

Impact à long terme des faibles doses de radiation sur les systèmes vivants

Quel est le rôle de la radioactivité dans l'évolution de la vie?

Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand: **V. Breton**, J. Castor, M. Coulon, N. Lampe, L. Maigne, P. Marin, P. Micheau, D. Sarramia

Laboratoire Microorganismes: Génome et Environnement: D. Biron, P. Marin

Laboratoire Adaptation et Pathogénie des Microorganismes: T. Hindré

Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan: S. Incerti

Laboratoire Souterrain de Modane: F. Piquemal, G. Warot, M. Zampaolo

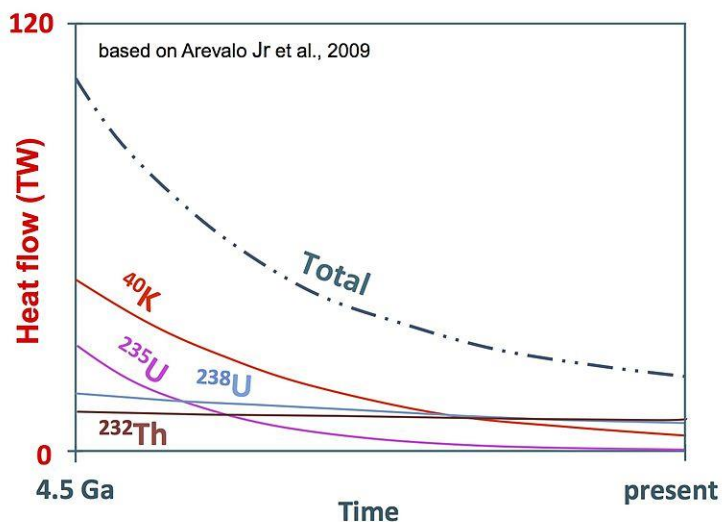
En collaboration avec: Département de Dosimétrie des Radiations de l'Institut de Physique Nucléaire de Prague

Institut de Physique Expérimentale et appliquée, Université Technique de Tchèque

Institut National Tchèque de Protection contre les Radiations



Partout où il y a de la vie, il y a de la radioactivité



La radioactivité est au cœur de tous les organismes vivants

^{40}K (fraction isotopique de 0,1167 %), isotope radioactif de période 1,248 milliards d'années



Apparition des premiers organismes multicellulaires: 600 millions d'années ou 2,1 Milliards d'années?

Fossiles découverts à 30 km des seuls réacteurs nucléaires naturels (Oklo, Gabon)

El Albani et al, nature 2010

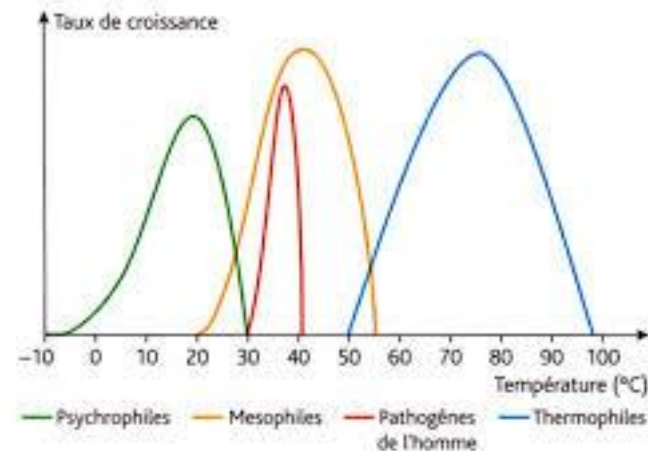
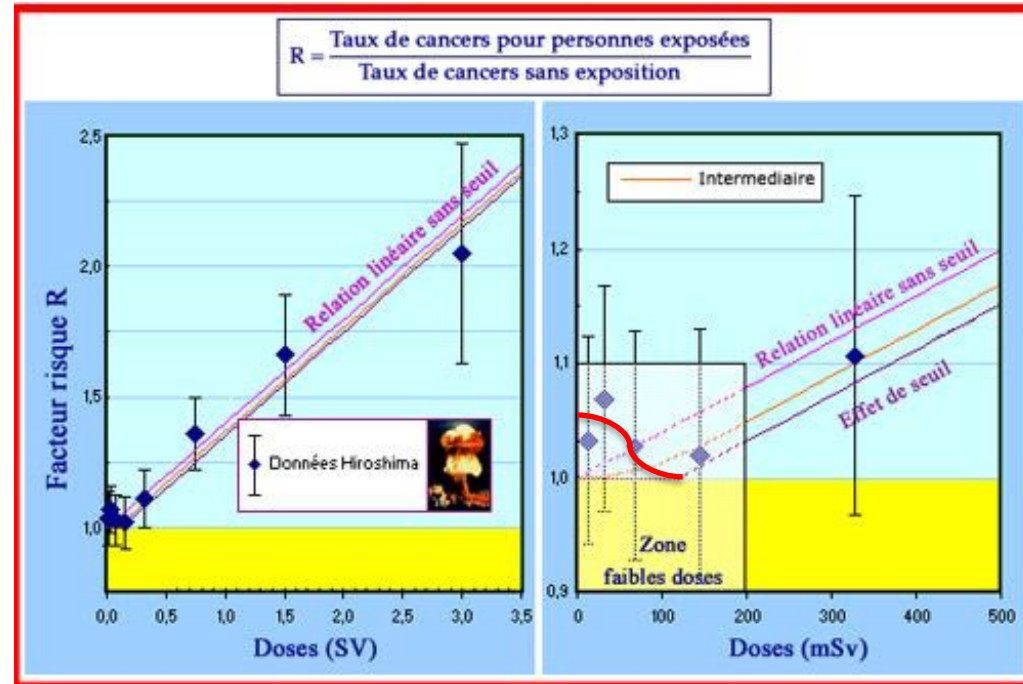


