

Dossier de recherche

Mise en perspective didactique

Pierre-Henry Suet

Agrégation externe spéciale

Lundi, 2 juillet 2018

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation
- 6 Transposition didactique
- 7 Conclusion

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation
- 6 Transposition didactique
- 7 Conclusion

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel**
- 3 Mes travaux de recherche
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation
- 6 Transposition didactique
- 7 Conclusion

Parcours universitaire et professionnel

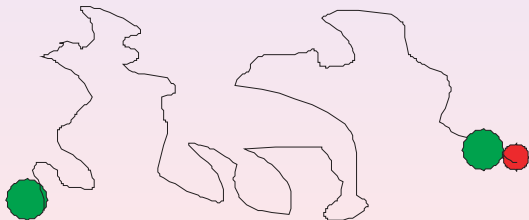
- **De 1999 à 2003** : Etudiant à l'Université Pierre et Marie Curie
- **En 2004** : Master en modélisation dynamique et statistique de systèmes complexes
- **De 2004 à 2007** : Doctorat au Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée
- **De 2008 à 2011**: Chargé de mission au Centre d'Analyse Stratégique (France Stratégie)
- **En 2011** : Master Métier de l'Enseignement de l'Éducation et de la Formation
- **De 2012 à aujourd'hui** : Professeur certifié de sciences physiques

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche**
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation
- 6 Transposition didactique
- 7 Conclusion

Introduction

Combien de temps faut-il pour un chercheur qui se déplace de manière aléatoire pour trouver une cible ?



Exemples

- Echelle microscopique: protéine cherchant un site cible sur l'ADN
- Echelle macroscopique: animaux cherchant de la nourriture

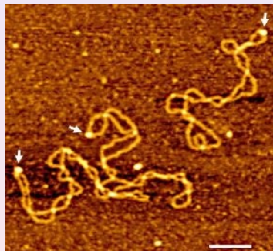
Idee : Le temps de recherche est le facteur limitant qui doit être optimisé

Quelle est la façon la plus rapide de trouver un objet caché au hasard ?

- recherche **systematique**

- recherche **intermittente**
= phases de recherche locales + des phases de déplacements rapides

Protéine cherchant un site cible sur l'ADN



ADN : plus de 10^5 paires de base

Site **cible**: quelques paires de base

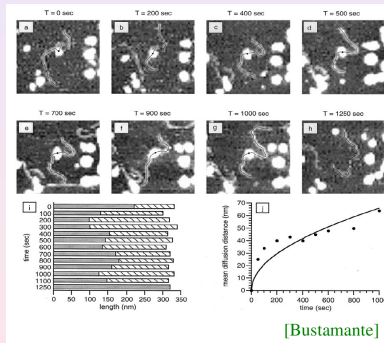
⇒ Recherche **difficile**

Temps de réaction après **diffusion 3D** $\sim \frac{1}{\text{rayon de la cible}}$

Temps de réaction après **diffusion 1D** $\sim (\text{longueur de l'ADN})^2$

⇒ **Modèle** : intermittence 1D/3D

Diffusion 1D



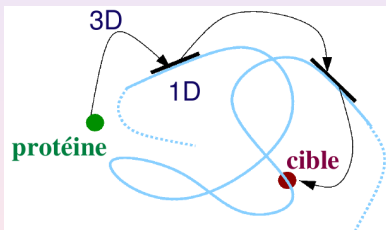
[Bustamante]

$$\langle t \rangle \sim \frac{L^2}{D} \text{ trop lent !}$$

Comment une protéine enzymatique trouve-t-elle son site cible sur l'ADN ?

Temps 1D

$$P_{1D} = \exp^{-f_1 t}$$
$$\langle t_{1D} \rangle = 1/f_1$$

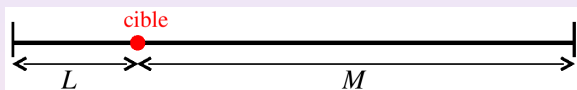


Temps 3D

$$P_{3D} = \exp^{-f_2 t}$$
$$\langle t_{3D} \rangle = 1/f_2$$

Hypothèse: pas de **corrélations** dans les excursions 3D
⇒ **position aléatoire** après chaque excursion 3D

Temps de premier passage sur la cible ?
Stratégie optimale par rapport à f_1 ?



$$\langle T \rangle = \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \left[\frac{\sqrt{\frac{\lambda_1}{D}}(L+M)}{\tanh(\sqrt{\frac{f_1}{D}}L) + \tanh(\sqrt{\frac{f_1}{D}}M)} - 1 \right]$$

$\langle T \rangle$ croît **linéairement** avec la longueur du brin d'ADN.

