

SUR LES INTERRELATIONS ENTRE DOMAINES SCIENTIFIQUES

LE CAS DE LA COMBUSTION ET DE LA TURBULENCE

L'un des thèmes importants de la philosophie des sciences est certainement l'explicitation des relations entre deux ou plusieurs branches scientifiques. Lorsqu'on réduit ces relations à celles entre les théories respectives de chaque branche, on retrouve bien sûr les discussions sur la réduction dérivationnelle de la théorie d'une branche scientifique à la théorie d'une autre branche¹ et sur l'unification de la science selon ce processus². En marge de ces discussions classiques, Darden et Maull³ ont introduit la notion de théorie *interfield* (interdomaine) pour pouvoir rendre compte d'autres types de relations entre deux ou plusieurs branches scientifiques, sans que ces relations soient forcément interprétées comme une relation de réduction. D'après elles,

« une théorie interdomaine peut être générée lorsque les ressources acquises dans chaque branche indiquent qu'il existe des relations entre elles, ou lorsque chacune des branches manifeste un intérêt pour expliquer l'une des facettes d'un même phénomène et/ou lorsque, s'agissant de ce phénomène, des questions restées sans réponse, en utilisant les seuls concepts ou techniques de l'une des branches, s'accumulent. »

Elles ont alors examiné plusieurs cas pour illustrer la notion de théorie interdomaine (qui s'oppose donc à la notion de théorie intradomaine). Ainsi, par exemple, elles ont décrit comment la théorie de la génétique mendélienne était reliée à la théorie chromosomale développée dans la cytologie et qui montrait que les facteurs de Mendel étaient les gènes localisés dans les chromosomes. Cette théorie interdomaine montra

1. Ernst NAGEL, *The Structure of Science*, New York, Harcourt, Brace and World, 1961.

2. Robert L. CAUSEY, *Unity of Science*, Dordrecht, Reidel Publ. Comp., 1977.

3. Lindley DARDEN, Nancy MAULL, « Interfield Theories », *Philosophy of Science*, t. 44, 1977, p. 43-64.

donc comment les entités décrites par une théorie étaient les composantes d'autres entités discutées dans une autre théorie.

Dans un autre texte, Maull⁴ a introduit la notion de théorie interniveau (*interlevel*) comme un cas particulier des théories interdomaine et s'appliquant particulièrement aux relations entre les branches de recherche qui peuvent être ordonnées en fonction de « la profondeur » de leur niveau descriptif. Sans entrer dans le détail de cette classification, rapportons simplement que, pour Maull, dans le couple biochimie-génétique, c'est la biochimie qui constitue le niveau le plus profond, ou encore dans le couple chimie physique-biochimie, c'est la première qui est considérée comme constituant un niveau descriptif plus profond. Le transfert d'un problème d'une branche donnée à une autre branche d'un niveau descriptif plus élevé constitue alors, d'après Maull, l'une des manifestations des relations profondes entre diverses branches scientifiques ; ce transfert pouvant être repéré par l'appropriation des termes du vocabulaire d'une branche donnée par celui de la branche ayant un niveau descriptif plus profond. Ainsi, le vocabulaire partagé par différents domaines de recherche peut être utilisé pour identifier un type de problème spécial, celui qui, tout en étant issu du sein d'un domaine scientifique donné, ne peut être résolu sans l'aide d'un autre domaine.

Ce rôle attribué au vocabulaire scientifique, partagé par deux ou plusieurs domaines scientifiques, pose évidemment le problème de l'identification des termes propres de chaque domaine. Maull⁵ distingue deux mécanismes par lesquels un terme peut devenir propre à un domaine. D'après elle, un terme propre peut naître dans le cours du développement historique du domaine considéré ; il peut s'agir dans ce cas soit de nouveaux termes, soit des termes qui sont déjà utilisés en dehors du domaine considéré et qui sont appropriés par ce dernier en modifiant les assertions associées à son utilisation. D'autre part, un terme peut être repris d'un autre domaine sans que les assertions qui lui sont rattachées ne soient réfutées. Au contraire, dans ce cas, on associe au terme repris de nouvelles assertions de connaissances pertinentes pour le nouveau domaine. Il s'agit, dans ce cas, d'un terme partagé et l'on peut dire que le terme est transformé par ce mécanisme de partage.

On peut aussi rencontrer des termes importés qui sont utilisés dans un domaine d'une façon que l'on ne peut plus associer aux problèmes prenant leur origine dans le domaine d'où le terme a été importé. Maull⁶ introduit aussi la notion d'asymétrie ou de la directionnalité de

4. N. MAULL, « Unifying Science Without Reduction », *Studies in the History and Philosophy of Science*, t. 8, 1977, p. 143-162.

5. *Ibid.*

6. *Ibid.*

l'importation ou de la transformation des termes. Elle utilise cette directionnalité pour ordonner les vocabulaires spéciaux comme des niveaux descriptifs plus ou moins profonds. Ainsi, si un terme propre est importé d'un vocabulaire spécial B vers un vocabulaire spécial A, elle suggère de considérer B comme un niveau descriptif plus profond que A.

