

Des structures de Turing à la chimiomécanique

Jacques Boissonade, Étienne Dulos et Patrick De Kepper

Résumé Après avoir rappelé le rôle du Pr. Pacault dans le développement des études sur les structures dissipatives chimiques, l'article est consacré aux structures spatiales qui se forment dans des systèmes réactionnels monophasiques maintenues hors d'équilibre par un apport permanent de réactifs. L'accent est d'abord mis sur les structures résultant d'un différentiel de diffusion et particulièrement des structures de Turing. Enfin, l'article donne un bref aperçu des structures chimiomécaniques, sous forme de mouvements mécaniques spontanés induits par des réactions chimiques bistables dans des gels chimio-sensibles.

Mots-clés Structures dissipatives, réaction-diffusion, dynamique non linéaire, structures de Turing, structures chimiomécaniques, bistabilité, gels stimulables.

Abstract **From Turing structures to chemomechanics**
After reminding the role played by Pr. Pacault in the development of studies on chemical dissipative structure, the article focuses on spatial structures that form in single-phase chemical systems kept far from equilibrium by a permanent feed of fresh reactants. Emphasis is set on concentration patterns that result from differential diffusion and more specially Turing structures. Finally, the article gives a short survey of chemomechanic structures, e. g. spontaneous motions induced in responsive gels immersed in bistable reactive media.

Keywords Dissipative structures, nonlinear dynamics, reaction-diffusion, Turing structures, chemomechanics, bistability, responsive gels.

Enseignant la thermodynamique et passionné par les concepts liés au temps et à l'évolution des systèmes, le Pr. Pacault s'est très vite intéressé aux travaux sur les processus irréversibles menés par l'école de Bruxelles, fondée par le Pr. Prigogine, ainsi qu'aux premiers développements sur les réactions chimiques oscillantes. Dès le début des années 70, il fonde au Centre de Recherche Paul Pascal (CRPP) un groupe d'étude qui va apporter plusieurs contributions décisives à la discipline. L'activité de ce groupe s'est poursuivie jusqu'à ce jour, contribuant aux importantes évolutions de ce domaine de recherche. Jusque vers la fin des années 80, cette activité reste essentiellement centrée autour des systèmes homogènes et des réactions oscillantes.

Le premier pas décisif sera de promouvoir l'usage systématique comme outil expérimental du réacteur continu agité (CSTR suivant l'acronyme anglo-saxon). Ce dispositif, bien connu des ingénieurs, était paradoxalement quasiment ignoré de chercheurs qui prétendaient étudier dans des réacteurs fermés des mécanismes supposés se dérouler loin de l'équilibre. Or en milieu fermé, le système évolue inexorablement vers l'équilibre. Au contraire, par un apport continu de réactifs et l'évacuation des produits, le CSTR permet de maintenir effectivement le système loin de l'équilibre de façon contrôlée. Grâce à ce dispositif, les travaux menés dès lors au CRPP sur les relations entre bistabilité et oscillations seront ainsi à l'origine de la découverte de nombreuses réactions oscillantes, non plus par le fait du hasard mais comme aboutissement d'un processus de construction systématique. Dans les années 80, le laboratoire va également jouer un rôle très important dans l'étude du chaos, en faisant de la réaction chimique l'un des meilleurs prototypes de système dynamique conduisant à ce phénomène alors très en vogue dans tous les domaines, des mathématiques jusqu'à la biologie. La discipline s'élargit, s'inscrivant dans le vaste

champ des sciences non linéaires. Organisateur de trois grands congrès internationaux, le groupe dirigé par Adolphe Pacault établit des collaborations suivies avec d'importantes équipes étrangères, en particulier avec les Universités américaines de Brandeis et du Texas à Austin, de Dortmund en Allemagne, avec plusieurs équipes hongroises et surtout avec le groupe bruxellois fondé par Ilya Prigogine, collaboration qui se poursuit encore aujourd'hui. Conscient de l'importance des solutions numériques dans l'étude des systèmes complexes, A. Pacault dote très tôt le laboratoire d'un équipement informatique performant qui permet de mener en parfaite symbiose expériences et simulations en prévoyant souvent des résultats majeurs.

