Des algorithmes et du naturel...

Entretien avec Bernard Chazelle (*réalisé par Valérie Schafer*)

Pour inaugurer cette rubrique dédiée à l'histoire de l'informatique, nous vous proposons un entretien avec Bernard Chazelle, tant est vraie cette phrase de l'historien Nathan Ensmenger : « The future of the history of computing is not machines, but people » [1]. *Chercheur passionné et engagé, pionnier dans la recherche en géométrie algorithmique, installé depuis 1977 aux États-Unis, Bernard Chazelle a accepté de revenir sur son parcours, son expérience américaine, sa présence cette année au Collège de France, ses recherches actuelles sur les algorithmes naturels, tout en recontextualisant son expérience et ses travaux dans le temps court de ces quarante dernières années et le temps long de l'histoire des sciences.*

Valérie Schafer [2] et Benjamin Thierry [3]

Valérie Schafer : *J'aimerais, si vous le voulez bien, que nous commencions par revenir sur votre parcours scientifique et professionnel.*

Bernard Chazelle : Après les Mines de Paris, je suis parti faire un doctorat en informatique aux États-Unis. Pourquoi l'informatique ? J'aimais les mathématiques, mais je voulais aussi partir de France pour découvrir quelque chose d'autre. L'informatique était la discipline qui se prêtait le mieux à un voyage aux États-Unis, car la France était un peu en retard dans ce domaine. Dans d'autres domaines des mathématiques, il y avait moins de raisons de s'exiler. Je suis parti en 1977. J'ai fait mon service militaire en coopération là-bas et je suis resté. Je suis revenu toutefois à trois

1. ENSMENGER N., "Power to the people : Toward a social history of computing", *IEEE Annals of the History of Computing*, 2004, 26 (1), p. 95.

2. Valérie Schafer, CNRS, ISCC.

3. Benjamin Thierry, Université Paris-Sorbonne.

reprises en France, pendant une année à chaque fois, en 1985, en 1998, et maintenant. C'est la troisième année que je passe en France depuis 1977. En 1985 j'étais à l'École Normale Supérieure et à Orsay, en 1998 à Polytechnique et actuellement au Collège de France.

En partant aux États-Unis en 1977, je ne connaissais rien à l'informatique. À l'école des Mines je faisais des mathématiques appliquées. J'ai dû tout apprendre là-bas. J'ai choisi un sujet d'informatique théorique, j'ai commencé à faire des algorithmes. J'ai fait une thèse à l'université de Yale sur la côte Est avec David Dobkin. La géométrie algorithmique était un sujet tout à fait neuf. J'ai réalisé la deuxième thèse au monde dans ce domaine. J'étais au tout début de ce champ. Il y a toujours un côté très grisant à être au début de quelque chose. J'ai aussi eu la chance de faire des stages. Vous savez, aux États-Unis on fait souvent des stages dans d'autres laboratoires et je suis allé notamment dans la Silicon Valley chez Xerox. Ethernet venait juste d'être inventé, puis le concept du PC, la souris... En 1978 je jouais avec des Altos. La seule différence avec les ordinateurs de maintenant, c'était qu'ils étaient plus lents, avec moins de mémoire, mais il y avait déjà tous les concepts de base.

VS : *Vous avez fréquenté Robert Metcalfe*[4] *?*

BC : J'étais plus proche de Bob Taylor[5], une figure légendaire ! C'était le directeur du centre de Xerox. Ce n'était pas un technicien, mais il a eu le génie de mettre ensemble tous ces gens pour travailler sur des choses nouvelles. Cela a mal tourné pour Xerox, ils ont raté le coche. Ils se sont toujours vus comme une compagnie qui faisait des copieurs... La révolution technologique la plus importante du siècle s'est faite dans leurs laboratoires, mais ils ont laissé partir tout le monde ! J'y faisais des stages tous les ans. Quand tout ce monde-là a déménagé à DEC SRC (Systems Research Center), j'ai continué à faire des stages chez DEC.

C'était plus intéressant je crois à cette époque que maintenant. Les innovations actuelles palissent énormément, Facebook et les autres, face à ce qui a été imaginé alors.

