

Entretien avec Emmanuel Candès

Mattis Paulin

Kevin Polisano

Sofia Zaourar

Federico Zertuche

16 juin 2014

M.P.: Commençons par votre enfance. Où êtes-vous né ? Que faisaient vos parents ?

E.C.: Je suis né à Paris, dans le 17^{ème}. Je ne suis pas issu d'un milieu scientifique, puisque mon père a fait des études de psychologie et ma mère d'histoire. J'ai donc grandi dans un milieu à Paris avec des parents qui étaient étrangers au monde scientifique. J'ai deux frères, tous deux ingénieurs de formation. J'ai fait toute ma scolarité dans le système public français.

M.P.: A quel moment avez-vous commencé à vous intéresser aux sciences ?

E.C.: Un peu par accident. J'avais beaucoup d'amis dont les parents étaient scientifiques et j'avais le sentiment un peu naïf qu'il s'agissait de filiales qui ne m'étaient pas vraiment destinées. Mais étant donné mes bons résultats, mon professeur de mathématiques a convoqué mon père et lui a expliqué qu'il fallait que j'aille en classes préparatoires. J'ai passé mon bac où j'ai eu de très bonnes notes en maths et en physique et je me suis retrouvé en Maths sup' à Louis-le-Grand. L'ambiance y était particulière ; pour l'anecdote, nous étions une quinzaine dans ma classe à avoir eu vingt en sciences au baccalauréat ! C'était un peu intimidant au début, et aussi à cause de certains professeurs. J'en ai eu de très bons pendant mes études, mais dans le système français, il fallait être taillé en béton pour ne pas se laisser décourager. Aux États-Unis, à l'inverse, on reçoit beaucoup plus d'encouragements. C'était un univers un peu étonnant, mais on s'y fait, comme le reste. J'ai ensuite fait une Maths Spé, j'ai passé mes concours, et j'ai eu la chance d'être bien classé à l'École Polytechnique. Ses oraux étant ma première série, j'ai su très rapidement que j'y serais admis et je suis parti en vacances avec mes amis, sans passer les autres concours.

M.P.: Aviez-vous aussi passé les ENS ?

E.C.: Oui et cela se passait plutôt bien, mais une fois l'assurance d'avoir l'X, je n'ai pas continué. C'est curieux, mais le fait de n'avoir pas poursuivi les concours de l'ENS est quelque chose que je n'ai jamais regretté. Mes années à l'X ont été de très belles années. Pendant le service militaire de la première année je suis allé dans l'artillerie, puis je me suis retrouvé en Allemagne au moment de la guerre du Golfe. Je ne garde pas un très bon souvenir de mes classes, mais un bien meilleur de mon régiment.

J'avais un certain problème de discipline à l'armée, comme par ailleurs dans toute ma scolarité, si bien que je me suis retrouvé à choisir parmi les derniers. Personne ne voulait aller en Allemagne. Je parlais allemand, j'ai regardé la carte et choisi une ville étudiante allemande : Tübingen. Ce n'était pas si terrible que cela : j'avais une vie le soir, en parallèle de ma vie militaire, qui m'a amenée à rencontrer des gens avec qui je me suis lié d'affection.

Il y a ensuite eu mes années à l'X qui ont été des années merveilleuses. Je jouais beaucoup au rugby, avec des amis que je revois toujours avec énormément de plaisir. Je suis resté deux ans sur le plateau de Saclay, ce qui est très court. J'ai suivi une majeure de physique, en étant persuadé que c'était ce que je voulais faire de ma vie. J'ai fait mon stage d'option en physique statistique.

À la fin de mes études, c'était le début d'une crise en France, le chômage progressait et les gens avaient du mal à trouver un premier emploi. J'ai eu un peu peur de ne pas trouver de travail si je faisais une thèse en physique. C'est à ce moment que je me suis tourné vers les mathématiques appliquées et j'ai commencé un DEA à Paris.

Je n'étais pas sûr que la carrière scientifique était faite pour moi, en fait j'étais persuadé du contraire. Je me suis toutefois dit qu'avant de m'engager dans l'industrie, il serait intéressant du point de vue scientifique de faire un doctorat, avant de me tourner vers une carrière professionnelle plus traditionnelle. J'ai donc commencé à étudier l'analyse numérique, et cela ne m'a pas plu. Heureusement, j'ai suivi le cours d'Yves Meyer, sur le traitement du signal et les ondelettes, et j'ai découvert à ce moment que les mathématiques appliquées pouvaient être autre chose.