À partir de la fin des années 80, sous l'impulsion de quelques-uns des derniers élèves du Pr. Pacault, l'activité s'oriente vers les structures spatiales, puis la chimiomécanique. C'est à ces aspects plus récents qu'est consacré le corps de cet article. Dans tout ce qui suit, nous excluons les ondes propagatives d'excitation telles que structures cibles ou ondes spirales produites par la réaction de Belousov-Zhabotinsky [1]. Ces ondes résultent de la propagation, sous l'effet de la diffusion, d'un pic d'excitation qui trouve sa source dans une dynamique temporelle. On exclura également les structures au sein de systèmes multiphasiques comme celles associées à des transitions de phase (anneaux de Liesegang) ou à des effets aux interfaces (effet Marangoni).

Les structures de Turing

Principes généraux

Dès 1952, Turing a prévu l'existence de structures stationnaires résultant de la seule compétition entre réaction et diffusion dans un système chimique maintenu loin de l'équilibre [2]. Elles se traduisent par une distribution des concentrations qui brise les symétries naturelles du système.

Elles reposent sur un paradoxe apparent car la diffusion devrait tendre à gommer toutes les fluctuations locales du système et à s'opposer au développement d'instabilités spatiales briseuses de symétrie. Turing a montré que lorsque certaines conditions sont remplies, le couplage réaction-diffusion ne conduit pas nécessairement à une telle homogénéisation.

La première est que le mécanisme réactionnel mette en jeu une boucle de rétroaction positive (processus dit « d'auto-activation »). Ce peut être une autocatalyse (lorsque la concentration d'une espèce accélère sa propre production) ou une inhibition par substrat (lorsque la diminution de sa concentration accélère sa propre consommation). La seconde condition est l'existence d'une rétroaction négative, comme la production d'un inhibiteur en concurrence avec l'espèce activatrice. Ces deux premières conditions sont précisément celles déjà nécessaires à l'apparition d'oscillations dans les systèmes homogènes. La troisième condition nécessaire à la formation d'une structure spatiale porte sur les coefficients de diffusion. On peut la comprendre aisément, sur la base d'arguments heuristiques, dans le cas d'un mécanisme activateur/inhibiteur. L'espèce inhibitrice doit diffuser plus vite que l'espèce activatrice : c'est une « inhibition à longue portée ». Dans ces conditions, une fluctuation locale correspondant à un petit excès d'activateur s'amplifie rapidement. En effet, puisque l'inhibiteur, produit simultanément par la réaction, diffuse rapidement en dehors de la zone de croissance de l'activateur, il ne s'oppose pas au développement d'un pic localisé de cette espèce et contribue même à ralentir la réaction autour de cette zone. De la sorte, le système devient instable vis-à-vis des perturbations spatiales (figure 1). Si cette instabilité précède celle qui conduit à des oscillations homogènes, les diverses fluctuations se développant dans l'espace, conjuguées au caractère non linéaire des interactions, peuvent conduire à une organisation stationnaire et périodique du champ des concentrations. Ces structures qui brisent spontanément la symétrie du système sont qualifiées de « structures de Turing ». Le raisonnement ne met en jeu ni la taille, ni la géométrie du système et, de fait, la longueur d'onde est intrinsèque : elle ne dépend que des concentrations, des constantes cinétiques et des coefficients de diffusion. Cette propriété a fait souvent invoquer ces structures comme source de morphogenèse dans les systèmes biologiques [3]. Si les mécanismes activateur/inhibiteur y sont nombreux et les différentiels de diffusion appréciables, la complexité de mécanismes mal compris et le contrôle très imparfait des processus n'ont pas permis de mise en évidence expérimentale convaincante dans le domaine biologique. *A contrario*, dans le domaine inorganique, si l'on connaît bien quelques réactions qui remplissent les conditions cinétiques, les coefficients de diffusion des petites molécules mises en jeu sont tous comparables ($\sim 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), le seul ion diffusant rapidement (H^+) jouant en outre généralement un rôle d'activateur. Par ailleurs, le maintien hors d'équilibre en tout point du système pose problème. C'est la raison

