

Dossier de recherche - Mise en perspective didactique

Pierre-Henry Suet

1 Parcours

J'ai suivi mes études de physique-chimie à l'Université Pierre et Marie Curie. J'ai fait plusieurs stages en laboratoire; le dernier en master au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée au Collège de France en 2004, à l'époque dirigé par Pierre-Gilles de Gennes. Après avoir obtenu le master en modélisation dynamique et statistique de systèmes complexes, je me suis engagé dans un doctorat intitulé "*Poursuite aléatoire d'une cible et optimisation du temps de recherche*". Mes travaux de recherche ont été supervisés par MM. Michel Moreau et Olivier Bénichou, de septembre 2004 à juillet 2007 au sein du Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée à l'Université Pierre et Marie Curie. Conjointement, j'ai enseigné en monitorat au niveau L1 pendant 3 ans en travaux dirigés et travaux pratiques d'optique géométrique et d'électrocinétique.

Ensuite, j'ai travaillé, pendant 3 ans, (de 2008 à 2011) au Centre d'Analyse Stratégique (aujourd'hui appelé France Stratégie) au sein du département "Développement Durable", mon travail consistait à analyser les évolutions de la société française, qui relèvent du développement durable ou des nouvelles technologies et anticiper les questions qu'elles posent à moyen terme, afin de préparer les conditions de la décision politique.

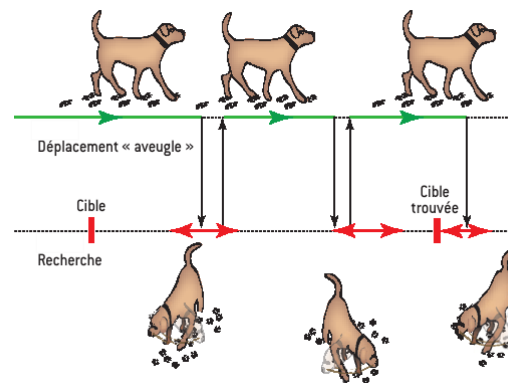
Après avoir obtenu le Master Métier de l'Enseignement de l'Éducation et de la Formation à l'Université Pierre et Marie Curie, j'ai été admis au CAPES de physique-chimie en 2012, j'ai enseigné dans le public, pendant 2 ans, puis, de nouveau admis au CAFEP en 2015, j'enseigne depuis trois ans dans le privé. J'ai été admissible trois fois à l'agrégation externe (2011, 2012, 2015) et deux fois à l'agrégation interne (2017, 2018).

2 Travaux de recherche

Mes travaux de recherche ont consisté à réaliser des modèles analytiques et numériques utilisant des processus stochastiques appliqués à la biologie et à la cinétique réactionnelle, j'ai eu à cœur de les confronter à des données expérimentales afin d'adopter une démarche scientifique complète. L'ensemble de ces travaux est, en fait, le fruit d'un va-et-vient régulier entre une phase de modélisation de ces systèmes physico-chimiques et une seconde phase plus technique, motivée par la première, d'étude de certaines propriétés générales des marches aléatoires appliquées à la cinétique réactionnelle. En particulier, nous sommes intéressés à l'étude des processus stochastiques de recherche mettant en jeu une variable aléatoire appelée **temps moyen de premier passage**. Il peut être mis à profit pour modéliser des phénomènes variés : temps mis par un prédateur pour trouver sa proie, temps mis par un facteur de transcription pour trouver une séquence spécifique sur l'ADN, temps nécessaire pour qu'un actif financier dépasse un certain seuil, temps de cyclisation d'une chaîne polymérique, temps d'émission d'un potentiel d'action par un neurone...

2.1 Modélisation du comportement de recherche de nourriture par certains animaux

Les nombreuses observations accumulées par les biologistes suggèrent que l'on peut décomposer, en première approximation, le comportement de recherche (nourritures, proies...) de certains animaux en deux phases élémentaires : une phase de déplacement rapide pour aller d'un endroit à un autre pendant lequel la proie ne peut pas être détectée et une phase de recherche proprement dite plus lente mais efficace. Ce mouvement intermittent, parfois qualifié de saltatoire, est facilement compréhensible dans le cas de cibles difficiles à détecter et peu abondantes. Et puisqu'un mouvement trop rapide altère significativement ses capacités de perception, l'animal doit chercher lentement. Puis, il se déplace rapidement pour pouvoir explorer un nouvel espace et cherche lentement encore. Et ainsi de suite...