La révolution n'était pas seulement technologique, elle était plutôt du côté social, par exemple avec l'invention du Web au CERN. L'idée que des gens passeraient des heures à peaufiner des pages Web... c'est un phénomène sociologique déroutant. C'est très difficile de prévoir que de tels concepts, formant un cocktail d'altruisme et de narcissisme, puissent marcher. De nos jours, le développement de Facebook

4. C'est au Xerox Parc qu'en 1973 Robert Metcalfe co-invente Ethernet, devenu un standard pour les LANs (réseaux locaux). Il quitte le Parc en 1979 pour fonder l'entreprise 3Com.

5. Après avoir été de 1966 à 1969 directeur de l'IPTO (*Information Processing Techniques Office*, à l'origine du lancement d'ARPANET) à l'ARPA (*Advanced Research Projects Agency*), Robert Taylor est au début des années 1970 à l'origine du *Computer Science Laboratory* du *Xerox Palo Alto Research Center*, puis *Founding Director* du *Digital Equipment Corporation's System Research Center* (SRC) de Palo Alto, en Californie, créé en 1984.

c'est assez prévisible, pas très innovant, alors que le Web est révolutionnaire, pas au sens technique mais au niveau social. Et c'est un sujet de grand étonnement : j'aurais pensé que les gens seraient plus soucieux de leur vie privée, que les pages Web seraient surtout des cartes de visite. Que Wikipedia soit d'une telle qualité, qu'un système comme celui-ci totalement *open* et décentralisé — ou presque —, arrive à fournir une information, alors qu'on imaginerait facilement que la tendance naturelle soit à un grand fourbi… Dans le domaine mathématique, quand on cherche une formule compliquée, on la trouve sur Wikipedia et elle est exacte… Mon étonnement, il est humain : dans un système où tout doit être monnayé, on découvre sur internet un volontariat de très haute qualité.

Quand le fondateur d'IBM a dit qu'il n'y avait un besoin que de cinq ou six ordinateurs dans le monde entier, personne ne lui a ri au nez. Un petit nombre d'ordinateurs comme on a un petit nombre de sous-marins atomiques… Et penser que c'est rentré dans le quotidien de tout le monde… De voir mes copains faire ça, c'était grisant, le transfert de cette technologie d'un petit monde d'élite à la société.

> « "*I think there is a world market for maybe five computers*", averred IBM Chairman, Thomas Watson, a gem of prescience matched only by a 1939 *New York Times* editorial : "*The problem with television is that people must sit and keep their eyes glued to the screen ; the average American family hasn't time for it.*". The great demographer Thomas Malthus owes much of his fame to his loopy prediction that exponentially increasing populations would soon outrun the food supply. As the apprentice soothsayer learns in "Crystal Gazing 101", never predict a geometric growth ! ».
>
> CHAZELLE B., "The Algorithm : Idiom of Modern Science"
> `http://www.cs.princeton.edu/~chazelle/pubs/algorithm.html`

Chez Xerox les centres de recherche étaient très ouverts. On pouvait plus ou moins faire ce qu'on voulait. Il y avait des gens comme moi qui n'y faisaient que de la théorie. Personne ne nous demandait si c'était utile, si ça rapporterait de l'argent. Si on publiait, c'était très bien. Pour eux il y avait une idée très holistique de ce qui se passait. J'étais là pour travailler de façon théorique. Et je pouvais utiliser leur matériel…

J'ai fait ma thèse en trois ans, puis j'ai passé deux ans en post-doc, tout en faisant aussi mon service militaire en coopération, à Carnegie-Mellon : ça a été une très bonne idée. Il y avait un autre Français sur place, Louis Monier, qui a co-inventé AltaVista. J'ai fait des VLSI (*Very Large Scale Integration*), des circuits intégrés, mais mes recherches ont aussi toujours eu un accent théorique. Je suis revenu ensuite à la théorie de la complexité. Après Carnegie-Mellon, je suis allé trois ans à Brown

sur la côte Est (Providence). J'étais *assistant professor*, avant de gagner ma *tenure* qui donne un poste permanent [6].

En 1985, comme je vous l'ai dit, je passe un an en France à l'École Normale Supérieure et à Orsay, puis je ne reviens jamais à Brown, car Princeton m'embauche. Aux États-Unis, il n'y a pas, contrairement à la France, de cumul possible.