Que sait-on aujourd'hui de l'effet des faibles doses?

Modèle couramment utilisé: modèle linéaire sans seuil

pas privilégié par les données à faible dose

Le niveau de radioactivité optimal au développement de la vie est aujourd'hui inconnu



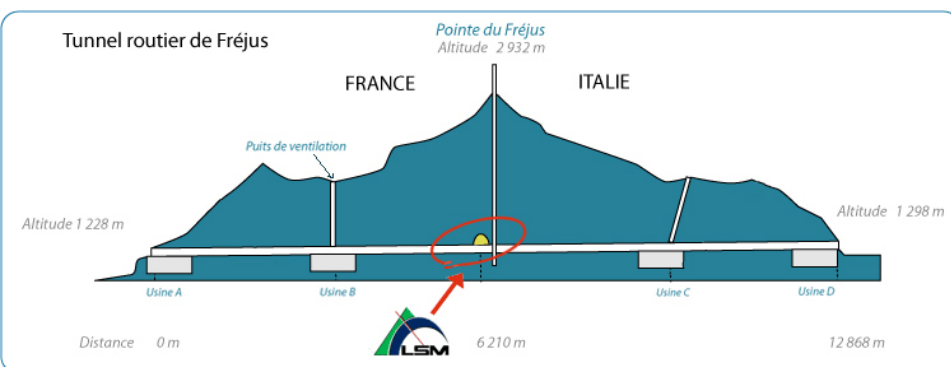
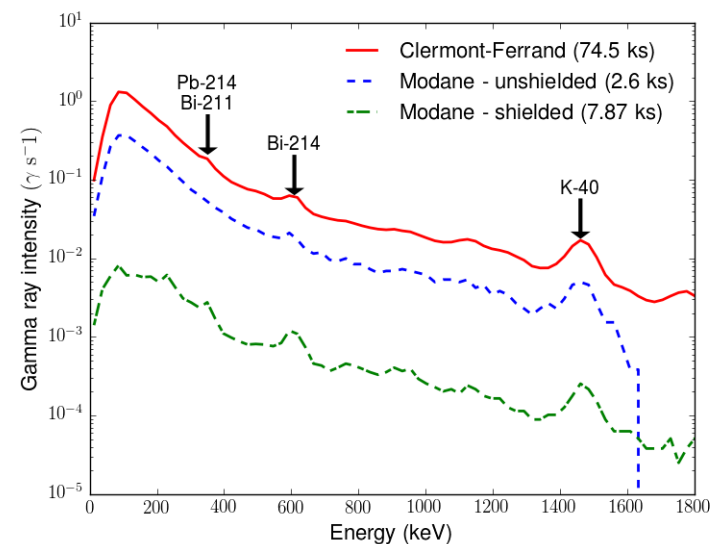
Le programme d'évolution expérimentale au Laboratoire Souterrain de Modane

Pourquoi au LSM ?