Préalablement, à l'écriture du modèle, il a été nécessaire de réaliser d'importantes recherches bibliographiques afin de prendre en compte tous les aspects du système biologique étudié à la fois théoriques et expérimentales que nous en avons. En compilant les publications des biologistes pendant plusieurs mois, nous avons pu regrouper quelques mesures de ces temps de déplacement rapides et de recherche plus lents. Il s'en est suivi une réflexion théorique afin de retenir que les aspects essentiels du phénomène de façon à le schématiser avec une approximation raisonnable.

Nous avons choisi un modèle dynamique qui permet de décrire l'évolution au cours du temps d'un ensemble de variables et de définir des états du système et des transitions entre ces états, et surtout un modèle stochastique c'est-à-dire qui intègre une part d'aléa (données réelles bruitées, état initial inexact, fluctuation de l'environnement, variations individuelles).

Parmi les paramètres du modèle, nous nous sommes limités à la vitesse v de la phase balistique et au coefficient de diffusion D de la phase de recherche, non aléatoires dans la nature, ils seront pris comme fixes. Les fréquences f_i ou les temps τ_i passés dans chaque état varieront de façon aléatoire.

La grandeur physique que nous avons choisie dans nos différents modèles est le temps moyen de premier passage en fonction des λ_i . Les temps passés dans chaque état seront supposés markoviens, de moyenne $\tau_i = 1/f_i$. En effet, c'est le cas le plus simple où l'on considère que le chercheur n'a pas de mémoire. En particulier, cet état 1 est décrit comme un état diffusif, de coefficient de diffusion D . Cette hypothèse forte appelle plusieurs commentaires.

- Tout d'abord, décrire en détail la phase de détection de la cible va clairement bien au-delà du cadre de modélisation adopté ici. Cette phase comprend certainement des mécanismes biologiques complexes que nous ne prétendons pas décrire. Nous cherchons à extraire les caractéristiques essentielles de ces mécanismes du point de

vue cinétique (i.e. du point de vue du temps mis pour détecter la cible). Ainsi, la modélisation proposée est purement effective.

- Il est à noter que ce n'est pas nécessairement la position du chercheur qui obéit à un mouvement diffusif, mais plutôt le point de focalisation du sens mis en jeu dans la détection de la cible, par exemple le point de focalisation des yeux.
- Enfin, cette hypothèse est largement admise et couramment utilisée par les biologistes même si c'est une approximation de la réalité.

En supposant que ces temps mesurés correspondent bien aux durées moyennes utilisées dans notre modèle, nous avons essayé de modéliser par des lois de puissance les fréquences de recherche. Cette modélisation repose cependant sur une dernière hypothèse toujours discutée du point de vue des biologistes selon laquelle l'évolution aurait eu tendance à optimiser ces temps moyens de premier passage en fonction des paramètres : la vitesse v et le coefficient de diffusion D pour chaque phase.

Cette représentation microscopique d'un phénomène macroscopique nous a conduit à un modèle local stochastique à base d'équations différentielles ordinaires rétrogrades avec condition terminale prescrite.

Ainsi, en s'appuyant sur l'équation dite de Chapman-Kolmogorov vers le passé, la densité de probabilité de transition vérifie

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} p(\vec{r}, i, t | \vec{r}', j, t = 0) = & D_j \nabla_{\vec{r}}^2 p(\vec{r}, i, t | \vec{r}', j, t = 0) + v_j \nabla_{\vec{r}} p(\vec{r}, i, t | \vec{r}', j, t = 0) \\ & + \sum_k [p(\vec{r}, k, t | \vec{r}', j, t = 0) - p(\vec{r}, i, t | \vec{r}', j, t = 0)] W_{kj} \end{aligned}$$

- Terme de diffusion avec un coefficient de diffusion D ●
- Terme d'entraînement ou dérive (drift) avec une vitesse v ●
- Terme de sauts ou de transitions ●

A une dimension, nous avons calculé le temps moyen de premier passage en fonction des fréquences passées dans chaque état (recherche ou déplacement).

