

Échos des Journées nationales

Paris, les 18, 19 et 20 novembre 2016

La belle réussite des Journées nationales 2016 organisées par l'APBG, en partenariat avec le CNRS et l'INSERM, démontre la volonté des professeurs de SVT, toujours aussi nombreux, de participer aux actions de formation et aux activités de l'APBG. Grâce à la liaison avec l'Enseignement supérieur et la Recherche, l'APBG développe, chaque année, une formation continue très importante, reconnue par le ministère et nécessaire pour les professeurs devant l'évolution rapide des nouvelles sciences. Jean Ulysse, qui nous a quitté quelques jours avant l'ouverture de ces Journées, avait su nouer des relations fortes et mener ces actions de formation continue avec le monde scientifique au plus haut niveau. Nous le remercions tous.

*Des dates à retenir pour 2017, à l'Université Paris-Descartes :
les 17, 18 et 19 novembre.*



Les Journées ont débuté par l'hommage rendu à Jean Ulysse par Serge Lacassie.



Ouverture des Journées avec Jean-Luc Teillaud, Inserm, Serge Lacassie, président de l'APBG et Frédéric Boccard, DAS CNRS

Une brève histoire de l'Univers

Bruno Guiderdoni

Bruno Guiderdoni, directeur de recherche au CNRS, est un spécialiste de la formation des galaxies. Il a dirigé l'Observatoire de Lyon de 2005 à 2015, et il est responsable scientifique du Laboratoire d'excellence LIO (Institut Lyonnais des Origines, « Programme Investissements d'Avenir »).



Après avoir redéfini les différents éléments structurant notre Univers : étoile, galaxie, planète, Bruno Guiderdoni a développé l'état des connaissances sur la formation de l'Univers, depuis la théorie de la relativité générale d'Einstein (1916), la découverte de l'expansion par Hubble en 1929.

Le Big Bang se définit par une singularité mathématique. C'est l'espace avec la matière et non la matière seule dans un espace déjà défini, qui est en expansion.

L'expansion est en accélération : cela serait due à la présence d'une matière et d'une énergie noires, non encore observées pour l'instant.

La structure de notre univers est définie par 6 paramètres.

Pourquoi ces valeurs ? Notre univers est-il le résultat d'une loterie cosmique ? (théorie des multivers).

Ces 20 dernières années ont été aussi celles de la découverte des exoplanètes.

Cela pose la grande question de l'apparition de la vie.

Résumé par Serge Lacassie

L'atmosphère, sa composition et ses mouvements
Prévisions météorologiques et projections climatiques
Projections climatiques globales et régionalisation

Catherine Freydl et David Pollack

Catherine Freydl : Ingénieur Divisionnaire des Travaux de la Météorologie, enseignante à l'Ecole Nationale de la Météorologie, département thématique « Météorologie, Climat et Statistique »



David Pollack : Ingénieur des Travaux de la Météorologie, responsable du département thématique « Météorologie, Climat et Statistique » à l'Ecole Nationale de la Météorologie



L'atmosphère, sa composition et ses mouvements

L'atmosphère terrestre est une couche gazeuse d'environ 600 km. Hormis l'eau, trois gaz sont majoritaires : le diazote, le dioxygène et l'argon. Chacun des gaz absorbe une partie du rayonnement qui le traverse et le transforme en chaleur. L'atmosphère est globalement opaque aux infra-rouges : l'énergie est piégée et porte la température de l'air à 12 °C au lieu des -18 °C théoriques : c'est l'effet de serre. D'autres gaz, bien que très minoritaires, ont un comportement spécifique pour la vie, tel que l'ozone qui absorbe les UV-B et UV-C très destructeurs.

L'eau est présente en quantité très variable et sous ses trois états, dans les quinze premiers kilomètres de l'atmosphère. Elle transporte beaucoup d'énergie dans le temps et dans l'espace grâce à ses changements de phase et sa très grande capacité calorifique. Comme la planète ne reçoit pas partout la même quantité d'énergie à cause de sa sphéricité, l'eau transporte beaucoup de cette énergie en fonction de gradients méridiens vers les pôles. Une part est prise en charge par les grandes gyres océaniques (ex : Gulf Stream) et une autre part par les cellules de la circulation générale atmosphérique (ex : cellules de Hadley). Cependant, à côté de ces circulations horizontales de grande échelle, des mouvements verticaux (de convection) transportent l'énergie du bas (là où l'atmosphère est réchauffée par le sol) vers le haut (là où l'atmosphère émet ses infra-rouges vers l'espace). Tous ces gradients sont à l'origine du vent et des nuages.

