



HAL
open science

Les conséquences économiques de la biologie predictive

Stefano Bosi, Thai Ha-Huy

► **To cite this version:**

| Stefano Bosi, Thai Ha-Huy. Les conséquences économiques de la biologie predictive. 2018. <hal-04319049>

HAL Id: hal-04319049

<https://hal.science/hal-04319049v1>

Preprint submitted on 2 Dec 2023

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.



HAL Authorization

Les conséquences économiques de la biologie predictive*

Stefano BOSI[†] et Thai HA-HUY[‡]

March 31, 2018

1 Introduction

La biologie prédictive consiste à identifier les gènes ou les biomarqueurs¹ responsables de certaines maladies chez les organismes vivants. Le colloque PREDICT² ainsi que le projet 1HEALTH³ abordent la question des recherches en santé des hommes, des animaux et des plantes dans une perspective de santé globale.

Dans cette note on considère certains effets économiques de la médecine et de la biologie prédictive avec un focus sur l'accumulation de capital humain et l'assurance.

On distingue traditionnellement les maladies monogéniques (dont un seul gène est responsable) des maladies polygéniques (dont le concours de plusieurs gènes est responsable). Le séquençage des génomes et l'analyse des données de génomique ont démultiplié notre capacité d'identifier des gènes, marqueurs génétiques et biomarqueurs liés à des dysfonctionnements physiologiques ou des pathologies. Toutefois, l'expression des gènes dépend aussi des conditions environnementales. On assiste maintenant au développement de deux champs à fort potentiel de recherche : l'épigénétique et la nutriginomique. Il s'agit respectivement de l'étude des modifications d'expression du génome sans modification du patrimoine génétique et de l'impact du microbiote intestinal sur la digestion, le système immunitaire ou, encore, d'autres fonctions. La réduction des coûts de séquençage permet aujourd'hui d'identifier et quantifier exhaustivement les microbes présents dans le système digestif. On sait par exemple que le microbiote joue un rôle dans l'obésité chez l'homme. La compréhension de ces cofacteurs permet de réviser les probabilités associées à chaque maladie selon la règle de

*Les auteurs souhaitent remercier Sandrine DUTEMPS et Claire ROGEL-GAILLARD pour leurs remarques constructives.

[†]EPEE, Université Paris-Saclay, stefano.bosi@univ-evry.fr.

[‡]EPEE, Université Paris-Saclay.

¹Molécules biologiques présentes dans les liquides corporels et les tissus.

²Colloque autour des questions socio-économiques posées par la biologie prédictive organisé en 2017 par la Maison de Sciences de l'Homme Paris-Saclay.

³Domaine d'Intérêt Majeur (DIM) financé par la Région Ile-de-France.

Bayes. Ces nouvelles connaissances offrent des opportunités pour améliorer les outils de prédiction, prévention et diagnostic.

Les enjeux économiques de la biologie prédictive n'échappent à personne. Les bénéfices peuvent dépasser les coûts de l'information génétique et inciter à une prise de conscience. Les stratégies de dépistage et de prévention dépendent de l'efficacité des biomarqueurs. Des nouveaux médicaments taillés sur mesure voient le jour (médecine de précision). La révision bayésienne des probabilités de maladie et de mort suite à un supplément d'information génétique affecte la valeur du vivant. De l'information, il faut considérer les implications dynamiques (épargne et lissage de la consommation entre périodes) et stochastiques (mutualisation du risque et lissage entre états de la nature). L'information génétique impacte les choix d'investissement en capital humain (éducation et santé) ainsi que l'offre et les primes d'assurance.

Les recherches actuelles visent à associer plus finement les caractères (phénotype) au génotype sous-jacent. Aujourd'hui il est question de phénotypage (et génotypage) haut débit. Il s'agit d'un enjeu de taille en médecine comme en agronomie. En ce qui concerne l'élevage, on souhaite comprendre les relations entre le génotype et le phénotype des animaux selon l'environnement, et identifier des leviers d'action pour promouvoir des systèmes durables, dans un contexte de transition écologique. Afin de peaufiner l'inférence génotype/phénotype, il s'agit par ailleurs d'appréhender le métabolisme des animaux dans sa globalité à travers la métabolomique. Le phénotypage permettra aussi de prédire la valeur d'un animal plus tôt au cours de sa vie à travers un choix restreint et pertinent de paramètres significatifs.

