



**HAL**  
open science

## Science et Innovation - Révolutions et ruptures

Olivier Ridoux, Filipe Drapeau Vieira Contim

► **To cite this version:**

Olivier Ridoux, Filipe Drapeau Vieira Contim. Science et Innovation - Révolutions et ruptures. Master. France. 2021. hal-03176745

**HAL Id: hal-03176745**

**<https://univ-rennes.hal.science/hal-03176745v1>**

Submitted on 22 Mar 2021

**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.

leurs limites et créent ainsi en permanence de nouveaux problèmes à résoudre. On peut noter que contrairement à d'autres sciences, les crises ne viennent pas de la confrontation avec la nature, mais très souvent de la confrontation avec les systèmes informatiques eux-mêmes. En effet, on observe que les utilisateurs/concepteurs de systèmes informatiques tentent toujours de les pousser dans

des unités d'exécution, le paradigme actuel avec les processeurs **multi-cœurs**. Facile à exécuter efficacement à une **fréquence élevée**, puis l'accroissement de la fréquence d'exécution ayant atteint ses limites, on est passé à la **multiplication** des unités d'exécution, le paradigme actuel avec les processeurs **multi-cœurs**. Ex. l'histoire de la conception des **calculateurs** s'inscrit pleinement dans des para-

digmes appaaraître, se développer, entrer en crise, et se succéder. **science**. Dans d'autres domaines, ex. les **bases de données**, on voit des para- (Floyd, 1978). Ces paradigmes coexistent, ce qui fait penser à une phase de **pré-structuration en paradigmes de programmation** en référence à **SRS** début XXe). D'autres champs comme celui de la **programmation** de plus en plus explicite de la **calculabilité** (Turing, 1936) et de la **complexité** (Bachmann et Landau, paradigmes au moins aussi anciens que la science informatique, ex. les théories Certains champs de l'informatique, ex. **l'algorithmique**, sont ancrés dans des

tique, les deux s'irrigant mutuellement et très rapidement.

enfin des relations complexes entre **science** informatique et **industrie** informa- riences confinées dans un **laboratoire** ou situées dans le **monde réel**. On observe : certaines très **eméthématiques**, d'autres très **expérimentales**, avec des expé- pendamment dans différents sous-domaines. Ses méthodes sont aussi très diver- **matisme**, etc. Il faut donc s'attendre à voir des paradigmes se développer indé- la **programmation** à **l'intelligence artificielle**, de **l'imagerie numérique** à **l'auto-** que les objets de la l'informatique sont très divers : des **processus aux réseaux**, de-

Que peut nous dire de l'informatique la théorie de Kuhn ? Il faut d'abord observer Dans SRS, Kuhn ne fait jamais référence à l'informatique, ni en 1962 ni en 1970. L'explication semble être que Kuhn ne fait **pas l'histoire du présent** ! il ne parle pas plus de physique no de biologie contemporaine que d'informatique. En fait, il ne mentionne jamais **aucun fait scientifique postérieur aux années 20**.

### Et l'informatique ?

### Les anomalies

Les **anomalies** sont donc plus un aliment de la recherche qu'un signe d'échec (lire aussi les **« Conversations avec le Sphinx »** de Klein). Kuhn dit que le métier des chercheurs est de résoudre des **anomalies** à l'intérieur d'un paradigme, plus que de chercher de nouveaux paradigmes quand une anomalie se fait jour. Selon Kuhn, les paradigmes sont entourés d'un **glacis protecteur** d'hypothèses auxiliai- res qu'il est possible de contester sans remettre en cause le paradigme.

La **mécanique de Newton** l'illustre bien. Ex. ses premières applications prédi- saient un **mouvement lunaire non conforme aux observations**, et il a fallu 60 ans pour découvrir comment **appliquer correctement** la théorie et résorber cette anomalie. Ce genre d'épisode se répétera durant le développement du para- digme, mais à chaque fois, les chercheurs ont d'abord incriminé l'observation ou l'application du paradigme ou les hypothèses complémentaires (ex. découvertes de **Uranus** et **Neptune**). Mais pour résoudre l'anomalie de la trajectoire de  **Mercure**, il faudra un nouveau paradigme, celui de la **relativité de Einstein**.

