Compte-rendu de l'échange du 22 janvier 2014 suite à la projection du film
***Agora*,** de Alejandro Amenabar (2010).

En présence de **Sophie Robert** - réalisatrice et productrice - **Michel Toulmonde** - physicien et astronome – **Cédric Villani** – directeur de l'IHP
et **Jean-Philippe Uzan** – directeur adjoint de l'IHP.

Jean-Philippe Uzan : "J'aimerais faire quelques remarques préalables : Hypathie est un nom très connu des mathématiciens puisque c'est l'intitulé donné à un séminaire de probabilités qui se tient à Lyon et à Marseille trois fois par an. Souvent les noms des grands scientifiques sont rendus célèbres par leur utilisation pour nommer des unités de mesure ou des institutions.

Ce film aborde le thème du statut des femmes en philosophie et en mathématiques. On mesure à quel point ce combat est difficile, avec les exemples des noms d'emprunt, je pense à Sophie Germain, au début du XIXe siècle, etc. Mais aujourd'hui encore on a des soucis avec la place des femmes de sciences. La chute du nombre de chercheuses en témoigne. Avec son documentaire "Comment j'ai détesté les maths", Olivier Peyon a eu de nombreuses critiques négatives car son film ne comporte aucune chercheuse. Il en avait prévu pourtant, mais elles se sont désistées, et au final son documentaire est sans femme, ce qui lui a été reproché durement. J'aimerais évoquer aussi les pays où la religion est lourde : par exemple les femmes étudient en Arabie Saoudite, mais elles le font par le biais de visio-conférences, ou bien des mezzanines sont aménagées pour éviter qu'elles ne côtoient physiquement les hommes. Cela existe encore, mais elles ont le droit d'étudier. Souvent les femmes s'avèrent être plus assidues et plus brillantes. Hypathie est un exemple de ce contraste entre l'idéal de vouloir déchiffrer les mystères universels et le fait d'être empêtrée dans les problèmes du temps présent. Les sciences en quête de lois absolues et d'infini se retrouvent à toutes les époques en proie à des contingences dont elles se passeraient bien."

Sophie Robert: " Je me présente un peu comme une collectionneuse d'histoires de femmes pionnières de la science (de l'antiquité à nos jours), dont je réalise et produit une série de portraits animés. Pour moi cette épopée des femmes de science est comme un roman. Hypatie, figure parmi les quatre femmes de sciences les plus citées, avec Marie Curie, Emilie du Châtelet et Sophie Germain. En réalité elles ont été beaucoup plus nombreuses : plusieurs centaines d'entre elles sont parvenues à fournir une contribution majeure dans leur domaine de recherche à une époque où c'était pourtant quasiment impossible. Malheureusement, la plupart de ces femmes ont sombré dans l'oubli, donc elles ne peuvent pas jouer de rôle de modèle auprès des étudiantes et femmes de science aujourd'hui. C'est tout l'intérêt de mon travail : mettre en lumière les femmes de l'ombre.

Certaines femmes ont connu des conditions exceptionnelles, et ont dû se déguiser en homme pour devenir médecin militaire. C'est le cas d' Henriette Favez, une femme franco-suisse veuve à vingt ans, qui prit l'identité de son mari pour étudier la médecine et devenir chirurgien de guerre dans la grande armée de Napoléon. Prisonnière pendant la guerre d'Espagne, elle partira à Cuba puis en Amérique latine pour soigner les pauvres. Elle sera démasquée sans arrêt car son déguisement n'était pas très crédible, finira par épouser sa bonne pour essayer de donner le change. Puis elle sera démasquée et empri-

sonnée pour “usurpation d’identité”. Une vie épique, tout comme celle de Margareth-Ann Bulkley, qui à la même époque, a pris l'identité de son oncle, James Barry, pour étudier la médecine à Glasgow. Devenue chirurgien elle sera enrôlé dans la bataille qui oppose l’armée anglaise à celle de Napoléon. Margareth-Ann, alias Dr James Barry sera décorée par Wellington en personne sur le champ de bataille, puis elle gravira tous les échelons de la médecine militaire sous son identité d’homme. Sa véritable identité ne sera découverte que sur son lit de mort. Margareth-Ann Bulkley était pourtant fluette et gracile de constitution, mais elle avait une astuce imparable pour faire taire les rumeurs : elle provoquait en duel tous les hommes qui mettaient au cause son déguisement.