C'est aussi pendant cette période que je me suis demandé comment la science était faite aux États-Unis. Je suis allé voir Yves Meyer et je lui ai dit que j'étais intéressé par un doctorat avec lui mais que j'aimerais pouvoir en effectuer une partie aux États-Unis. Il m'a répondu que c'était une très mauvaise idée. Il m'a expliqué que la thèse était un moment d'intensité et qu'on ne pouvait pas se disperser, et que voyager était le premier motif de dispersion. Il m'a toutefois suggéré d'effectuer tout mon doctorat aux États-Unis. On était au mois de juin, le 15 juin 1994, et les procédures d'inscriptions pour les docto-

rants aux États-Unis finissent le 15 janvier. Il a donc écrit à des collègues, et le premier qui a répondu était David Donoho. Le tout a pris quinze jours : le premier juillet, je partais à Stanford pour mon doctorat. J'avais la caractéristique de connaître par avance mon directeur de thèse, ce qui n'est pas habituel.

J'ai suivi des cours de statistique en première année, ce qui m'a beaucoup plu. Non seulement j'ai découvert une science un peu différente mais aussi une approche nouvelle, moins fondée sur la rigueur, d'avantage sur les idées. J'ai toujours l'impression d'avoir une double richesse, celle d'avoir appris la rigueur en France et la valeur des idées aux États-Unis. Mes années à Stanford ont de nouveau été merveilleuses, avec une vie communautaire très intéressante. Je vivais avec des Iraniens, des Suisses, et c'est là que j'ai rencontré la femme avec laquelle je me suis marié, qui est aussi statisticienne.

M.P.: Combien de temps a duré votre thèse ?

E.C.: La durée d'un doctorat aux États-Unis est de quatre ans et le mien n'a pas fait exception. Néanmoins, il n'y a que des cours en première année, donc sa durée effective n'est que de trois ans, comme en France.

F.Z.: Quelle était votre relation avec votre directeur de thèse ?

E.C.: J'avais une relation particulière avec David Donoho, en ce que je le voyais très peu souvent, et même très rarement, du fait qu'il habitait à Berkeley. J'ai le souvenir de ne pas l'avoir vu pendant des mois entiers ; j'étais très indépendant. Il m'a toutefois apporté des choses uniques et je lui dois une partie énorme de mon succès. Il a su me faire distinguer ce qui était important de ce qui ne l'était pas.

Mes conversations avec lui ne portaient jamais sur ce que je faisais, jamais sur les problèmes que je pouvais rencontrer, mais toujours sur des sujets un peu "en l'air". Au travers de ces sujets, j'ai compris comment il pensait et j'ai bénéficié d'une expérience unique et d'une vision scientifique incomparable. Le plus difficile pour les scientifiques appliqués est de développer ce que j'appelle le "bon goût", c'est-à-dire de comprendre ce qui est important et ce qui ne l'est pas. C'est David qui m'a appris ça.

Ma thèse a constitué pour moi une ouverture, une manière de comprendre comment un grand scientifique pensait. Chaque heure passée avec David en valait mille avec un autre. J'essaye maintenant avec mes étudiants de leur expliquer qu'il vaut mieux avoir deux articles qui ont changé l'état de l'art, que dix qui n'ont pas un "avant" et un "après".

Aujourd'hui, même si j'ai moins d'énergie qu'avant, j'ai plus d'expérience, et je suis capable de déterminer si ma direction de recherche ne mène nulle part.

K.P.: Pourriez-vous nous parler brièvement de vos travaux pendant votre thèse ?

E.C.: Historiquement, il y a eu l'analyse harmo-

nique de Fourier, puis les ondelettes. Lorsque ces dernières sont arrivées, les gens ont pensé que c'était la fin de l'analyse de Fourier et que c'était la solution à tous les problèmes, comme aujourd'hui on pourrait penser que le "compressed sensing" est la panacée.

On a étudié les ondelettes car l'analyse harmonique de Fourier est mal adaptée aux phénomènes transients. Il faut un grand nombre de sinusoides pour représenter un signal discontinu, à cause entre autres du phénomène de Gibbs. Une série de Fourier d'un signal discontinu a une vitesse de convergence tellement faible que cela la rend inutilisable. Les ondelettes sont quant à elles bien adaptées pour représenter des signaux réguliers par morceaux.

Une des questions principales que j'ai abordée pendant ma thèse était la signification de la transience en deux dimensions. En une dimension, il n'y a qu'un seul type de discontinuité, mais en deux dimensions, il peut y avoir des points sources, des rebroussements, etc. La discontinuité la plus fréquente est le contour, c'est-à-dire les bords des objets dans les images. Les ondelettes approximent beaucoup mieux ces contours que Fourier, ce qui explique le succès du JPEG2000, mais ce n'est pas optimal, et c'est ce que j'ai montré pendant ma thèse.