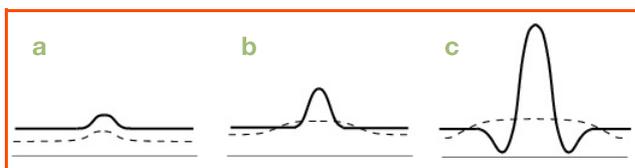


Figure 1 - Croissance d'une fluctuation dans l'instabilité de Turing. Ligne continue : activateur ; ligne pointillée : inhibiteur.

pour laquelle ces structures sont longtemps restées expérimentalement inaccessibles bien que de nombreux modèles plus ou moins formels aient été discutés [1, 3].

Mise en évidence expérimentale et modélisation

Les structures de Turing ont été mises en évidence pour la première fois fin 1989 au CRPP [4] avec la réaction [chlorite-iodure-acide malonique] et sa variante [dioxyde de chlore-iode-acide malonique], traditionnellement désignées par leurs acronymes anglo-saxons CIMA et CDIMA. Afin d'éliminer la convection et de contrôler les conditions de non-équilibre, la réaction est mise en jeu au sein d'un hydrogel chimiquement inerte et très riche en eau (un gel d'agarose à 98 % d'eau). À partir de réservoirs constamment renouvelés, les réactifs diffusent depuis les bords vers l'intérieur du gel où ils réagissent. Des gradients de concentrations résultant du processus de réaction-diffusion s'établissent entre les faces d'alimentation du gel. Les structures de Turing se forment dans les régions du gel où les conditions nécessaires à leur apparition sont remplies. On utilise communément un mince disque de gel alimenté par ses deux faces circulaires opposées [5], tel que schématisé dans la partie gauche de la figure 2. Diverses structures, révélées par un indicateur coloré (ici l'amidon ou le polyvinylalcool), sont observées à travers l'épaisseur du gel et présentées sur la droite de la figure. Lorsque l'épaisseur de leur domaine de formation est de l'ordre de la longueur d'onde (typiquement 0,2 mm), les structures sont quasi bidimensionnelles. Les motifs de concentration présentent alors, à quelques défauts près, une distribution de symétrie hexagonale ou en bandes parallèles en accord avec les théories non linéaires (figure 2a, b, d). Lorsque l'épaisseur augmente, la structure devient tridimensionnelle. On n'observe alors que le résultat de l'absorption de la lumière à travers toute la structure, ce qui peut produire un motif apparemment non standard (figure 2c).

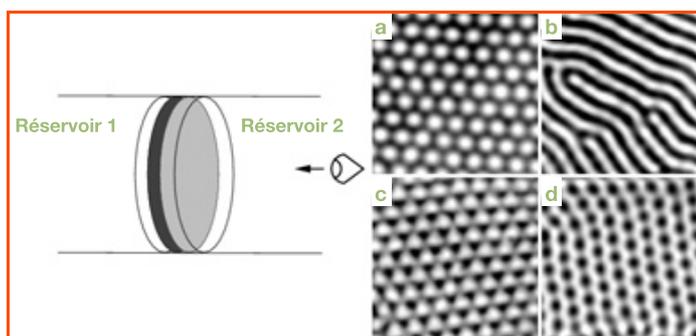


Figure 2 - Structures de Turing de la réaction CIMA observées dans un disque de gel alimenté par des faces opposées.

Partie gauche de la figure : schéma et direction d'observation. Partie droite, observations : a, d : structures hexagonales ; b : structures de bandes ; c : projection d'une structure de dimensionnalité plus élevée.