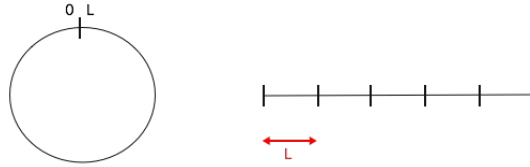
$$t(x_0, i_0) = \langle t | \vec{r}', j, t = 0 \rangle = \sum_{j=1}^n \int_0^{+\infty} t p(\vec{r}, i, t | \vec{r}', j, t = 0) dt$$

Ce dernier vérifie alors une équation du type

$$L_{i_0}^\dagger t(x_0, i_0) + \sum_i f_{ii_0} [t(x_0, i) - t(x_0, i_0)] = -1$$

avec $L_{i_0}^\dagger = D \partial_{xx} + v \partial_x$ et f_{ii_0} est le taux de transition d'un régime i_0 à un régime i . Les conditions aux limites sont : $t(x_0, i_0) = 0$ si $x_0 = 0$ et $i_0 = 1$.

Pour tenir compte du fait que le chercheur n'a aucune information *a priori* sur la position des cibles, nous supposons que la position initiale du chercheur est une variable aléatoire uniforme. On se ramène à un problème très simplifié avec une seule cible sur un cercle de longueur L , le chercheur étant initialement uniformément réparti sur ce cercle.



Afin de déterminer l'efficacité du processus de recherche défini précédemment, nous nous sommes posé les deux questions suivantes :

- Que vaut le temps de recherche défini comme le temps de premier passage sur la cible, moyenné sur la position initiale du chercheur ?
- Existe-t-il une stratégie de recherche optimale par rapport aux deux taux de transition f_1 et f_2 ? En d'autres termes, est-il possible de jouer sur les temps passés dans chacun des deux états de manière à être le plus efficace possible ?

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

avec les conditions aux limites périodiques : $t(0, 1) = 0$, $t(L, 1) = 0$, $t(0, 2) = t(L, 2)$ correspondantes à des cibles absorbantes en 0 et L .

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

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

où $t(x, i)$ = temps de premier passage et L = distance entre les cibles.

Dans la limite de basse densité, $L \gg \frac{v}{f_2}, \sqrt{\frac{D}{f_1}}, \frac{f_2 D}{f_1 v}$

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

où $\tau = \frac{D}{v^2}$

$\langle T \rangle$ dépend linéairement de L alors que le temps caractéristique de la diffusion est de l'ordre de L^2 .

L'étude analytique et numérique de l'optimisation de la solution générale mène aux deux cas limites suivants :

- Si l'espèce animale considérée est telle que $f_{1\max} \ll 1/\tau$, alors la relation optimale prend la forme d'une loi de puissance :

$$f_2 \sim \left(\frac{4}{3\tau} \right)^{1/3} f_1^{2/3}$$

Par ailleurs, il est facile de montrer que pour cet ensemble d'animaux (noté S pour searching), le chercheur passe plus de temps à chercher qu'à se déplacer.

- Dans la situation opposée où $f_{1\max} \gg 1/\tau$, la relation optimale prend une nouvelle fois la forme d'une loi de puissance :

$$f_2 \sim \left(\frac{8}{\tau^2}\right)^{1/5} f_1^{3/5}$$

Du point de vue numérique, l'exposant de cette loi de puissance est très voisin du précédent. On montre, en outre, que pour cet ensemble d'animaux (noté M pour moving), le chercheur passe en fait plus de temps à se déplacer qu'à chercher.

Notons que les préfacteurs mis en jeu dans ces lois de puissances sont a priori dépendants de l'espèce animale considérée.

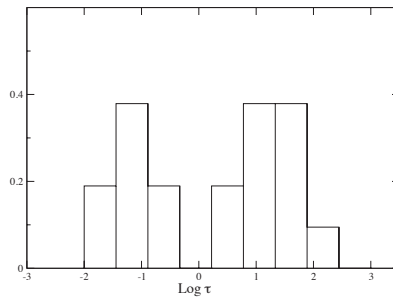


Figure 1: *Histogramme des valeurs de $\log(\tau)$ pour les animaux au comportement saltatoire. Le premier pic (autour de $\tau = 0,1$ s) correspond aux animaux appartenant au groupe S. Le second pic (autour de $\tau = 25$ s) correspond aux animaux appartenant au groupe M.*

En reportant les données expérimentales, on obtient un histogramme de $\log \tau$ qui est grossièrement celui d'une distribution bimodale. Le pic de gauche correspond à une valeur de τ de l'ordre de 0,1 s, alors que celui de droite correspond à une valeur de τ de l'ordre de 25 s. Un résultat surprenant est qu'en fait les animaux représentés par le pic de gauche sont ceux appartenant au groupe S défini précédemment, passant plus de temps à chercher qu'à se déplacer. Le pic de droite, quant à lui, correspond à l'ensemble des animaux, noté M précédemment, passant plus de temps à se déplacer qu'à chercher. Finalement, $\log \tau$ prend essentiellement deux valeurs, et est grossièrement constant pour chacun des deux ensembles d'animaux S et M.