Ce transfert de problème d'une branche à l'autre indique donc que ces deux branches manifestent un intérêt commun à un problème donné. Maull se pose alors la question des caractéristiques communes des solutions apportées aux problèmes partagés par deux branches scientifiques. Un point important dans cette analyse est le constat du fait que les concepts et les techniques de chacune des deux branches sont nécessaires pour une éventuelle solution. La réponse apportée par Maull insiste sur la forme causale de ces solutions qui sont exprimées par les théories interniveau et sont donc associées à un transfert de problème entre les branches scientifiques ordonnées comme des niveaux descriptifs.

La fonction d'une théorie interniveau est de rendre explicite mais aussi d'expliquer les relations entre les domaines scientifiques. Ces relations peuvent être de plusieurs types. Un domaine scientifique peut spécifier la localisation physique d'une entité ou d'un processus postulé dans un autre domaine. Il s'agit dans ce cas d'une relation du type tout-partie. Un domaine scientifique peut aussi spécifier la nature physique d'une entité ou d'un processus postulé par un autre domaine. Un autre type de relations entre domaines scientifiques se rencontre quand un domaine étudie la structure d'une entité ou d'un processus dont la fonction est examinée au sein d'un autre domaine. Finalement, les domaines scientifiques peuvent aussi être reliés d'une manière causale, c'est-à-dire, les entités postulées dans un domaine peuvent fournir les causes des effets étudiés dans un autre domaine.

Les théories interniveau ou interdomaine fonctionnent alors, d'après Darden et Maull⁷, selon l'une ou l'ensemble des voies suivantes :

- elles peuvent résoudre des problèmes théoriques en introduisant de nouvelles idées quant aux relations entre les domaines scientifiques ;
- elles peuvent répondre à des questions qui émergent au sein d'un domaine donné, mais qui ne peuvent être résolues en utilisant les seuls techniques et concepts de ce même domaine ;
- elles peuvent attirer l'attention sur les entités jusqu'alors négligées de l'un ou de l'ensemble des domaines ou même prédire des entités non soupçonnées jusqu'alors ;
- elles peuvent générer de nouvelles lignes de recherche qui peuvent aboutir à de nouvelles connexions interdomaine.

7. L. DARDEN, N. MAULL, *art. cit. supra* n. 3.

D'après Bechtel⁸, qui a appliqué l'idée de connexion interdomaine à la découverte des relations entre les vitamines et les coenzymes, ce qui différencie l'approche précédente des analyses traditionnelles basées sur la notion de réduction, est le fait que les théories interdomaine sont composées d'ingrédients produits par des théories distinctes. Autrement dit, il n'est donc pas postulé *a priori* que l'une des théories couvre d'emblée le domaine de l'autre, comme c'est le cas dans la réduction dérivationnelle. Par ailleurs, la construction des théories interdomaine permet aussi d'envisager l'incorporation de nouvelles entités théoriques ou de nouveaux processus qui n'étaient suspectés par aucun des domaines pris séparément ; il ne s'agit donc pas de la seule recherche de relations logiques entre deux corpus théoriques existants. Bechtel a appliqué plus récemment cette même problématique au cas de la psycholinguistique, considérée également comme un domaine de recherche interdisciplinaire⁹.

L'un des mérites de ces approches s'attachant à expliciter les liens entre branches scientifiques, de l'extérieur de la tradition réductionniste, est d'insister sur les distinctions nécessaires entre une branche scientifique et sa ou ses théories, d'une part, et de tenter de mieux préciser les notions mêmes de disciplines, branches, champs ou domaines scientifiques, d'autre part. En effet, concernant le premier point, il n'y a pas de doute que les étapes de l'évolution d'une branche scientifique donnée sont souvent identifiées à celles des théories la concernant et, par conséquent, les relations entre deux branches scientifiques traitées à travers celles de leurs théories respectives. C'est ainsi que la réduction dérivationnelle est explicitement conçue comme « relation interthéorique ». Pourtant, peut-on ignorer les liens, d'ordre plutôt expérimental, qui peuvent amener deux branches à s'influencer. Cette négligence relative des aspects expérimentaux des relations entre branches scientifiques n'est évidemment qu'une conséquence du traitement généralement asymétrique des aspects théoriques et expérimentaux des sciences naturelles, où les premiers reçoivent un traitement de faveur¹⁰.

Concernant le deuxième point, à savoir l'identification des caractéristiques des entités que l'on nomme discipline, branche, ou domaine scienti-

8. William BECHTEL, « The Evolution of our Understanding of the Cell : A Study in the Dynamics of Scientific Progress », *Studies in the History and Philosophy of Science*, t. 15, 1984, p. 309-356.

9. W. BECHTEL, « Psycholinguistics as a Case of Cross-Disciplinary Research : Symposium Introduction », *Synthese*, t. 72, 1987, p. 293-312.

10. Iskender GÖKALP, « A Case Study on the Impact of a New Instrument : The Introduction of Laser Doppler Anemometry in Turbulent Reacting Flow Studies », à paraître dans *Science, Technology and Human Values*, 1989.

fique, il nous semble que les études s'attachant à préciser les liens entre ces entités peuvent également contribuer à mieux préciser leurs limites et leurs frontières. Autrement dit, l'étude des interactions entre les domaines scientifiques peut à la fois augmenter nos connaissances à propos des spécificités disciplinaires, tout en éclairant les différents mécanismes, tant cognitifs que sociaux, par lesquels ils interagissent.