Au-delà d'un certain positivisme triomphant, il ne faut pas ignorer les effets paradoxaux de la biologie prédictive. Le partage de l'information peut conduire au sous-investissement en capital humain voire à la défaillance du marché de l'assurance. En théorie de la décision, le droit de ne pas savoir peut affecter les choix individuels. La décision de se marier ou avoir des enfants dépend des risques génétiques. L'espérance de vie affecte les choix d'éducation et de santé et en est affectée en retour.

2 Capital biologique

Combien un être vivant vaut-il ? Quel est son prix sur le marché ? Les animaux et les plantes sont assimilés à des objets et échangés sur le marché. Le prix à payer dépend du retour sur investissement en termes de productivité (c'est le cas d'une vache laitière) ou d'utilité marginale (c'est le cas d'un animal de compagnie). Dans un marché parfait sans bulles, à l'équilibre, le prix égalise la valeur escomptée des retours futurs. Si l'on pense la force travail comme facteur de production on arrive à définir le prix d'un homme comme la valeur actuelle de ses revenus de travail. On appelle ce prix d'équilibre le capital humain. Par extension, on appellera capital biologique le prix d'équilibre d'un être vivant à l'équilibre. Le capital humain pourrait ainsi s'interpréter comme un cas particulier de capital biologique.

2.1 Capital humain et médecine prédictive

Génome et biomarqueurs sont une forme d'information. Une information a une pertinence économique si elle affecte les prix et, par le jeu de marché, l'allocation des biens. L'information pertinente a un coût. Même si les données brutes sont gratuites, leur traitement coûte. L'arbitrage élémentaire en économie de l'information est celui entre le coût marginal de production de l'information pertinente et son prix de revente ou son prix fictif (utilité marginale). Comme définir une unité de mesure de l'information pose problème, la détermination de sa valeur au sein de la communauté des économistes fait débat.

L'information génétique coûte de moins en moins cher. La théorie standard considère un travailleur-consommateur qui maximise l'utilité de son cycle de vie sous une suite de contraintes budgétaires. Son revenu de capital dépend de l'épargne accumulée et du taux d'intérêt. Son revenu de travail, de son capital humain et des heures travaillées. Une partie du revenu est consommée, l'autre épargnée. Une partie de son temps disponible est consacrée à l'investissement en capital humain (éducation et santé), l'autre au travail. L'individu doit choisir aujourd'hui combien d'heures travailler, combien de temps consacrer à son éducation et sa santé, combien consommer. Il est confronté à deux arbitrages : consommation-épargne, éducation (santé)-travail.

Qui est confronté à une faible espérance, aura intérêt à consommer plus tôt. On investit plus en capital humain si l'horizon de vie est long. De plus, les dépenses de santé allongent la durée de vie ; les dépenses en éducation aussi, mais indirectement. Connaître son patrimoine génétique permet de mettre à jour les probabilités de survie et mieux calculer son espérance de vie. Reviser les probabilités de transition change la maximisation de l'utilité espérée. Ces probabilités sont endogènes parce qu'elles dépendent de l'investissement en capital humain, et subjectives parce qu'elles dépendent de l'information disponible au sujet. Acheter de l'information génétique change les probabilités de transition, mais affecte aussi les investissements en capital humain. Une probabilité accrue de contracter une maladie incite l'individu à changer ses habitudes de consommation (aliments et drogues) et à consacrer plus de temps au sport. Des maladies comme les cardiopathies, les AVC, les cancers, le diabète, listées parmi les principales causes de mortalité selon l'OMS (2015), présentent parfois une prédisposition génétique.

Le capital humain est une pièce biface. Il s'interprète comme une accumulation d'investissements en éducation et santé, et comme valeur actuelle des revenus futurs de travail. La productivité du travail dépend du capital humain et égale le salaire à l'équilibre ; ainsi on peut démontrer que les deux définitions de capital humain sont équivalentes. Si la théorie du capital humain remonte à Smith (1776), elle a été popularisée par Becker (1964) et développée par Lucas (1988) dans le cadre des modèles de croissance économiques.