VS : *Princeton vous approche à quel moment ?*

BC : Ils me contactent quand je suis en France. Nous nous connaissions tous plus ou moins dans ce milieu assez étroit.

Princeton pour moi est le meilleur endroit au monde en informatique théorique, c'est un peu la Mecque de la discipline, la plaque tournante. Il y a l'université et l'Institut d'étude avancée. Dans la région il y a également d'autres gros laboratoires, New York est proche, il y a une densité de recherche élevée. Je parle du domaine de la théorie, pas d'autres disciplines de l'informatique.

VS : *Dans votre discipline le travail se fait en équipe ?*

BC : Oui, j'aime aussi parfois travailler seul, mais j'aime travailler en équipe. J'ai des étudiants en doctorat notamment.

VS : *Pourquoi avoir choisi une carrière aux États-Unis ? Evidemment ce que vous venez de m'expliquer répond déjà partiellement à la question...*

BC : L'informatique théorique veut dire deux choses différentes en Europe et aux États-Unis.

La discipline américaine de l'informatique théorique est assez peu pratiquée en France, même s'il y a quelques talents individuels très grands, notamment à l'École Normale, mais un pays comme Israël est bien plus fort en informatique théorique que la France. Il y a une autre informatique théorique où la France est très forte, mais ce n'est pas la même discipline.

La différence peut s'expliquer de plusieurs façons : en France, on regarde l'informatique par le biais des langages de programmation. La France est très forte sur l'invention de langages de programmation. C'est important en vérification. Mais on n'appelle pas cela de l'informatique théorique. Cependant il y a un autre aspect : on peut exprimer un langage informatique sous une forme algébrique. On peut aborder le problème des langages sous un aspect algébrique et combinatoire. Une école française a commencé dans les années 1950 sur ce terrain, derrière Schützenberger et d'autres chercheurs. L'informatique théorique en France c'est surtout cela, elle s'intéresse surtout au comportement et à la structure des langages.

6. Aux États-Unis ou au Canada, le système de la *tenure* offre une sécurité d'emploi permanent dans l'enseignement supérieur (par opposition à des renouvellements périodiques) et garantit une liberté d'expression des professeurs, qui les protège des pressions extérieures.

Les langages n'intéressent pas tellement les informaticiens aux États-Unis. Ils laissent davantage cela aux ingénieurs qui font de la conception. Il y a une coupure fondamentale entre les deux disciplines.

Par contre une de mes spécialités est la géométrie algorithmique. C'est une exception à la règle que je vous ai énoncée, où en France et aux États-Unis on transcende les frontières, c'est international. Je peux aller à Sophia-Antipolis et trouver toute une communauté de Français et d'Allemands avec lesquels on parle le même langage. Une autre exception est la cryptographie.

VS : *La géométrie algorithmique est votre spécialité ?*

BC : Oui, mais je passe l'essentiel de mon temps actuellement sur les algorithmes naturels… J'ai d'autres centres d'intérêts de plus en plus prenants. Ce n'est pas une distance intellectuelle, mais je n'ai plus le temps de m'y plonger autant.

VS : *Les algorithmes naturels, c'est donc ce qui vous occupe et vous préoccupe en ce moment ?*

BC : Effectivement, c'est ce qui m'occupe et me préoccupe le plus. Les gens écrivent des algorithmes comme ils conçoivent des ponts, un peu comme des ingénieurs. La différence entre des scientifiques et des ingénieurs ? Les seconds ont un problème concret, un objectif précis. La question est de construire quelque chose qui leur permette de répondre à un objectif, le but est d'accomplir cette chose. Et si quelqu'un trouve une méthode plus efficace, on va jeter la précédente. En science on ne peut pas faire cela. Le but est d'étudier les choses comme elles sont, pas comme on veut les faire.

Est-ce que les algorithmes sont comme des ponts ? Ou au contraire la nature nous propose-t-elle des algorithmes et nous n'avons pas le choix ? Oui, depuis plus d'un milliard d'années dans la vie il y a des algorithmes. Certains diront : "Quel est l'intérêt d'appeler cela des algorithmes ?". Avant on disait des systèmes dynamiques, etc. Mais, l'avantage de changer de nom, c'est qu'on change de point de vue.