Un problème constitue, nous semble-t-il, le cœur de l'approche en terme de relations *interfield* ; c'est celui de la nature du travail scientifique effectué au niveau interdomaine ou *interfield*. Autrement dit, l'espace scientifique qui se constitue par les interactions entre deux domaines peut-il être considéré comme un troisième domaine autonome ? Darden et Maull manifestent une réserve certaine pour considérer l'espace commun aux deux domaines mis en relation par une interrelation *interfield* comme constituant un domaine autonome¹¹.

L'objectif essentiel de nos recherches, portant sur les interrelations établies entre la chimie de la combustion et la mécanique de la turbulence et ayant abouti à l'émergence du domaine de la combustion turbulente ou des écoulements réactifs turbulents, est justement de clarifier le statut du domaine interfacial ou de frontière ainsi établi et d'identifier les mécanismes de mise en contact qui sont en œuvre.

Dans la seconde partie de ce texte, nous présenterons d'abord une brève périodisation du développement des relations entre les domaines de la chimie de la combustion et de la mécanique de la turbulence ainsi que de la progressive autonomisation du domaine de la combustion turbulente ; puis nous discuterons les processus de mise en contact des deux domaines tentés lors des premières phases de leur rencontre.

PÉRIODISATION DU DÉVELOPPEMENT DU DOMAINE DE LA COMBUSTION TURBULENTE

D'un point de vue fondamental, ce sont les problèmes liés à la production de réactions chimiques dans des milieux fluides animés d'un

11. Voir, en part., L. DARDEN, N. MAULL, *art. cit. supra* n. 3, p. 48 et p. 59. Pour une analyse similaire, voir aussi Adele A. ABRAHAMSEN, « Bridging Boundaries versus Breaking Boundaries : Psycholinguistics in Perspective », *Synthese*, t. 72, p. 355-388. Pour une récente reconsidération des positions de Darden et Maull, voir W. BECHTEL, « The Nature of Scientific Integration », in *Integrating Scientific Disciplines*, W. BECHTEL, ed., Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1996, p. 3-52 ; et L. DARDEN, « Relations among Fields in the Evolutionary Synthesis », in *ibid.*, p. 113-123.

mouvement turbulent qui constituent le domaine de la combustion turbulente (CT). D'un point de vue appliqué, ce réseau de phénomènes aérothermochimiques caractérise la quasi-totalité des systèmes énergétiques non nucléaires et de grande puissance, des moteurs à combustion interne aux réacteurs aéronautiques. Il s'agit donc d'un domaine scientifique contemporain qui, parallèlement à ses aspects fondamentaux, se rattache très directement à la société au sens large, ne serait-ce que par ses interventions décisives dans l'évolution des possibilités de déplacement des individus (ou d'autres flux matériels) et, par conséquent, sur les composantes spatiales et temporelles des sociétés modernes.

Par ailleurs, ce domaine présente la particularité de résulter de l'interpénétration progressive de deux autres domaines scientifiques, la chimie de la combustion et la mécanique de la turbulence. Ainsi, la CT s'est constituée à l'interface ou à la frontière de deux domaines qui ont eu des développements parfaitement autonomes jusqu'à leur rencontre partielle dans le contexte de la CT. Cette particularité de la CT la désigne comme un domaine fructueux pour étudier en détail les mécanismes d'interaction entre deux domaines scientifiques initialement autonomes et les processus de constitution et d'autonomisation des domaines interdisciplinaires.

L'histoire de la combustion turbulente peut être appréhendée en deux périodes distinctes : sa préhistoire et son histoire moderne. La préhistoire de la CT comporte elle-même deux phases relativement bien distinctes. La première phase concerne le développement moderne et autonome, c'est-à-dire antérieur à leur rencontre, des domaines de la chimie de la combustion et de la mécanique de la turbulence dont les origines ne sont distantes que de quelques années. En effet, c'est en 1876 qu'Osborne Reynolds réalisa ses expériences où il distingua clairement entre les modes laminaire et turbulent de l'écoulement des fluides¹². Parallèlement, l'ère moderne des recherches sur la combustion a été inaugurée en 1880 par les travaux de Mallard et Le Chatelier, d'une part, et Berthelot et Vieille, d'autre part, portant sur la propagation de la flamme et la transition à la détonation¹³. La caractéristique importante de cette première phase est le développement totalement autonome de ces deux domaines.

La deuxième phase de la préhistoire de la CT correspond à l'établissement de quelques relations préliminaires et fugitives entre la combustion

12. Jack ALLEN, « The Life and Work of Osborne Reynolds », in *Osborne Reynolds and Engineering Science Today*, D. M. MCDOWELL, J. D. JACKSON, eds, Manchester, Manchester University Press, 1970, p. 1-82.

13. William A. BONE, Donald T. A. TOWNEND, *Flame and Combustion in Gases*, New York, Longmans, Green, 1927.

et la turbulence lors des premières décennies du xx^e siècle. Cette phase est marquée par deux caractéristiques. D'une part, ces relations préliminaires sont de nature totalement asymétriques, puisque l'initiative les concernant provenait uniquement du côté de la combustion qui tenta d'incorporer quelques concepts et paramètres de la mécanique des fluides en général (comme le débit, la pression, la vitesse et aussi la turbulence) pour expliquer et prédire certains paramètres de combustion, comme celui de la vitesse de propagation de la flamme. Il est aussi important de noter que cette attraction unilatérale était principalement motivée par des considérations appliquées portant sur la propagation des flammes dans les volumes clos.