Les courbes log-log des fréquences observées f_1 et f_2 sont présentées sur la figure ci-dessous. Les régressions linéaires effectuées pour chacun des ensembles d'animaux (S et M) montrent, d'une part, l'existence d'une corrélation raisonnable à l'intérieur de chacun de ces deux groupes (chaque point du graphe correspond à une espèce animale différente). D'autre part, la pente expérimentale 0,7 obtenue pour le groupe M (resp. 0,6 pour le groupe S) doit être comparée aux pentes théoriques 3/5 pour le groupe M (resp. 2/3 pour le groupe S). L'accord quantitatif est donc raisonnablement bon.

En conclusion, de nombreux animaux adoptent un comportement intermittent pour chercher de la nourriture. Nous avons proposé un modèle stochastique simple, qui s'appuie explicitement sur les observations qualitatives de ce comportement de recherche, et qui rend compte de manière satisfaisante des données quantitatives portant sur de nombreuses espèces animales. Ainsi, bien que les animaux considérés aient des aptitudes cognitives minimales (ni mémoire temporelle ni mémoire orientationnelle), cette stratégie intermittente optimale permet de réduire très significativement le temps de recherche, par rapport à la stratégie qui consisterait à ne pas interrompre la recherche minutieuse. Autrement dit, même si on a l'impression de perdre du temps dans des phases de déplacement aveugles, on peut en

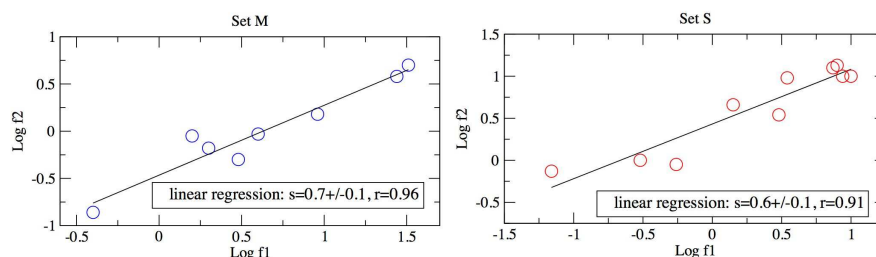


Figure 2: Courbes log-log de la fréquence expérimentale f_2 en fonction de la fréquence expérimentale f_1 : en haut animaux du groupe S et en bas, animaux du groupe M. Chaque point correspond à un animal différent. Les droites sont les régressions linéaires des points expérimentaux.

fait accélérer le processus de recherche. Ce temps moyen semble indépendant du détail de la modélisation de la détection de la cible. On peut se demander si il n'est pas une caractéristique fondamentale des processus de recherche intermittents qui ne dépend que de la dimension de l'espace. Cette économie comportementale va dans le sens d'une sélection par l'évolution qui pourrait expliquer l'observation de ces stratégies intermittentes dans de nombreuses situations allant de la recherche de nourriture par des animaux au problème de recherche d'une séquence cible par une enzyme sur l'ADN.

2.2 Des processus de recherche intermittente à la réactivité chimique

Dans cette partie, nous avons approfondi l'étude des recherches intermittentes et essayé de répondre aux questions précédentes de manière plus générale. Nous avons considéré quelques modèles toujours aussi simples reposant sur l'alternance entre différents régimes. Le chercheur reste des temps aléatoires dans chacun des états et ne trouve la cible que dans l'un des régimes. Pour chaque modèle, on a déterminé analytiquement le temps de premier passage à la cible. Après optimisation, nous avons eu une idée plus claire de l'avantage ou non à utiliser l'intermittence avec mémoire lors de la recherche d'une cible.

Il apparaît que l'intermittence n'est favorable que dans le cas des cibles cachées ou avec un stimulus faible pour lesquels il est nécessaire de perdre du temps pour mieux chercher.

