

Chapitre 2

Représentations classiques du mouvement

Voici que s'avance l'immobilisme et nous ne savons pas comment l'arrêter.

Edgar Faure, cité par *Le Monde*, 1er juillet 1988.

Nous allons dans ce chapitre examiner les différentes façons dont le mouvement a été appréhendé classiquement en I.A. et dans certains domaines pertinents pour nos préoccupations. On peut résumer celles-ci ainsi : afin de rendre compte du mouvement de sens commun il est nécessaire d'avoir une théorie avec un niveau d'abstraction suffisant pour avoir un niveau de granularité adaptable aux situations traitées (c'est-à-dire l'aspect "qualitatif" de la théorie). Cette théorie doit avoir un certain pouvoir prédictif par rapport aux inférences de sens commun à propos du mouvement d'objets physiques de notre monde "de tous les jours", et ceci peut être testé par une certaine adéquation avec l'ontologie du monde qui transparaît dans le langage naturel. L'hypothèse centrale que nous faisons pour développer cette théorie est que les choix de représentation déterminent pour une large part ce que l'on peut obtenir dans cette perspective, les aspects de raisonnement pouvant être considérés *a posteriori*. Nous mettons donc l'accent en premier lieu sur l'expressivité.

Le mouvement est un concept très présent dans de nombreuses disciplines et est donc un sujet d'étude dans des domaines aussi variés que la physique, la philosophie, la psychologie, la linguistique et l'I.A., et chaque domaine possède ses objectifs propres et un angle d'attaque différent sur le problème de la représentation de ce phénomène. La conception newtonienne issue de la physique pré-relativiste a été prédominante même en dehors de sa discipline d'origine, mais ses limites apparaissent clairement quand il s'agit de rendre compte de la manière dont le mouvement est perçu par les humains, comme on le voit dans le langage par exemple, ou pour le faire traiter par des machines. La conception newtonienne prévaut encore dans de nombreux domaines, à quelques changements près. La plupart des théories qui se rapprochent de nos préoccupations ici (modéliser les aspects qualitatifs du mouvement) s'écartent de façon variable de la vue classique où le mouvement est une fonction continue du temps (assimilé à la droite réelle) vers un espace isomorphe à l'espace euclidien, que ce soit en raisonnement qualitatif sur des systèmes physiques, en représentation de connaissances lexicales, en modélisation de la cognition, dans les bases de données spatiales (géographiques) ou bien en vision et perception

artificielle. Nous avons tenté de les classer par rapport à un certain nombre de problèmes centraux à nos préoccupations, de façon à montrer comment ces modèles les abordent. La plupart des références que nous présentons sont issues soit de la linguistique, soit de l'I.A., soit de travaux philosophiques en ontologie formelle, sans prétendre à l'exhaustivité vue la largeur des travaux que l'on peut rattacher à des degrés divers au concept de mouvement¹. En nous concentrant sur les aspects représentationnels, nous ignorons une bonne part des travaux en psychologie ou en philosophie, notamment sur la perception du mouvement ou sur la nature de l'espace-temps dans un cadre relativiste.

Les différentes approches peuvent être distinguées par rapport à quelques choix ontologiques clés vis à vis de l'espace en général et donc du mouvement :

1. Le choix d'un espace absolu (qui existe et persiste à travers le temps indépendamment des objets qu'il contient) contre un espace relatif, où seuls les objets physiques ont une existence et sont repérés les uns par rapport aux autres à l'aide de relations spatiales.
2. Le choix d'objets étendus (régions de l'espace ou objets physiques) contre le choix de points comme entités primitives, et le choix correspondant pour le temps (la combinaison étant indépendante, certains auteurs adoptent une approche hybride).
3. Le choix d'un mouvement relatif (par rapport à d'autres entités) ou absolu (par des coordonnées dans un repère), indépendamment du choix effectué pour l'espace.
4. Le choix d'un espace et/ou d'un temps discret ou dense (ce qui altère la nature du mouvement, notamment du point de vue de sa continuité).
5. La modélisation du changement par l'intermédiaire d'un graphe d'états ou avec un ensemble de contraintes sur les transitions possibles contre une modélisation avec des prédicats dynamiques.
6. Le choix d'un espace-temps primitif contre le maintien du temps et de l'espace comme deux dimensions bien distinctes.

La plupart de ces choix peuvent être faits indépendamment les uns des autres, comme l'atteste la variété des approches recensées. Le choix d'un espace absolu combiné avec le choix d'un espace euclidien et d'un temps isomorphe aux réels est la base de la physique pré-relativiste (l'espace et le temps sont alors denses, et les primitives sont des points). On retrouve cette conception dans la plupart des approches en robotique, et dans les travaux se retrouvant sous la bannière de la "physique qualitative". Nous allons étudier dans ce chapitre les limites des approches fondées sur cette base (section 2.1).