La **stratégie optimale** est vérifiée pour $f_1 = f_2$

Stratégie de recherche intermittente en écologie comportementale

Observations des animaux [Bell, O'Brien, Kramer]

- Des phases de **déplacement** alternent avec des phases de **recherche**
- Les durées de ces phases **varient largement** selon les espèces
- Il semble y avoir une **corrélacion** entre ces durées

Peut-on justifier ces observations par un modèle cinétique ?

Stratégie de recherche intermittente en écologie comportementale

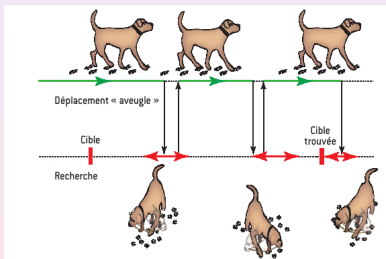
Observations des animaux [Bell, O'Brien, Kramer]

- Des phases de **déplacement** alternent avec des phases de **recherche**
- Les durées de ces phases **varient largement** selon les espèces
- Il semble y avoir une **corrélacion** entre ces durées

Peut-on justifier ces observations par un modèle cinétique ?

Modèle à 2 états (modèle 1D)

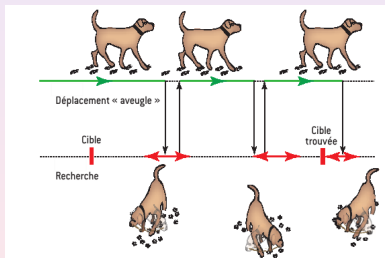
[PRL, (2005)], [J. Phys.: Cond. Matter, (2005)], [Physica A, (2005)]



- état 1: phase de recherche minutieuse
- état 2: phase de déplacement pur

Modèle à 2 états (modèle 1D)

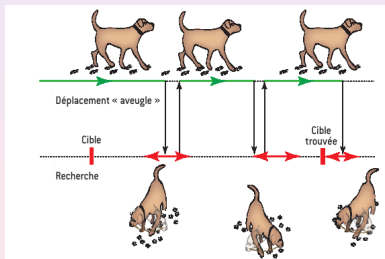
[PRL, (2005)], [J. Phys.: Cond. Matter, (2005)], [Physica A, (2005)]



- état 1: phase de **recherche minutieuse**
- état 2: phase de **déplacement pur**

Modèle à 2 états (modèle 1D)

[PRL, (2005)], [J. Phys.: Cond. Matter, (2005)], [Physica A, (2005)]



- état 1: phase de **recherche minutieuse**
- état 2: phase de **déplacement pur**

Modélisation du chercheur

- Phase 1 de durée T_1 : Déplacement diffusif :

$$\text{Prob}(T_1 > t) = e^{-f_1 t}$$

- Phase 2 de durée T_2 : Déplacement balistique :

$$\text{Prob}(T_2 > t) = e^{-f_2 t}$$

Modélisation du chercheur

- Phase 1 de durée T_1 : Déplacement diffusif :

$$\text{Prob}(T_1 > t) = e^{-f_1 t}$$

- Phase 2 de durée T_2 : Déplacement balistique :

$$\text{Prob}(T_2 > t) = e^{-f_2 t}$$

Modélisation du chercheur

- Phase 1 de durée T_1 : Déplacement diffusif :

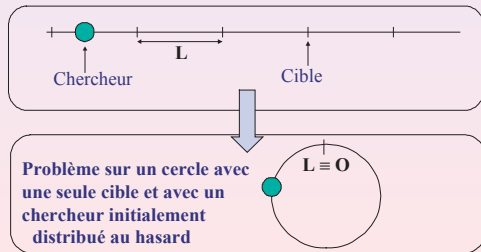
$$\text{Prob}(T_1 > t) = e^{-f_1 t}$$

- Phase 2 de durée T_2 : Déplacement balistique :

$$\text{Prob}(T_2 > t) = e^{-f_2 t}$$

Modélisation des cibles

- **Situation réelle:** cibles cachées en des sites inconnus, distribuées **au hasard**, avec une basse densité
- **Modélisation:** distribution **régulière** des cibles



Efficacité du processus de recherche

- Que vaut le **temps de recherche** $\langle T \rangle$?

$$\langle T \rangle \equiv \frac{1}{L} \int_0^L t(x, 1) dx$$

$\langle T \rangle =$ **Temps moyen de premier passage**

$L =$ distance entre les cibles

- Quelle est la **stratégie optimale** de recherche par rapport aux fréquences f_1 et f_2 ?