A la fin du XIXème siècle en Europe et aux Etats-Unis les femmes mènent des combats épiques pour obtenir le droit de devenir médecins en tant que femmes et non pas déguisées en hommes. L’opposition des carabins a été extrêmement violente. Aux alentours de 1850 l’académie de médecine de Philadelphie publie un texte rageur stipulant que : "*les femelles de toutes les espèces sont intellectuellement, moralement, et physiologiquement inaptes à la médecine.*"

La fin tragique d’Hypatie marque le début de la fin pour les femmes. Le film ne présente qu'une seule femme alors qu'il existait de nombreuses femmes médecins à l'époque, c'est même un phénomène banal. Contrairement à ce que sous-entend le film Agora, Hypathie n'est justement pas une exception. Sa fin tragique marque le début de 7 siècles d’obscurantisme, dont l’impact se fait encore sentir aujourd’hui,; à cause justement de la méconnaissance de l’histoire des pionnières. Dans ma collection de portraits de femmes de sciences, les deux tiers des pionnières se sont exprimées dans un domaine de recherche liées aux mathématiques.

Cédric Villani : " Ce film évoque les premiers sujets mathématiques : si on dit "mathématiques" au pluriel, c'est parce que l'on y regroupe à l'époque : l'astronomie, la géométrie, l'algèbre et la musique. Ce sont les quatre arts des mathématiques, selon le système philosophique du monde à cette époque. Ils connaissent l'ellipse, mais considèrent que la seule figure parfaite, c'est le cercle. C'est vers 1600 que Kepler proposera sa vision du monde limpide. Elle sera transformée ensuite par Newton et diffusée en France par Voltaire et la Marquise du Châtelet. Mais ces sujets de recherche sont encore contemporains."

Michel Toulmonde : "Par ce film, on se trouve dans le contexte de l'Antiquité. Bizarrement, il n’y a guère qu’en Grèce qu’on s'est intéressé à la recherche d’une mécanique des astres par une description géométrique des mouvements observés. Au contraire, en Amérique précolombienne ou en Chine, on ne s'attache pas aux mouvements mais seulement à leur période ou à la description du ciel (cartes). La Terre est le centre unique et immobile du monde, c’est un *dogme*, et tous les astres (Lune, Soleil, étoiles) tournent autour d’elle. Cependant, les astres "errants" (Mars, Jupiter et Saturne) posent un réel problème : chaque année, pendant 2 à 4 mois, ils se déplacent dans le ciel en sens contraire du sens habituel, avant de reprendre leur cours d’Ouest en Est. Ce mouvement dit de *rétrogradation* est évidemment toujours observable de nos jours, et de partout dans le monde.

Le cercle est considéré comme parfait et pur, ce qui, pour Platon au IVe siècle, signifie beau. Afin de déterminer la forme sphérique de la Terre, Aristote s'inspire de la forme toujours circulaire du bord de son ombre sur la Lune, lors d'une éclipse de Lune. Mais dans le cas des planètes, on se retrouve avec un mouvement *non* circulaire et *non* uniforme, ce qui n'est pas envisageable dans cette conception esthétique du monde : il faut donc trouver une combinaison de mouvements qui ont l'air compatibles avec la description géométrique de l'époque. Une des premières idées fécondes est due à Apollonius, géomètre et astronome grec du IIIe siècle avant notre ère, auteur du livre *Les Coniques*. Il imagine, pour chaque planète, une combinaison de deux cercles : un grand, centré sur la Terre, et un petit dont le centre se déplace sur le grand, la planète étant un point de ce petit cercle. D'un point de vue qualitatif, par rapport à la Terre centrale, cela « sauve » les apparences, d'autant plus que cela semble justifier les observations (faites à l'oeil nu à cette époque) : ces planètes sont effectivement plus brillantes quand elles sont au milieu de leur arc de rétrogradation, car elles sont alors plus proches de la Terre.