La nature relative de l'espace est défendue dans la plupart des approches linguistiques et cognitives ((Talmy, 1975; Talmy, 1983; Vandeloise, 1986; Herskovits, 1982; Jackendoff, 1990), bien que cela n'entraîne pas toujours que le mouvement dans un tel espace soit considéré purement en termes de relations. L'approche relative est souvent combinée au choix de régions de l'espace comme entités primitives de représentation dans ces approches ; nous regroupons dans la section "études linguistiques" les apports de cette discipline au débat sur les choix de représentation.

1. Chez Aristote, entre autres philosophes de l'Antiquité, la notion de "mouvement" englobe tous les types de changement possibles, qu'ils soient purement spatiaux ou non. Nous nous contenterons du changement spatial.

Pour ce qui est du choix d'un espace-temps primitif et sur lequel seraient bâtis ensuite les concepts de temps et d'espace, peu d'auteurs se sont consacrés à l'élaboration d'une théorie dans ce sens, malgré une longue tradition philosophique de débat autour des avantages et des inconvénients d'une telle approche. Dans ce camp on trouve des approches partant de points de l'espace-temps et d'autres basées sur des régions de l'espace. La section "approches spatio-temporelles" décrit ces quelques tentatives rarement satisfaisantes d'une construction de l'espace (de sens commun ou non). Nous verrons en particulier pourquoi nous pensons qu'une telle approche possède des atouts pour la représentation du changement en particulier spatial, et les insuffisances des travaux qui réutilisent la géométrie classique pour cet objectif.

L'influence de considérations issues de l'étude de la conception humaine de l'espace s'observe dans le développement de théories récentes sur l'espace en I.A. qui s'orientent vers une représentation qualitative à des fins computationnelles. En s'inspirant de théories axiomatiques conçues par des mathématiciens ou des philosophes dans le but de développer des géométries "intuitives", ces travaux ont conduit à des formalismes topologiques et méréologiques basés sur des régions de l'espace. Ce genre de théories remet en question le bien fondé des approches passées basées sur les primitives classiques pour le temps et l'espace pour atteindre la compréhension de l'espace dans la cognition humaine, et s'approche donc plus de ce que nous tentons de modéliser. Nous reviendrons donc en détail sur ces approches au chapitre suivant. La représentation du mouvement sur cette base est rare mais quelques auteurs ont tracé des voies possibles dans cette optique. Elles impliquent souvent de reconsidérer les théories existantes sur le temps et nous présenterons dans le chapitre suivant également ces approches du temps, avant d'aborder au chapitre 4 le problème de la combinaison de ces théories "qualitatives" avec une optique proprement spatio-temporelle.

2.1 L'héritage de la physique classique en I.A.

2.1.1 Prédominance des modèles de l'espace absolu

Les succès de la physique Newtonienne pour la prédiction de certains comportements, essentiellement cinématiques et dynamiques, des objets du monde en ont fait une base évidente pour de nombreux travaux dans des disciplines concernés par des problèmes cinématiques comme la robotique. Gérer le déplacement d'un robot s'accommode assez bien des hypothèses sous-jacentes à la physique classique : un objet matériel se déplace dans un espace absolu et sa trajectoire doit être précisément contrainte par la présence d'autres objets (l'environnement, pour la plus grande partie constitué "d'obstacles", et perceptible par des capteurs numériques).

La physique classique est également la base de travaux plus proches de l'I.A. traditionnelle qui se sont attachés à modéliser, dans le but de l'automatiser, certaines formes de raisonnement sur des systèmes physiques, ce que l'on a appelé "physique qualitative" et qui est maintenant regroupé sous l'appellation "raisonnement qualitatif" (qualitative reasoning). Le cadre considéré par les chercheurs de ce domaine est en effet celui d'une machine qui doit raisonner sur des données perceptibles partielles ou imprécises et qui doit parfois fournir quand même des résultats exploitables proches de ce qu'un être humain déduit du même type d'informations, sans avoir recours à l'appareillage complexe (et très exigeant sur ses conditions d'applications) de la physique traditionnelle, à base d'équations différentielles principalement, dans la mesure où les informations disponibles ne permettent souvent pas de les résoudre dans les cas considérés. Partant du principe qu'un humain est quand même capable de déduire par exemple

qu'un objet tombant dans un entonnoir va ressortir par l'orifice du bas si sa dimension est suffisamment petite, alors que la mise en équation du phénomène est hors de sa portée, la physique qualitative a cherché à exhiber des lois qualitatives qui permettraient à une machine de produire les mêmes conclusions. La cinématique et la dynamique sont deux domaines de choix pour ces théories et c'est en cela qu'elles nous intéressent. Nous allons en effet voir à quoi correspond la notion de mouvement dans ce cadre et pourquoi ces théories ne sont pas satisfaisantes pour raisonner sur le mouvement d'une manière proche du sens commun, bien que ce soit un des buts avoués de certains de ces formalismes.