La deuxième caractéristique de cette période résulte du fait que le domaine de la combustion tenta d'incorporer la turbulence comme une sorte d'idée générale, en la réduisant à son effet d'ensemble. En effet, lors de cette période, les scientifiques de la combustion considéraient la turbulence comme un mouvement de fluide en masse qui était supposé améliorer le mélange intime des gaz réactifs et, par conséquent, l'efficacité de la combustion. En d'autres termes, la turbulence à laquelle faisait référence la combustion, lors de cette période, n'était pas pensée comme possédant une structure interne et n'était pas quantifiée (mesurée) non plus.

Il semble réaliste de faire débiter l'histoire moderne de la combustion turbulente à partir de l'année 1940 qui est la date de publication en allemand d'une étude de Gerhard Damköhler qui s'intéressa à l'influence de la turbulence sur la vitesse de propagation dans les systèmes réactifs prémélangés¹⁴. Il est, en effet, clair aujourd'hui que ce travail ouvrit la voie à une nouvelle perspective de recherche en CT. Dans la nouvelle période, la turbulence était dorénavant décomposée en ses divers éléments structurels (comme son intensité ou ses différentes échelles spatiales et temporelles) et leur influence sur les différents paramètres de la combustion était étudiée.

Cependant, lors des premières décennies de cette nouvelle période — on pourrait dire jusqu'aux années 1970 — l'asymétrie essentielle des relations entre la combustion et la turbulence était conservée, et le domaine de la CT s'est développé sous la poussée du domaine de la combustion, comme une spécialité de la combustion en général. Ce n'est qu'à partir de la moitié des années 1970 que la symétrie de ces relations s'est améliorée, comme en témoigne, d'une part, l'adoption progressive de l'appellation « Écoulements turbulents réactifs » pour désigner le

14. Gerhard DAMKÖHLER, « The Effect of Turbulence on the Flame Velocity in Gas Mixtures », *NACA TM*, 1112, 1947 (publié en allemand dans *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*, t. 46, 11, 1940, p. 601-626).

domaine de la CT, et, d'autre part, l'apparition, d'une façon encore timide mais de plus en plus fréquente, d'articles traitant de la CT dans les revues spécialisées de la mécanique des fluides et de sessions portant sur les écoulements réactifs dans les congrès de mécanique des fluides.

Cette nouvelle évolution semble être entraînée par deux dynamiques. La première est l'avènement de nouvelles techniques de mesure, communes aux écoulements turbulents réactifs et non réactifs, utilisant les propriétés optiques de la lumière laser et permettant, pour la première fois dans l'histoire de la CT, d'accéder à la structure de la turbulence dans les milieux réactifs¹⁵. La deuxième dynamique, qui joue en faveur de l'établissement des relations plus symétriques entre la turbulence et la combustion, est le développement des méthodes générales de calculs numériques, initialement conçus pour le traitement des écoulements non réactifs, mais qui, moyennant quelques modifications de leur structure sont aussi appliquées de plus en plus aux écoulements turbulents réactifs.

Aujourd'hui la combustion turbulente est considérée comme un domaine scientifique quasi autonome, dont l'objectif essentiel est l'intégration totale des connaissances provenant de ses deux éléments constitutifs. Comme c'est toujours le cas dans toute situation constituée dans les interfaces ou les frontières, la difficulté majeure dans cette interaction est de pouvoir tenir compte de la modification des caractéristiques de chacun des éléments, introduite par la présence de l'autre. En effet, la turbulence dans un milieu réactif n'est plus la turbulence classique des milieux fluides isothermes ou à masse volumique très faiblement variable et cette différence n'est pas que quantitative, elle est aussi qualitative. En effet, dans le cas des écoulements turbulents réactifs, les définitions statistiques classiques des éléments structurels de la turbulence nécessitent des révisions conséquentes, du fait essentiellement de la variation importante de la masse volumique à travers le front de flamme. De même, les mécanismes essentiels de la production des réactions chimiques (c'est-à-dire, les phénomènes de transport de masse et de chaleur) à l'intérieur des fronts de flamme, sont très fortement affectés par les fluctuations, dans l'espace et le temps, de l'ensemble des paramètres aérothermochimiques. Autrement dit, comme précédemment, les paramètres classiques de la combustion laminaire, tels que la vitesse de propagation de la flamme et l'épaisseur du front de flamme, nécessitent également une redéfinition afin d'incorporer les divers effets de la turbulence.

Ces efforts d'intégration des deux systèmes de connaissances scientifiques font appel à des mécanismes de divers ordres qui n'excluent pas la

15. I. GÖKALP, *art. cit. supra* n. 10.

compétition entre les deux domaines constituants, celle-ci devenant de plus en plus manifeste avec la complexification croissante des connaissances accumulées tant dans le domaine de la combustion que dans celui de la turbulence. Nous pensons, par conséquent, que l'analyse des premières décennies de l'histoire moderne de la combustion turbulente permettra d'identifier certains mécanismes d'intégration de la combustion et de la turbulence, antérieurement à la transformation de ces tentatives en des thèmes fortement controversés¹⁶. Une telle analyse est proposée dans le chapitre suivant.