Je me suis heurté à une sorte d'incompréhension du monde scientifique, qui pensait à cette époque que les ondelettes étaient ce qu'il y avait de mieux. Sur des exemples assez simples, j'avais montré qu'il y avait de meilleures représentations. Les chercheurs du domaine à cette époque pensaient que la solution consistait à construire des bases d'ondelettes adaptées à la géométrie de l'image. Seulement, connaître la géométrie de l'image c'est déjà avoir résolu le problème, car l'extraction de contour est un problème difficile. Le dogme était alors qu'il n'existait pas de représentation fixe qui donne de meilleurs résultats que les bases adaptatives.

J'ai introduit les curvelets et montré qu'on peut arriver aux mêmes résultats que des bases adaptatives avec des bases fixes. La communauté a commencé à s'y intéresser de très près, et c'est ce qui a lancé ce que l'on appellera les "bases d'irrrationnels" : une manière différente de représenter l'information qui utilise des formes allongées, très anisotropes. On peut montrer qu'elles donnent une représentation optimale des images "cartoons", c'est-à-dire régulières avec des bords réguliers.

F.Z.: Que pensez-vous du lien que certains voient entre les curvelets et le fonctionnement du cerveau ?

E.C.: Il faut faire attention à cet effet de mode, décrié par David, qui consiste à comparer tout ce que l'on découvre au cerveau humain. Lorsqu'on a étudié l'analyse de Fourier, les gens ont comparé son fonctionnement avec celui des neurones, et de même pour Gabor. Mais il semblerait effectivement, au vu des expériences d'Huberl et Wiesel, qui leur ont valu un prix Nobel, que les activations des neurones V1

et V2 chez les singes ont des réponses selon des axes très précis, ce qui ressemble au comportement des curvelets.

K.P.: Vous avez l'air de lire des articles dans beaucoup de domaines différents.

E.C.: Oui. Dans ma carrière, j'ai touché à beaucoup de domaines. J'ai ce matin même eu la chance d'aller au LETI (CEA) à Grenoble car j'ai une collaboration avec des chercheurs qui développent des circuits électroniques pour des microscopes. Beaucoup de choses m'intéressent. Tous les problèmes de "Big Data" ont besoin aujourd'hui de l'inférence statistique et de la garantie de reproductibilité des expériences dans des conditions similaires. C'est un sujet qui nous intéresse.

K.P.: Pour en revenir à votre parcours, qu'avez-vous fait une fois votre doctorat en poche ?

E.C.: Je suis tout d'abord resté à Stanford comme "assistant professor", puis au bout de deux ans je suis parti à CalTech dans le département de mathématiques appliquées. C'était un département très traditionnel, où par la force des choses, j'ai travaillé plutôt seul, car mes collègues proches faisaient des choses radicalement différentes. J'ai continué à travailler sur mes projets d'analyse harmonique, et en particulier sur les curvelets. J'ai eu de la chance d'avoir des étudiants d'horizons différents, notamment ayant des formations en électronique. Cela m'a beaucoup enrichi.

K.P.: Comment l'idée du "compressed sensing" a-t-elle germé ?

E.C.: C'est grâce aux curvelets que j'ai été amené à me pencher sur ce problème. A cette époque, les radiologues essayaient de sous-échantillonner leurs acquisitions, afin d'accélérer le processus, avec une fréquence vingt ou trente fois inférieure à celle de Nyquist. Leurs méthodes produisaient cependant beaucoup d'artefacts.

Un collègue de l'université du Wisconsin m'a contacté en pensant que les ridgelets seraient bien adaptées à ce problème. J'ai vite compris que ce n'était pas le cas et qu'il fallait essayer autre chose.

Nous avons essayé de minimiser la norme L_1 du gradient, et nous nous sommes rendus compte que la reconstruction n'était pas meilleure, mais exacte ! Cela m'a d'ailleurs valu des problèmes avec les radiologues et mes collègues du Wisconsin : ils ont cru que je me moquais d'eux et que l'algorithme n'avait rien fait. Grâce à la littérature de David Donoho sur la séparation des sinusoides et des pics d'une part [?], et de Michael Elad et d'Alfred Bruckstein [?] d'autre part, je me doutais qu'il était possible de montrer que la reconstruction était exacte, mais sous des conditions différentes.

J'ai commencé à chercher une explication et je me suis rendu compte assez vite que j'en avais une, à condition d'abandonner le cadre déterministe. En effet, si les mesures ne sont pas stochastiques, il y a des

phénomènes de recouvrement de spectre ("aliasing"). Par exemple, il est impossible d'échantillonner de manière déterministe en temps, car deux sinusoides de fréquence différentes peuvent toujours coïncider en certains points. En considérant des mesures prises aléatoirement, je suis arrivé très rapidement au résultat théorique suivant : pour reconstruire un signal k -parcimonieux, $k^2 \log(n)$ mesures suffisent. Je pensais cependant qu'il fallait aller plus loin car j'observais en pratique une reconstruction exacte avec un nombre d'observations proportionnel à $k \log(n)$. La preuve devient alors complexe.