2.1.2 La physique qualitative

La physique qualitative se donnait donc comme objectifs d'automatiser le raisonnement sur des systèmes physiques, à la suite du manifeste de la "physique naïve" de Hayes mais avec des moyens un peu différents de ceux qu'il préconisait. On peut caractériser les travaux assez divers par les traits suivants, cf (Forbus, 1984) :

- Utilisation de valeurs qualitatives au lieu de valeurs numériques réelles (les "quantity spaces"). Les grandeurs sont alors soit caractérisées uniquement par leur signe (+,-,0) soit par un ensemble de valeurs discrétisé.
- Caractérisation des systèmes par des graphes de transitions entre états physiques, ces états correspondant souvent à des discrétisations des valeurs physiques classiques, comme indiqué précédemment.
- Les tâches réalisées se divisent en deux catégories :
 1. la prédiction de l'évolution d'un système (via une simulation ou un "envisonnement" qui correspond à la propagation dans le graphe d'états à partir d'un état initial et des règles régissant les transitions).
 2. l'explication du comportement d'un système par abduction sur un ensemble de règles.

En fait ces travaux emploient des moyens assez classiques d'un point de vue ontologique, alors que la vision de Hayes qui les a inspirés est bien plus radicale dans ses ambitions et ses choix de représentation. On la présentera ensuite à la section 2.3.1.

La théorie des processus

Dans la mouvance de la physique qualitative qui a émergé à partir du travail pionnier de Hayes, le projet qui a le plus de liens avec le raisonnement spatial est le formalisme qualitatif de la dynamique dont Forbus est l'initiateur. C'est pourquoi nous nous y attardons un peu, pour montrer comment sur la base des présupposés ontologiques jamais remis en cause de la physique classique ces travaux ont tenté de modéliser certaines notions de sens commun. Forbus caractérise les phénomènes physiques en différents processus (par exemple, chocs, mouvements, échauffement d'un solide, etc...) qui ont les traits suivants : ils impliquent un ensemble d'individus (objets, directions particulières, événements), ils nécessitent un certain nombre de préconditions pour pouvoir avoir lieu, et ils respectent certaines conditions, d'une part sur des quantités liées aux individus impliqués dans le processus (quantity conditions), d'autre part entre les grandeurs impliquées (relations), comme certaines relations de proportionnalité, et enfin ces processus sont caractérisées par certaines "Influences" entre les grandeurs (sans être

des relations de proportionnalité), comme par exemple ce qui lie l'accélération à la vitesse. Approche exemplaire de la physique qualitative, son étude de la physique "de base", comme on pourrait désigner l'ensemble de la cinétique et de la dynamique des solides réunit de plus les caractéristiques suivantes :

- La manipulation symbolique des concepts essentiels de la dynamique et de la cinématique : concepts géométriques et mécaniques classiques (direction, position de centre de gravité (ponctuelle), masse, énergie).
- L'utilisation de variables d'états discrétisées en trois groupes de valeurs $\{+,0,-\}$ sur lesquelles opèrent des équivalents des connecteurs arithmétiques de base (addition, soustraction) qui représentent le comportement des grandeurs physiques essentielles pour la dynamique des solides : vitesse, position du centre de gravité, forces. Les quantités discrètes sont désignées par A_m , par exemple $A_m(\text{vitesse}(B))$ désigne la norme de la vitesse de B, que l'on peut comparer à une autre vitesse ou à la valeur qualitative ZERO. L'utilisation des dérivées permet de caractériser qualitativement l'évolution de ces variables.
- L'utilisation de liens entre certaines valeurs, comme la proportionnalité : $A \alpha_{Q+} B$ exprime l'évolution positive conjointe des valeurs A et B, et $A \alpha_{Q-} B$ exprime que A diminue en proportion de l'augmentation de B.
- Le temps est implicitement représenté à travers des événements, qui peuvent temporaliser certaines propositions ; par exemple $(T \text{ A start}(E))$ exprime que la proposition A est vraie ($T=\text{true}$) à l'instant initial de E (de la même façon on peut désigner la fin de E par $\text{end}(E)$ ou la durée complète de E par $\text{during}(E)$).