\Rightarrow Méthodes: équation **Fokker-Planck**

Mise en équations

En utilisant l'équation de **Fokker-Planck**, on obtient :

$$\begin{cases} D \frac{\partial^2 t(x,1)}{\partial x^2} + f_1 [t(x,2) - t(x,1)] = -1 \\ v \frac{\partial t(x,2)}{\partial x} + f_2 [t(x,1) - t(x,2)] = -1 \end{cases}$$

Avec des **conditions aux limites périodiques**:

$$\begin{cases} t(0,1) = t(L,1) = 0 \\ t(0,2) = t(L,2) \end{cases}$$

Temps de recherche

$$\text{Pour } L \gg \frac{v}{f_2}, \sqrt{\frac{D}{f_1}}, \frac{f_2 D}{\lambda_1 v}$$

$$\langle T \rangle \simeq \frac{L}{2v} \left(\frac{1}{f_1 \tau} + \frac{1}{f_2 \tau} \right) \frac{\tau^2 f_2^2 + 2f_1 \tau}{\sqrt{\tau^2 f_2^2 + 4f_1 \tau}}$$

où $\tau = \frac{D}{v^2}$

$\Rightarrow \langle T \rangle$ dépend **linéairement** de L !

Optimisation du temps de recherche $\langle T \rangle (f_1, f_2)$

- **Pas de minimum global** pour $\langle T \rangle (f_1, f_2)$
- mais f_1 est borné par f_{1max} (l'analyse des informations reçues par les organes sensoriels requiert un minimum de temps)
- alors $\langle T \rangle$ **est minimum** quand

$$\begin{cases} f_1 = f_{1max} \\ f_2^5 + \frac{6}{\tau} f_1 f_2^3 - \frac{8}{\tau^2} f_1^3 = 0 \end{cases}$$

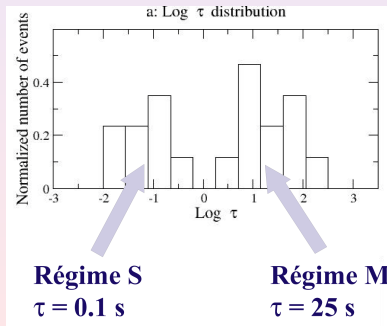
Lois d'échelle

- Si $f_{1max} \ll \frac{1}{\tau} \Rightarrow f_2 = \left(\frac{4}{3\tau}\right)^{\frac{1}{3}} f_1^{\frac{2}{3}}$
Régime **S** : plus de temps à chercher qu'à se déplacer
- Si $f_{1max} \gg \frac{1}{\tau} \Rightarrow f_2 = \left(\frac{8}{\tau^2}\right)^{\frac{1}{5}} f_1^{\frac{3}{5}}$
Régime **M** : plus de temps à se déplacer qu'à chercher

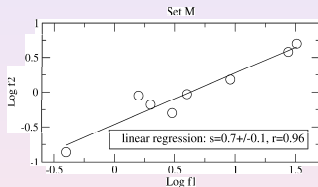
τ dépend a priori de la nature de l'animal

Stratégie Optimale / Comparaison Expérimentale 1

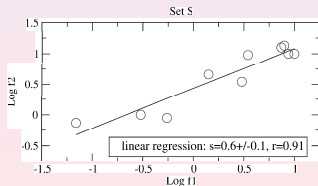
Données expérimentales : f_1 et f_2 pour 18 espèces animales
Histogramme de τ obtenu pour $f_2^5 + \frac{6}{\tau} f_1 f_2^3 - \frac{8}{\tau^2} f_1^3 = 0$



Stratégie Optimale / Comparaison Expérimentale 2



- $f_2 \propto f_1^{\frac{3}{5}}$ animaux passant plus de temps à se déplacer qu'à chercher



- $f_2 \propto f_1^{\frac{2}{3}}$ animaux passant plus de temps à chercher qu'à se déplacer

Conclusion

- Le temps moyen de premier passage $\langle T \rangle$ est un bon paramètre pour étudier les processus de recherche.
- L'intermittence est un processus très efficace pour optimiser la recherche
- Elle est observée à différentes échelles

Perspectives

- **Modèles très simples** à développer dans le cas non markovien
- Examiner le cas d'une **distribution aléatoire de cibles**
- Etudier les interactions entre **plusieurs chercheurs** et différentes cibles au moins numériquement.
- **De nombreuses applications** : moteurs moléculaires, cinétique enzymatique, biologie comportementale, recherche opérationnelle

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible**
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation
- 6 Transposition didactique
- 7 Conclusion

Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique

Organisme qui a pour mission de contribuer aux choix de politique publique, de réaliser un travail de prospective et d'aide à la décision.