La température moyenne de l'atmosphère décroît de 20 °C au sol à -70 °C au niveau de la tropopause puis augmente. Parfois dans la troposphère des inversions de température se produisent et conduisent à des blocages de circulation et des pollutions ponctuelles. En moyenne, les vents soufflent d'est en ouest aux basses latitudes et inversement aux moyennes et hautes latitudes. De plus, au niveau de la tropopause, il existe des jets subtropicaux très forts (150 km.h⁻¹). Celui de l'hémisphère nord est discontinu (reliefs). Au niveau vertical, les ascendances sont présentes massivement au niveau de l'équateur avec une variation méridienne saisonnière. C'est l'initiation des cellules de Hadley qui sont rompues en plusieurs

zones méridiennes à cause de la force de Coriolis. Naissent ainsi les alizés d'est. Les subsidences au niveau subtropical sont à l'origine des anticyclones (ex : Açores).

Prévisions météorologiques et projections climatiques

Les prévisions météorologiques sont régies par des équations non linéaires aux multiples inconnues. La difficulté majeure est la connaissance très précise des conditions initiales à l'origine du phénomène. Une erreur est rapidement amplifiée (effet papillon de Lorenz). Cependant, la construction mathématique de l'attracteur de Lorenz permet de prévoir une trajectoire (évolution de la météo) issue d'une condition initiale donnée.

La projection climatique se situe sur un autre plan : des modifications de paramètres (variations astronomiques de l'orbite de la planète, concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère) induisent un déplacement global de l'attracteur de Lorenz (ensemble des trajectoires issues des conditions initiales et décrivant une prévision météo). Toutes les trajectoires (prévisions météo) sont ainsi modifiées, quelques soient leurs conditions initiales (le moule des trajectoires change de forme et de place).

Projections climatiques globales et régionalisation

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC) produit régulièrement trois rapports : un sur les bases scientifiques du changement climatique, un sur les impacts, l'adaptation, la vulnérabilité et un troisième sur l'atténuation des phénomènes.

Les observations de carottes de glace permettent de reconstituer le climat du passé jusqu'à 800 000 ans. Dans ces carottes, on analyse, dans les bulles d'atmosphère ancienne emprisonnées, les concentrations de multiples isotopes et de poussières. Les sédiments lacustres et marins, la dendrochronologie, la palynologie et l'étude des coraux sont d'autres indices à observer. On constate que le réchauffement climatique est sans équivoque.

Cette connaissance du passé posée, des projections climatiques globales sont construites. Les paramètres nouveaux par rapport au passé sont pris en compte (paramètres anthropiques). Les différentes valeurs de concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère permettent de calculer quatre scénarios RPC (representative concentration pathways). Le plus modéré des quatre (RPC 2,6) prévoit un pic puis un déclin de l'augmentation de la température. Les trois autres scénarii prévoient une augmentation très significative de cette température (+2 °C pour la fin du XXI^e siècle). Les conséquences sur le niveau marin seront importantes, d'autant que l'inertie du phénomène est de l'ordre du millénaire.

La régionalisation des projections permet de prendre en compte les conditions locales (relief, vents régionaux, contraste terre-mer) et donc de définir des mailles plus étroites. Par exemple, en méditerranée, le réchauffement sera de supérieur à très supérieur à la moyenne. Les modèles mathématiques (ARPEGE, ALADIN) sont les outils utilisés.

Résumé par Rémy Thomas

Évolution : convergence adaptative et vision

Guillaume Lecointre

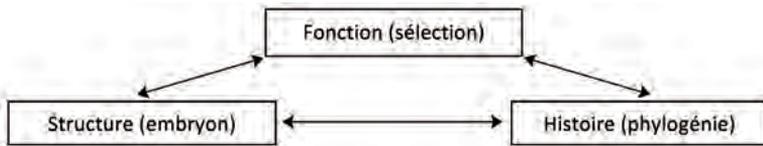
Guillaume Lecointre est enseignant-chercheur (UMR 7205), zoologiste, systématicien, professeur au Muséum national d'Histoire naturelle où il dirige le département de recherche « Systématique et évolution ». Ses recherches portent sur la phylogénie et la systématique des poissons téléostéens, tant à partir de données moléculaires qu'anatomiques.