Par quel miracle le problème de la diffusion différentielle s'est-il trouvé résolu ? En fait, l'espèce jouant le rôle d'activateur, ici Γ , se trouve partiellement et réversiblement complexée par une macromolécule initialement insérée au sein du gel et trop grosse pour pouvoir y diffuser. L'agent complexant est ici l'indicateur coloré lui-même. À un instant donné, seule la fraction libre de Γ diffuse et le coefficient de diffusion effectif de cette espèce est fortement diminué. Le complexe réversible n'étant pas réactif, on peut montrer que,

au-delà d'une concentration critique en agent complexant, le seuil d'apparition des structures de Turing peut être favorisé par rapport à celui des oscillations homogènes. En tenant compte du fait que les concentrations des réactifs de départ varient très peu sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde, Lengyel et Epstein [6] ont montré que la dynamique la réaction DCIMA peut être correctement décrite par un modèle de réaction-diffusion à deux variables u et v , respectivement proportionnelles à $[I^-]$ et $[ClO_2^-]$:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \left(a - u - 4 \frac{uv}{1+u^2} + \Delta_r u \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = b \left(u - \frac{uv}{1+u^2} \right) + d \Delta_r v$$

où les coordonnées de temps et d'espace ont été renormalisées et $d \sim 1$. Le rôle de l'espèce activatrice est tenu par I^- . Il s'agit en fait d'une inhibition par substrat comme le montre la première équation où, aux fortes valeurs de $[I^-]$, proportionnel à u , sa consommation varie comme $1/u$ et décroît quand u augmente. La diffusion effective de I^- est contrôlée par σ , une quantité proportionnelle à la concentration en agent complexant, supposé en large excès. Ce modèle permet des calculs analytiques et des développements perturbatifs en accord avec les observations. Sur la base d'un modèle cinétique légèrement plus développé, un accord quasi quantitatif a pu être obtenu entre des simulations numériques et des expériences menées dans un disque de gel alimenté par diffusion à partir d'une seule face placée au contact du contenu d'un CSTR [7]. Un temps de renouvellement court permet d'assurer de façon contrôlée les conditions de non équilibre à la limite CSTR/gel (figure 3).

Le mécanisme de complexation qui permet le contrôle de la diffusion est la clé du processus. Il est même possible par ce procédé de ralentir fortement la diffusion effective de l'ion H^+ dont la diffusion naturelle est pourtant la plus rapide. Une seconde structure de Turing pour laquelle l'espèce autocatalytique est précisément l'ion H^+ ralenti par complexation a ainsi été observée récemment avec la réaction [thiourée-iodate-sulfite] [8].

Les interactions des structures de Turing avec d'autres instabilités, notamment oscillantes, donnent lieu à des phé-

nomènes dynamiques complexes. On trouvera des développements plus exhaustifs dans la revue écrite par De Wit [9].

Au-delà de Turing

Structures associées à une dynamique de fronts

Les structures de Turing ne sont pas les seules structures spatiales effectivement observables. Les structures à grande amplitude associées à une dynamique de fronts constituent une autre classe très importante. Le système expérimental prototype est la réaction [ferrocyanure-iodate-sulfite] (FIS). Ces structures résultent de la propagation d'un état de non-équilibre dans un autre (instable ou de stabilité relative inférieure) sous forme d'un front raide. L'évolution est gouvernée à la fois par des effets de courbure et des interactions entre fronts. On peut ainsi observer des ensembles de taches qui croissent, se divisent, puis meurent (« self replicating spots ») ou encore, lorsque les fronts se repoussent fortement, la formation de systèmes de bandes croissant à partir de leur extrémité, la structure finale s'apparentant à un labyrinthe (« labyrinthine patterns ») [10-11]. Un exemple est donné dans la figure 4. Il est intéressant de noter qu'elles requièrent fondamentalement les mêmes ingrédients que les structures de Turing : autocatalyse et inhibition à longue portée. Le rôle d'une complexation dans le ralentissement du proton de la réaction FIS y a du reste été récemment mis en lumière [12]. Signalons au passage que remplacer, *a contrario*, l'inhibition à longue portée par une activation à longue portée (diffusion rapide de l'activateur) peut induire des oscillations dans des systèmes qui ne pourraient en présenter autrement.



Figure 4 - Structure labyrinthe dans la réaction FIS [11].