- Possibilité de travailler dans un environnement radiatif contrôlé
- Absence de rayonnement cosmique
- Possibilité de disposer de sources

Nécessité de contrôler les autres sources de radioactivité

- Radioactivité tellurique
- Equipements
- ^{40}K (cellules, milieu nutritif)



Le modèle biologique: *E. Coli*

Pourquoi *E. Coli*?

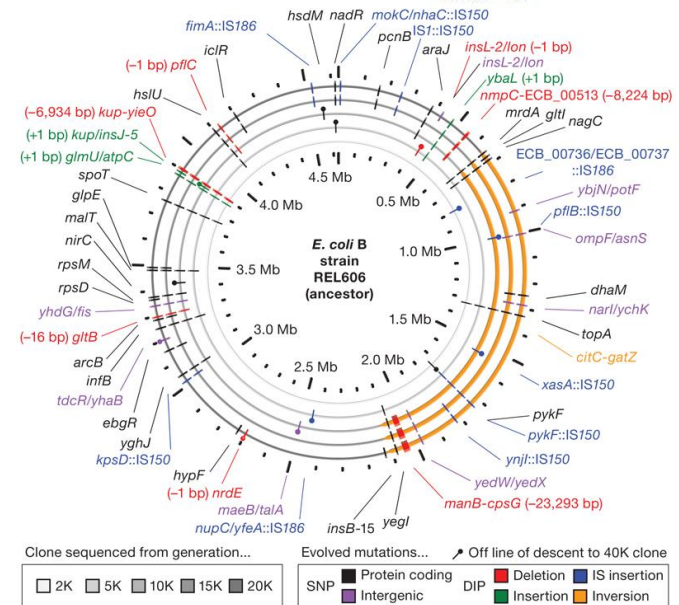
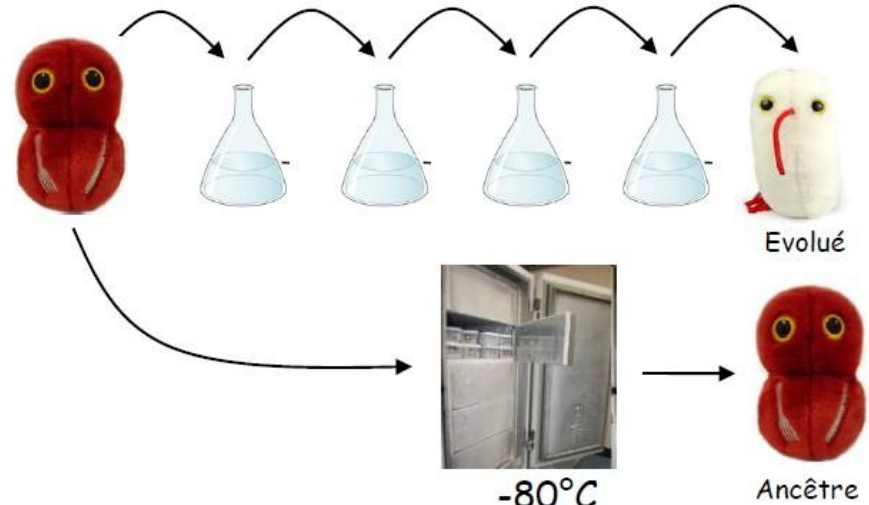
- Bactérie la plus étudiée
- Génome séquencé
- Evolution expérimentale documentée (gènes mutés)

Choix de la souche étudiée par R. Lensky *et al*

- Evolution documentée sur 40.000 générations depuis février 1988

Est ce que les souches évoluées au LSM vont suivre le même chemin évolutif?

- Si oui, à la même vitesse?



Mutations identifiées par séquençage du génome de 2000 à 20000 générations (Barrick *et al.*, Nature, 2009)

La salle de biologie du LSM

2014: équipement d'une salle de microbiologie

- Co-financements: Mission Interdisciplinaire du CNRS, GDR MI2B, EDF, collaborateurs tchèques
- Mise au point des protocoles biologiques au LPC