Avec le vocabulaire dont il dispose, Forbus caractérise ainsi les processus de mouvement, de plusieurs points de vue, déjà distingués par Hayes, à savoir la vision Aristotélicienne, la vision Newtonienne qui est maintenant la plus familière, et une vision inspirée d'études psychologiques où le mouvement est causé par un élan ("impetus") qui donne de la vitesse à un corps et se dissipe peu à peu. Nous présentons leurs caractéristiques respectives dans le formalisme de (Forbus, 1984) :

Process Motion(B,dir)	(Newtonien)	
Individus	[B un objet, mobile(B) dir une direction]	
Préconditions	[direction-libre(B,dir) direction-de(dir,vitesse(B))]	
Cond/Quantité	[$A_m(\text{vitesse}(B)) > \text{ZERO}$]	
Influences	[I+(position(B),A(vitesse(B)))]	

Dans un mouvement de type newtonien, seule la vitesse (définie par ailleurs, et dépendant de l'accélération également définie ailleurs) a une influence sur le mouvement ; celui-ci se traduit par un dépla-

cement (dernière condition). Le mouvement “aristotélien” est défini comme suit :

Process Motion(B,dir)	(Aristotélien)
Individus	[B un objet, mobile(B) dir une direction]
Préconditions	[direction-libre(B,dir) direction-de(dir,force(B))]
Conditions/Quantité	[$A_m(\text{force}(\text{B})) > \text{ZERO}$]
Relations	[soit vitesse, une quantité vitesse α_{Q+} force(B) vitesse α_{Q-} masse(B)]
Influences	[I+(position(B),A(vitesse(B)))]

Dans un mouvement “aristotélien” le mouvement a besoin d’une poussée constante (la force) pour continuer, et sans lui il ne peut y avoir de vitesse. Une troisième définition du mouvement est donnée par Forbus et s’inspire de la théorie de l’élan : un mouvement est impulsé par une force (il y a donc un processus spécial qui initie le mouvement) qui donne à l’objet une accélération qui a son tour donne un certain élan à l’objet qui va entretenir le mouvement, tout en se dissipant spontanément au cours du mouvement (cette définition du mouvement fait alors intervenir trois types de processus en interaction : l’élan qui imprime un mouvement à un objet, le mouvement lui même qui poursuit l’impulsion et la force de dissipation du mouvement qui va tendre à le stopper ; nous ne les présentons pas en détail maintenant que nous avons donné une idée plus précise de ce qu’est un processus). Cette dernière vision du mouvement est inspirée des conceptions naïves du mouvement qui apparaissent chez certains sujets observés dans les travaux de McCloskey que nous avons déjà mentionnés (McCloskey, 1983). Il faut maintenant voir comment on peut utiliser ce formalisme pour effectivement raisonner de façon qualitative sur des situations physiques. En fait la théorie des processus telle qu’on l’a présentée a un pouvoir prédictif très faible : les trois types de mouvement définis ne sont pas vraiment utilisés pour faire de la cinématique, sans doute parce que Forbus n’a pas voulu ou pu faire le choix de celui qui était le plus approprié à ses objectifs, et qu’ils sont bien sûr incompatibles. Pour faire de la cinématique qualitative, Forbus va donc redéfinir partiellement ses outils et construire un formalisme à part (Forbus, 1984). Il prend l’exemple d’une balle lancée au dessus d’un puits, représenté figure 2.1. Le modèle intègre les segments et les régions de l’espace “pertinents” pour la description, et considère 8 directions de mouvement possibles à chaque instant (2 horizontales, 2 verticales et les médiatrices de ces directions). Chaque segment est soit une limite entre deux régions libres, soit une surface matérielle orientée, soit la limite du diagramme. Le rôle de la gravité fait que les régions introduites dans l’espace analysé sont essentiellement les verticales et horizontales des points limites des segments matériels. Le résultat de l’analyse des contraintes supprime certaines possibilités (comme le fait que la balle ne peut, vues les conditions initiales, être dans la région la plus à droite et revenir vers la droite). Dans l’exemple considéré cela autorise quand même 86 états distincts, correspondant soit à la traversée d’une région, soit à la collision avec une surface, soit au passage d’une frontière entre deux régions, à chaque fois combinée avec une des huit directions qualitatives possibles. Par exemple, l’état FLY(region3,bas-gauche) (la balle traverse la région 3 avec la direction vers le bas et la gauche) peut mener à un des deux états suivants : soit PASS(segment s1,bas-gauche) soit à COLLIDE(s2,bas-gauche).