Lucas (1988) considère un consommateur-travailleur à durée de vie infinie⁴ $\int_0^\infty e^{-\rho t} u(c(t)) dt$. L'agent tire une utilité u de sa consommation $c(t)$ à l'instant

⁴Barro (1974) montre qu'un agent à durée de vie finie opère les mêmes choix d'une dynastie s'il est altruiste à l'égard des enfants.

t . Il évalue cette utilité à l'instant 0 en appliquant un taux d'escompte ρ . A chaque instant, il dispose d'une unité de temps et consacre une fraction z de ce temps à travailler et le reste du temps à étudier ou à soigner sa santé. La loi d'accumulation établit une proportionnalité entre le taux de croissance du capital humain et le temps consacré à cet investissement : $\dot{h}(t)/h(t) = B[1 - z(t)]$. La production est proportionnelle à l'offre de travail $y(t) = Al(t)$ qui est le produit du temps passé au travail et sa productivité : $l(t) \equiv z(t)h(t)$. L'agent consomme le produit : $c(t) = y(t)$. Ces équations donnent la demande de consommation, l'offre de travail et l'accumulation optimale de capital humain au fil du temps : $(c(t), z(t), h(t))$.

Le modèle de Lucas (1988) est déterministe. Sa version stochastique consiste à maximiser un objectif $E[\int_0^\infty e^{-\rho t} u(c(t)) dt]$ qui résulte de l'introduction d'une mesure de probabilité intégrant les probabilités de survie. Un raccourci est représenté par le modèle de Blanchard (1985) où l'individu est confronté à une probabilité de mourir à chaque instant. Plus précisément, on suppose que la probabilité de rester encore en vie à l'âge t est donnée par $e^{-D(t)}$ avec $D(0) = 0$ et $\lim_{t \rightarrow \infty} [te^{-D(t)}] = 0$.⁵ Des tables de mortalité françaises on sait que le risque de mortalité est très faible pendant l'enfance, puis augmente exponentiellement à partir de la trentaine (INED, 2015). En première approximation on peut considérer $D(t)$ comme une fonction croissante et convexe. Dans le modèle de Blanchard, par simplicité, chaque personne meurt à chaque période (une unité de temps) avec une probabilité constante δ (selon un processus de Poisson). La fonction D devient ainsi linéaire : $D(t) = \delta t$. Blanchard réécrit l'objectif de la manière suivante

$$\int_0^\infty e^{-(\delta+\rho)t} u(c(t)) dt$$

Ainsi l'introduction d'une probabilité de mort revient à renforcer le taux d'escompte. Le taux d'escompte ρ est subjectif, il traduit l'impatience du consommateur. La probabilité de décès δ dépend de la prédisposition génétique et du comportement de l'individu. Connaître son génome permet de mettre à jour cette probabilité et mieux optimiser la consommation tout au long de la vie.

Plus en général, la fonction D pourrait dépendre explicitement du capital humain :

$$D = D(t, h(t))$$

avec⁶

$$D(0, h(0)) = 0 \text{ and } \lim_{t \rightarrow \infty} [te^{-D(t, h(t))}] = 0 \quad (1)$$

La fonction objectif deviendrait dans ce cas :

$$\int_0^\infty e^{-\rho t - D(t, h(t))} u(c(t)) dt$$

⁵ $\lim_{t \rightarrow \infty} [te^{-D(t)}] = 0$ implique $\lim_{t \rightarrow \infty} D(t) = \infty$.

⁶ $\lim_{t \rightarrow \infty} [te^{-D(t, h(t))}] = 0$ implique $\lim_{t \rightarrow \infty} D(t, h(t)) = \infty$

avec

$$\frac{\partial D}{\partial t} > 0, \frac{\partial D}{\partial h} < 0$$

Les tests génétiques permettent une révision bayésienne de la fonction D :

$$D(t, h) \rightarrow D'(t, h)$$

Ils sont souhaitables s'ils augmentent l'optimum. On fait l'hypothèse que le coût fixe initial du screening s réduit la dotation initial de capital humain h_0 et on compare les deux programmes :