QUELQUES MÉCANISMES DE MISE EN CONTACT DES DOMAINES DE LA COMBUSTION ET DE LA TURBULENCE

La question de la structure des flammes turbulentes de prémélange (ftp) constituait le thème autour duquel s'articulait le travail de Damköhler que nous avons identifié plus haut comme faisant débiter la phase moderne de la CT. Damköhler identifia deux types de structure des ftp. Le premier consiste en une flamme laminaire continue mais plissée par les fluctuations turbulentes de la vitesse instantanée du prémélange réactif. Cette flamme plissée conserve instantanément les caractéristiques laminaires, comme l'épaisseur ou le taux de réaction chimique. La différence fondamentale par rapport à la flamme laminaire pure est celle créée par la surface apparente de la flamme turbulente qui, à cause de ses plissements, c'est-à-dire des fluctuations dans le temps et l'espace de la position du front de flamme instantané, est en moyenne supérieure à la surface de la flamme laminaire.

Dans ce type de structure, l'augmentation de la surface apparente de la flamme explique l'augmentation de la vitesse de combustion (ou de propagation) turbulente par rapport à la vitesse laminaire, qui est une caractéristique intrinsèque, c'est-à-dire indépendante des conditions d'écoulement d'un prémélange à composition donnée¹⁷. Cette explica-

16. I. GÖKALP, « On the Dynamics of Controversies in a Borderland Scientific Domain : The Case of Turbulence Combustion », *Social Science Information*, t. 26, 3, 1987, p. 551-576.

17. Cette compréhension de la vitesse de propagation laminaire apparaît aujourd'hui, de plus en plus, comme une hypothèse de première approximation, car de récents résultats théoriques et expérimentaux tendent à montrer une influence non négligeable des paramètres dynamiques du mélange réactif, tels que les gradients de la vitesse moyenne, sur cette vitesse. Il est évident que la prise en considération de cette interaction nécessiterait une réévaluation des pôles que nous avons considérés comme autonomes dans cette présentation des interrelations entre la combustion et la turbulence. Autrement dit, si les paramètres de combus-

tion physique s'exprime donc par l'égalité entre le rapport de surface des flammes laminaire et turbulente et celui de leur vitesse de propagation respective.

Par opposition à ce type de ftp, la deuxième structure identifiée par Damköhler est celle où la flamme laminaire en tant que telle n'existe plus et est remplacée par une zone de réaction distribuée dont l'épaisseur est supérieure à celle de la flamme laminaire. A l'intérieur de ce front élargi, les phénomènes de transfert de chaleur et de masse sont accentués par l'agitation turbulente, ce qui engendre, comme dans le type de structure précédent, une vitesse de propagation (ou de combustion) plus importante que celle du cas laminaire correspondant.

Damköhler arriva à cette classification binaire des régimes de combustion turbulente dans les systèmes de prémélange en quittant définitivement l'explication antérieure de l'influence de la turbulence sur la combustion, qui, comme nous l'avons déjà signalé, considérait cette influence comme un effet global de brassage intense du mélange réactionnel. En effet, l'originalité de l'approche de Damköhler réside dans l'intérêt qu'il porta à la structure de la turbulence et dans la mise en relation de celle-ci avec la structure de la flamme laminaire. C'est donc en mettant sur un pied d'égalité les pôles de combustion et de turbulence que Damköhler arriva à traiter d'une façon originale leur interaction. Ce « saut qualitatif » de Damköhler est également visible à partir des références citées dans son rapport, qui incluent des travaux sur la turbulence et sur la combustion laminaire, mais ne comportent aucune des études sur la combustion turbulente de la période précédente.

Dans l'identification de ces deux types de flammes turbulentes de prémélange, Damköhler se référa à un paramètre de structure essentiel de la turbulence, c'est-à-dire l'échelle spatiale de la turbulence, qui caractérise la taille moyenne des tourbillons présents dans le champ dynamique. Damköhler compara cette échelle spatiale de la turbulence à l'épaisseur de la flamme laminaire. Dans le cas d'un écoulement turbulent avec une échelle spatiale supérieure à cette épaisseur, il proposa le régime de la flamme laminaire plissée, en arguant du fait que cette turbulence à grande échelle ne pourra que plisser le front de flamme et laisser intacte sa structure interne. Par contre, pour un écoulement turbulent à petites

tion laminaire ou statique sont eux-mêmes influencés par les paramètres de l'écoulement, il semblerait opportun de déplacer l'un des pôles en interaction de la combustion laminaire vers la cinétique chimique qui, jusqu'à preuve du contraire, est aujourd'hui considérée comme ne dépendant que des phénomènes de transport laminaire. Dans son étude sur la théorie synthétique de l'évolution, Darden (*art. cit. supra* n. 11) insiste aussi sur la nécessité de prendre en considération l'évolution propre des domaines supposés autonomes dans l'étude des interrelations interdomaines.

structures, dont l'échelle spatiale caractéristique est plus petite que l'épaisseur de la flamme laminaire, il suggéra que ces tourbillons pouvaient se loger à l'intérieur du front de flamme laminaire, l'élargir, modifier sa structure interne et donner naissance au régime de réactions distribuées.