Le reste de l'histoire est connu. J'habitais à UCLA et je rencontre Terrence Tao par accident, qui me questionne sur mes activités de recherche. Je lui parle de mon problème et de ma conjecture en $k \log(n)$, et il me répond que c'est impossible. Mais Terrence est un mathématicien et il pense en tant que tel. Lorsqu'on lui affirme quelque chose, son premier réflexe est de chercher un contre-exemple. Il est très rapide ; il va au tableau et cherche un contre-exemple mais n'en trouve pas. Je lui expose mon début de preuve, basée sur les polynômes trigonométriques. Avec Terrence maintenant convaincu du bien-fondé de la conjecture, nous nous attaquons au problème et quelques jours plus tard, nous avons une esquisse du résultat final. L'article est écrit, accepté et publié. Après cela, nous avons poursuivi dans le sujet et écrit quatre ou cinq articles en six mois, traitant des généralisations possibles, comme le cas approximativement parcimonieux et le cas bruité. Le développement du "compressed sensing" a été très rapide, en particulier grâce aux contributions gigantesques de David qui avait tout de suite compris ses tenants et aboutissants.

K.P.: Dans quels domaines les applications liées à la théorie du "compressed sensing" voient-elles le jour ?

E.C.: Il y a par exemple toutes les branches qui réalisent des circuits électroniques, des microscopes, des caméras avec très peu de pixels, ce qu'on appelle le "hardware design". Mais l'application phare, et celle qui a motivée tous nos travaux, est l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

L'anecdote que je raconte régulièrement est l'histoire de cet enfant de 2 ans qui, suite à une greffe, présentait des signes cliniques alarmant au niveau de son foie. Les médecins pensaient qu'il avait des canaux bouchés. Pour le vérifier et intervenir au bon endroit, il était nécessaire de faire une IRM à très haute résolution, ce qui impliquait que l'enfant devait rester parfaitement immobile et ne pas respirer, autrement dit cela nécessitait d'arrêter son coeur durant environ deux minutes. Privez un enfant d'oxygène pendant une si longue durée et son foie devient le cadet de vos soucis. Le cerveau n'étant plus irrigué, les séquelles peuvent être très graves. Grâce au compressed sensing on a pu réduire cette durée

à seulement quinze secondes et obtenir une reconstruction nette de l'image. Les médecins ont alors pu identifier les canaux bouchés et pratiquer l'intervention. Depuis l'enfant est en pleine santé.

Un autre collègue de Stanford utilise aussi le *compressed sensing* appliqué au CT-scan (Computed Tomography scan), c'est-à-dire aux scanners à rayons X, pour réduire le temps d'exposition, puisqu'il est établi qu'une forte dose d'irradiation est associée à un risque de cancer.

K.P.: L'imagerie médicale semble donc avoir toujours été un fil conducteur dans vos recherches, d'où est venu cet intérêt particulier pour ce domaine ?

E.C.: J'ai toujours été fasciné par l'imagerie médicale. Auparavant pour voir à l'intérieur du corps humain il fallait pratiquer la dissection. Le scientifique qui révolutionna tout fut Röntgen, qui effectua la première radiographie. C'est à mon sens la plus grande découverte médicale réalisée à ce jour.

Vingt ans plus tard, McCormack et Hounsfield furent récompensés également du prix Nobel pour la construction des premiers scanners basés sur des clichés radiographiques pris selon différents angles, le CT-scan était né.

On est alors capable de voir l'intérieur du corps humain en 3D, sans l'ouvrir, ce qui est extraordinaire. Plus folle encore fut la découverte de l'imagerie par résonance magnétique par Lauterbur et Mansfield, qui utilise le fait que les protons ont des spins. Imaginer qu'on puisse reconstruire des images à partir de spins est quelque chose de totalement impensable, de fou et d'extrêmement audacieux. C'est cette fascination pour ces très belles découvertes qui en fait certainement mon domaine de prédilection.

K.P.: Et comment est apparue la théorie de la super-résolution ? De l'imagerie médicale également ?

E.C.: L'histoire de la super-résolution est en réalité celle d'un échec. Un des grands problèmes ouverts du *compressed sensing*, qui n'est toujours pas résolu, est celui de la justification mathématique de la reconstruction d'un signal parcimonieux dans le cas où les bases considérées ne sont pas suffisamment incohérentes, condition requise pour que cela fonctionne théoriquement. Pourtant numériquement on observe des résultats plutôt satisfaisants.