Bistabilité spatiale

Un dernier phénomène qui implique l'espace sans être une véritable structure mais qui mérite d'être mentionné en raison de son importance dans la suite de cet article est la bistabilité spatiale. Celle-ci implique seulement l'existence de l'autocatalyse, mais aucune condition sur la diffusion. On considère une réaction autocatalytique en X au cours de laquelle la production de l'espèce X s'accélère fortement lorsque sa concentration atteint un niveau suffisant. Le milieu réactionnel est maintenu très loin de l'équilibre, par exemple par l'utilisation d'un CSTR dont le temps de renouvellement est très court devant le temps de réaction t_R . On place un gel, support du processus de réaction-diffusion, au sein de ce milieu. Si la taille L caractéristique du gel est petite, t_R reste grand devant le temps de diffusion t_D qui caractérise les échanges entre le cœur du gel et son environnement. Le degré d'avancement de la réaction reste faible au sein du gel. Si, au contraire, la taille L est grande, les temps de diffusion vers le cœur du gel s'allongent ($t_R \ll t_D$) de sorte que la réaction a le temps de s'y effectuer presque complètement. Sous l'effet de l'autocatalyse et de la diffusion, les valeurs élevées de $[X]$ formées dans ce cœur s'étendent à l'ensemble du système, à l'exception d'une étroite couche limite qui assure la continuité des concentrations aux bords du gel. Aux tailles intermédiaires du gel, l'état final dépend de la situation initiale. Si la concentration $[X]$ est déjà significative au départ, le gel

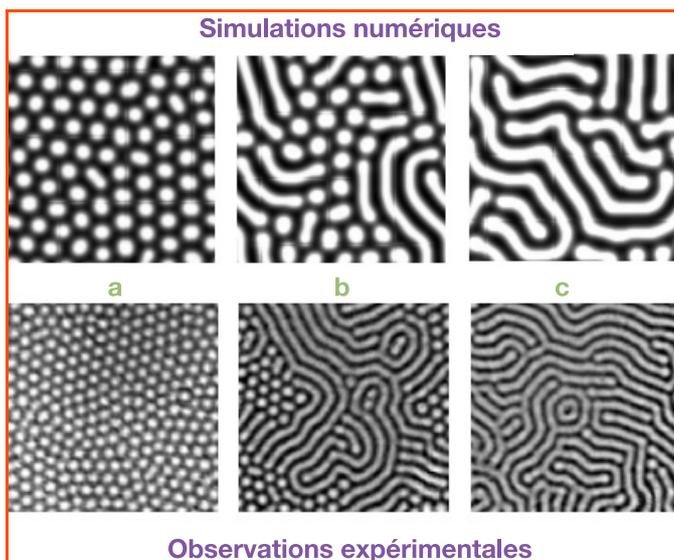


Figure 3 - Séquence de structures de Turing de la réaction DCIMA dans un réacteur à alimentation monoface, observations expérimentales et simulations numériques. La concentration d'acide malonique augmente de gauche à droite [7].

basculer vers un fort degré d'avancement sous l'effet de l'autocatalyse. Sinon il reste dans un état peu réagi. Il existe donc un domaine de L pour lequel le système présente deux distributions de concentrations stables, la sélection s'opérant en fonction de l'histoire du système, ce qui définit une « bistabilité spatiale ». Expérimentalement, on pourra évidemment remplacer L par la concentration d'un réactif comme paramètre de contrôle mais, si l'on pouvait alternativement faire croître et décroître L continûment, on pourrait décrire un véritable cycle d'hystérèse en passant alternativement d'un état de faible avancement à un état de fort avancement. Cette potentialité sera mise à profit dans les processus chimio-mécaniques. La plupart des réactions autocatalytiques présentent une bistabilité spatiale pour un domaine de tailles approprié, ce qui n'implique pas que la réaction puisse être oscillante.