Ainsi, en premier, on a vu dans le modèle balistique-balistique, que le temps moyen de premier passage est minimum pour une fréquence de recherche $f_1 = 0$ et une fréquence de déplacement f_2 aussi grande que possible. Dans le cas d'un modèle du même type que celui utilisé pour les animaux autrement dit un modèle diffusif-balistique avec mémoire orientée mais avec une cible étendue, on a pu obtenir une solution analytique mais son optimisation par rapport aux fréquences reste difficile à faire.

Pour celui avec une réaction imparfaite, il y a apparition d'une transition pour une des lois de puissance qui permet de différencier ce modèle de celui avec une réaction parfaite. Puis, nous avons envisagé les processus de recherche intermittent sans mémoire par le truchement de deux modèles à une dimension. Ces modèles trouvent leur application dans la réactivité chimique où le chercheur est une molécule qui n'a évidemment pas de mémoire.

Un paramètre-clé peut profondément conditionner l'étude du temps moyen de premier passage : le confinement. La question posée ici est la suivante : démarré d'une partie de la surface du domaine de confinement, combien de temps un marcheur aléatoire met-il pour revenir à cette même partie de la surface du domaine ? Motivé initialement par l'étude des trajectoires diffusives réalisées par des animaux (fourmis, blattes et autres insectes

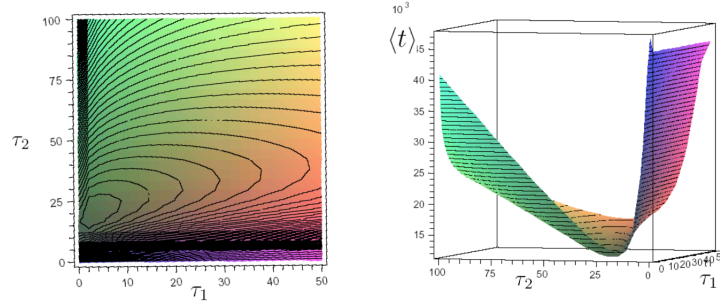


Figure 3: Temps de premier passage en fonction $\tau_1 = \frac{1}{f_1}$ et de $\tau_2 = \frac{1}{f_2}$ pour le modèle diffusif-balistique

rampants...) dans des conditions variables, nous avons étudié l'influence d'un confinement géométrique sur les temps de résidence et les propriétés de rencontre entre les partenaires d'une réaction chimique. A l'aide de l'équation de Chapman-Kolmogorov vers le passé, nous avons alors montré que les relations géométriques précédemment obtenues pour des marches de Pearson dans des domaines fermés, sont des cas particuliers de relations très générales entre les temps de résidence pour une large classe de processus stochastiques. Au delà des applications pour les trajectoires des animaux, de nombreux systèmes physiques sont concernés, tel que les processus de diffusion de neutrons.



On s'est, ainsi, intéressé à une succession de mouvements balistiques déterministes dans un domaine fermé V délimité par une frontière Σ , interrompus par des redistributions instantannées et isotropiques de la vitesse \vec{v} .

En tenant compte de l'influence du confinement géométrique pour des conditions aux limites générales, le temps de première sortie $\langle t_1 \rangle$ et le temps de résidence $\langle \tau_1 \rangle$ dans un sous domaine de volume V' vérifient

$$\langle t_1 \rangle_{\Sigma_{abs}} = \frac{\eta_d V}{v \Sigma_{abs}} \quad \text{et} \quad \langle \tau_1 \rangle_{\Sigma_{abs}} = \frac{\eta_d V'}{v \Sigma_{abs}}$$

où η_d est dépendant de la dimension. En généralisant, on trouve la relation entre les moments du temps de première sortie, et de temps de résidence.

$$\forall n \geq 1, \quad \langle t^{n-1} \rangle_V = \frac{\langle t_{n-1} \rangle_\Sigma}{n \langle t_1 \rangle_\Sigma} \quad \text{et} \quad \langle \tau^{n-1} \rangle_{V'} = \frac{\langle \tau_{n-1} \rangle_\Sigma}{n \langle \tau_1 \rangle_\Sigma}$$

Puis, nous avons étudié un processus de recherche intermittent combinant des phases de diffusion et de téléportation (repositionnement aléatoire) dans un système continu sphérique de dimension d .