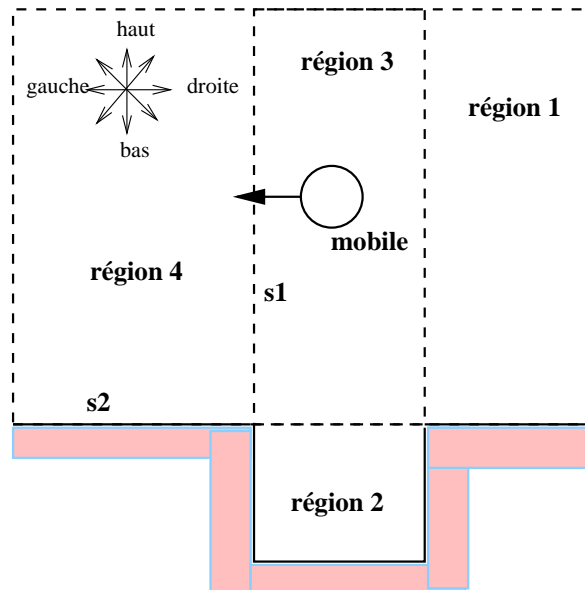


FIG. 2.1 - Analyse d'une situation cinématique dans FROB

Les inconvénients d'une telle vision du mouvement sont flagrantes. Les régions pertinentes pour l'analyse sont totalement *ad hoc* et leur génération plus ou moins arbitraire ; la segmentation en régions est difficilement justifiable en dehors de situation très simple comme celle de l'exemple où toutes les surfaces sont parallèles ou orthogonales à la gravité. La discrétisation nécessaire à l'élaboration d'un diagramme d'états ne correspond en fait pas à des séparations qualitatives dans le sens où elle ne définit pas des changements réels des propriétés de l'espace. La composition d'un état à un autre fait perdre beaucoup d'informations car chaque transition d'une région à une autre fait augmenter l'incertitude quant à la région qui sera traversée ensuite, sans que cela corresponde à une incertitude intuitive réelle ; on peut donc s'attendre à ce que dans des cas limites, aux frontières des régions par exemple, le modèle soit très sensible à des variations minimales des données numériques. C'est là un des aspects les plus discutables de cette approche qualitative de la physique : la discrétisation en "quantity spaces" est une simplification assez arbitraire de modèles physiques qui sont eux-mêmes des simplifications de réalités physiques plus complexes que les humains appréhendent avec un meilleur niveau d'abstraction que ces modèles, parce que le domaine de validité des théories physiques est restreint à des situations très précises, comme des trajectoires d'objets ponctuels dans le vide par exemple, et en ne considérant qu'un nombre limité d'objet.

La physique qualitative de Davis

Partant d'une base ontologique similaire mais avec l'intention d'éviter les écueils sur lesquels Forbus s'est échoué, Ernest Davis a développé une théorie qualitative de phénomènes physiques (essentiellement ce qui correspond à la dynamique classique des solides) basée sur des règles de comportement exprimées en logique du premier ordre (et dont l'automatisation devrait donc inclure un démonstrateur de théorèmes spécifique). Les objets qu'il considère sont des solides indéformables et indestructibles. Parmi les objectifs qu'il se fixe on trouve les problèmes de caractérisation cinématique des ob-

jets : quelles sont les trajectoires des objets dans une situation donnée, en considérant deux types de comportement qualitativement différents : ceux qui sont “différentiels” (comme glisser le long d’une surface ; cela correspond à peu près à la notion de processus de Forbus) et ceux qui correspondent à une caractérisation globale (comme passer à travers une surface). Davis veut également pouvoir faire des inférences sur les chemins possibles en l’absence de recouvrement des objets matériels considérés, et donc également prédire les contacts ou les pertes de contact entre objets matériels. Les règles portent sur des objets soumis aux types de forces suivants : gravité, forces normales aux surfaces de contact, frottements et une notion de “drag force” (qu’on pourrait traduire par force de freinage) et qui ralentit les objets qui roulent (Davis considérant, à tort d’un point de vue physique, que les objets qui roulent ne subissent pas de frottement mais finissent quand même par s’arrêter en l’absence d’autre force). Chaque objet est ensuite contraint par la donnée de certaines constantes (constante de frottement, masse,...). L’espace considéré par Davis est euclidien et assimilé à \mathbf{R}^3 , le temps à \mathbf{R} , mais les objets sont toujours considérés globalement (par une fonction qui leur attribue une forme correspondant à une région de l’espace), par les inclusions entre régions, par leurs relations topologiques, de contact physique, par des distances, etc, notions qui ne font jamais explicitement appel aux propriétés de \mathbf{R} et on peut penser que sa modélisation est indépendante jusqu’à un certain point de ce choix.