Il est donc à remarquer que Damköhler réussit à mettre en relation la combustion et la turbulence, d'une part, en s'intéressant à leur structure respective et, d'autre part, en utilisant un élément de mise en relation universel qui n'est autre que l'élément spatial, c'est-à-dire les échelles spatiales caractérisant les deux pôles de l'interrelation. Cette référence aux universaux comme l'espace, mais aussi le temps, constitue l'un des mécanismes de mise en relation de la combustion et de la turbulence, mais aussi d'autres domaines comme le transfert thermique et la mécanique des fluides en général. En effet, la comparaison des échelles temporelles caractéristiques des phénomènes étudiés normalement au sein des domaines distincts, mais se combinant dans certaines situations, est un outil d'analyse puissant qui permet d'apprécier les limites et l'importance de l'interrelation et voire d'identifier, dans une situation complexe où plusieurs phénomènes interagissent, les interactions les plus probables et les plus efficaces du point de vue de la structure et de la dynamique de la situation de frontière étudiée, en désignant notamment les cas limites. On peut aussi noter que le modèle de classification proposé par Damköhler est un cas limite, puisqu'il n'envisage pas la coexistence simultanée des structures de ftp qu'il a identifiées.

Les points forts de l'argumentation de Damköhler sont donc, d'une part, sa proposition de deux types possibles de structure des ftp, en se basant sur les connaissances accumulées dans les domaines de la combustion et de la turbulence, et, d'autre part, ses propositions d'explications physiques pour rendre compte, dans les deux types de structure, des processus conduisant à l'augmentation de la vitesse de propagation turbulente, consolidant ainsi le lien entre son modèle et le paramètre appliqué le plus important des systèmes de prémélange, à savoir leur vitesse de combustion (ou de propagation).

Dans la mise en relation des domaines scientifiques, les observations empiriques portant sur un phénomène d'ordre appliqué jouent souvent le rôle d'initiateur des interrelations. Dans le cas de la combustion turbulente, la vitesse de combustion (ou de propagation) turbulente joua ce rôle. Dans un système appliqué tel qu'un moteur à combustion interne, c'est en effet ce paramètre qui décide des performances globales du système en imposant les limites de son efficacité (ou rendement). Lors de la deuxième phase de la préhistoire de la combustion turbulente (voir *supra*, p. 459), les recherches empiriques pour la détermination

des paramètres influençant cette vitesse avaient déjà permis d'indiquer la complexité des couplages entre les paramètres concernant la nature de l'écoulement et ceux concernant la nature chimique du mélange réactif. De même, une fois que les connaissances de la chimie de la combustion et de la mécanique de la turbulence ont été mises ensemble plus systématiquement que par les approches empiriques, l'objectif de la compréhension des mécanismes régissant la vitesse de combustion fut conservé. Autrement dit, l'objectif d'ordre appliqué qui était à l'origine des relations entre les deux domaines continua à constituer le mobile ultime des recherches en combustion turbulente dans la phase moderne de son développement. Le niveau d'organisation globale de la rencontre des deux domaines n'était donc pas modifié lors des premières décennies de cette phase ; mais les relations suspectées entre les deux domaines étaient maintenant identifiées plus clairement. Une brève présentation des développements autour de la notion de vitesse de propagation turbulente (S_T) dans cette nouvelle période, permettra d'identifier certains des mécanismes de mise en contact et d'intégration de deux domaines scientifiques.

Pour représenter analytiquement l'augmentation de la vitesse de propagation dans le cas du régime du front de flamme plissé, c'est-à-dire en présence de la turbulence à grande échelle, il a été proposé par Damköhler, et aussi par d'autres après lui, de rajouter à la vitesse de propagation laminaire S_L une vitesse caractérisant l'intensité de la turbulence de l'écoulement. La vitesse de propagation turbulente de la flamme s'écrit alors comme la somme de deux termes, l'un représentant la contribution de la chimie et des phénomènes de transfert thermique qui y sont associés, (S_L), et l'autre représentant la contribution de la turbulence. Ainsi, la chimie et la turbulence étaient mises en relation par une simple opération d'additivité qui présupposait une commensurabilité des deux domaines et des phénomènes qu'ils induisirent quant à la vitesse de propagation de la flamme. La mise en contact de deux domaines distincts par addition de leurs effets respectifs est l'un des mécanismes d'intégration, où le niveau d'organisation de l'effet d'ensemble reste inchangé par rapport à la situation précédente, mais où des relations de cause/effet, de tout/partie et de structure/fonction commencent à être entrevues.