Prenez par exemple un tel signal représenté dans l'espace des curvelets, qui ne forment pas une base et ne sont pas orthogonales, deux curvelets pouvant avoir un large coefficient de corrélation. D'après la théorie du *compressed sensing*, il n'est pas possible de retrouver les coefficients dans cette "base" redondante. En effet, comme le dictionnaire est cohérent, son produit par la matrice des contraintes A l'est aussi. Deux colonnes du dictionnaire (deux curvelets donc) sont cohérentes : en les projetant elles le sont d'autant plus. Pourtant, lorsque l'on fait des expériences numériques on parvient tout de même à reconstruire un signal parcimonieux dans l'espace

des curvelets avec peu de mesures. Mais il y a cette notion de cohérence, et on ne peut pas utiliser les résultats tels qu'ils sont énoncés dans la théorie du *compressed sensing*.

Un dictionnaire D cohérent comporterait deux colonnes identiques. Cependant, ce qui nous intéresse ce ne sont pas les coefficients du signal mais le signal lui-même ; choisir l'une ou l'autre des colonnes n'a alors pas d'importance. Il y a trois niveaux d'information, du plus grossier au plus fin : les mesures, le signal et les coefficients du signal. Le *compressed sensing* stipule que l'on ne peut pas avoir accès aux coefficients donc au dernier niveau. Mais ce qui nous intéresse, c'est d'accéder au deuxième niveau : au signal. L'écriture de la théorie correspondante s'est avérée difficile et très abstraite. Pour simplifier, on peut supposer que cette matrice AD est très cohérente, et donc comme cas particulier que ses éléments sont des sinusoides qui sont tellement proches en fréquence que l'on peut considérer que le dictionnaire est maintenant continu : la super-résolution est née.

Tout d'un coup mon problème, qui est un cas particulier du problème ouvert, devient le suivant : on a un signal parcimonieux en fréquence avec une superposition de sinusoides, dont la matrice de Fourier est maintenant continue en fréquence. A partir de quelques échantillons rapprochés en temps, la question porte sur la séparabilité des sinusoides ?

Si on échange le temps et la fréquence c'est exactement le même problème que d'avoir un signal parcimonieux et de n'en voir que les basses fréquences. L'idée est donc de faire de l'extrapolation, contrairement au *compressed sensing* dont l'objectif était de faire de l'interpolation. Ce qui est étonnant c'est que le dictionnaire a une cohérence de un, ce qui sort du cadre du *compressed sensing*.

S.Z.: Est-ce que la théorie des matrices aléatoires était déjà à la mode avant l'apparition du *compressed sensing* ?

E.C.: Oui la théorie des matrices aléatoires a toujours été à la mode, indépendamment du *compressed sensing*, mais des connexions ont été établies avec la théorie des espaces de Banach. Il y a eu énormément d'échanges fructueux entre scientifiques, notamment entre Alain Pajor qui étudie la géométrie dans ces espaces de Banach et nous qui sommes plus appliqués. Nous nous sommes alors rendus compte que l'on redécouvrait beaucoup de choses qu'il savait par ailleurs. Par exemple, un résultat connu établit qu'il n'existe pas de meilleur algorithme que la minimisation de la norme L_1 pour reconstruire un signal parcimonieux projeté aléatoirement, dont on dispose de peu de mesures. Ce résultat est étroitement lié à des travaux sur les espaces de Banach effectués par des mathématiciens de l'école soviétique.

S.Z.: Outre la théorie du signal et ses applications en imagerie médicale vous semblez présenter un at-

trait particulier pour la statistique, pourquoi vous être tourné vers ce domaine ?

E.C.: Je dirais que la statistique est une science subtile. L'enjeu est de se demander quelle est l'information dans un jeu de données. Contrairement au calcul différentiel, qui est une science très mécanique et qui a 350 ans, la géométrie qui a plus de 3000 ans, la théorie des nombres, très vieille également, et bien d'autres, la statistique et les probabilités sont des sciences très récentes puisqu'elles datent du siècle dernier, avec Fisher notamment pour la première et Kolmogorov pour la seconde.

Le langage de l'incertitude est donc encore à ses balbutiements, et sa construction s'est faite à travers un certain nombre d'erreurs et de paradoxes qui mettent en difficulté l'esprit humain. On le voit particulièrement bien quand on l'enseigne auprès des jeunes étudiants : comprendre la notion de variabilité, de tests sur des échantillons représentant un comportement d'une population avec une certaine confiance est déstabilisant. Même de grands mathématiciens ont trébuché plus d'une fois sur le concepts d'incertitude. Ce qui me plaît dans cette branche des mathématiques est qu'elle est peut-être moins technique que le calcul différentiel ou la théorie des nombres, mais est des plus subtiles.

S.Z.: Au delà des statistiques, vous avez aussi plusieurs travaux en optimisation. Comment avez-vous été amené à vous y intéresser ?