Avant Kuhn, Popper disait déjà qu'une **théorie** (il n'employait pas le mot **para- digme**) pouvait **s'immuniser** contre les **contre-exemples**. Mais pour lui, elle le faisait à tort, alors que pour Kuhn c'est à raison. Kuhn et Popper ne s'opposent donc pas sur l'observation des faits, mais sur le sens qu'ils leurs donnent.

### L'incommensurabilité

Même si deux paradigmes traitent du même sujet, Kuhn dit que les comparer est impossible, car ils sont **incommensurables**. Deux paradigmes sont comme **deux langues différents**, et il n'existe pas une **super-langue** dans laquelle exprimer les deux. Ex. la **masse de Newton** et celle **de Einstein** ne sont pas comparables à l'intérieur de l'un ou l'autre de leur paradigme. L'incommensurabilité se voit aussi dans **l'application des normes**. Ex. la **simplicité** : le formalisme mathématique se **complexifie**, mais pour le spécialiste moderne cela **simplifie** la modélisation.

C'est probablement la thèse la plus provocante de Kuhn, car elle semble interdire de déterminer quel paradigme est le meilleur, et donc de reconnaître un **progrès**. Kuhn fut accusé de **relativisme** par ses détracteurs, mais il restaure une notion de progrès en affirmant qu'il s'observe dans la résolution des anomalies, mais pas dans la comparaison des paradigmes. Il dit que la science ne progresse pas **vers quelque chose**, la Vérité, mais **de quelque chose**, son Histoire.

***low cost*** plutôt que de développer un service ***low cost*** elles-mêmes. respecter **leurs propres valeurs** : comme le font ces sociétés qui créent des **filiales** services dans des structures suffisamment indépendantes pour qu'elles puissent établi et un marché émergent. Christensen préconise de développer les nouveaux mes à la fois, Christensen explique qu'il est difficile de satisfaire à la fois un marché comme Kuhn explique que **l'incommensurabilité** interdit d'être dans deux paradig- certains croient pouvoir reprocher à ceux qui n'ont pas vu les menaces. Mais tout entreprises. **Non explicites**, elles orientent l'appréciation de la **performance** par les utilisateurs et les opérateurs, et expliquent des formes **d'aveuglement** par Comme Kuhn, Christensen souligne le rôle des **valeurs** dans le fonctionnement des

**crise**, tandis que la contractaque correspond à une **extension du paradigme**. langage **kuhnién**, la fuite correspond à une **hyper-spécialisation d'un paradigme en soit en **contraignant****, c-à-d. en intégrant à son offre des services nouveaux. En c-à-d. on se réajustait dans les marchés les plus exigeants, les **marchés de niche**, Christensen explique que la technologie en place peut se défendre soit en **fuyant**,

quand la nouvelle technologie satisfèra la plupart des utilisateurs de l'ancienne. prendre la part de marché des utilisateurs **sur-satisfaits**. Et la **rupture** commença à lui La technologie en place est alors **menacée** par la nouvelle qui commença à lui

de ses utilisateurs, qui rechignent à payer pour un service qu'ils **sous-emploient**. toujours pas le nouveau service, et surtout commença à **sur-satisfaire** une partie Dans le même temps, la technologie en place progresse aussi, mais ne rend permettant aussi d'en gagner de **nouveaux** à cause de ses performance accrues. **ement du paradigme**, à la grande satisfaction de ses utilisateurs, mais en lui Cependant, la nouvelle technologie **s'améliore continument** comme par **dévelop-**

technologie en place, et ne semble donc **pas la menacer**.

les **technologies en place** pour les services classiques. Elle ne peut pas remplacer la **technologie** de façon très performante, et surtout elle est moins performante que **ce ou d'organisation**, est acceptée car elle rend de **nouveaux services**, mais pas Selon Christensen, une **nouvelle technologie**, mais aussi un nouveau type de servi-

Le modèle d'innovation de Christensen identifie des périodes **d'innovation conti-** **nue** et des moments de **rupture** comparables avec la **science normale** et les **révolu-** **tions**. Mais c'est **l'insatisfaction des utilisateurs** qui tient lieu d'**anomalie**.