Dans la physique, l'humanité a eu un succès énorme, c'est fulgurant. La physique est un monde de symétrie, de miroir, et on a un langage pour étudier ces symétries : les mathématiques. On a un langage intellectuel qui nous donne des outils parfaits pour faire de la physique. Les expériences sont indispensables, mais sans ces mathématiques extrêmement puissantes, on n'aurait pas abouti. Est-ce que ce succès peut se répéter en biologie, dans les sciences un peu moins physiques ? Pourquoi pas. Certains disent qu'après tout, tout est une molécule. D'autres, comme moi, disent que les lois de la physique sont opérantes, mais qu'elles ne servent pas à grand chose dans ce cas, que c'est regarder à une mauvaise échelle.

La différence entre la biologie et la physique, entre les cellules et le système solaire, c'est l'absence de symétrie. Toutes les symétries naturelles de la physique ont été brisées par l'histoire, ce qui donne la complexité de la biologie.

Si vous me donnez une page blanche, je peux écrire des équations qui expliqueraient 99% de ce qui nous entoure dans cette pièce, sauf vous et moi. En biologie, personne de sérieux ne croit qu'on va faire tenir sur une page des équations miraculeuses qui permettront de guérir le cancer, de tout expliquer... C'est la différence entre un haiku et *Crime et Châtiment*. La biologie c'est comme ça, il y a une complexité descriptive.

> « Le prix Nobel de physique, Eugène Wigner, s'émerveillait de "l'efficacité déraisonnable des mathématiques dans les sciences de la nature". Sans dénier l'intérêt épistémologique de ce propos, il convient de le reformuler. Wigner avait à l'esprit les sciences physiques. En guise de réponse, le mathématicien Israel Gelfand ironisa que la seule chose plus étonnante que l'efficacité des mathématiques en physique, c'est leur inefficacité en biologie. Excès de langage, soit, mais nul n'entretient l'illusion que guérir le cancer ou élucider le cortex cérébral puisse se réduire à la solution de quelques équations différentielles. La raison en est simple. L'univers physique est bâti sur des principes de symétrie et d'invariance — dont les liens s'expriment dans un théorème classique d'Emmy Noether — qui font cruellement défaut en biologie. Si l'on se réfère au schéma :
>
> Biologie = Physique + Histoire,
>
> on se heurte à la dure réalité que l'histoire est le grand briseur de symétrie. Il y a une distance considérable entre la régularité d'horloge du système solaire et les mystères du système immunitaire. »
>
> CHAZELLE B., *L'algorithmique et les sciences*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. "Les leçons inaugurales", no. 229, 2013, pp. 76-77.

Alors a-t-on des outils conceptuels pour comprendre ce qui se passe ? Voire prédire ? Je pense qu'une des erreurs à ne pas commettre est d'être obnubilé par la physique et de penser qu'on peut appliquer les mathématiques classiques, tout réduire à des équations différentielles. On peut obtenir des résultats pour des choses simples, par exemple pour certains aspects de la morphogénèse (travaux de Turing). Mais, un processus algorithmique il faut le voir comme une pièce de théâtre, une complexité inhérente... il faut l'aborder sous l'angle d'un récit historique avec une complexité inhérente. Les mathématiques classiques ne permettent pas cela.

Il est évident qu'on ne peut pas réduire *Crime et Châtiment* à des équations mathématiques ou des statistiques sur la fréquence des mots. C'est exactement pour cette même raison que les équations mathématiques ne peuvent pas expliquer l'immunologie.

VS : *Quel est historiquement le rapport qu'entretiennent les mathématiques avec la biologie ?*

BC : Au XIX^e siècle, il est quasiment nul. Darwin, Mendel n'ont pas besoin de mathématiques. Au XX^e siècle les choses changent un peu. Il y a utilisation des probabilités et des équations différentielles pour l'étude de la dynamique de population par exemple. On peut écrire des équations pour faire quelques prédictions. Ce sont des mathématiques relativement simples. Cela a quelques succès, mais comparé à la physique du XX^e siècle, c'est le jour et la nuit, alors qu'au même moment les mathématiques changent tout à la physique.