E.C.: Très jeune déjà j'avais suivi le cours d'optimisation convexe de Stephen Boyd que j'avais adoré et dont les idées m'ont suivi toute la vie. En travaillant sur le compressed sensing, je suis rapidement arrivé à des problèmes L_1 de grande taille. Je connaissais la méthode de points intérieurs mais j'ai réalisé qu'elle n'était pas adaptée à ces problèmes. Par hasard, je suis tombé sur le travail de master d'un étudiant qui mentionnait l'article de Nesterov de 2005. J'ai commencé à l'implémenter pour la norme L_1 et je me suis rendu compte au bout d'une heure que cela marchait très bien.

Pour moi, Nesterov a opéré une véritable révolution. Cela m'a ouvert les yeux à une nouvelle manière de faire de l'optimisation et m'a poussé à donner un cours à Caltech sur ce sujet. Aujourd'hui, j'essaye de rester au courant des derniers progrès mais je ne suis pas un spécialiste.

K.P.: Quittons maintenant le domaine technique. Pourriez-vous nous donner votre opinion sur le système éducatif américain en comparaison avec le système français ?

E.C.: Une différence est que la sélection en France passe principalement par les mathématiques et la physique. Aux États-Unis l'enseignement est plus démocratisé, il n'y a pas de filières prestigieuses comme les grandes écoles d'ingénieurs ou les écoles normales supérieures qui possèdent un nombre limité de places. D'ailleurs, les carrières davantage

prisées aux États-Unis sont par exemple celles de la médecine ou du droit.

En France l'enseignement est très rigoureux, ce qui a des avantages car cela forme des esprits tout aussi rigoureux et précis. De ce fait, les étudiants acquièrent patience et persévérance. Cette endurance se fait alors ressentir dans la façon de surmonter les difficultés rencontrées dans le travail de recherche ; il n'est pas question de contourner l'obstacle mais de le prendre de front.

Le système américain est moins rigoureux, mais il confère une certaine habileté à réagir face à une situation nouvelle. Cela se voit très bien dans la nature des examens et concours dans l'un et l'autre des systèmes : au concours de l'X par exemple les questions s'enchaînent d'une façon linéaire, dont la gymnastique d'esprit consiste à suivre la logique balisée par les différentes questions du sujet. Aux États-Unis on donne moins les clés et on insiste plus sur une compréhension globale et un savoir faire face à une situation nouvelle.

Ce qui m'a beaucoup plu aux États-Unis, c'est qu'à chaque cours il y avait une bonne idée à retenir. Je ne suis pas sûr que durant les 15h de mathématiques par semaine que j'ai eues en classe préparatoire il y avait une bonne idée dans chaque cours. J'avais le sentiment que le travail portait comme je l'ai dit davantage sur la patience, la rigueur, la technique, mais qu'il était moins riche en idées.

Je trouvais d'ailleurs regrettable d'avoir dû attendre d'intégrer l'École Polytechnique avant d'entendre parler de statistiques et de probabilités, alors que j'ai coupé des delta et des epsilon pendant un an et demi. Même les premiers cours dispensés en probabilités commencent directement par les notions abstraites de tribus, de mesures, etc. Aux États-Unis je trouve appréciable ce lien très fort qu'il y a avec les applications.

Je ne prétendrais absolument pas que le système américain est meilleur que le système français ou vice-versa ; je trouve que l'un est l'autre possèdent des qualités qui leur sont propres. Je me considère donc chanceux d'avoir baigné dans ces deux systèmes qui ont chacun façonné la conduite de mes activités de recherche.

S.Z.: Qu'en est-il à votre avis du statut du scientifique et de la science en général aux États-Unis par rapport à la France ?

E.C.: De manière générale les Américains ont beaucoup de respect pour les scientifiques, tant au niveau du gouvernement que des organismes de décision. La politique de financement des sciences est très soutenue. Les américains la mettent au coeur de leurs projets et n'imaginent pas devenir un pays qui importe des solutions technologiques. Je crois que ce phénomène remonte à la deuxième guerre mondiale, lorsque naît le "Manhattan Project", qui

fait prendre conscience aux américains que la science peut considérablement les aider et qu'elle fait partie intégrante de la sécurité nationale. Ce sentiment va être renforcé par la Guerre Froide, pendant laquelle la course scientifique entre Américains et Russes est sans pareille. C'est au moment où ces derniers lancent Spoutnik, que l'électorat des États-Unis se rend compte de leur retard. La science en relation à la puissance militaire est quelque chose d'important chez l'électeur américain.

A cela s'est rajouté aussi l'émergence des "dot coms" : les Américains ont vu l'essor considérable de l'économie basée sur les technologies de l'information grâce auxquelles les États-Unis prennent une avance considérable sur le reste du monde. Il n'y a pas d'équivalent de Google ou d'Apple en France.