Les problèmes résolus par sa théorie se ramènent aux cas suivants : étant donnés certains objets et une situation initiale (leurs positions et leurs vitesses), arrive-t-on à un état stable ? quelle est la position des objets dans cet état s’il existe ? sinon quelle est la nature du mouvement ? quelles sont les collisions qui ont lieu entre les objets présents ?

La place des objets est une fonction des situations possibles, par exemple

$\text{image}(\text{mapping}(S,O),\text{shape}(O))$

représente la position dans la situation S de l’objet O dont la forme est $\text{shape}(O)$, ce qui correspond plus ou moins à ce que l’on trouve dans le calcul des situations, le formalisme le plus utilisé en I.A.. pour modéliser l’action (et que l’on retrouve en planification et en robotique cognitive). L’évolution du système est ensuite donnée par une “chronique” qui associe à chaque instant d’un intervalle de temps donné une situation, en respectant les contraintes exprimées par la théorie. Ces contraintes (des règles logiques) sont du type géométrique : “deux objets ne peuvent se recouvrir”, ou bien physiques “l’énergie d’un système isolé n’augmente jamais” et Davis arrive alors à montrer des assertions analogues à “un objet à l’intérieur d’un tube finit toujours dans un état stable ou bien il sort par l’une des extrémités” et dans le cas d’un tube vertical, cette extrémité est celle du bas. Le projet de Davis suit véritablement les traces de Hayes, en caractérisant un peu plus précisément des phénomènes physiques naturels. Le problème principal de son approche est que l’utilisation pratique est difficile à cause d’une théorie axiomatique foisonnante et dont la cohérence n’est pas vérifiée, ce qui condamne presque sûrement le raisonnement par démonstrateur qu’il se propose de poursuivre. Il modélise cependant certaines intuitions de façon beaucoup plus abstraite et générique que ne le fait Forbus, et fournit une base intéressante qui demanderait une validation théorique plus rigoureuse. Les objets qu’ils manipulent respectent par ailleurs les présupposés des autres approches de physique qualitative : l’espace est absolu, euclidien (même si ce n’est pas essentiel), et cela nécessite de faire les raisonnements purement géométriques à l’aide d’une fonction de localisation dont les propriétés ne sont pas spécifiées et dont on peut se demander l’utilité quand le rôle joué par la géométrie n’est pas clairement précisé (quelles sont les propriétés nécessaires ?). Un autre problème plus important est que les règles sont fondées sur des approximations peu justifiées autrement que par un souci de simplicité qui peut s’avérer excessif ; par exemple

on trouve l'axiome suivant :

$$\text{shape}(\text{centre-mass}(\text{O})) \in \text{interior}(\text{convexhull}(\text{shape}(\text{O})))$$

qui exprime que le centre de gravité d'un objet fait partie de la fermeture convexe de la forme de cet objet. Cette propriété est très faible et il est à craindre que la sous-spécification qu'elle entraîne ne bloque beaucoup d'inférences, notamment parce que la notion de fermeture convexe est déjà assez complexe (sans compter que pour beaucoup d'objets physiques ce centre de masse est situé à l'intérieur de l'objet, y compris pour beaucoup d'objets non convexes). On voit là que le domaine d'étude est peut-être encore trop vaste pour se prêter à une formalisation de ce type qui soit efficace et nous pensons qu'il est sans doute nécessaire de segmenter encore plus précisément les phénomènes que l'on veut représenter. C'est d'ailleurs plus ou moins ce qui est fait dans les approches plus récentes de raisonnement "spatial" ou de raisonnement qualitatif en mécanique.