Il y a donc au XX^e siècle des mathématiques en biologie, mais peu. Par exemple les grandes découvertes en biologie telle que la structure tridimensionnelle de l'ADN, cela demande très peu de maths.

La biologie est un sujet bien plus vaste et difficile que la physique. Je ne dis pas qu'il n'y a pas des pans de la biologie qui se prêtent aux mathématiques, mais ils sont plus proches de la chimie peut-être. Par contre dans les réseaux, le caractère algorithmique est important.

Il faut s'entendre sur le mot réseau, on pense souvent à des choses statiques, le réseau d'autoroute, le réseau téléphonique, mais il y a des réseaux qui changent tout le temps. Il faut élargir la définition d'un réseau. Prenons un monde où on commence par les nœuds du réseau, les agents, c'est-à-dire quelqu'un qui a une capacité de cognition et de communication. Cela peut être vous sur Facebook, cela peut être les oiseaux et les poissons, qui communiquent avec un nombre restreint de voisins. Les capacités cognitives employées par les agents du système ne sont pas énormes, on a un réseau, mais dynamique au sens plein. Vous regardez des bancs de poissons quand il y a des prédateurs, ce dynamisme est très important, on le voit dans les bactéries, etc. On peut modéliser des tas de choses, même très complexes, des relations d'influence, des mouvements de foule. Il y a généralement des processus cognitifs simples : ainsi en voiture, si le véhicule devant vous avance, vous avancez. La modélisation typique est de trouver des modèles d'agents qui changent tout le temps. On peut les simuler, visualiser ce qui se passe. Mais, la science c'est aller au-delà : la question est de savoir si, une fois que l'on a ces modèles, on va trouver des outils conceptuels qui nous permettent de faire des prédictions. Actuellement on essaie de calquer des équations. Il faut changer de paradigme, arrêter d'essayer de calquer des théories anciennes.

Donnons un exemple concret en dehors de la biologie : Facebook, les blogs. On a regardé comment certaines rumeurs se propagent, certaines modes se créent. Pour les épidémies en médecine, c'est intéressant aussi. Si on a seulement quelques ressources de vaccins, on va essayer de comprendre qui on va vacciner, etc. Il faut expérimenter, créer un modèle, un algorithme, qui tienne compte des comportements différents. Il faut modéliser tout cela. Mais, ce n'est pas ce qui m'intéresse directement. Pour les épidémies, la modélisation va être faite par des épidémiologistes, elle requiert des spécialistes de l'application. Une fois qu'on a cette modélisation, on la

simule, on la visualise, mais cela n'explique rien. Il faut revenir à cet algorithme et chercher à le comprendre.

> « On rapporte du grand physicien danois, Niels Bohr, cette anecdote peut-être apocryphe :
> — Professeur Bohr, je vois que vous avez un fer à cheval accroché au mur. Ne me dites pas que vous croyez à ce genre de choses !
> — Rassurez-vous, je n'y crois pas du tout, mais on m'a dit que ça marche même quand on n'y croit pas.
> Ainsi en va-t-il de la révolution algorithmique. Au-delà du scepticisme ou de l'engouement du jour pour la dernière nouveauté informatique se cache un de ces changements de paradigme chers à Kuhn. Outil conceptuel subversif, l'algorithme ouvre la possibilité d'un regard nouveau sur les sciences et les technologies qui s'étend bien au-delà de ses applications pratiques. »
>
> CHAZELLE B., *L'algorithmique et les sciences*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. "Les leçons inaugurales", no. 229, 2013, p. 17.

VS : *À quels types de réseaux pensez-vous ? Les réseaux neuronaux ?*

BC : À mon avis il y a des réseaux plus complexes que d'autres. Dans la neurobiologie, où on trouve les réseaux les plus complexes de la nature, c'est là où je suis le moins optimiste. Alors soyons réalistes, essayons déjà de résoudre des choses plus "simples", comme les bactéries. Sur les aspects neuronaux il est en outre très difficile de faire des expériences. Mais parfois, en posant des questions simples, on ouvre des portes énormes sur d'autres problèmes. L'enjeu actuel est de construire des outils intellectuels qui nous manquent. Maintenant il faut accorder une marge de temps pour développer des outils conceptuels.