Dans le cas d'une turbulence à petite échelle, le mécanisme utilisé de mise en contact de la chimie et de la turbulence était celui de l'analogie. En effet, dans ce cas, la vitesse de propagation turbulente recevait une définition identique à celle de S_L , dans laquelle les coefficients de transports moléculaires étaient remplacés par les transports turbulents, beaucoup plus intenses que la diffusivité thermique ou la viscosité dynamique moléculaires. Ainsi, dans ce régime limite de combustion turbu-

lente, les phénomènes d'ordre chimique et ceux d'ordre turbulent étaient également pensés commensurables, en utilisant une analogie entre le tout (c'est-à-dire la vitesse de propagation turbulente qui était l'aspect de la combustion turbulente sur lequel étaient concentrées les études de la période ici considérée) et l'une des deux parties (la combustion, c'est-à-dire la propagation de la flamme soit en régime statique, soit en régime dynamique mais laminaire), tout en utilisant des connaissances provenant du corpus de la deuxième partie, la turbulence. Il apparaît ainsi que l'analogie, en tant que mécanisme d'intégration de deux domaines scientifiques, et tel qu'il a fonctionné dans ce cas particulier, ne permet pas non plus de changer de niveau d'organisation parce qu'elle est incapable de rendre compte des modifications simultanées dans les deux domaines intervenants et qu'elle entraîne une forte dépendance envers l'une des parties.

Un nouveau mécanisme d'interrelation entre la turbulence et la combustion, introduit au début des années 1950, a permis, pour la première fois, d'envisager cette rencontre comme une réelle interaction. Cette évolution s'est faite par l'intermédiaire de la notion de « turbulence créée par la flamme » (TCF), proposée par Bela Karlovitz¹⁸ et reprise par d'autres durant les années 50. Comme sa structure syntaxique l'indique, cette notion se propose comme un concept hybride et témoigne ainsi de sa fonction de mise en relation des deux pôles de la combustion turbulente. De même, le contexte d'où cette notion est issue, et que nous relaterons ci-dessous, montre que le problème de la TCF était intimement lié à ceux de la structure des flammes turbulentes prémélangées et de la vitesse de propagation turbulente et constituait ainsi l'un des éléments d'un réseau de problèmes interconnectés. De même, la question de la TCF posait un problème de validation expérimentale redoutable, celui bien sûr de sa mesure directe avec les moyens expérimentaux totalement inappropriés de l'époque¹⁹.

L'idée de la TCF est issue d'une observation concernant la quantification de la vitesse de propagation turbulente. En effet, les relations analytiques du type additionnel, issues du modèle du front de flamme plissé (cf. *supra*), prédisaient des valeurs de S_T bien inférieures à celles mesurées dans les flammes turbulentes de laboratoire. Comme ces relations ne faisaient qu'ajouter l'intensité de la turbulence de l'écoulement réactif à S_L pour obtenir S_T , on pensait simplement que la flamme elle-même créait un certain niveau de turbulence qui, toujours par le même

18. Bela KARLOVITZ, D.W. DENNISTON, W.E. WELLS, « Investigation on Turbulent Flames », *Journal of Chemical Physics*, t. 19, 1951, p. 541-550.

19. I. GÖKALP, *art. cit. supra* n. 10.

processus additif, augmentait le niveau de S_T ; parallèlement, divers mécanismes d'ordre cinématique, thermique et hydrodynamique étaient avancés pour justifier cette génération de turbulence additionnelle. Ainsi, même si, à cause de l'absence totale de mesures expérimentales de l'évolution du niveau de la turbulence à travers un front de flamme, ces explications des origines de la TCF n'étaient au mieux que des spéculations, il n'en demeure pas moins qu'avec l'introduction de cette notion, les relations entre la combustion et la turbulence étaient finalement envisagées comme une réelle interaction (c'est-à-dire à un niveau d'organisation « supérieur » à celui envisagé par les interrelations du type additionnel ou analogique), puisque la combustion pouvait dorénavant modifier la turbulence de l'écoulement incident, ce qui à son tour pouvait modifier la combustion par le biais, par exemple, d'une vitesse de propagation accrue. Même si le processus d'interaction envisagé était linéaire, l'idée de la TCF marque le début d'une nouvelle étape dans l'histoire moderne de la combustion turbulente, celle qui sera traversée par la recherche d'informations expérimentales sur la structure de la turbulence dans les écoulements réactifs et qui aboutira de nos jours au développement et à l'application intensifs des méthodes de diagnostics optiques²⁰.

Cette brève présentation des développements essentiels dans les premières décennies de la période moderne du domaine de la combustion turbulente montre ainsi que les pionniers de cette période ont bâti un réseau bien connecté de tentatives de mise en relation et d'intégration des phénomènes d'ordre chimique et de ceux d'ordre turbulent, afin de les rendre commensurables, voire même, de justifier l'émergence d'un nouveau domaine de recherche autonome (ou autonomisable) par rapport aux deux domaines constituants. Ainsi, la structure des flammes turbulentes prémélangées était traitée par Damköhler en se fondant sur les caractéristiques universelles du concept de l'espace, et en se référant aux échelles spatiales des aspects chimiques et turbulents de l'interaction. Parallèlement, la notion de vitesse de propagation turbulente était construite soit par un mécanisme de commensurabilité additionnelle, soit