L'idée de Guillaume Lecointre au cours de cette conférence fut d'amener progressivement son auditoire à l'idée que le terme convergence n'est pas singulier mais pluriel puisqu'il est le fruit de « jeux de mots » et non de processus biologiques.

Le concept de convergence est plutôt celui de la stabilisation d'un trait dans des populations sous l'effet de la sélection naturelle. En effet, selon Darwin, tout ce qui varie et se transmet est susceptible d'être sélectionné, et ce en étroite dépendance avec le nombre de petits dans la descendance (Lamarck en son temps a plutôt évoqué l'aptitude individuelle et pas celle des populations).

Pour chaque trait considéré, trois aspects doivent être considérés qui figurent de la manière suivante :



STRUCTURE					
F O N C T I O N	Similaire	Similaire et phylogénique	Similaire et non phylogénique	Phylogénique mais pas similaire	Non similaire ni phylogénique
		ANALOGIE HOMOGÉNIE	ANALOGIE HOMOPLASIE	ANALOGIE	ANALOGIE
	Différente	HOMOGÉNIE	HOMOPLASIE	HOMOGÉNIE	STRUCTURES NON COMPARABLES

Résumé par Annick Boulanger

Les micro-algues : évolution et biodiversité, photosynthèse et métabolisme carboné, potentiel pour un futur algo-sourcé

Éric Maréchal

Directeur de recherche au CNRS, agrégé de Sciences naturelles, responsable d'équipe au Laboratoire de physiologie cellulaire végétale à Grenoble, et président de la section Biologie végétale intégrative du Comité national de la recherche scientifique. Il s'intéresse au métabolisme des lipides chez les organismes photosynthétiques, microalgues et plantes terrestres, articulant recherches fondamentale et appliquée.



Les micro-algues assurent à elles seules 50 % de la production d'O₂ sur Terre. Afin de présenter leurs caractéristiques, Eric Maréchal situe les micro-algues par rapport aux cellules Procaryotes, Eucaryotes et l'hypothèse fondamentale de L.U.C.A. Se pose la question de la place de la photosynthèse au sein de ces groupes pour constater qu'elle est pratiquée par des cyanobactéries, des bactéries photosynthétiques, Procaryotes et des algues et plantes Eucaryotes. Il rappelle que leur point commun est le « cracking » de H₂O sous l'effet des photons notamment. Le chloroplaste est un organite dit secondaire puisqu'avec un deuxième système membranaire connecté à un réseau endomembranaire dynamique. Toujours dans le souci d'une classification de ces micro-algues, l'auteur évoque la nature spécifique des lipides des Archées face aux autres lipides bactériens et eucaryotes. Or, parmi les produits de la phase « sombre » il y a les glycérolipides constituant des membranes, les huiles à triacylgol, les phospholipides et les galactolipides. Ces derniers, sont les plus abondants sur Terre...

Le potentiel des micro-algues dont on comprend la richesse en lipides spécifiques, dépend donc de la recherche fondamentale sur le séquençage du génome (celui d'une diatomée à des fins de production d'origine transgénique), la connaissance systématique du phytoplancton (expédition Tara océan), l'industrie de la mise en culture... soutenue par celle du pétrole.

Il est à noter que la classification traditionnelle ayant placé des espèces parmi les Protozoaires du fait de l'absence de chloroplaste, revoit sa copie à partir de la nature des lipides que présentent ces espèces. Tel est le cas du *Plasmodium*, agent de la malaria, passé du statut de Protozoaire à Dinoflagellé. Que de perspective pour la Recherche !!

Résumé par Annick Boulanger

Hydrogène natif, une curiosité scientifique ou un enjeu pour l'énergie ?

Bruno Goffé

Directeur de recherche émérite au CNRS, Aix-Marseille Université, géologue minéralogiste, il est auteur de plus de 230 publications avec plusieurs brevets.



La croissance de la consommation des énergies fossiles et celle des émissions de gaz à effet de serre (37 Gt de CO₂ en 2015), le réchauffement climatique, les scénarios énergétiques à l'horizon 2050 convergent vers l'idée d'une société décarbonée (qui n'émet pas de CO₂) basée sur l'utilisation de l'hydrogène. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais un vecteur d'énergie sans carbone comme l'électricité.