Pour comprendre le système solaire, Poincaré a inventé toute une discipline mathématique. À mon avis, il faut avoir cette disposition, ne pas être trop obnubilé par les réponses à des problèmes concrets. C'est un mal de notre temps, l'application immédiate. Il faut être un peu plus humble, modeste.

VS : *Vous travaillez en interdisciplinarité ?*

BC : Oui, absolument. La raison pour laquelle je repars aux États-Unis est que je vais travailler avec des biologistes et physiciens sur des problèmes concrets à IAS (*Institute for Advanced Study*).

C'est pour cela qu'on va avoir une redéfinition des disciplines. La nature de la discipline va complètement changer. Une expérience qui m'a beaucoup marqué, il y a quelques années, est d'avoir fait un cours pluridisciplinaire : l'idée était d'enseigner des bases scientifiques ensemble, en un seul cours s'étendant sur un an. Quand on étudie un phénomène physique, la diffusion, il y a l'aspect physique, mathématique,

chimique, etc. L'algorithme de Google est un algorithme de diffusion. On enseigne aux étudiants que le sucre qui se répand dans votre sang et l'algorithme de Google, c'est intellectuellement à peu près la même chose… c'est une perspective différente sur l'enseignement. Je ne dis pas que tout doit changer. La relativité générale par exemple n'a pas besoin de cela, mais la biologie est de plus en plus une science de l'information, et la science de l'information c'est l'informatique. Je ne dis pas que l'une va remplacer l'autre, mais dans quinze ans ces disciplines auront tellement changé… Alors qu'un département de mathématiques où ils font de la théorie des nombres, dans quinze ans les chercheurs auront fait de grands progrès, mais ils travailleront sûrement d'une manière assez semblable à aujourd'hui.

"First you prove it, then you let it sink in."
Dessin de Bernard Chazelle (sous licence CC-BY-NC-ND)

VS : *À quand remonte la notion d'algorithmes naturels ?*

BC : Les algorithmes naturels, c'est moi qui ai suggéré cette phraséologie. La formule a été utilisée avant moi mais avec un sens différent.

Il y a une démarche inverse très intéressante, mais je n'y travaille pas, c'est le biomimétisme. On regarde comment les fourmis font, afin de s'inspirer du monde naturel pour résoudre des problèmes concrets. On fait des algorithmes en piochant dans la nature. Parfois on appelle cela des algorithmes naturels. Mais moi ce n'est pas le sens que je leur donne. Je réserve ce sens aux algorithmes qu'on trouve dans la nature et qui ont évolué pendant des millions d'années.

Le moteur de recherche de Google marche bien, il a été mis au point pendant dix ans par une centaine d'ingénieurs et s'ils travaillent mal, ils sont virés… les algorithmes naturels ce ne sont pas dix ans mais plusieurs millions d'années, plusieurs milliards d'ingénieurs, et s'ils travaillent mal, ils meurent ! Ce que je veux dire par

cette boutade, c'est que quand on regarde les oiseaux, les fourmis, on a des algorithmes bien plus impressionnants que ceux que nous pouvons inventer.

Revenons aux fourmis... Celui qui fait du biomimétisme, il n'en a rien à faire des fourmis. Il s'inspire des fourmis, pour résoudre un problème, alors que moi ce sont les fourmis qui m'intéressent. Donc le but et la démarche sont différents. Je veux que cela respecte la démarche des fourmis le plus possible, je ne vais pas aider les fourmis à mieux fonctionner.