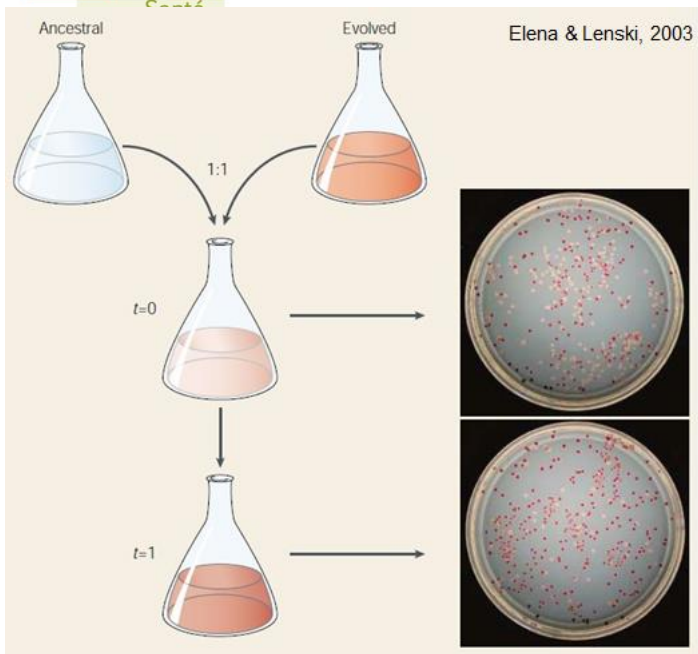
2015: démarrage de l'expérimentation au LSM à partir de mai

- Repiquage quotidien des souches (8,23 générations par jour)
- Au 26/1/2016: 12 lignées évoluées sur 600 générations
- Caractérisation biologique en cours (LAPM, LMGE)