$$\max \int_0^\infty e^{-\rho t - D(t, h(t))} u(Az(t) h(t)) dt \text{ sous la contrainte } \frac{\dot{h}(t)}{h(t)} = B[1 - z(t)]$$

et les conditions alternatives

$$\begin{aligned} (1) \quad h(0) &= h_0 \\ (2) \quad h(0) &= h_0 - s \end{aligned}$$

avec solutions les trajectoires des variables de contrôle et d'état (1) (z^*, h^*) et (2) $(z^*, h^*)'$ respectivement. Si

$$\int_0^\infty e^{-\rho t - D'(t, h^{*'}(t))} u(Az^{*'}(t) h^{*'}(t)) dt > \int_0^\infty e^{-\rho t - D(t, h^*(t))} u(Az^*(t) h^*(t)) dt$$

le test génétique est envisageable.

Dans le modèle à la Blanchard-Poisson, le test est réalisé si

$$\int_0^\infty e^{-(\rho + \delta')t} u(Az^{*'}(t) h^{*'}(t)) dt > \int_0^\infty e^{-(\rho + \delta)t} u(Az^*(t) h^*(t)) dt$$

On remarque que ce modèle intègre les changements de comportement suite à une prise de conscience génétique. En effet, le risque accru de maladie implique normalement des plus grandes dépenses de santé (médicaments, sport, alimentation) : $h^{*'} > h^*$. Plus précisément, il faudrait distinguer entre la possibilité de traiter la maladie génétique et l'impossibilité. Toutefois, le fait qu'un traitement spécifique ne soit pas disponible ne signifie pas que l'accumulation de capital humain ne soit pas perturbée par la mise à jour informationnelle : $D \rightarrow D'$.

Soit $N_0 \equiv N(0)$ la taille de la population initiale. Il n'y a pas de naissances et les individus sont identiques. On considère la trajectoire du capital humain $h = h(t)$ donnée. A la date t , le nombre de survivants est égal à $N(t) = N_0 e^{-D(t, h(t))}$. Le nombre de morts dans la période $[t, t + dt)$ est égal à $-dN$. L'espérance de vie à la naissance est donnée par la moyenne d'âge de mort :

$$\begin{aligned} E(0) &= \frac{\int_0^\infty t(-dN)}{\int_0^\infty (-dN)} = \frac{-\int_0^\infty t \frac{d}{dt} [N_0 e^{-D(t, h(t))}] dt}{N_0 - \lim_{t \rightarrow \infty} [N_0 e^{-D(t, h(t))}]} \\ &= \int_0^\infty e^{-D(t, h(t))} dt - \left[t e^{-D(t, h(t))} \right]_0^\infty = \int_0^\infty e^{-D(t, h(t))} dt \end{aligned}$$

sous les hypothèses (1). Dans le cas particulier de Blanchard (1985), on trouve

$$E(0) = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} dt = \frac{1}{\delta}$$

Si le test coûte cher (coût fixe s élevé), on peut assister au paradoxe d'une réduction de l'espérance de vie

$$E'(0) = \int_0^{\infty} e^{-D'(t, h^{*'}(t))} dt < \int_0^{\infty} e^{-D(t, h^*(t))} dt = E(0)$$

due à une plus faible accumulation de capital humain. Toutefois, dans le cas de Blanchard (1985), comme le capital humain n'intervient pas dans la probabilité de mort, on a $\delta' < \delta$ et, donc, les tests génétiques rallongent toujours l'espérance de vie : $E'(0) = 1/\delta' > 1/\delta = E(0)$.

On remarquera enfin que ce modèle n'intègre ni le droit de ne pas savoir ni les externalités positives d'éducation et de santé (on apprend plus vite dans un milieu éduqué, un système immunitaire plus fort protège aussi les autres de la propagation des maladies infectieuses).

Toute externalité positive implique une sous-production du bien dans une économie de marché par rapport à l'optimum social. Il en est ainsi aussi pour le capital humain. On n'accumule pas assez de capital humain parce qu'on n'intègre pas dans le calcul les effets positifs de notre éducation ou de notre santé sur les autres. Il faudrait étudier plus, se vacciner plus etc.