Chaque jour, dans son mouvement autour de la Terre, le Soleil se déplace d'un cran, fraction 1/365 de tour (c'est là l'origine des 360° pour le tour du cercle car 360 est un nombre voisin de 365 qui possède beaucoup de diviseurs, au contraire de 365). Hipparque, au IIe siècle avant notre ère, s'apercevant que les quatre saisons n'ont pas exactement la même durée (91 jours), en déduit que le Soleil tourne autour de la Terre de manière légèrement décentrée, ce qui n'est pas bien grave puisque ce centre ne serait pas matériel. Au IIe siècle de notre ère, Ptolémée (qui sera très étudié par le père d'Hypathie) représente quantitativement les mouvements de ces planètes : les vitesses et les distances ne "collaient" pas aux observations mais on ne trouvait pas mieux pour décrire ces mouvements...

Une autre représentation, appelée modèle héliocentrique, a été proposée par Aristarque au IIIe siècle avant notre ère (on ne connaît ses travaux que par le récit d'Archimède). Il détermine les distances de la Lune et du Soleil en utilisant une géométrie simple. Ce calcul, qu'on peut refaire facilement (niveau de la classe terminale) montre que la Lune est 3 fois plus petite que la Terre, le Soleil est 20 fois plus loin que la Lune (400 en réalité) et qu'ainsi le Soleil est six à sept fois plus gros que la Terre (100 fois en réalité). Aristarque trouve absurde que le « gros » Soleil tourne autour de la « petite » Terre. Mais pour les contemporains d'Aristarque, la Terre doit être immobile, la preuve en est que l'on peut sauter et retomber sur place : la Terre ne s'est donc pas déplacée pendant le saut. De même, si on lâche un sac du haut du mât d'un bateau en mouvement, le sac tombe au pied du mât. Autre argument utilisé contre ce modèle héliocentrique : les objets tombent vers le centre de la Terre qui est donc le centre du monde car si le Soleil en était le centre, les objets tomberaient... sur le Soleil.

Les changements périodiques du sens de parcours des planètes seront expliqués par Copernic en 1543, lequel comprend que si la Terre tourne comme les autres planètes autour du Soleil central, ces rétrogradations ne sont que des mouvements *apparents*, dus au mouvement réel de la Terre qui les double en tournant plus vite qu'elles et ainsi, elles nous semblent « reculer » dans le ciel.

Kepler avait une mauvaise vue mais était un excellent calculateur. Il a découvert en 1601-1602 que le diamètre du Soleil variait annuellement de ½ minute de degré (de 31,5' à 32,5'). En traitant les observations précises de la planète Mars faites par Tycho Brahe, Kepler montre que cette planète ne décrit pas correctement les mouvements cir-

culaires héliocentriques prévus par Copernic : il subsiste un écart atteignant 8 minutes de degré. Le modèle n'est donc pas correct, et après 7 ans de laborieux calculs, Kepler découvre que la trajectoire de Mars autour du Soleil est une ellipse.

Puis en 1610, avec une lunette qu'il a perfectionnée, Galilée découvre que des petits astres tournent autour de Jupiter (c'est Kepler qui leur donnera le nom de *satellites*). Ainsi, la Terre n'est pas l'*unique* centre du monde (modèle géocentrique) puisqu'avec Jupiter, il y en a au moins un deuxième. Mais les détracteurs de Galilée lui répondent : « C'est votre lunette qui crée les satellites, puisqu'on ne les voit pas à l'oeil nu » ! Un autre argument contre le mouvement de la Terre sera utilisé par l'Église : dans un épisode de la Bible, un chef militaire (Josué) prie pour que le Soleil « s'arrête » afin qu'il puisse remporter la bataille (à cette époque-là, en effet, on ne se battait que le jour, pas la nuit). Et Josué l'emporte, c'est donc bien que le Soleil s'est arrêté... Galilée répondra : « les Écritures nous apprennent comment aller au ciel, mais pas comment est le ciel » ! Cette séparation de la foi et de la science permettra l'essor de la science.

L'unification de la physique céleste et de la physique terrestre sera réalisée par Newton qui montrera en 1687 que c'est la *même cause* qui fait tomber une pomme sur la Terre, tourner la Lune autour de la Terre et les planètes autour du Soleil : la gravitation *universelle*. Mais, comme l'attestent les Shadoks d'en-dessous (de la Terre plate) : ceux qui arrêtent de pomper... tombent !"