2016: poursuite de l'expérience d'évolution jusqu'à 1000 générations

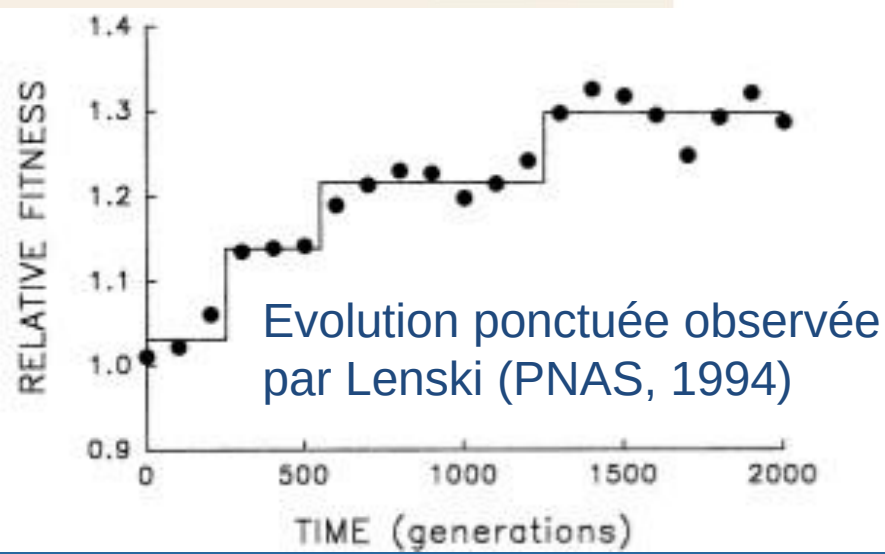


Modane – Scénarios possibles



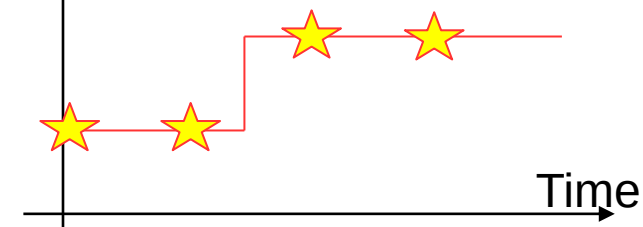
Trajectoire
attendue

★
Mesures à
Modane



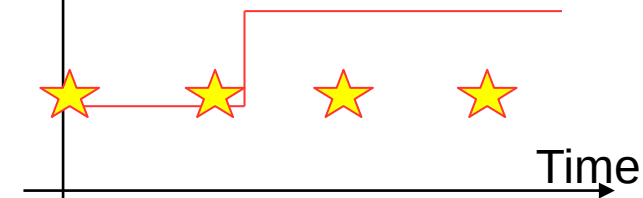
Fitness

Scénario 1: pas d'effet



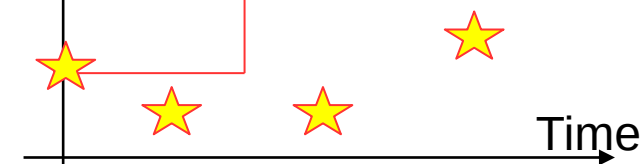
Fitness

Scénario 2: évolution
retardée

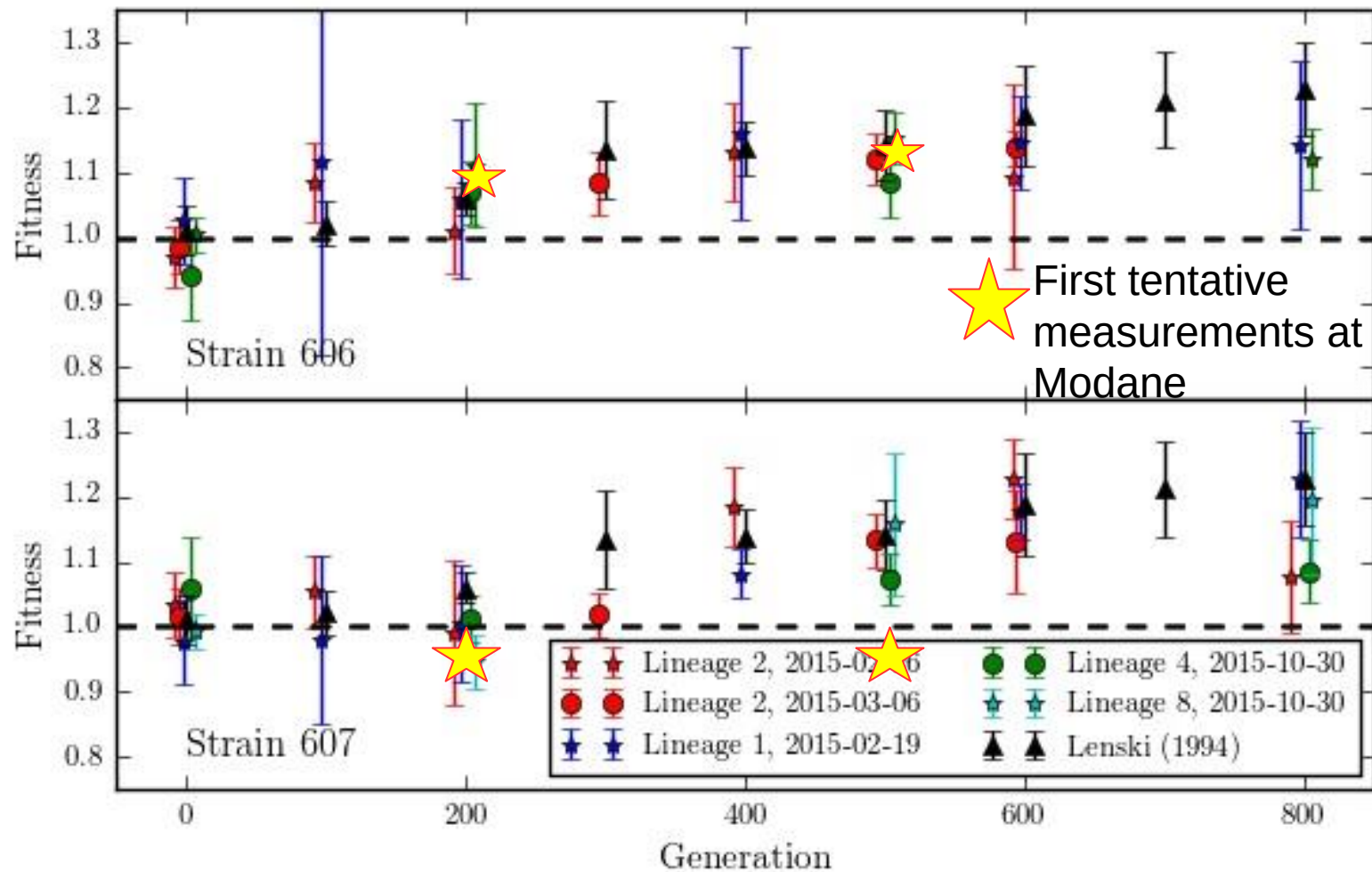


Fitness

Scénario 3: adaptation
avant évolution



Evolution des souches cultivées à Modane et au LPC (préliminaire)