Les tests génétiques augmentent les investissements en capital humain, mais pas assez. Dans un système politique centralisé, il faudrait systématiser ces tests afin d'internaliser les externalités positives. La question de la liberté et de la protection de la vie privée se pose toutefois ainsi que celle d'une perte de bien-être associée.

2.2 Capital biologique et biologie prédictive

La santé animale affecte la santé humaine. On pense à l'antibiorésistance qui peut résulter d'une surconsommation d'antibiotiques en élevage. Peut-on parler de capital "humain" pour les animaux ou les plantes ? Evidemment, parler d'éducation des animaux ou des plantes n'a pas beaucoup de sens. Par contre, investir dans la santé des plantes et des animaux signifie en augmenter le capital "biologique" (animal et végétal) et, donc, leur productivité. Cela signifie aussi augmenter les externalités positives de l'animal à l'homme (on pense entre autre à la réduction des zoonoses). Une meilleure santé animale se traduit enfin par un plus grand bien-être animal. La question de la mesure du bien-être animal est posée mais elle n'est pas résolue (Hestermann, Le Yaouanq et Treich, 2018).

La question de l'intégrabilité des fonctions de demande avait été correctement posée par Antonelli (1886). La reconstruction de la fonction d'utilité d'un agent (humain) à partir de ses préférences (révélées) a été résolue par Debreu (1954).⁷ La rationalité instrumentale qui fonde la théorie utilitariste ne

⁷Une relation complète, réflexive et transitive constitue un préordre complet. On peut associer à cette relation de préférence une fonction d'utilité.

s'applique pas aux animaux. Il est donc difficile de parler d'une fonction d'utilité animale et étendre le modèle de Lucas (1988) au capital "biologique".

Comment calculer alors l'accumulation optimale de capital "biologique" sans faire référence à une fonction de bien-être animal ? On pourrait maximiser le profit de l'éleveur ou celui de l'agriculteur, ou encore l'utilité du consommateur final.

L'avantage de pratiquer les tests génétiques sur les plantes et les animaux est que, d'une part, la question du droit de ne pas savoir ne se pose pas et, d'autre part, une politique d'internalisation des externalités positives de l'animal à l'homme pourrait être mise en place.

3 Assurance

Le capital humain dépend de l'horizon de vie et de la productivité du travail. Le prix des êtres vivants, la valeur du vivant, dépend aussi de leur durée et utilité/productivité. Les hommes et les animaux se distinguent par la rationalité. Les hommes optimisent un objectif sous contrainte, les animaux obéissent à des automatismes déterminés par la sélection naturelle. L'hypothèse de rationalité instrumentale au sens de Weber fonde la théorie utilitariste du choix. Les animaux ne sont pas rationnels au sens de l'utilitarisme. Les hommes décident pour eux-mêmes et, souvent, pour les animaux et les plantes en investissant dans leur capital biologique.

On stipule une assurance pour mutualiser les risques futurs. Les hommes s'assurent et assurent parfois les êtres vivants, qui ne peuvent pas signer des contrats. La rationalité humaine se substitue ainsi à la rationalité (très) limitée des autres êtres vivants. Cependant les intérêts humains coïncident rarement avec ceux des animaux.

La médecine prédictive concerne en priorité les assurances vie et santé des humains. Il s'agit d'assurances contre la perte de valeur du capital humain (maladie et mort). La biologie prédictive pourrait affecter par le futur le marché des assurances des êtres vivants. La connaissance de leur qualité génétique affecte les primes d'assurance sur le cheptel et les cultures. Les primes d'assurance de nouvelles variétés et d'OGM avec une plus grande résistance aux maladies et aux intempéries pourraient être moindre.

3.1 Assurance humaine

La connaissance de l'information génétique d'un individu concerne plusieurs acteurs (médecins, famille, gouvernement, assureurs).

En général, une connaissance peut être commune ou pas. Si le partage des informations est inégal, les individus les plus informés extraient une rente. L'asymétrie d'information est une imperfection de marché qui génère des rentes informationnelles.