A une dimension, la valeur optimale de f_1 est $f_1 \approx f_2$, d'où

$$\langle t \rangle_{min} \sim \frac{2b}{\sqrt{D}} \sqrt{\tau_2}$$

A deux dimensions, la valeur optimale de f_1 est $f_1 = \frac{f_2}{\ln(\gamma)} \left[1 - \frac{\ln(\gamma)}{\gamma} \right]$ avec $\gamma = \ln\left(\frac{a^2 f_2}{D}\right)$, d'où

$$\langle t \rangle_{min} \sim \frac{b^4}{4D} [\gamma + \ln(\gamma)]$$

A trois dimensions, la valeur optimale de f_1 est $f_1 = \frac{D}{a^2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{a^2 f_2}{D}} \right]^2$, d'où

$$\langle t \rangle_{min} = \frac{b^3}{Da} \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{f_2 a^2}{D}}}$$

En généralisant, on constate que l'intermittence permet de réduire le temps de recherche à 1 et 2 dimensions mais perd de son intérêt à plus haute dimension.

Ensuite, dans un réseau régulier, on a considéré un chercheur qui alterne entre deux régimes dynamiques :

- durant le régime 1, il réalise une marche aléatoire à temps continu entre deux bords réfléchissants avec une cible absorbante. Le taux de transition d'un point du réseau vers un autre point est $\frac{p}{2}$
- durant le régime 2, le chercheur est relocalisé sur n'importe quel point du réseau.

Pour une basse densité, $L \rightarrow \infty$, le temps moyen de recherche $\langle t \rangle$ peut être approximé par

$$\langle t \rangle = 2 \frac{f_1 + f_2}{f_1 f_2} \frac{1}{\sqrt{1 + 2 \frac{p}{f_1}}} L$$

La valeur optimale de f_1 est donnée par $f_1 = \frac{p}{p - f_2} f_2$.

Si $p \gg f_2$, la marche aléatoire est approximativement une diffusion et on trouve que $f_1 \approx f_2$, comme dans le cas continu à une dimension.

Le chercheur alterne des phases diffusives, durant lesquelles les cibles peuvent être découvertes, et des phases rapides (téléportation) qui relocalisent aléatoirement le chercheur, mais qui ne permettent pas de détecter les cibles. Nous avons montré que cette alternance peut être favorable pour minimiser le temps de première découverte, et que ce temps peut être optimisé par un choix approprié des temps d'attente de chaque mouvement. On a déterminé la stratégie de recherche optimale dans le cas continu et le cas discret. On a prouvé que l'intermittence peut permettre de réduire le temps de recherche considérablement si la nature physique du chercheur et de son environnement rend possible de réaliser une alternance entre deux régimes, chacun d'eux avec une très petite durée moyenne, comparé au temps caractéristique du système. Si c'est le cas, et si les durées moyennes de chaque régime vérifient certaines lois d'échelle, le temps de recherche peut être bien plus court que dans un régime purement diffusif. On a observé aussi que l'intermittence peut toujours être une stratégie efficace à une ou deux dimensions, mais ce n'est pas toujours le cas à plus haute dimension. Ces résultats peuvent être utiles dans le contexte de la catalyse hétérogène, ou dans de divers exemples biologiques de transport à travers les pores membranaires. Le cas d'une limite bidimensionnelle est fréquent en chimie dans le cas d'une catalyse hétérogène, ou dans la physique des milieux poreux.

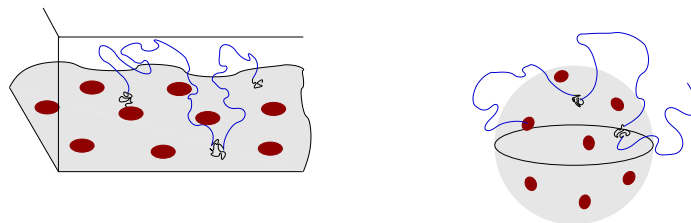


Figure 4: *Catalyse hétérogène (à gauche) et transport à travers une membrane cellulaire (à droite) en tant que processus de recherche intermittents.*

Un autre exemple vient de la physiologie : la respiration chez les mammifères peut être décrite par des molécules O_2 (réactants A) diffusants dans une unité d'échange gazeux, appelé acini, jusqu'à ce qu'elles soient adsorbées par un pore de la membrane. La biologie cellulaire fournit d'autres exemples d'une réaction du type $A + B \rightarrow B$. Certaines molécules (souvent ioniques) sont transportées à travers la membrane d'une cellule, ou même le cas d'une infection virale à travers la membrane cellulaire qui met en jeu un chercheur A (molécule ou virus) alternant des diffusions dans le milieu intercellulaire avec des phases adsorbées sur la membrane cellulaire avant d'entrer dans la cellule par une "porte" B (pore ou récepteur membranaire).