Interprétation des résultats: importance de la simulation

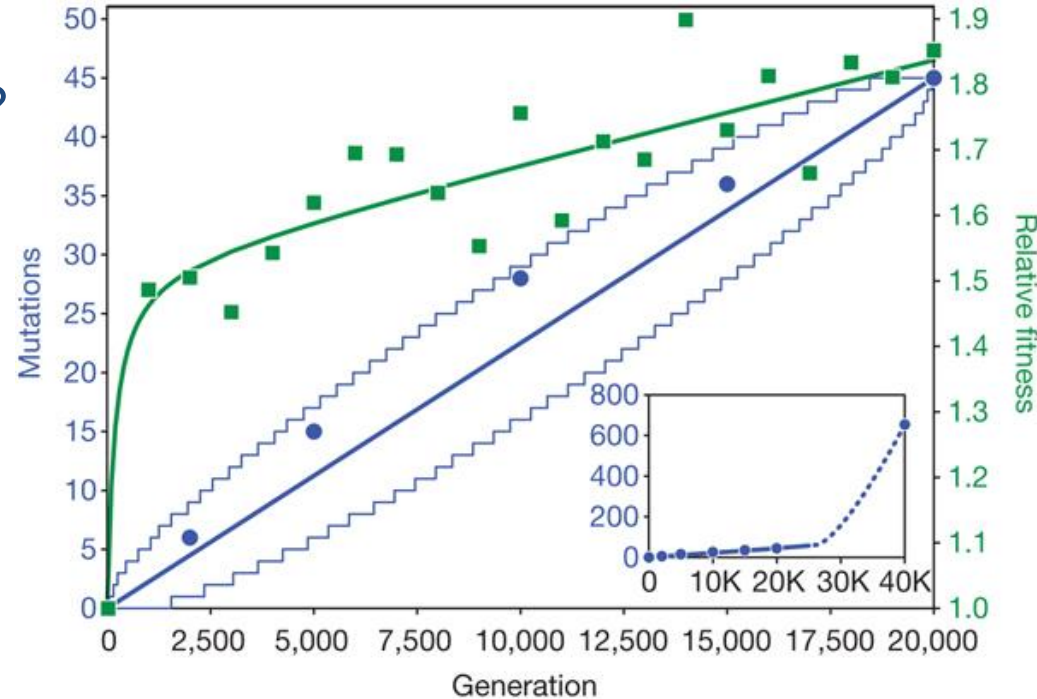
Faibles doses => comment mesurer l'exposition des bactéries?

Nombre très réduit de mutations positives observées par Lenski et al

Est ce que les mutations d'origine radiative jouent un rôle différent des mutations d'origine biologique dans l'évolution?

La simulation permet d'explorer ces deux questions

GEANT4 – G4DNA



Mutations positives (cercles bleus) en fonction du nombre de générations (Barrick et al, Nature 2009)

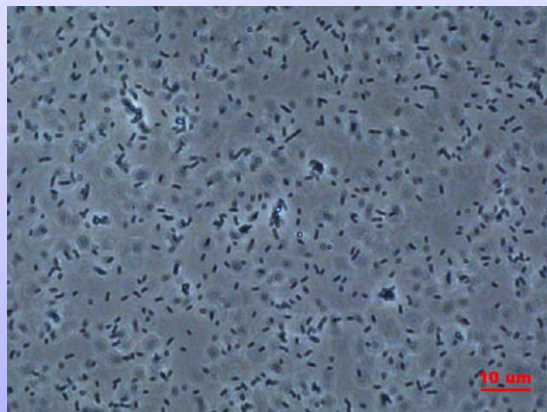
Simulation multiéchelles

Echelle macroscopique



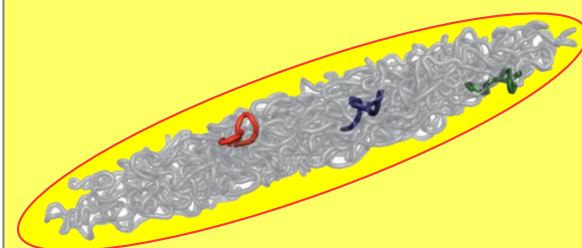
Entrée: termes sources
Sorties: dépôts d'énergie et spectres d'électrons secondaires

Echelle mésoscopique



Entrée: spectre d'électrons secondaires
Sorties: spectre des électrons à l'entrée et dépôt d'énergie dans les cellules