La chimio-mécanique

Jusqu'ici, nous avons utilisé des gels inertes. Il existe toutefois des gels polymères capables de gonfler ou dégonfler considérablement par absorption ou rejet de leur solvant en fonction de la composition chimique de ce solvant. C'est le cas de certains polyélectrolytes, comme les poly(NIPAAm-co-AAc), qui gonflent en fonction du pH sous l'effet de la pression osmotique due à un excès de charges libres, conformément à l'équilibre de Donnan [13]. Une idée de départ est d'utiliser des oscillations chimiques pour engendrer des oscillations mécaniques dans ces gels chimiosensibles.

Les oscillations forcées

Les groupes de Yoshida au Japon [14], puis de Ryan en Angleterre [15], obtiennent des oscillations mécaniques d'un ruban ou d'un petit cube de gel plongé dans un CSTR où se déroule une réaction produisant des oscillations de pH. Le ruban doit être assez mince (< 1 mm) pour que la réponse mécanique suive les variations de pH dont la période est typiquement d'une dizaine de minutes.

Une expérience un peu plus subtile est à l'origine de nombreux travaux de Yoshida *et coll.* [16]. Le milieu est constitué des réactifs de la réaction oscillante de Belousov-Zhabotinsky, mais le catalyseur nécessaire à l'obtention des oscillations, un complexe rubidium-bipyridine, n'est pas présent dans la solution ; il est greffé sur le squelette polymère du gel. Dans ces conditions, les oscillations chimiques ne sont présentes qu'au sein du gel, l'environnement restant stationnaire. Elles induisent à leur tour des oscillations mécaniques du gel en environnement chimique constant. Des variantes reposant sur le même principe permettent d'obtenir la propagation d'ondes mécaniques. Dans ce cas particulier, en l'absence de variations de pH, c'est la modification des interactions gel/solvant qui est responsable des changements de volume.

Dans les deux cas, il est néanmoins nécessaire d'utiliser une réaction oscillante et l'instabilité des états stationnaires est d'origine purement chimique. Le système mécanique est donc forcé par un élément extérieur.

Instabilités et oscillations chimio-mécaniques

On peut pourtant imaginer l'existence d'instabilités chimio-mécaniques résultant du couplage entre réaction-diffusion d'une part et propriétés de gonflement d'un gel

chimiosensible d'autre part. En effet, la distribution des concentrations au sein du gel dépend de sa taille et de sa forme, mais cette taille et cette forme sont elles-mêmes déterminées en retour par cette distribution. L'existence de cette rétroaction est une source potentielle d'instabilités qui peut entraîner l'émergence d'oscillations à la fois mécaniques et chimiques ou un changement de forme.

Nous avons proposé une source d'oscillations mécaniques à partir d'une réaction non oscillante en nous appuyant sur l'existence d'une bistabilité spatiale décrite précédemment. Les variations de taille qui permettraient de parcourir le cycle d'hystérèse entre les états de fort et faible avancement vont être spontanément assurées par le gonflement et le dégonflement du gel pilotés par ces états eux-mêmes. Prenons l'exemple d'une réaction à autocatalyse acide. Un état de faible avancement, correspondant à un état basique, entraînera le gonflement d'un gel polyacide. La taille augmentant, le système peut atteindre la limite d'existence de cet état et passer spontanément dans l'état acide à fort avancement de la réaction, ce qui va en retour entraîner une contraction du gel. Si celle-ci est d'amplitude suffisante, le système peut repasser dans l'état basique et le cycle se répéter indéfiniment [17-18]. Un cylindre de gel de (poly(NIPAAm-co-AAc)) immergé au sein d'un CSTR alimenté par la réaction chlorite-tétrathionate (CT), système non oscillant en CSTR, présente ainsi des oscillations spontanées de sa longueur (figure 5). Bien que ce comportement ne corresponde pas strictement au schéma précédent et ne soit pas complètement compris, ces résultats sont extrêmement encourageants [19]. La même réaction permet de mettre en évidence une excitabilité chimio-mécanique pour laquelle une perturbation chimique à l'extrémité du cylindre induit une onde de contraction qui se propage le long de ce cylindre [20]. D'autres dynamiques plus exotiques ont aussi été observées.