La comparaison avec la France est intéressante, car c'est un pays qui est très bien positionné dans ce type de technologie. Comment se fait-il qu'avec France Telecom, Alcatel et des écoles d'ingénieurs qui forment des jeunes très brillants dans ces domaines, on n'ait pas réussi à saisir le moment opportun, alors que les clés de la réussite étaient entre nos mains ? J'ai rencontré le conseiller scientifique du président Bush, qui m'a expliqué comment cet essor américain avait été rendu possible par un investissement fédéral soutenu dont ils récoltent aujourd'hui les fruits. Il y a chez les preneurs de décision américains ce sentiment que la science est un vecteur pour asseoir leur puissance économique.

Avec l'essor des biotechnologies, les jeunes comprennent qu'une partie de leur avenir dépend de notre progrès à améliorer la santé, et qu'en général, la puissance militaire, économique et même le bien-être, dépendent d'une certaine façon des scientifiques.

Les Français ont-ils les mêmes convictions ? Dans le domaine militaire je ne pense pas, car nous n'avons pas du tout la même vision de l'armée et de la défense que les Américains. Dans le domaine économique, je ne sais pas. Quand je vois la politique Française, l'état des universités, de certaines écoles, la rémunération des maîtres de conférence, même de certains professeurs, notamment au vu de la difficulté de se loger en région parisienne, je me demande si l'état français met bien la science dans sa liste de priorités.

Quand les choses vont mal aux États-Unis, il y a un budget fédéral qui finance la plupart de la recherche biologique et médicale : c'est le National Institut of Health (NIH), doté de beaucoup de moyens. Lorsqu'il y a une crise je ne crois pas que le budget du NIH diminue, car il est considéré comme vital : il est impensable de se mettre à éliminer la recherche médicale. J'ai l'impression qu'en France, la valorisation du patrimoine par exemple, passe avant la science au niveau des priorités gouvernementales.

M.P.: Les chercheurs ont-ils été affecté par le récent "shut-down" du gouvernement américain ?

E.C.: Les employés fédéraux se sont retrouvés au chômage technique, ce qui a retardé l'établissement de nouveaux contrats d'environ trois semaines. C'était un désagrément, mais en ce qui concerne les chercheurs, rien de plus.

F.Z.: Que faut-il alors pour développer la science ?

E.C.: Il faut tout d'abord y mettre les moyens. La Chine par exemple, un peu à l'opposé de la France, investit dans la science en construisant tous les jours de nouveaux campus. Mais il faut aussi un embryon de culture scientifique.

L'exemple de la Russie est très intéressant. Staline considérait que la biologie était contraire à l'idéal communiste, et a forcé les biologistes à changer de domaine, contrairement à la physique et aux mathématiques, nécessaires à la vision militaire soviétique. On se rend compte quatre-vingt ans après que la Russie n'a que très peu de compétences scientifiques en biologie. Il est difficile de faire pousser la culture scientifique là où il n'y a personne pour former les jeunes.

F.Z.: Envoyer ces jeunes se former à l'étranger permettrait-il de repeupler les déserts scientifiques ?

E.C.: Peut-être, et c'est ce que font les Chinois : ils cherchent à créer une culture scientifique en rapatriant leurs compatriotes exilés, la plupart du temps des États-Unis. Des scientifiques reviennent et créent cette culture recherchée.

Un exemple très éclairant est donné par l'Allemagne, qui est en train de créer un très grand programme scientifique. Celle-ci s'illustre après la guerre parce qu'elle excelle dans le domaine des technologies (technologie et science ne sont pas la même chose). On sent dans les discours d'Angela Merkel une vision de l'Allemagne comme un grand pays technologique et scientifique à haute valeur ajoutée, qui refuse d'importer sa science. Pour développer une culture scientifique, il faut qu'il y ait un embryon et qu'il y ait des moyens. Ces derniers servent aussi à faire en sorte que les jeunes aient envie de choisir cette vie. La valorisation de la science doit d'abord passer par la valorisation financière.

Il y a une autre chose dont je voulais parler, qui est en fait une expérience humaine qui illustre la différence entre la France et les États-Unis. Quand j'étais étudiant à Polytechnique, les professeurs venaient de Paris, donnaient leurs cours et repartaient. Il y avait des laboratoires de recherche mais il fallait une carte magnétique pour y rentrer. On vivait ainsi dans un univers un peu bizarre, dans lequel le monde de la recherche et le monde de l'enseignement étaient deux mondes séparés. On pouvait faire sa scolarité à l'X sans avoir aucune expérience de la vie de la recherche, de la vie du scientifique, de la vie du doctorant ou de la vie du professeur. Aux États-Unis, c'est différent : sur un campus américain les cours de physique ont lieu dans les laboratoires de physique ; les cours de chimie dans le laboratoire de chi-

mie. Les étudiants viennent dans le laboratoire pour recevoir les cours de base, chose que je n'ai jamais faite en tant qu'étudiant. Les élèves vont en cours avec un chercheur qui habite à côté, et suivent des travaux dirigés avec des doctorants qui sont des "teaching assistants" (T.A.). Quand les étudiants ont des problèmes, ils vont voir les T.A. et sont aidés par eux. Même s'ils sortent de Stanford avec un niveau qui n'a rien à voir avec celui des polytechniciens, ils ont, pour moi, fait l'expérience de la vie scientifique. Ils n'ont peut-être pas pris des pipettes, ils n'ont peut-être pas écrit de programme qui calcule la quadrature du cercle, mais ils en ont fait l'expérience : ils ont vu les doctorants en situation, ils tiré des liens d'amitié et ils ont fait des choses.