Dans le cas de l'assurance, l'asymétrie conduit à l'antisélection, à un biais dans les prix qui se traduit dans une allocation inefficace des biens. L'assureur

cherche à s'informer en proposant, dans un cadre légal, des contrats qui incitent à révéler l'information. Parfois, le dévoilement de l'information implique une perte de bien-être (paradoxe d'Hirschleifer, 1971).

Il ne faut pas confondre aléa moral et antisélection. L'aléa moral intervient dans une transaction quand celui qui prend un risque connaît mieux ses intentions que celui qui en supporte les conséquences. Si l'assuré ne paie pas en cas de problème, il augmente sa prise de risque. L'antisélection intervient quand la participation au marché est affectée par une information asymétrique. Dans certains cas, la non-participation d'une catégorie d'agents conduit au collapse du marché. Si l'assureur ne module pas les prix, l'assurance-vie va attirer plus les fumeurs que les non-fumeurs. Cette situation incite l'assureur à augmenter la prime. Les non-fumeurs se retirent du marché. Le contrat proposé n'est plus rentable pour l'assureur et il est retiré du marché, qui implose enfin. La médecine prédictive est davantage concernée par l'antisélection.

Les maladies génétiques sont causées par des mutations génétiques et, parfois, des cofacteurs environnementaux. On revise selon la règle de Bayes la probabilité d'occurrence d'une maladie quand une prédisposition génétique est détectée. Cette révision change les primes des assurances santé et vie.

Afin de comprendre comment les tests génétiques affectent le marché de l'assurance, Hoy, Orsi, Eisinger et Moatti (2003) appliquent les modèles classiques d'antisélection de Rothschild et Stiglitz (1976) et Wilson (1977, 1980) à la médecine prédictive. L'aversion au risque des agents détermine l'offre de contrats d'assurance : un seul contrat basé sur le risque moyen de la population est proposé ou des contrats sur mesure qui discriminent selon les niveaux de risque. L'offre d'un ou plusieurs contrats dépend de la proportion d'individus à haut risque. Dans le cas du cancer du sein en France, ces chercheurs montrent qu'un contrat unique est proposé si des tests génétiques sont disponibles de par l'incidence limitée de la prédisposition génétique sur la maladie. Dans ce cas, les auteurs critiquent l'opposition aux tests génétiques basée sur un argument d'antisélection du marché de l'assurance santé.

Si le travail d'Hoy, Orsi, Eisinger et Moatti (2003) insiste sur l'aversion au risque, d'autres chercheurs considèrent les hypothèses alternatives de partage de l'information génétique. Les résultats changent selon que l'information s'adresse au patient, au médecin, à la famille, à l'assureur.

Paradoxalement, la médecine prédictive peut avoir des implications négatives. L'intuition que la disponibilité de l'information puisse réduire le bien-être ne date pas d'hier et remonte au travail pionnier de Drèze (1960). Hirschleifer (1971) formalisera en suite le paradoxe homonyme.

Plus récemment, Chiappori (2006) a cherché à mesurer la perte de bien-être qui résulte du dévoilement de l'information sur le risque individuel (effet Hirschleifer). Il montre que, dans le cas de haut risque, la perte domine les avantages de la médecine prédictive. Sa conclusion va à l'encontre du travail d'Hoy, Orsi, Eisinger et Moatti (2003).

Chiappori distingue le risque de maladie du risque de classification. Ce dernier intervient de par une plus grande capacité des assureurs à prédire la maladie. Les agents qui manifestent une aversion au risque, souhaitent se pro-

téger de ce type de risque en achetant une assurance. En l'absence de tests génétiques, un contrat unique (même prime pour tous) couvre à la fois le risque de maladie et celui de classification. La disponibilité de tests réduit la possibilité de couverture contre le risque de classification et donc le rôle positif de l'assurance (effet Hirschleifer) : la meilleure information pénalise les agents averses au risque et réduit la possibilité de partage du risque à travers des contrats d'assurance. Cependant, il ne s'agit pas seulement d'assurer mais aussi de prévenir les maladies. Il convient donc de distinguer les maladies sans solutions de celles pour lesquelles des traitements préventifs existent. Dans le premier cas la critique demeure, tandis que, dans le second, l'allongement de l'espérance de vie pourrait compenser l'effet Hirschleifer.