3 Rendre la science accessible

3.1 Travaux au Centre d'Analyse Stratégique (France Stratégie)

Après mon doctorat, j'ai été chargé de mission au Centre d'Analyse Stratégique. Il s'agit d'un organisme qui a pour mission de contribuer aux choix de politique publique, de réaliser un travail de prospective et d'aide à la décision. C'est à la fois un lieu de concertation au service du débat social et un outil de pilotage stratégique au service du Gouvernement. Directement rattaché au Premier ministre, il apporte son concours à l'élaboration des politiques publiques et à la préparation des réformes.

Ses missions consistent à :

- 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.

Pour remplir mes missions, mon activité se situait à l'interface entre la recherche, les politiques publiques et le débat social. Ainsi, j'ai été amené à visiter des laboratoires, à interviewer des chercheurs ou des entrepreneurs, à organiser des colloques autour d'un thème.

J'ai, ainsi, travaillé sur :

- la biologie synthétique
- les interfaces cerveau-machine

- les microprocesseurs
- la révolution numérique
- les nouvelles mobilités
- et certains domaines actuels de recherche fondamentale en physique.

3.2 Activités d'enseignement

J'ai pris goût à l'enseignement pendant le monitorat en dispensant des cours d'électrocinétique et d'optique géométrique en L1 pendant trois ans. Actuellement, cela fait 6 ans que j'enseigne en physique-chimie au collège et au lycée. J'ai effectué, également, plusieurs suppléances en mathématiques au lycée. J'ai déjà eu toutes les classes de la 5ème à la Terminale S, participé au TPE, corrigé les ECE, le Brevet, et le Baccalauréat. En seconde, j'ai expérimenté l'approche par classe inversée. J'ai enseigné au cours de stages de remise à niveau pour des élèves entrant en classes préparatoires PCSI.

En outre, j'ai réalisé un site internet ph-suet.fr accessible à tous contenant :

- Tous mes cours, feuilles d'exercice, diaporamas, fiches de révision et activités expérimentales de la 5ème à la Terminale S
- De nombreuses démarches d'investigation, tâches complexes et résolutions de problèmes
- Plus d'une vingtaine de fiches méthodes
- De nombreux liens vers des vidéos d'expériences
- Plusieurs cours universitaires
- Des modes d'emploi de logiciels utilisés au secondaire
- Des cours d'histoire des sciences.

Enfin, j'ai commencé une [chaîne YouTube](#) avec les élèves de Seconde où ils peuvent mettre en ligne leurs propres expériences qu'ils ont réalisées eux-mêmes.

Toujours afin de promouvoir la diffusion de la culture et de la science, j'ai été responsable d'un atelier pour des collégiens à la journée Portes Ouvertes. J'ai animé un atelier "Parlons science" avec le professeur de SVT destiné à des collégiens intéressés par les sciences. J'ai accompagné des élèves au CERN, au Palais de la découverte, aux journées "Fête de la science". Tout cela contribue, à mon sens, à enrichir la culture scientifique des élèves, ce qui leur sera nécessaire afin de mieux comprendre les enjeux scientifiques de demain.

4 Vers un enseignement de la modélisation

Au cours de mon expérience d'enseignement, j'ai pu ressentir une forme d'attente des élèves devant un enseignement dogmatique où les modèles sont présentés comme des évidences non questionnées, non rattachés à des problèmes à résoudre. Il me paraît, de plus en plus, essentiel d'enseigner la construction, l'adaptation des modèles avec les expériences au cours de la scolarité des élèves. Le recours aux simulations numériques où les élèves peuvent implémenter une partie des programmes et modifier certains paramètres s'avèrent souvent pertinents. De même, la contextualisation et l'établissement des liens avec les connaissances et les conceptions du quotidien des élèves est primordial pour éveiller leurs curiosités et alimenter leur envie d'apprendre. Ils doivent également pouvoir se confronter aux difficultés de la résolution d'un problème concret et donc à la nécessité d'en fournir un modèle pour mieux l'appréhender.