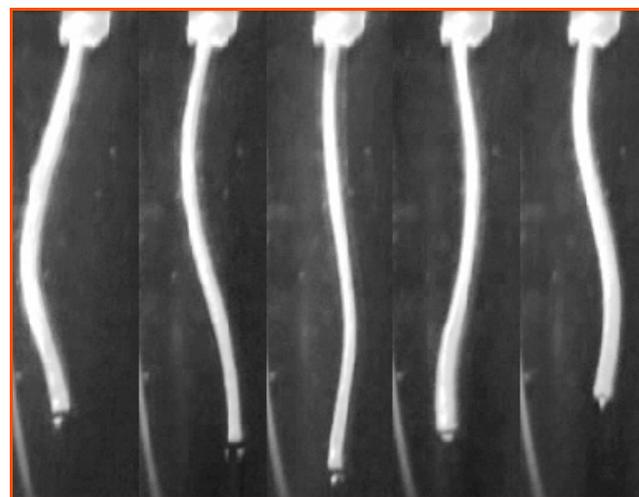


Figure 5 - Oscillations de volume d'un cylindre de gel sur une période.

Le cœur du cylindre étant très acide est effondré et turbide (laiteux). Les variations de longueur sont révélées par cette turbidité le long de l'axe, les bords du gel, transparents, étant ici peu visibles. Les variations de longueur sont de l'ordre de 20 % [19].

Ces études sont encore en plein développement. Les processus mis en jeu sont très complexes tant au niveau du gel (entropie de mélange, interactions électrostatiques, pression osmotique des charges libres, élasticité), que de la réaction (cinétique, déplacement de charges) et des

conditions aux bords. Un premier modèle, assez réaliste et prévoyant des oscillations pour la réaction spatialement bistable [bromate-sulfite], a été développé récemment [21], mais beaucoup de chemin reste à faire.

Conclusion

Ce qu'il est aujourd'hui convenu d'appeler la « chimie non linéaire », car elle exploite les propriétés non linéaires de la cinétique chimique, a pu apparaître à sa naissance, dans les années 60, comme un secteur un peu exotique. C'est grâce à la clairvoyance de ses promoteurs, parmi lesquels Adolphe Pacault, qu'elle est désormais au cœur de nombreux développements pluridisciplinaires.

Elle est d'abord un outil expérimental fondamental dans l'étude des systèmes physiques non linéaires. Elle a été l'un des principaux supports dans l'étude du chaos temporel. Les structures de réaction-diffusion sont également des prototypes remarquables d'auto-organisation dans les systèmes non linéaires étendus : les structures de Turing présentent de nombreuses analogies et partagent une bonne part de leur formalisme mathématique avec les structures convectives de Bénard ou les structures de l'optique non linéaire. C'est en association avec d'autres phénomènes physiques, comme la diffusion et les effets mécaniques présentés dans cet article, que cette chimie prend toute sa généralité, en étant potentiellement à l'origine de nombreux processus d'auto-organisation, notamment dans le domaine biologique [3]. Même lorsqu'elle n'est pas réellement impliquée dans ces processus, on peut la mettre à profit pour concevoir des systèmes biomimétiques puisque, comme dans les systèmes vivants, l'énergie est puisée dans l'environnement. La chimiomécanique permet par exemple d'imaginer des systèmes de valves de contrôle ou de micro-pompes auto-alimentées.

Enfin, à une époque où les concepts d'auto-assemblage sont souvent mis en avant, il convient de souligner leurs différences fondamentales avec les structures dissipatives chimiques tant au niveau des processus que des échelles mises en jeu. L'auto-assemblage repose sur des propriétés d'équilibre et d'interactions au niveau microscopique. Au final, les états obtenus minimisent un potentiel thermodynamique. Les structures dissipatives sont associées à des processus de non-équilibre régis par des lois dynamiques macroscopiques. Elles disparaissent dès que la contrainte de non-équilibre est interrompue et ne peuvent être rattachées à aucun potentiel.