L'hydrogène est l'élément le plus simple, le plus léger et le plus abondant de l'univers dont il constitue 90 % de la matière. A l'état gazeux (état normal), l'hydrogène est inodore, insipide, incolore et non toxique. L'hydrogène brûle aisément avec l'oxygène en dégageant des quantités considérables d'énergie (33 kWh) et en ne produisant que de l'eau.

Mais d'une part, l'hydrogène est hautement inflammable, explosif, difficile à stocker du fait de sa faible densité (il faut un volume de 11 m³ d'hydrogène pour stocker 1 kg d'hydrogène) et d'autre part, les obstacles économiques ne sont pas négligeables.

Dès 2007, la question de l'existence de sources naturelles d'hydrogène utilisable pour l'énergie était posée dans le domaine scientifique.

La campagne océanographique « Serpentine » de l'IFREMER sur la dorsale Atlantique révèle l'existence de sources naturelles de di-hydrogène (état naturel de l'hydrogène) au niveau des fumeurs noirs.

En milieu continental, il existe des sources de di-hydrogène dans les cratons (les trous de sorcière en Russie), dans les reliefs montagneux (les Alpes Ligures, en Oman). Cette production naturelle résulte de l'interaction de l'eau avec des roches du manteau terrestre.

En laboratoire (CNRS, 2013) des expériences ont été menées avec les laitiers d'aciérie contenant 20% de fer ferreux (équivalents des roches du manteau). Les résultats montrent une production de di-hydrogène en fonction de la température. D'autres expériences (CNRS, 2016) montrent que l'association de la production de di-hydrogène avec des coproduits (la calcite, la capture du CO₂ et la nano-magnétite) à partir de déchets ferreux semble être la meilleure voie de production d'hydrogène, par l'oxydation du fer et la réduction de l'eau, économiquement rentable.

Des sites pilotes d'exploitation ont été mis en place au Kansas et au Mali.

Résumé par Nicole Faure

Épigénétique

Christoph Grunau

Professeur d'université à Perpignan et responsable du groupe « Ecologie et Evolution des Interactions » dans l'unité « Interactions Hôtes Pathogènes Environnement ». Il travaille sur l'interrelation entre information génétique, information épigénétique et environnement, et son importance pour l'évolution rapide.



L'épigénétique est une information héritable et réversible (variable dans le temps et dans la vie de la cellule) qui contrôle l'activité des gènes. Par exemple, l'épigénétique explique pourquoi une cellule hépatique n'exprime pas les mêmes gènes qu'une cellule nerveuse.

Les porteurs de l'information épigénétique : notion d'épigénotype (4 grands mécanismes)

- **La méthylation de l'ADN** correspond à l'ajout d'une groupement méthyle (CH₃) sur le C5 de la cytosine, cela entraîne une répression (non-expression) du gène. D'autres mécanismes épigénétiques peuvent provoquer la répression. À l'échelle du génome entier, environ 5 % des cytosines sont méthylées. Ces méthylations peuvent être très stables dans le temps et sont héritables.
- **La modification des histones**, protéines liées à l'ADN qui forment la chromatine. Il existe une grande diversité des histones.
- **L'ARN non-codant** s'hybride à certaines portions d'ADN et entraîne alors la répression de certains gènes, mais aussi l'inactivation de chromosomes entiers !
- **La topographie du noyau ou « chromosome territoires »**. L'idée que les chromosomes sont disposés (hors division cellulaire) aléatoirement dans le noyau est fausse. Leur disposition détermine l'accessibilité de certains gènes rendant possible leur expression ou la non accessibilité des autres gènes, rendant alors impossible leur expression.

Épigénétique et phénotype

Il existe une régulation épigénétique. Par exemple, la méthylation de certains gènes, ou la non-méthylation d'autres, peut expliquer certains phénotypes particuliers comme la couleur panachée du pelage chez la souris Agouti. La notion de mutation génétique peut être également complétée par celle de mutation épigénétique. En effet, pour *Arabidopsis* il existe des épimutants aboutissant aux mêmes phénotypes que certains mutants « classiques ».

Épigénétique et santé

L'épigénétique peut également expliquer certains cancers. Des techniques de diagnostics sont basées sur l'analyse du taux de méthylation de l'ADN. L'alimentation peut également influencer l'épigénétique : par exemple, les folates (vitamines B) augmentent l'état de méthylation de l'ADN.