Questions et remarques du public :

Question 1: " Dans le film on évoque la chute d'un sac dans un bateau en mouvement. Quelle est la place du dogme face à l'empirisme?"

Réponse de Michel Toulmonde :"Un physicien a toujours sur lui une pomme afin d'expérimenter dans une voiture en mouvement rectiligne uniforme. Faites l'essai..."

Question 2: "Est-il possible à l'époque de réaliser la démonstration de l'ellipse d'Hypathie telle qu'elle est montrée dans le film?"

Réponse de Michel Toulmonde : "L'ellipse est une figure géométrique bien connue à cette époque (intersection d'un cône et d'un plan), mais il n'est alors pas envisageable de penser que les trajectoires célestes sont des ellipses, car on ne considère que des mouvements circulaires. De plus, les variations annuelles du diamètre apparent du Soleil ne sont pas décelables à l'oeil nu. C'est seulement après avoir découvert ces variations que Kepler considérera des trajectoires elliptiques. Concernant la science en général, et ici la mécanique céleste, on a toujours deux entités présentes : observations et représentations d'un modèle mathématique, les deux doivent coïncider."

Question 3: "Je n'ai pas vu le manteau des philosophes cyniques, et j'ai constaté dans le film quelques inexactitudes historiques : celui qui est présenté comme l'Evêque serait plutôt platonicien que chrétien."

Réponse de Sophie Robert: "En effet, le film tente de retracer la vie de cette grande mathématicienne, grande astronome et grande philosophe, ce qu'il arrive à ne réaliser qu'en partie. Il faut savoir que les écrits d'Hypathie ont été perdus. Elle doute beaucoup dans le film alors qu'elle a été beaucoup citée par la suite et a été une vraie inspiratrice dans l'histoire des sciences. Elle est d'ailleurs la fille d'un homme de sciences (tout comme Marie Curie par ailleurs), baignant dans un milieu où la science s'enseignait à la maison, de manière familiale."

Question 4: " Comment calculaient-ils à l'époque? Comment écrire une racine cubique en chiffres romains?"

Réponse de Michel Toulmonde : "Il y a une différence entre calculer et compter. A Babylone, on n'utilisait pas le système décimal, mais un système numérique à base 60. A l'époque on utilisait essentiellement la géométrie, avec des fractions de nombres entiers simples (2/3, 4/5, 22/7...) ; par exemple, pour déterminer pi (3,14...), Archimède utilise des polygones. Ptolémée améliore la trigonométrie et met au point une table de cordes : dans un cercle, le sinus d'un angle au centre est la moitié de la corde de l'angle double (faites le dessin !). Dans le monde arabe, vers l'an 850, on crée à Bagdad la « Maison de la Sagesse » qui avait pour but de récupérer "les savoirs" de tous les pays, de la Chine à l'Egypte en passant par l'Inde, en les recopiant et les traduisant en arabe. Vers 1200 à Tolède, on traduit ces livres d'arabe en latin et l'Occident découvre les textes d'Aristote et de bien d'autres auteurs anciens. Ce sera la « renaissance » qui prend d'abord son essor dans l'art et l'architecture aux XIIIe et XIVe siècles. L'histoire a connu beaucoup de sang mais aussi de commerce : de nombreux livres circulent avec les marchandises échangées. Les chiffres arabes s'avèrent être plus simples à dessiner, et pour calculer, on a mis au point des algorithmes opératoires avec la numération positionnelle (il suffit de 10 chiffres pour écrire tous les nombres). Pour répondre à votre question concernant la racine cubique d'un nombre, on opère par encadrement en cherchant d'abord 2 nombres entiers dont les cubes encadrent le nombre donné, puis on recommence avec deux nombres plus proches, etc."

Question 5: "Il s'agit d'un simple conseil d'anthropologue mais je remarque que la parité n'est pas vraiment respectée pour ce débat..."

Réponse de Jean-Philippe Uzan et de Cédric Villani : "Nous avons vraiment essayé ... mais il faut savoir que le taux de refus est plus élevé chez les femmes que chez les hommes! Il n'y a que 40% de femmes et 2/3 de refus chez elles contre 1/3 chez les hommes. Nous y sommes attentifs mais ce n'est pas toujours réalisable."

Par Lydia Ben Ytzhak.