Chaque maladie mérite une solution appropriée. Il faut peser le pour et le contre des tests génétiques. La manière de partager l'information joue aussi un rôle : la loi fixe les règles du jeu et, donc, les asymétries d'information. La théorie des contrats et des mécanismes d'incitation permet de comprendre les effets des règles.

Selon Chiappori (2006), on est confrontés à quatre règles de partage : (1) l'assureur peut demander un test à l'assuré avant la signature du contrat ; (2) l'assureur peut poser des questions établies au préalable et l'assuré est tenu à répondre ; (3) l'assuré est libre de communiquer les tests ; (4) l'assureur n'a pas le droit d'utiliser l'information, y compris celle que l'assuré communique de plein gré.

D'un point de vue économique, les points (1), (2) et (3) sont rendus équivalents par un puissant argument : le principe de révélation. Ce principe est à la base de la théorie des mécanismes d'incitation (*mechanism design*). Les mécanismes sont des jeux en asymétrie d'information où un acteur, le principal, dépend de l'action ou de la nature d'un autre acteur, l'agent, sur lequel il est imparfaitement informé. Dans un mécanisme de révélation directe, on demande à chaque agent de communiquer ses préférences. Dans un mécanisme indirect, on demande aux agents de communiquer autre chose. Le principe de révélation est un principe d'équivalence : si une fonction de choix social peut se réaliser par un mécanisme indirect, elle peut aussi se réaliser par un mécanisme direct où les agents parlent vrai. Cette équivalence permet de restreindre l'analyse des solutions aux seuls mécanismes directs.

Cependant, le principe de révélation n'intègre pas les effets externes. Le bénéfice privé peut en effet se traduire dans une perte sociale à cause des externalités d'antisélection. Un patient qui se considère à faible risque est incité à révéler l'information à l'assureur. Si des tests anonymes bon marché sont possibles, les points (1), (2) et (3) s'équivalent impliquant une révélation pleine de l'information et une discrimination contractuelle à l'équilibre. Ainsi, on propose à l'agent à faible risque une prime inférieure à celle des agents de type risqué ou inconnu. Le comportement stratégique de l'assureur incite les agents à faire le test et à le communiquer. A l'équilibre, tous les agents s'informent privément et ceux à faible risque informent l'assureur. L'assureur peut discriminer en proposant trois contrats différents : pour les agents testés positifs, testés négatifs et non testés.

Si la proportion d'agents à haut risque est faible (comme dans Hoy, Orsi, Eisinger et Moatti, 2003), la différence de risque entre les assurés à faible risque et la moyenne de la population demeure insuffisante pour justifier un nouveau contrat. L'incitation à entreprendre privément le test et à communiquer les résultats disparaîtrait ainsi. C'est le cas des maladies rares.

Dans le cas (4), l'assureur ne peut pas utiliser l'information. Cette interdiction produit une antisélection. Des contrats exclusifs avec engagement des parties génèrent sans surprise des relations plus efficaces. Des contrats non exclusifs, au contraire, conduisent au collapse du marché.

3.2 Assurance du vivant

Assureur et assuré sont des personnes juridiques à la différence des animaux ou des plantes. L'objet de l'assurance peut toutefois concerner un être vivant. On paiera une prime moindre dans le cas d'un animal en bonne santé si des contrats ciblés sont disponibles. Toutes les questions que l'on vient d'évoquer pour les humains (antisélection et aléa moral) se posent aussi pour ce marché. Du point de vue théorique, on considère l'animal comme un bien que l'on assure tel qu'une voiture ou une maison. L'assureur cherche à mettre en place des incitations pour que le maître ou l'éleveur prenne soin de l'animal (aléa moral). La connaissance des maladies génétiques peut affecter la valeur d'un animal ainsi que la prime demandée. Ces questions se posent dans le cas d'élevage d'espèces animales et de culture de variétés végétales qui présentent différents capitaux biologiques (antisélection).