- Evaluer les politiques publiques,
- Anticiper les évolutions de l'économie, de la technique, de l'environnement et de la société,
- Débattre, avec les partenaires sociaux, la société civile, les entreprises, les chercheurs, en France et à l'étranger,
- Proposer des orientations ou des réformes, en vue de préparer les politiques publiques de demain.

Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique

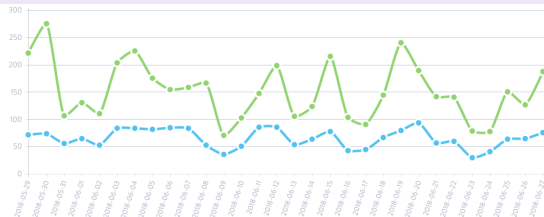
Sujets de mes [travaux publiés](#) :

- la biologie synthétique
- les interfaces cerveau-machine
- les microprocesseurs
- la révolution numérique
- les nouvelles mobilités
- et certains domaines actuels de recherche fondamentale en physique.

Mes activités d'enseignement

- Toutes les classes de la 5eme à la Terminale S
- Atelier club sciences, journée portes ouvertes
- Expérimentation de la classe inversée en seconde
- Site internet : ph-suet.fr
- Mise en place d'une [chaîne YouTube](#) où les élèves mettent leurs propres expériences

Analyse des visiteurs de mon site



Vos pages les plus visitées

Page	Visiteurs	Pages visitées
Troisième /collège/	511 👤	873 📄
Terminale S /lycée/	399 👤	830 📄
Fiches méthodes /fiches-méthodes/	324 👤	653 📄

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation**
- 6 Transposition didactique
- 7 Conclusion

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Un modèle n'est qu'une **approximation de la réalité** qui sert de simulation du monde réel en termes mathématiques. Il permet :

- de regrouper le plus de connaissances dont on dispose, à propos du système étudié, dans des équations qui sont définies de façon concises et précises
- de fournir un cadre formel unifié rendant compte des observations expérimentales et corroborant les conclusions tirées des expériences
- d'agir sur le système pour l'optimiser ou le contrôler au mieux

Qu'est-ce qu'un modèle ?

- d'étudier des systèmes complexes où de nombreuses variables, régulations, et contre régulations, interviennent.
- de faire des simulations numériques sans avoir à faire des expériences qui pourraient se révéler longues et coûteuses
- de déterminer l'influence qualitative et quantitative de chaque paramètres
- de poser des questions inaccessibles par l'expérience
- de prédire de nouveaux résultats et de suggérer des expériences de validation
- d'identifier les liens avec des phénomènes similaires se produisant dans d'autres contextes.

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation
- 6 Transposition didactique**
- 7 Conclusion

Transposition didactique

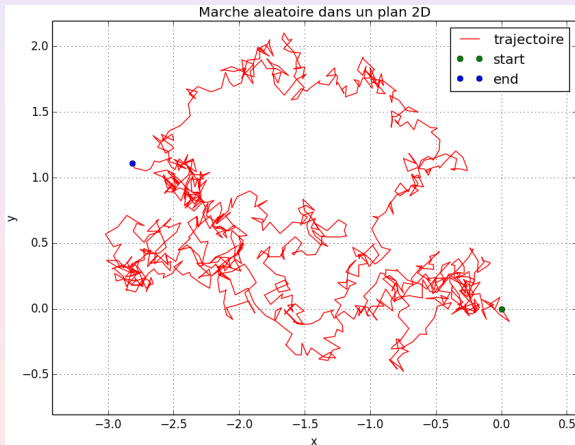
Passage du savoir savant au savoir enseigné