Épigénétique et évolution

L'épigénétique est également à prendre en compte dans l'évolution et en particulier dans la sélection naturelle. Les méthylations, les ARN non-codant, les protéines, mais aussi des micro-organismes (le microbiote) passent au crible de l'environnement. Par exemple, dans l'évolution des pinsons de Darwin, il y a autant de différences génétiques que épigénétiques.

Remarque de conclusion

Avec l'environnement d'aujourd'hui, on peut influencer la génétique de demain.

Résumé par David Boudeau

Médecine prédictive et génétique

Catherine Bourgain

Après une quinzaine d'années consacrées au développement de méthodes d'analyse statistique pour étudier la composante génétique des maladies humaines, Catherine Bourgain s'est tournée vers les sciences sociales. Elle étudie aujourd'hui la façon dont la génomique transforme les pratiques cliniques, fait bouger les limites entre soin et recherche et fragilise les régulations en place. Chargée de recherche à l'Inserm (CERMES3), elle est également membre du Comité d'Éthique de l'Inserm.



La médecine prédictive s'appuie sur l'évolution de la recherche médicale qui est passée de la génétique à la génomique : c'est-à-dire que ce sont plus les marqueurs et empreintes génétiques que les gènes qui sont identifiés et repérés dans le génome.

Le projet gigantesque et coûteux (3 milliards de dollars) du séquençage du génome humain, commencé en 1990, a permis aux industries des biotechnologies de se développer. Le séquençage est ainsi devenu automatique, rapide.

En outre la mise en évidence d'un polymorphisme au niveau d'une seule paire de bases de nucléotides entre individus (SNP, single-nucléotide polymorphism) permet de caractériser l'ADN d'une seule personne dans 5 millions d'endroits différents du génome et éventuellement déceler des maladies. De telles variations de l'ADN (105000 SNP) ont pu être reliées à la DLMA.

Mais ces variations de l'ADN sont si nombreuses qu'elles sont souvent difficiles à interpréter, d'où seul, le traitement de grandes bases de données permet parfois de déceler une, réellement liée à une pathologie. La génomique dépend donc de l'évolution des techniques et de l'informatique.

La génomique est actuellement utilisée pour les maladies rares, multifactorielles et les cancers. Mais elle n'est qu'une aide pour diagnostiquer les maladies multifactorielles comme pour la maladie de Crohn, ainsi les 71 variations génétiques associées à cette maladie n'expliquent que 20 % des cas.

Par contre la génomique permet une médication personnalisée. Un anticoagulant, la Warfarine a une réponse variable de la part des patients, l'efficacité de ce médicament dépend de 2 gènes, des tests génétiques pourraient aider à la prescription pour déterminer la posologie efficace de cette molécule.

Ainsi si la génétique et la génomique n'expliquent pas tout, elles sont toutefois pleines de promesses.

Remarque : la discrimination génétique à l'embauche ou lors d'une contraction d'une assurance par exemples est illégale aujourd'hui en France.

Résumé par Jean-Marie Gendron

**Stéréotypes de genre : impact sur la cognition
(mathématiques / raisonnement / habiletés visuo-spatiales)**

Pascal Huguet

Pascal Huguet, Directeur de Recherche (DR1) au CNRS, dirige actuellement le Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive (UMR CNRS 6024) sur le site Carnot de l'Université Clermont-Auvergne (UCA). Ses recherches portent sur la régulation sociale des fonctionnements cognitifs.



Pascal Huguet a rappelé en introduction que les stéréotypes de genre font que les femmes dans nos sociétés n'accèdent pas aux mêmes responsabilités que les hommes, et en particulier dans les métiers caractérisés par des études scientifiques « dures » : ingénieurs par exemple.

Les stéréotypes sociaux sont des croyances partagées déterminant des positions inductives ou déductives sur des catégories sociales.

Existe-t-il une véritable infériorité du sexe féminin pour les mathématiques ou est-ce une conséquence d'un stéréotype ?

Une conseillère de G.W. Bush, Camilla Benbow affirme que cette différence de capacité envers les mathématiques est biologique et liée à une imprégnation précoce de testostérone embryonnaire.

Mais les travaux de Steele sur le test d'entrée au lycée en mathématiques (SAT-M) montrent au contraire que le stéréotype est en action :

- si on présente les tests en annonçant que les résultats seront différents en fonction des sexes, les résultats sont à l'avantage des hommes ;
- si on ne dit rien, ou si on annonce qu'il n'y a pas de différence de résultats en fonction du sexe, les résultats ne montrent pas de différences.