### Et l'innovation ?

### Structure d'un paradigme, ou matrice disciplinaire

Kuhn définit la structure d'un paradigme comme formée de quatre composantes :

**Généralisations symboliques** : les **lois primitives** du paradigme, c-à-d. sa **théorie**, au centre de l'exposition académique d'une discipline, ex. les lois de la **mécanique newtonienne**.
Noter qu'entre la présentation originelle de Newton dans un style géométrique, et la présentation moderne dans le langage de l'analyse mathéma- tique, comme **f = m ∂v/∂t**, il n'y a pas changement de paradigme, mais seulement son **développement**. Kuhn dit de ces lois qu'elles constituent les **définitions impli-** **cites** de leurs symboles. Ex. les lois de Newton définissent simultanément **f**, **m** et **v**, et tout paradigme admettant d'autres lois, comme **e = m c²**, définit tout autre chose, même pour les symboles qu'ils ont en commun, comme ici la masse **m**.

**Modèle métaphysique** : les **grands principes** de la théorie, non formalisés, mais essentiels à sa compréhension. Ex. la mécanique de Newton repose sur le principe d'une **influence à distance instantanée et sans contact**.

**Normes et valeurs** : elles guident l'action mais sont souvent implicites. On ne consi- dère pas ici les valeurs **morales** comme l'**intégrité**, mais des valeurs **épistémiques**, comme la **précision**. Les valeurs peuvent changer avec les périodes. Ainsi, la valeur de **précision** est importante pour la science normale, mais l'est moins en période de révolution. Ex. la **constante gravitationnelle** n'est pas précisée quand le paradigme newtonien se crée, et c'est à la nouvelle science normale de le faire. Inversement, la valeur de **fécondité** est plus importante en période de révolution puisque elle détermine l'espoir qu'on place dans un paradigme. Mais ce qui change le plus d'un paradigme à un autre ce sont les critères d'application des valeurs. Ainsi, la valeur de **simplicité** : **f = m ∂v/∂t** n'est simple que si on connaît le **calcul différentiel**.

**Exemples** : les problèmes types résolus par le paradigme et la façon de les réso- dre. C'est le sens premier du mot **paradigme**. Kuhn dit que les exemples sont le cœur d'un paradigme. Ce sont eux qui sont repris dans des expériences types, qui sont décrits dans les traités, et qui sont enseignés. Les **plans inclinés de Gallée**, les **pinsons de Darwin**, et le **pendule de Foucault**, sont de tels exemples.

Kuhn ajoute que chaque paradigme suscite la création de différents **institutions**, sans lesquelles il ne pourrait pas se développer : **laboratoires** de recherche, **dépar- tements** universitaires, **journaux**, **colloques**, **sociétés savantes**, **prix**, etc.

On reprocha à Kuhn d'avoir surchargé le mot **paradigme** de nombreux sens diffé- rents alors qu'une définition était déjà en usage (**paradigme = exemple**). Il proposa d'utiliser à la place le terme de **matrice disciplinaire**, mais c'est bien le terme de **paradigme** qui a prévalu.

« **Structure des révolutions scientifiques** » , Thomas Kuhn (1962). Préférer la 2<sup>de</sup> édition (1970) pour sa postface dans laquelle Kuhn synthétise sa pensée et répond ses objectifs.
« **The Innovator's Dilemma** » Clayton Christensen (Harvard Business School, 1997). Suitvent de nombreux ouvrages dans lesquelles Christensen applique son mo- dèle à la santé, l'éducation, les transports aériens, l'informatique, etc.
« **Contre la méthode** », Paul Feyerabend (1970).
« **The Paradigms of Programming** » Robert Floyd (Turing Award Lecture, 1978).
« **La science en action** », Bruno Latour (1989).
« **Conversations avec le Sphinx** », Etienne Klein (Albin Michel, 1991).
« **Petites leçons d'épistémologie** », Yannis Delimas Rigoutsos (Vuibert, 2009).
« **Science : A Discovery in Comics** », Margaret de Heer (NBM Publishing, 2013).

### Bibliographie

donc en phase de **science normale**, et les seconds à l'état de **pré-science**. chercher encore leurs méthodes, ex. la **programmation**. Les premiers seraient domaines bien ancrés dans un **paradigme**, ex. **l'algorithmique**, et des domaines qui Reste à situer **l'informatique** selon les termes de Kuhn. Celle-ci semble avoir des considère que l'ingénierie a des aspects scientifiques et managériaux à la fois.

