et la fin des énergies fossiles (1865-1931)*, Classiques Garnier.

Missemer A., 2022, « Un imaginaire fossilisé ? Les représentations économiques de l'énergie au défi de la transition bas-carbone », *Cahiers François Viète*, vol. III, n° 12.

Missemer A., Gaspard M. & Ferreira da Cunha R. P., 2022, « From Depreciation to Exhaustible Resources: On Harold Hotelling's First Steps in Economics », *History of Political Economy*, vol. 54, n° 1, pp. 109-135. https://doi.org/10.1215/00182702-9548337

Mueller T. M., 2021, « Rescuing Henry George: Optimization, Welfare, and the Monopoly Game in Harold Hotelling's Economic Thought », *History of Political Economy*, vol. 53, n° 5, pp. 925-947. https://doi.org/10.1215/00182702-9395114

National Research Council, 1983, *Changing Climate: Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee*, The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/18714

Nordhaus W. D., 2010, « Economic Aspects of Global Warming in a Post-Copenhagen Environment », *Proceedings of the National Academy of Science*, n° 107, pp. 11721-11726.

Okullo S. J., Reynès F. & Hofkes M. W., 2015, « Modeling Peak Oil and the Geological Constraints on Oil Production », *Resource and Energy Economics*, n° 40, pp. 36-56.

Pestre D., 2020, « Comment l'environnement a été géré depuis 50 ans. Anatomie d'un échec », in È. Chiapello, A. Missemer & A. Pottier (Éds.), *Faire l'économie de l'environnement*, Presses des Mines, pp. 17-36.

Pindyck R. S., 1978, « The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources », *Journal of Political Economy*, vol. 86, n° 5, pp. 841-861.

Pottier A., 2016, *Comment les économistes réchauffent la planète*, Seuil.

Pottier A., Méjean A., Godard O. & Hourcade J.-C., 2017, « A Survey of Global Climate Justice: From Negotiation Stances to Moral Stakes and Back », *International Review of Environmental and Resource Economics*, vol. 11, n° 1, pp. 1-53. https://doi.org/10.1561/101.00000090

Quirion P., 2020, « Les instruments de marché dans la lutte contre le changement climatique : Quel bilan? », in È. Chiapello A. Missemer & A. Pottier (Éds.), *Faire l'économie de l'environnement,* Presses des Mines, pp. 161-175.

Ramos Gorostiza J. L., 2003, « Ethics and Economics: From the Conservation Problem to the Sustainability Debate », *History of Economic Ideas*, vol. 11, n° 2, pp. 31-52.

Ramsey F. P., 1928, « A Mathematical Theory of Saving », *Economic Journal*, vol. 38, n° 152, pp. 543-559. https://doi.org/10.2307/2224098

RSAS, 2018, *The Prize in Economic Sciences 2018. Press Release*, Royal Swedish Academy of Sciences. https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/press-economicsciences2018.pdf

Saliers E. A., 1922, *Depreciation. Principles and Applications*, The Ronald Press Company.

Samuelson P. A., 1960, « Harold Hotelling as Mathematical Economist », *The American Statistician*, vol. 14, n° 3, pp. 21-25. https://doi.org/10.2307/2682168

Sinclair P. J. N., 1994, « On the Optimum Trend of Fossil Fuel Taxation », *Oxford Economic Papers*, n° 46, pp. 869-877.

Slade, M. E., & Thille, H., 2009, « Whither Hotelling: Test of the Theory of Exhaustible Resources », *Annual Review of Resource Economics*, *1*, 239-260. https://doi.org/10.1146/annurev.resource.050708.144223

Smith, G. A., 1982, « Natural Resource Economic Theory of the First Conservation Movement (1895-1927) », *History of Political Economy*, *14*(4), 483-495. https://doi.org/10.1215/00182702-14-4-483

Solow, R. M., 1974, « The Economics of Resources or the Resources of Economics », *American Economic Review*, vol. 64, n° 2, pp. 1-14.

Stern, N., 2006, *The Economics of Climate Change. The Stern Review*, Cambridge University Press.

Strefler, J., Kriegler, E., Bauer, N., Luderer, G., Pietzcker, R. C., Giannousakis, A., & Edenhofer, O., 2021, « Alternative carbon price trajectories can avoid excessive carbon removal », *Nature Communications*, *12*, 2264. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22211-2

Wigley, T. M. L., Richels, R. G., & Edmonds, J. A., 1996, « Economic and Environmental Choices in the Stabilization of Atmospheric CO_2 Concentrations », *Nature*, *379*, pp. 240-243.