VS : *Sur votre page de Princeton on trouve aussi des articles plus personnels, engagés, cela m'a étonnée. Je pense notamment aux articles contre la torture, sur la guerre en Irak...*

BC : La signification historique de la *tenure* est très particulière. Cela vous donne le droit absolu à la liberté d'expression. L'université ne peut pas vous causer le moindre problème. Elle ne peut pas dire que cette page est professionnelle et que vous ne pouvez pas exprimer vos idées. Ce n'est pas le cas dans une entreprise, alors que dans les universités américaines, cette ligne de démarcation n'existe pas. Par contre comme c'est public, des gens peuvent ne pas être d'accord. Mais c'est vrai partout. Les courriers que je reçois dans ma profession scientifique sont toujours aimables. Quand vous vous engagez sur un terrain politique, ces règles ne sont pas toujours respectées. J'ai l'impression d'avoir un statut privilégié et une dette vis-à-vis de la société. L'idée que je ne suis payé que pour faire des algorithmes, ce n'est pas ma vision du monde intellectuel. La spécialisation est récente. Au XIX^{e} siècle les scientifiques avaient une culture énorme. Prenez les grands physiciens, Einstein par exemple, ils ne se gênaient pas pour exprimer des opinions. On a une plateforme que la plupart des gens n'ont pas. Je me sens aussi une obligation d'exprimer mes opinions.

VS : *Dans un article lié à un cours à destination de lycéens, vous étayez votre propos de nombreuses références à l'histoire. Connaître l'histoire de sa discipline, est-ce important ?*

BC : Oui, d'autant que ce n'est pas très compliqué. Cela commence véritablement dans les années 1930. Cette histoire est importante. Prenez Alan Turing. Il se pose des questions en Intelligence Artificielle et morphogénèse qui sont maintenant complètement d'actualité.

Il a posé la question de savoir à quel point le monde vivant peut être expliqué par des algorithmes. C'est lui le fondateur des algorithmes naturels ! Pour lui, l'ordinateur n'est pas qu'un calculateur. Sa vision s'est perdue ensuite. Sous Turing, c'était extrêmement large. Il a aussi compris très tôt que ce n'était pas une branche classique des mathématiques, que ce qu'il faisait était quelque chose de différent, alors qu'à l'époque certains inventaient une nouvelle mathématique, mais c'était toujours des maths. Turing a créé une autre espèce. Lui et toute une communauté. Il représente bien l'esprit universel de l'informatique... et aussi le fait qu'avant Turing on a fait

beaucoup de robots, automatisé les tâches, mais c'est le caractère universel qui a tout changé, ne pas vouloir faire un robot mieux que les autres, mais le robot universel... c'est cela à mon avis le grand saut intellectuel. L'idée de code, d'algorithmes codés de façon symbolique, une idée qu'on retrouve dans nos gènes et les protéines qui les codent, voilà un des concepts les plus révolutionnaires du XX^{e} siècle, au même titre que la relativité et la mécanique quantique.

Pour aller plus loin...

Page de Bernard Chazelle : `http://www.cs.princeton.edu/~chazelle/`

Introduction aux algorithmes naturels :

CHAZELLE B., "Natural Algorithms and Influence Systems", *Research Highlights*, CACM 2012. `http://www.cs.princeton.edu/~chazelle/pubs/cacm12web.pdf`

L'article de Bernard Chazelle à destination des lycéens :

CHAZELLE B., "The Algorithm : Idiom of Modern Science"
`http://www.cs.princeton.edu/~chazelle/pubs/algorithm.html`

La leçon inaugurale de Bernard Chazelle au Collège de France :

CHAZELLE B., *L'algorithmique et les sciences*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. "Les leçons inaugurales", no. 229, 2013, 104 p.

Sur Alan Turing :

HODGES *A. Alan Turing : The Enigma. The Centenary Edition*, Princeton University Press, 2012, 632 p.

Voir sur le site Interstices le film de Catherine Bernstein "Le modèle Turing"
`http://interstices.info/jcms/int\_67976/le-modele-turing`

Plusieurs pages du site du CNRS sont dédiées à Turing. Voir notamment :
Présentation de l'année Turing, `http://www.cnrs.fr/ins2i/spip.php?article201`
Exposition "Alan Turing, Du langage formel aux formes vivantes",
`http://www.cnrs.fr/ins2i/spip.php?article365`

Sur Xerox et le Parc :

Parc History, `http://www.parc.xerox.com/about/history/default.html`

HILTZIK M. A., *Dealers of Lightning : Xerox PARC and the Dawn of the Computer Age*, Harper Business, New York, 1999, 448 p.

JOHNSON J., ROBERTS T., “The Xerox Star : a retrospective”, *IEEE Computer*, vol. 22, 1989, p. 11-29.