On pourra trouver un ensemble de revues sur les structures dissipatives chimiques et la chimiomécanique

ainsi qu'une bibliographie plus complète dans les actes d'une école d'été tenue à Cargèse en 2007 [22].

Références

- [1] Pojman J.A., Eptein I.R., *An Introduction to Nonlinear Chemical Dynamics*, Oxford University Press, New York, 1998.
- [2] Turing A., *Philos. Trans. R. S. London*, 1952, 327, p. 37.
- [3] Murray J., *Mathematical Biology I & II*, Springer, 2003.
- [4] Castets V., Dulos E., Boissonade J., De Kepper P., *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64, p. 2953.
- [5] Ouyang Q., Swinney H.L., *Nature*, 1991, 352, p. 61.
- [6] Lengyel I., Epstein I.R. *Science*, 1991, 251, p. 650.
- [7] Rudovics B., Barillot E., Davies P.W., Dulos E., Boissonade J., De Kepper P., *J. Phys. Chem. A*, 1999, 103, p. 1790.
- [8] Horvath J., Szalai I., De Kepper P., *Science*, 2009, 324, p. 772.
- [9] De Wit A., *Adv. Chem. Phys.*, 1999, 109, p. 435.
- [10] Li G., Ouyang Q., Swinney H.L., *J. Chem. Phys.*, 1996, 105, p. 435.
- [11] Szalai I., De Kepper P., *Chaos*, 2008, 18, p. 026105.
- [12] Szalai I., De Kepper P., *J. Phys. Chem. A*, 2008, 112, p. 783.
- [13] Rika J., Tanaka T., *Macromolecules*, 1984, 17, p. 2916.
- [14] Yoshida R., Yamaguchi T., Ichijo H., *Mat. Sci. Eng. C*, 1996, 4, p. 107.
- [15] Crook C.J., Smith A., Jones R.A.L., Ryan J., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2002, 4, p. 1367.
- [16] Yoshida R., Takahashi T., *J. Am. Chem. Soc.*, 1996, 118, p. 5134.
- [17] Boissonade J., *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90, p. 188302.
- [18] Boissonade J., *Chaos*, 2005, 15, p. 023703.
- [19] Gauffre F., Labrot V., Boissonade J., De Kepper P., *Nonlinear Dynamics in Polymeric Systems*, Pojman J.A., Tran-Cong-Miyata Q. (eds), ACS Symposium Series 869, ACS, Washington, 2003, p. 80.
- [20] Labrot V., De Kepper P., Boissonade J., Szalai I., Gauffre F., *J. Phys. Chem. B*, 2005, 109, p. 21476.
- [21] Boissonade J., *Eur. Phys. J. E*, 2009, 28, p. 337.
- [22] Borckmans P., De Kepper P., Kholkhov A., Métens S. (eds), *Chemomechanical Instabilities in Responsive Material*, NATO series A, Springer, 2009.



J. Boissonade



E. Dulos



P. De Kepper

Jacques Boissonade est physicien et directeur de recherche au CNRS, Étienne Dulos est biochimiste et chargée de recherche retraitée au CNRS, et Patrick De Kepper est physico-chimiste et directeur de recherche au CNRS. Les trois auteurs, membres de l'équipe « Structures et dynamique non linéaire » du Centre de Recherche Paul Pascal*, ont obtenu le prix Paul Pascal 2000 de l'Académie des sciences pour leurs travaux sur les structures de Turing.

* Centre de Recherche Paul Pascal, Université de Bordeaux, 115 avenue Schweitzer, 33600 Pessac.
Courriel : boisson@crpp-bordeaux.cnrs.fr



www.lactualitechimique.org

Connaissez-vous bien le site de l'AC ?

Vous y trouverez :

- le sommaire et l'éditorial du dernier numéro
- des actualités
- un moteur de recherche

Et aussi :

- les articles en ligne (certains accessibles gratuitement, d'autres au prix de 4€)
- les archives des numéros thématiques (depuis 1999) ou à rubriques (depuis 2000)

Sans oublier que vous pouvez également :

- acheter un numéro en pdf
- vous abonner à la version électronique

Alors vite, à votre souris !