2.1.3 Approches absolues récentes

Malgré les échecs récents pour ce qui est du raisonnement cinématique, certains auteurs ont poursuivi l'étude du mouvement avec les mêmes postulats de base que la physique qualitative (discrétisation et modèles physiques absolus). Dans la lignée de Forbus ou Davis, (Rajagopalan et Kuipers, 1994) modélisent certaines aspects de la physique des solides. Le raisonnement qualitatif (dont l'objectif est la simulation de la cinématique de solides) porte sur des abstractions de formes : les objets sont assimilés soit à un rectangle englobant, soit à une sphère ou un cercle englobant. Généralement les situations sont décrites en deux dimensions : un solide glissant le long d'un plan incliné assimilé à une ligne, objet roulant, ressorts... L'apport est la prise en compte de l'orientation sur des objets étendus (contrairement aux points de Forbus), avec en plus l'introduction de directions (vitesses, normales aux surfaces) plus pertinentes que celles de Forbus (qui choisit arbitrairement les 8 directions absolues haut, bas, gauche, droite, et leurs bissectrices). Cette approche implique cependant un pré-traitement implicite : choix des surfaces, détermination des orientations privilégiées qui permettent de se ramener à deux dimensions, formes simples et non généralisables ; le choix de la forme simplifiée d'un objet (cercle ou rectangle) présuppose de plus pour une bonne part la résolution *a priori* du problème : le cercle englobant n'est un avantage que pour un mouvement comportant une rotation, alors que le rectangle est plus approprié pour les glissements. On peut donc difficilement parler d'un modèle générique.

Une autre approche est celle de (Shanahan, 1995) et revient sur le raisonnement sur le mouvement générique avec les hypothèses de Davis : même vocabulaire, pour les formes et les concepts ; Shanahan a cependant une approche du raisonnement avec une logique par défaut et l'utilisation de la circonscription pour minimiser certains prédicats. La règle non monotone unique de raisonnement est que l'espace est vide par défaut, et que le mouvement est la seule exception directe (ainsi Shanahan veut éviter le trop fameux "frame problem"). La spécification des états spatiaux est alors très lourde, à cause de l'utilisation du calcul des situations et le mécanisme de raisonnement est par trop inspiré de problèmes (l'action) qui n'ont qu'un lien assez éloigné avec les problèmes de représentation de l'espace, sans en montrer les liens de façon convaincante. En effet la sémantique des prédicats "géométriques" n'est pas véritablement spécifiée ; comme Davis, Shanahan adopte *a priori* tout l'éventail de la géométrie classique, avec les mêmes inconvénients que ceux que l'on a indiqué plus haut.

2.1.4 Les limites des approches absolues pour le raisonnement spatial

Comme l'ont déjà souligné Davis (Davis, 1988), Struss (Huberman et Struss, 1990) et Vieu (Vieu, 1991), l'approche de Forbus est tout à fait défendable dans sa caractérisation des liens entre différents phénomènes physiques qui ne font intervenir que des variables portant sur des quantités numériques à une dimension (ébullition par exemple), mais elle échoue sur les comportements plus complexes qui font intervenir des espaces à plusieurs dimensions (comme le mouvement), car son modèle devient non compositionnel (le vocabulaire de places dont dépend le raisonnement doit être redéfini pour chaque problème) et les processus définis n'interviennent en fait pas directement sur la classification qui est faite des comportements cinématiques. Forbus l'a admis lui-même plus tard dans (Forbus, 1995). Revenant dix ans après les premiers travaux sur le raisonnement qualitatif sur des propriétés spatiales il affirme en effet la "poverty conjecture", conjecture de pauvreté, sous-entendu de la structure de l'espace :

There is no problem-independent, purely qualitative representation of shape or space.

Forbus avance l'argument suivant, cité dans (Cohn, 1996) pour étayer cette conjecture :

Quantity spaces don't work in more than one dimension (...) we suspect the space of representations in higher dimension is sparse ; that for spatial reasoning almost nothing weaker than numbers will do.

Pour Forbus, l'échec des "quantity spaces" pour l'espace venait du manque de structure de l'espace qui ne permettait pas d'appliquer les techniques de raisonnement sur des grandeurs pourvues d'un ordre total (comme les températures) ; on voit comment un présupposé jamais remis en cause, à savoir que l'espace doit être décrit par des mesures numériques absolues, conduit à condamner a priori toute tentative de formaliser le raisonnement de sens commun sur l'espace et le mouvement. Nous verrons plus loin (chapitre 3) comment la remise en cause de ce postulat implicite a permis au contraire de dépasser les limitations de l'approche absolue du mouvement de sens commun, ce qui a fait dire à Anthony Cohn (Cohn, 1996) que la conjecture de pauvreté avait été dépassée.