- Activités expérimentales variées : techniques, mesures, protocole
- Activités numériques : simulation, animation, calcul formel, représentation graphique
- La **contextualisation** des activités (vie quotidienne, métiers, industrie, recherche actuelle, histoire, films, jeux vidéos ...)
- Projets en petits groupes, ateliers scientifiques
- L'interdisciplinarité : thèmes de convergence
- Hors de l'école : films, expositions, musées, culture, livres
- Réinvestissement soutenu des connaissances acquises

Programme python d'une marche aléatoire

```
1 #!/usr/bin/env python
2 # -*- coding=utf-8 -*-
3
4 """ marche_aleatoire - 26.06.2018 """
5
6 from random import random
7
8
9 def marche_aleatoire():
10     """ Marche aléatoire dans un plan 2D """
11
12     # nombres de pas
13     npas = 1000
14     amplitude = .1
15
16     # liste pour les coordonnées
17     x = list()
18     y = list()
19
20     # initialisation
21     x.append(0.)
22     y.append(0.)
23
24     # marche aléatoire
25     for i in range(npas):
26         wx = 2. * random() - 1.
27         wy = 2. * random() - 1.
28         x.append(x[i] + amplitude * wx)
29         y.append(y[i] + amplitude * wy)
30
31     # représentation avec matplotlib
32     import matplotlib.pyplot as plt
33
34     plt.plot(x, y, "r-", label="trajectoire")
35     plt.plot(x[0], y[0], "go", label="debut")
36     plt.plot(x[-1], y[-1], "bo", label="fin")
37     plt.title("Marche aleatoire dans un plan 2D")
38     plt.axes().set_aspect("equal")
39     plt.grid()
40     plt.xlabel("x")
41     plt.ylabel("y")
42     plt.legend()
43     plt.show()
44
45 if __name__ == "__main__":
46     marche_aleatoire()
```

Programme python d'une marche aléatoire



Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Protéine cherchant un site cible sur l'ADN
 - Comportement de recherche des animaux
- 4 Rendre la science accessible
 - Mes travaux au Centre d'Analyse Stratégique
 - Mes activités d'enseignement
- 5 Vers un enseignement de la modélisation
- 6 Transposition didactique
- 7 **Conclusion**

Publications

[1] *Averaged residence times of stochastic motions in bounded domains* O. Bénichou, M. Coppey, M. Moreau, P.H. Suet, and R. Voituriez., *Europhysics Letters*, **70**, 42, (2005).

[2] *Optimal search strategies for hidden targets* O. Bénichou, M. Coppey, M. Moreau, P.H. Suet, and R. Voituriez., *Physical Review Letters*, **94**, 198101, (2005).

[3] *A stochastic model for intermittent search strategies* O. Bénichou, M. Coppey, M. Moreau, P.H. Suet, and R. Voituriez., *Journal of Physics: Condensed Matter*, **17**, 4275 (2005).

Publications

[5] *Intermittent search process and teleportation* O. Bénichou, M. Moreau, P.H. Suet, and R. Voituriez, The Journal of Chemical Physics , (2007).

[6] *Intermittent search process : Chance against Strategy* M. Moreau, O. Bénichou, C.Loverdo, P.H. Suet, and R. Voituriez, , (2007).

[7] Note de Veille 136/137 (juin 2009) - Analyse : *La biologie synthétique : de la bioingénierie à la bioéthique*

[8] Note de Veille 150 (septembre 2009) - Analyse : *Les interfaces cerveau-machine*

Publications

[9] Note de Veille 174 (mai 2010) - Analyse : *Les microprocesseurs : pour une stratégie industrielle européenne...*

[10] Note de Veille 188 (juillet 2010) - Analyse : *Les supercalculateurs, un impératif scientifique et industriel*

[11] Rapport : *La société et l'économie à l'aune de la révolution numérique (juillet 2009)*, La Documentation française

[12] Rapport : *Les nouvelles mobilités. Adapter l'automobile aux modes de vie de demain (novembre 2010)*, La Documentation française

Références

Viswanathan G.M., Buldyrev S.V., Havlin S., da Luz M.G.E., Raposo E.P., Stanley H.E., *Optimizing the success of random searches*, Nature, **401**, 911, (1999)

Berg O.G., Winter R.B., von Hippel P.H., Biochemistry **20**, 6929, (1981)

Blanco S., Fournier R., *An invariance property of diffusive random walks*, Europhys. Lett., **61**, 168, (2003)

Mazzolo A., *Properties of diffusive random walks in bounded domains*, Europhys. Lett., **68**, 350, (2004)