Kuhn est dans les listes de lecture des études scientifiques tout comme Christensen l'est pour les études de management. Les comparer permet d'envisager qu'ils deviennent des références pour les deux domaines. Ce qui est naturel quand on

Dans le modèle d'innovation de Christensen, **l'insatisfaction** tient lieu d'**anomalie**. Tout service **s'améliore** en continu pour **résoudre** des anomalies, c-à-d. augmenter la satisfaction des utilisateurs. Mais la **sur-satisfaction** est aussi une insatisfaction, **menace** pour le service en place, dans une forme de **crise**. La **rupture** survient quand les utilisateurs optent massivement pour le nouveau service.

La contribution de **Kuhn** est beaucoup plus une **structure de la science normale** **structure des révolutions scientifiques** tant il met en avant le concept de **paradigme**, c-à-d. de ce qui encadre la science normale. Sa théorie met à mal la corayance que le chercheur est à la fois en quête de découvertes et en quête de la vérité. Il rappelle aussi que la vérité n'est pas directement visible dans les **observa-** **tions**, tant celles-ci sont **chargées de théorie** a priori.

### Conclusion

### Pré-science, science normale, anomalie, crise, et révolution

**Pré-science**. Avant d'être étudié scientifiquement tout domaine a pu être étudié au cours d'une période qu'on qualifie parfois de **pré-science** ou de **science immature**. Ex. la **physique d'Aristote** n'est pas encore de la **physique scientifique** au sens où on l'entend depuis la **mécanique de Galilée** (1638), mais c'est de la physique.

Kuhn soutient que, pris individuellement, les savants de la pré-science ne sont pas moins **rigoureux** et **scientifiques** que leurs successeurs. Ce qui distingue la pré- science de la science, c'est **l'absence de communauté scientifique** soudée autour d'un **paradigme** ; on ne s'entend ni sur la théorie à défendre, ni sur la méthode, ni sur le langage, ni-même sur les phénomènes à expliquer.

**Science normale**. La période de **science normale** s'organise autour d'un **paradigme** qui structure l'ensemble des activités d'une communauté scientifique. Le paradigme est **connu de tous**, grâce à la **formation scientifique**, et **accepté par tous**, donc **jamais contesté**. Il est la **matrice** de l'ensemble des travaux de cette communauté.

Le but de la science normale est de **développer le paradigme**, ce qui comprend 4 objectifs :

- résorber les désaccords** connus entre le paradigme et les données empiriques,
- améliorer sa précision** (c-à-d. préciser la valeur des constantes postulées, accroî- tre son pouvoir de prédiction, …), ex. en améliorant l'instrumentation,
- étendre sa portée** à de nouveaux domaines,
- et **améliorer sa cohérence**.

Kuhn soutient, contre Popper, que **tester** le paradigme (pour le **confirmer** ou le **réfuter**), ou même **découvrir** des phénomènes nouveaux, n'est **jamais un objectif** en période de science normale.

**Anomalies et crises**. Les **anomalies** sont les désaccords entre les prédictions du paradigme et les données empiriques. Le développement du paradigme conduit à les **résorber**, mais aussi à en détecter de **nouvelles**. Celles-ci ne causent pas l'aban- don immédiat du paradigme. Bien au contraire, elles alimentent le programme de recherche de la communauté. Ce n'est que lorsque des anomalies **se multiplient** ou restent trop longtemps **non résolues** que le paradigme entre en **crise**.

**Révolution**. La crise conduit à rejeter ou corriger des éléments du paradigme, en commençant par les éléments les plus périphériques. Si cela résout l'anomalie, le cours de la **science normale** peut reprendre. Sinon la crise débouche sur une **révo-** **lution** scientifique. Pour Kuhn, il ne suffit ni d'une crise durable, ni d'un paradigme concurrent, pour changer de paradigme, il faut avoir les deux ensemble.