La question des externalités doit aussi être prise en compte par le législateur qui fixe les règles du jeu du marché de l'assurance. Elle peut toutefois dépasser ce cadre légal. La résistance aux maladies infectieuses ne dépend pas seulement du capital génétique mais aussi des pratiques d'élevage (on pense notamment à l'antibiorésistance) et des systèmes agricoles. La question du contrôle des externalités (zoonoses) liées aux pratiques de sélection/modification génétique et d'élevage/agriculture se pose. Les compagnies assurent les animaux en proposant des contrats qui sont du point de vue théorique comparables à ceux des humains. Elles ont du mal à mutualiser les risques dans le cas de catastrophes systémiques (on se réfère entre autre à certaines pandémies).

Il ne faut donc confondre les contrats d'assurance qui concernent les productions animales et agricoles pour lesquelles des test génétiques pourraient être envisageables, des contrat contre les risques systémiques.

4 Conclusion

Les animaux peuvent être aussi soignés par le biais d'une médecine personnalisée, mais ils ne sont pas rationnels au sens de la théorie utilitariste et ils ne décident pas. La prise de décision revient au producteur et aux décideurs publics. Les questions économiques abordées sont donc différentes. L'animal peut être considéré comme une ressource économique ou un sujet de droit. Le

producteur qui maximise le profit ne tient pas compte des externalités positives de la médecine prédictive ni des externalités négatives de l'usage de certains médicaments (antibiorésistance). On assiste ainsi à une pratique insuffisante des tests (si l'on néglige l'effet Hirschleifer) et une consommation excessive de médicaments.

La médecine prédictive appliquée aux animaux peut réduire les externalités négatives et, sur les fronts des droits, réduire la souffrance animale. Elle pourrait cependant promouvoir une sélection génétique par élimination progressive des animaux porteurs d'anomalies mono et polygéniques. Mal gérée, cette sélection pourrait s'accompagner d'externalités négatives avec une perte de biodiversité et une réduction des services écosystémiques.

La prédiction pour la santé se décline avec des objectifs distincts aux échelles des populations humaines, des animaux et des plantes, mais ces objectifs se croisent dans une perspective de santé globale. Les approches prédictives sont au cœur des débats en médecine humaine personnalisée. Prendre en compte la dimension éthique de ces approches, y compris pour les animaux, les plantes, l'environnement, est un enjeu de société à partager.

5 Bibliographie

Antonelli G.B. (1886). *Sulla teoria matematica dell'economia politica*. Folchetto, Pisa.

Barro R.J. (1974). Are government bonds net wealth? *Journal of Political Economy* 82, 1095-1117.

Blanchard O.J. (1985). Debt, deficits and finite horizons. *Journal of Political Economy* 93, 223-247.

Becker G.S. (1964). *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*. Columbia University Press.

Chiappori P.A. (2006). The welfare effects of predictive medicine. Dans *Competitive Failures in Insurance Markets: Theory and Policy Implications* édité par Chiappori P.A. et Gollier C., MIT Press, Cambridge, 55-79.

Debreu (1954). Representation of a preference ordering by a numerical function. Dans *Decision Processes* édité par Thrall M., Davis R.C. et Coombs C.H., John Wiley & Sons, New York, 159-165.

Drèze (1960). Le paradoxe de l'information. *Economie appliquée* 13, 71-80.

Hestermann N., Le Yaouanq Y. et Treich N. (2018). An economic model of the meat paradox. Manuscrit.

Hirschleifer J. (1971). The private and social value of information and the reward of inventive activity. *American Economic Review* 61, 561-574.

Hoy M., Orsi F., Eisinger F. et Moatti J.P. (2003). The impact of genetic testing on healthcare insurance. *Geneva Papers on Risk and Insurance: Issues and Practice* 28, 203-221.

INED (2015). <https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/france/mortalite-cause-deces/taux-mortalite-sexe-age/>.

Lucas R. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics* 22, 3-42.

OMS (2015). <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/fr/>.

Rothschild M. et Stiglitz J. (1976). Equilibrium in competitive insurance markets: an essay on the economics of imperfect information. *The Quarterly Journal of Economics* 90, 629-649.

Smith A. (1776). *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. W. Strahan and T. Cadell, London.

Wilson C. (1977). A model of insurance markets with incomplete information. *Journal of Economic Theory* 16, 167-207.

Wilson C. (1980). The nature of equilibrium in markets with adverse selection. *Bell Journal of Economics* 11, 108-130.