20. Pour une présentation des possibilités expérimentales mais aussi théoriques, ouvertes par l'introduction des techniques expérimentales optiques utilisant la lumière laser et fondées, parmi d'autres principes optiques, sur l'effet Doppler et sur l'effet Rayleigh, voir respectivement I. GÖKALP, Ian G. SHEPHERD, Robert K. CHENG, « Spectral Behaviour of Velocity Fluctuations in Premixed Turbulence Flames », *Combustion and Flame*, t. 71, 1987, p. 313-323 et Abdelkrim BOUKHALFA, I. GÖKALP, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, 1988, p. 755-761. Un panorama plus complet des interactions actuelles entre les aspects théoriques et expérimentaux des écoulements turbulents réactifs se trouve dans Roland BORCHI, S. N. B. MURTHY, eds, *Turbulent Reactive Flows*, New York, Springer Verlag, 1989.

par un mécanisme d'analogie entre le tout (la combustion turbulente) et ses parties. Enfin, le mécanisme par lequel la combustion turbulente fut pensée pour la première fois comme résultant d'une réelle interaction entre ses deux termes faisait appel à une notion hybride, celle de la turbulence créée par la flamme. Ainsi, référence aux universaux, commensurabilité additionnelle, analogie et production de concepts hybrides constituent les mécanismes essentiels de mise en contact et d'intégration des domaines autonomes de la turbulence et de la combustion.

Aujourd'hui, le domaine de la combustion turbulente ou des écoulements turbulents réactifs qui a émergé de ces premières tentatives d'intégration systématique constitue définitivement un niveau d'organisation autre que ceux des domaines de la combustion et de la turbulence pris séparément. L'évolution récente de ce domaine est riche d'exemples de processus d'unification/intégration par connexions interdomaines, concernant les aspects tant théoriques qu'expérimentaux des relations entre la turbulence et la chimie de la combustion. Par ailleurs, tout semble indiquer que le domaine des écoulements turbulents réactifs pourrait constituer le domaine unifié à partir duquel les domaines de la turbulence pure et de la combustion laminaire ou statique pourraient découler comme des cas limites : en effet, on peut montrer aujourd'hui tant théoriquement (c'est-à-dire à partir des équations de conservation d'un système turbulent réactif) qu'expérimentalement, qu'un tel système tendra vers la limite de combustion laminaire ou statique si l'on fait tendre le nombre de Reynolds turbulent (qui représente le rapport entre le transport turbulent et le transport moléculaire) vers zéro, et vers la limite d'un écoulement turbulent non réactif si l'on fait tendre le nombre de Damköhler (qui représente le rapport entre les échelles temporelles caractéristiques de l'écoulement et de la production chimique) vers zéro.

Il nous semble que les interrelations que nous avons traitées dans ce texte constituent un exemple pertinent de l'instauration de liens durables mais dynamiques entre divers domaines ayant une structure et une dynamique autonomes et peuvent à ce titre contribuer à la consolidation d'une problématique de « situations de frontière ». Cette généralisation de l'étude des interrelations nécessite bien évidemment l'extension de la notion de domaine et l'inclusion dans son champ définitionnel de diverses situations ou espaces autres que les branches scientifiques et faisant intervenir différentes sortes de déterminations ou de rationalités. Par exemple, un système technologique ou une institution dont la structure et la dynamique subissent les interventions de divers facteurs, tels que politique, économique, symbolique, culturel, mais aussi scientifique,

constituent d'autres exemples de « situation de frontière ». La caractéristique essentielle de tels situations ou domaines de frontière est l'instauration de divers types d'interactions entre leurs éléments constitutifs ou les facteurs qui les influencent, de sorte que toute analyse basée sur les approches du type déterministe, causal ou volontariste serait insuffisante pour leur compréhension. Par ailleurs, ces interactions font que les caractéristiques propres de chaque élément sont modifiées par la présence des autres éléments ; l'objectif premier de la constitution d'une approche destinée à étudier les situations de frontière est donc de forger les concepts nécessaires pour rendre compte de ces interrelations et interactions et de caractériser l'effet d'ensemble qui en résulte. Si l'on reconsidère la présente étude de cas à travers cette problématique générale, il devient évident que la compréhension totale de la dynamique de constitution du domaine de la combustion turbulente nécessite l'inclusion dans l'analyse des facteurs autres que cognitifs, comme ceux institutionnels ou socio-économiques²¹.

Iskender GÖKALP,
C.N.R.S., Orléans.

21. Nous avons tenté de poser les prémices d'une problématique de situations de frontière dans les textes suivants : « Éléments pour l'analyse de l'impact spatial et temporel des nouveaux systèmes de communication », *Informations sur les sciences sociales*, t. 27, 2, 1988, p. 203-235 ; « Global Networks : Space and Time », in *Global Telecommunication Networks : Strategic Considerations*, George MUSKENS, Jacop GRUPPELAAR, eds, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1988, p. 185-210 ; « The Interrelating of Scientific Fields », à paraître, *Studies in History and Philosophy of Science* ; « Contribution à l'étude des situations de frontière », communication présentée à la *Première réunion du Groupe de recherche sur la coopération intellectuelle en Europe au XX^e siècle*, Maison des sciences de l'homme, 22-23 sept. 1989 ; « On the Analysis of Large Scale Technical Systems », communication présentée au *Annual Meeting of the Society for the History of Technology*, Sacramento, California, 12-15 oct. 1989 ; « From Sprays to a Single Droplet, or, How to Isolate a Scientific Fact », communication présentée au *Annual Meeting of the Society for the Social Studies of Science*, Irvine, California, 15-18 nov. 1989.