ment par la **rationnalité**, mais aussi par référence à des **valeurs**. que développent Kuhn et Christensen est que les idées ne s'adoptent pas seule- semblent incontestables n'ont pas été bien accueillies à leur époque. La réponse l'invention, et qui explique dans les deux cas pourquoi des idées qui aujourd'hui de commun une **pensée subtile**, **respectueuse** des acteurs de l'innovation ou de domaines de la pensée, et d'y apporter la **profondeur du temps**. Il ont aussi en auteurs est donc aussi un moyen de mieux comprendre le développement de ces **l'histoire**, des innovations pour le premier, des sciences pour le second. Lire ses Finalement, le travail de Christensen et celui de Kuhn s'appuient tous deux sur

et plus largement à ce qu'on appelle aujourd'hui **sciences du numérique**. **rique** et plus largement à ce qu'on appelle aujourd'hui **sciences du numérique**. **ture** comme la physique et la chimie, la biologie et l'astronomie. On peut alors se poser la question du positionnement dans la grille d'analyse de Kuhn des **sciences de la** cette date, et s'appuie donc essentiellement sur l'histoire des **sciences de la** années 1950-60, il fonde son analyse sur l'histoire des sciences qui ont précédé Une autre question se pose en lisant Thomas Kuhn. En effet, écrivant dans les

et la rupture et celle de Kuhn sur le développement scientifique et la révolution. Nous explorons donc la parallèle entre la pensée de Christensen sur l'innovation re. Les deux exposent les ressorts cachés qui font naître ou étouffer une rupture. une vision qui alterne des phases d'amélioration continue et des phases de ruptu- par **Thomas Kuhn** en 1962, sans pour autant y faire référence. Les deux proposent **Christensen** en 1997 fait écho au modèle des révolutions scientifiques proposé par **Clayton** indépendamment. Cependant, le modèle de l'innovation proposé par **Clayton** l'étude de **l'innovation** et celle du progrès des **sciences** semblent se développer

# Science et Innovation

## La proposition de Thomas Kuhn

L'essentiel des idées de Kuhn figure dans un livre, **La structure des révolutions scientifiques (SRS)**, qui est vite devenu un *best-seller* en épistémologie, et un ouvrage de référence dans de nombreux cursus scientifiques.

Thomas Kuhn s'intéresse à deux questions : (1) **En quoi consiste l'activité scienti- fique ?** et (2) **En quoi consiste le progrès des sciences ?**, la question (2) primant selon lui sur la question (1). Kuhn adopte en cela une approche historique et des- criptive de la science, en rupture avec l'approche **normative** et **a priori** privilé- giée jusque-là par des philosophes des sciences comme **Karl Popper**.

À ces questions, Kuhn répond en proposant un modèle **cyclique et discontinu** de l'histoire des sciences. Ce serait une alternance de phases longues de **science normale** et phases brèves de **science révolutionnaire**, auxquelles correspondent deux schémas d'activité très différents. La première se caractérise par le mono- pole d'un **paradigme**, une théorie acceptée par tous et qui exclut de ce fait toute critique. À l'inverse, la seconde est un état **transitoire et anarchique** de l'activité scientifique durant lequel l'ancien paradigme perd son monopole et rentre en conflit avec une ou plusieurs théories rivales. L'une d'elles finit par s'imposer, inaugurant ainsi un **nouveau** cycle de science normale.

Selon Kuhn, deux paradigmes successifs sont **incommensurables** entre eux, et il n'existe aucun point de vue à l'aune duquel l'un pourrait être dit plus vrai que l'autre. Kuhn rompt ainsi avec le **modèle cumulatif** de l'histoire des sciences d'après lequel la science **progress**e par empilement de résultats définitifs.

Les idées de Kuhn font débat. On reproche à la thèse de l'incommensurabilité de conduire au **relativisme** et de ruiner l'idée de progrès. On a également accusé Kuhn de déprécier la science et ses acteurs, en présentant l'homme de la science normale comme un esprit dogmatique, à l'opposé de ce que préconise le falsifi- cationnisme de Popper. Kuhn insiste en outre sur les facteurs subjectifs, voire irrationnels, qui président aux choix des scientifiques en période de révolution.

En réalité, Kuhn veut montrer que même si les scientifiques, pris individuelle- ment, ne se conforment pas toujours à la logique ou au calcul des probabilités pour fonder leurs décisions, la science, conçue collectivement, est l'activité ra- tionnelle la plus à même d'inventer et de progresser. Kuhn introduit ainsi un point de vue **sociologique**, voire politique, sur la science qui inspirera des auteurs tels que Paul Feyerabend, ou Bruno Latour.