Lorsqu'on leur parle de fermer tel laboratoire à Stanford, même ceux qui se sont orientés vers des postes à responsabilité, ils se souviennent et s'y opposent.

J'idéalise peut-être un peu ce contact des étudiants américains avec la vie scientifique, mais ce mélange, qui ne débouche pas forcément sur des étudiants qui savent résoudre les questions du polycopié leur donne néanmoins une expérience humaine très forte. C'est en particulier pour cela que j'ai décidé de faire une thèse : pour avoir une vraie expérience de la découverte scientifique.

K.P.: Vous avez parlé de la porosité des frontières entre les laboratoires et les étudiants, qu'en est-il de celles avec les entreprises ?

E.C.: L'avantage du système américain est sa grande fluidité. Il est parfaitement accepté que votre carrière passe par la recherche, puis l'entreprise, puis de nouveau la recherche. Mon voisin est parti dans une start-up, est devenu millionnaire, puis est revenu, et cela n'a choqué personne. Aux États-Unis, il y a de nombreux chemins qui permettent d'aller d'un point A à un point B, alors que dans certains pays européens, on a l'impression que si vous ratez une marche, vous n'arriverez pas à destination.

K.P.: Qu'est-ce qui vous a poussé à rester aux États-Unis ?

E.C.: Quand j'ai fini ma thèse je n'étais pas du tout convaincu que j'étais fait pour la recherche, voire même pas du tout. En fait, après ma thèse, je me suis intéressé à la finance, et j'ai passé des entretiens avec des banques à New-York. J'avais écrit un article, mais il y en avait sept de plus en cours, et j'ai donc décidé de faire un post-doc pour les finir avant de rejoindre une banque.

Ce qui a changé et qui m'a fait réaliser que j'étais dans la bonne voie, ce sont les étudiants en thèse. D'un coup, je me suis rendu compte que je ne travaillais plus tout seul mais que j'étais responsable de la carrière de quelqu'un. En tant que directeur de thèse, il faut donner des sujets intéressants à ses étudiants pour leur ouvrir des portes. J'ai arrêté de penser à moi-même et j'ai eu une expérience beau-

coup plus collective et responsable du travail scientifique.

Vers 2002-2003, j'ai commencé avec mes premiers étudiants. En 2004 le groupe commençait à être assez important avec cinq ou six personnes. Le compressed sensing était en plein essor et il fallait avancer vite. Il m'a fallu du temps pour que je comprenne que la carrière scientifique m'était destinée. Je ne suis pas du tout le chercheur fou et passionné. Je ne me lève pas la nuit pour lire Science ou Nature. A Caltech cela m'a beaucoup intimidé : il y avait des gens passionnés par la science et bien que de nombreuses choses m'intéressaient, je me sentais moins passionné et ils me le faisaient sentir. Je leur répondais : "It's a good job, but it's a job".

S.Z.: En dehors de la recherche qu'aimez-vous faire ?

E.C.: Quand j'étais un peu plus jeune je faisais du rugby et de la voile dans la baie de San Francisco. Maintenant que j'ai des enfants cela occupe une grande partie de mon temps. On a beaucoup d'amis qu'on voit le week-end. Je fais parfois de grands tours à vélo : je vais jusqu'à l'océan, je reviens par les montagnes. Je me plairais à Grenoble.

M.P.: Plus de rugby ?

E.C.: Une fois en sortant d'une séance, je ne sentais plus la partie gauche de mon visage et ma femme m'a demandé d'arrêter. Sinon, j'essaye de passer du temps avec mes enfants et on voyage beaucoup.

S.Z.: Pour finir, quels conseils donneriez-vous aux jeunes chercheurs ?

E.C.: Peut-être partir à l'étranger, aller voir ce qui se passe ailleurs. Lancez-vous et ayez confiance. Mes étudiants sont toujours anxieux et se posent beaucoup de questions. Ils veulent tout optimiser : aller aux meilleures universités, décrocher les meilleurs postes, etc. C'est un peu extrême. Quand cela ne marche pas ce n'est pas grave : ce qui compte c'est de faire du bon travail. "If you do a good job, good things will happen".