Donc les hommes sont plus performants quand le stéréotype est activé.

L'étude française menée par Huguet et ses collaboratrices aboutit aux mêmes résultats : un test de mémoire de formes géométriques complexes est effectué sur des élèves de 6^e -5^e, ayant des bons résultats en mathématiques et en particulier en géométrie. Si on indique avec la consigne que le travail est un test de géométrie, les garçons sont plus performants que les filles ; si on donne l'information que le test est un jeu ou un travail en arts plastiques, c'est au contraire les filles qui sont meilleures que les garçons. Un test sur des élèves de 3^e aboutit aux mêmes résultats.

Se pose la question si l'inférence est repérable chez les femmes contre-stéréotypiques (femmes dans les grandes écoles d'ingénieurs).

Un test matrice de Raven a été mené : si on informe le groupe test que les résultats attendus ne présentent aucune différence entre les sexes, les filles sont plus performantes que les garçons ; si aucune information n'est fournie, ou si on prévient que les filles doivent mieux réussir que les garçons, alors les garçons sont plus performants.

Des tests sur des paires de jumeaux, monozygotes ou dizygotes, montrent des résultats similaires, permettant de conclure sur l'influence des stéréotypes plutôt que sur l'imprégnation à la testostérone.

Résumé par Serge Lacassie

La révolution CRISPR-Cas9 : histoire et applications de la modification ciblée des génomes

Érika Brunet

Chargée de Recherche Inserm en génomique et biologie cellulaire au Laboratoire Dynamique du Génome et Système Immunitaire à la fondation Imagine. Spécialiste des méthodes de ciblage du génome (comme les « ciseaux génétiques » CRISPR/Cas9), elle étudie les mécanismes de remaniements du génome impliqués dans de nombreux cancers et maladies génétiques.



Créée en 2012, cette innovation (prononcez l'acronyme « crispère ») consiste en une modification ciblée des génomes pour enlever, insérer ou remplacer une séquence d'ADN choisie. La technique nécessite un guide ARN modulable pour reconnaître la séquence d'ADN choisie, une protéine Cas9 qui est une nucléase s'associant avec l'ARN guide pour couper l'ADN à la façon d'un « bistouri moléculaire ». Le principe a été découvert lors de l'immunité acquise d'une bactérie pour se protéger de virus (des phages).

La technique peut être utilisée en thérapie pour corriger *ex vivo* des cellules, réaliser des souris transgéniques constituant des modèles pour des études de maladies génétiques. Le CRISPR/Cas9 est utilisable pour rendre des plantes résistantes à des maladies.

Il est possible de produire des cellules KO (Knock-out) qui n'expriment plus un gène en introduisant un codon stop ou des cellules Knock-in en corrigeant le gène défectueux.

Exemple de cellules KO dans la lutte contre le SIDA

Le récepteur CCR5 du LT CD4 facilite chez les malades l'entrée du VIH, la délétion $\Delta 32$ de ce récepteur procure une forte résistance à l'entrée du VIH chez des porteurs sains. On reproduit l'effet de cette mutation dans des cellules du sang du patient et on les réinjecte au malade. Des essais montrent une progression moindre du VIH.

Exemple de cellules KO dans la lutte contre le cancer du poumon

On modifie le génome d'un récepteur PD-1 qui entrave la reconnaissance de la cellule cancéreuse ; la cellule immunitaire LT cd4 reconnaît alors la cellule cancéreuse ce qui permet sa destruction ultérieure.

Exemple de cellules Knock-in en hématologie : la β -thalassémie

Chez les patients atteints de β -thalassémie, une délétion de 4 nucléotides (TCTT) induit l'inactivation du gène α HBB par l'apparition d'un codon STOP. On utilise le système CRIPR/Cas9 avec un guide ARN qui cible la région du gène muté et on introduit la matrice ADN qui corrige la délétion TCTT. Après modification, le gène HBB s'exprime. La modification est réalisée sur des cellules pluripotentes (IPS) issues de la peau et capables de se différencier *in vitro* en cellules hématopoïétiques-souches et en précurseurs érythrocytaires pour redonner des globules rouges efficaces.

Cette révolution moléculaire pose aussi de nombreux problèmes éthiques, car on peut également modifier des cellules germinales qui seront alors transmises à la descendance.

Le CRISPR/Cas9 est un outil moléculaire à fort potentiel thérapeutique.

Résumé par Gilbert Gisclard