Voici les éléments caractéristiques d'un modèle que je choisirai de transmettre aux élèves. Tout d'abord, un modèle n'est qu'une approximation de la réalité qui permet de décrire le monde réel en termes mathématiques. L'utilisation des modèles permet :

- de fournir un cadre théorique unifié s'appuyant sur un formalisme mathématique concis et précis afin de rendre compte des observations expérimentales et corroborant les conclusions tirées des expériences
- de faire des simulations numériques sans avoir à faire des expériences qui pourraient se révéler longues et coûteuses afin d'explorer rapidement différents mécanismes dans une grande variété de conditions
- d'agir sur le système pour l'optimiser ou le contrôler au mieux
- d'étudier des systèmes complexes où de nombreuses variables, régulations, et contre régulations, interviennent.
- de déterminer l'influence qualitative et quantitative de chaque paramètres et d'identifier les paramètres de contrôle du modèle
- 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

5 Transposition didactique

La transposition didactique ne consiste pas à faire de la vulgarisation scientifique où la multiplication des moyens de communication sacrifie souvent la rigueur scientifique. Néanmoins, il s'avère nécessaire de connecter l'enseignement de la physique-chimie à celui des autres disciplines scientifiques et à des situations de vie réelles voire professionnelles. Nous avons d'un côté un savoir complexe issu de colloques et de publications scientifiques, avec des divergences évolutives et des remises en question, et de l'autre un savoir sorti de manuels et des professeurs parlant d'une seule et même voix suivant une progression plus ou moins univoque. Mon travail d'enseignant nécessite donc un important processus de transposition et de contextualisation. Par exemple, je peux faire appel à des éléments historiques voire biographiques en insistant sur la présence des hypothèses, des doutes, des difficultés jalonnant le parcours scientifique jusqu'à la découverte d'une nouvelle idée. Il est important que les élèves prennent conscience que l'élaboration du savoir scientifique n'est pas linéaire, qu'il résulte souvent d'une succession d'erreurs, de discussions passionnées et passionnantes qui peuvent s'étendre sur des siècles. Lors de la construction de ce savoir, n'oublions pas qu'une loi perd son sens lorsqu'elle se détache de son cadre théorique et/ou de la réalité qu'elle explique. Son degré d'explicitation peut être d'autant plus profond ses relations au modèle et à la réalité restent tangibles pour l'élève. Ceci est garanti en amont par la contextualisation et la familiarisation de l'élève au modèle où s'inscrira la loi, et prendra tout son sens lorsque l'élève y verra un outil pour décrire son quotidien.

Afin de favoriser la transposition du savoir savant au savoir enseigné, j'ai participé à l'encadrement de TPE, travaillé sur des thèmes de convergence au collège, préparé des formations dans ce domaine, pratiquer la réalisation de projets en petits groupes, favoriser le réinvestissement des connaissances acquises. De fait, les approches transpositionnelles constituent un levier efficace pour que les connaissances des élèves ne soient pas le résultat d'une réception passive, mais de leur activité cognitive.

6 Conclusion

Mes activités de recherche m'ont permis de m'approprier et d'adopter une démarche scientifique rigoureuse au travers de la modélisation de phénomènes biologiques et chimiques. Tout cela m'a conduit à développer un esprit d'analyse, de synthèse ainsi qu'une autonomie, une organisation et une capacité de travail coopératif au sein d'une équipe. Mon expérience dans le domaine de la programmation informatique et de la communication me seront également très utiles. En outre, j'ai pu me préparer à contextualiser, et à transposer didactiquement des domaines actuels de la recherche au service de la formation des élèves. En tant qu'enseignant agrégé, j'aurai d'autant plus à cœur que cette connaissance scientifique soit à la fois transmise, apprise et partagée (c'est-à-dire assimilée effectivement) ainsi que soit favorisé l'engouement des élèves pour les sciences.

Publications scientifiques

- [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).
- [4] *A stochastic theory for intermittent behaviour of foraging animals* O. Bénichou, M. Coppey, M. Moreau, P.H. Suet, and R. Voituriez., *Physica A*, **356**, 151 (2005).
- [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).

Publications au Centre d'Analyse Stratégique (France Stratégie)

- [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*
- [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