Echelle microscopique



Entrée: spectre des électrons à l'entrée des cellules
Sortie: dommages à l'ADN

Doses reçues par les bactéries

Source	Method	LPC Clermont (nGy hr ⁻¹)	LSM (nGy hr ⁻¹)	LSM (shielded) (nGy hr ⁻¹)
γ background	Dosimeter	150	20	<1
Cosmic rays (charged)	UNSCEAR	31	<<1	<<1
Cosmic rays (neutrons)	Simulation	4.4	<<1	<<1
⁴⁰ K (γ)	Simulation	0.13	0.13	0.13
⁴⁰ K (β)	Simulation	26	26	26
¹⁴ C (β)	Simulation	<<1	<<1	<<1
	Total	212	46	26

Dans les conditions d'expérimentation au LSM, le ⁴⁰K est la source dominante d'exposition des bactéries aux rayonnements ionisants (milieu nutritif Davis Medium)



Principaux résultats de la simulation

Dans les conditions de l'expérience à Modane

Seulement une bactérie sur 10000 impactée quotidiennement par les rayonnements ionisants (principalement par désintégration beta du ^{40}K)

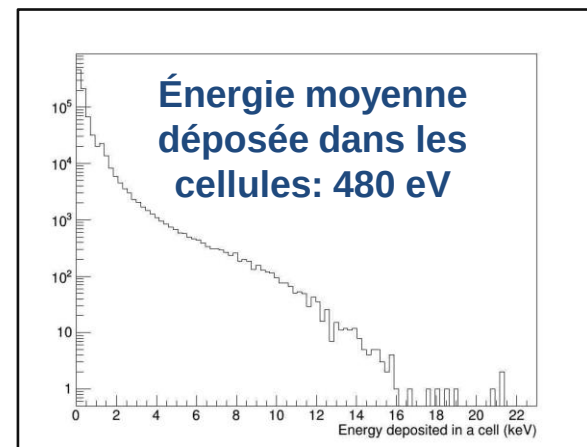
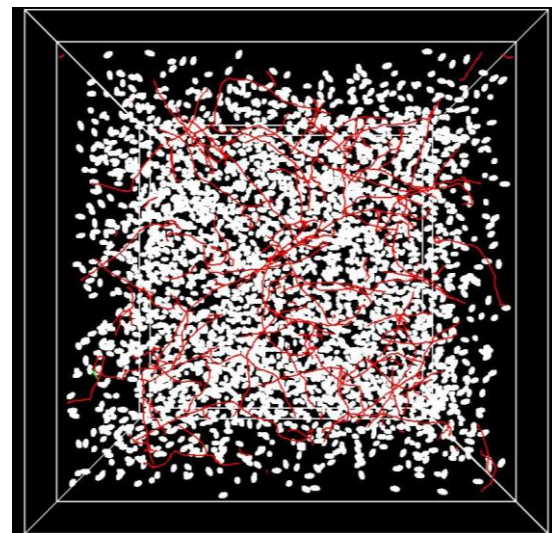
En moyenne, quelques centaines d'eV déposés dans les bactéries touchées par des électrons secondaires

Pour chaque puits, cela représente 75000 bactéries impactées quotidiennement directement

Dans les conditions normales de radioactivité

Environ une bactérie sur mille impactée quotidiennement par les rayonnements ionisants (bruit de fond gamma dominant)

A comparer à $6 \cdot 10^{-3}$ mutations par bactérie et par jour observée expérimentalement (Barrack, Nature 2009)



Conclusion et perspectives

La salle de biologie du LSM ouvre la porte à un programme sur l'effet des très faibles radioactivités sur le vivant

- premiers résultats sur l'évolution d'*E. Coli* attendus au printemps 2016
- réduction d'un facteur 8 de la radioactivité % surface
- expériences couplées à une modélisation des dommages à l'ADN
- caractérisation biologique: génomique (mutations), protéomique (réponse adaptative)

Perspectives vers les ultra-faibles radioactivités

- changer le milieu nutritif (mais chemin évolutif modifié)
- utiliser du potassium déplété en ^{40}K (mais très cher)

Autres voies prometteuses

- utilisation d'une source dans les mêmes conditions
- culture des bactéries avec de l'eau d'exhaure de mines d'uranium (en lien avec Zone-Atelier « Territoires Uranifères ») chargée en radioéléments