On peut en fait penser que la cinématique qualitative était vouée à l'échec à cause de la non-linéarité de la plupart des phénomènes physiques et des simplifications imposées par l'approche à des modèles déjà simplifiés de la réalité physique (car linéaires), celle-ci étant largement imprédictible en général pour la plupart des systèmes physiques à cause des phénomènes de sensibilité aux conditions initiales (le phénomène du chaos). Par opposition le sens commun utilise sans doute des représentations plus grossières, mais qui en présence du chaos physique trouve quand même la bonne granularité, adaptée à la situation à appréhender, (pour une analyse de l'importance du chaos pour le raisonnement qualitatif, voir (Huberman et Struss, 1990)). En cela, l'approche de Davis fait sans doute mieux que celle de Forbus en considérant des propriétés plus globales. De façon générale, les travaux en raisonnement qualitatif portent sur la description des états possibles d'un système de façon peu générique et dans le cas du mouvement elles traitent surtout de systèmes à un degré de liberté (ressorts, pendules, etc) qui permettent de le ramener à un problème de comparaison d'ordre de grandeur en une dimension. Ces problèmes perdent ainsi leur nature réellement spatiale : la présence de plusieurs dimensions, l'absence d'un "espace de quantité" totalement ordonné.

Après cette étude du mouvement d'un point de vue qui ignore assez largement la nature de l'espace de sens commun (malgré les prétentions affichées au départ), nous allons voir maintenant comment

les travaux d'IA ont été influencés par ce qu'avait pressenti Hayes très tôt, à savoir que l'étude du sens commun devait prendre en considération des domaines qui sont justement en partie des manifestations de ce sens commun, à savoir la psychologie et la linguistique. Ces disciplines ont en effet mené à reconsidérer la conception qu'avaient les gens de l'espace à travers leur perception de certains phénomènes et la façon dont ils expriment ces mêmes phénomènes dans le langage. Nous verrons ensuite les conséquences de ce changement de perspective.

2.2 Études linguistiques du mouvement

2.2.1 Liens entre raisonnement qualitatif et linguistique

La représentation des connaissances de sens commun en I.A. est souvent fondée sur les intuitions des auteurs sur les concepts qu'ils essaient de modéliser, la plupart du temps sans souci d'une validation cognitive de leur théorie. Par exemple certaines théories de l'espace partent d'une notion intuitive (la connection entre régions de l'espace par exemple) et se concentrent ensuite sur les distinctions qui peuvent être faites sur cette base. Le succès d'une théorie est alors mesuré par son pouvoir expressif par rapport aux intuitions qu'elle tente de capturer, et par le type des inférences permises que l'on considère comme correctes. Dans la perspective de la formalisation des capacités de raisonnement, surtout de raisonnement qualitatif, des approches complémentaires doivent être aussi utilisées, comme le souligne Patrick Hayes dans son Manifeste de la Physique Naïve (Hayes, 1985b), à propos de "la découverte d'intuitions et la construction de théories" :

...So far I have assumed that concepts have been initially identified by no more than careful introspection. Other more objective and disciplined ways are also available. Detailed examinations of the meanings of English spatial prepositions (Herskovits 1982) provides many clues.

Il est clair aussi comme il le dit plus loin, qu'il n'y a pas une correspondance univoque entre les concepts que l'on peut isoler et les unités lexicales d'une langue particulière. Cependant l'étude des données linguistiques peut servir de guide pour une étude conceptuelle des modèles intuitifs de l'espace et du mouvement, en sélectionnant les catégories pertinentes parmi la multitude des choix possibles pour leur représentations (ce qui l'a guidé pour son travail sur l'ontologie des liquides par exemple (Hayes, 1985a)). De plus cela donne un moyen de validation "expérimental" de validations des intuitions qui vont gouverner l'analyse, en testant l'adéquation des modèles produits pour la représentation de la sémantique des marqueurs linguistiques qui ont alimenté le travail d'analyse. Cette approche est celle qui a été suivie entre autres par (Hobbs *et al.*, 1987) et (Aurnague *et al.*, 1997; Aurnague et Vieu, 1993); ce dernier article présente une théorie de l'espace (qui sera présentée plus en détail par la suite) qui a émergé de l'analyse linguistique des prépositions spatiales du français.

Quand il s'agit de la représentation qualitative du mouvement, le problème du choix des distinctions de base qu'il faut faire est d'autant plus aigu (par rapport aux concepts spatiaux purement statiques) que si on se contente de considérer indépendamment les distinctions généralement faites dans les théories qualitatives de l'espace statique et du temps, on rencontre une multiplicité de configurations rédhibitoire. Les travaux de Galton (que nous présenterons plus loin en détail) ont montré le genre de structure que l'on peut vouloir pour une théorie du changement continu de relations spatiales. Galton a notamment donné, sur une base axiomatique, quelques exemples de définitions de classes de mouvement

“naturelles”, utilisant les transitions élémentaires de son modèle. Malheureusement il ne prétend à aucune exhaustivité, et le problème du choix des classes de transition qui correspondent aux classes pertinentes pour le raisonnement de sens commun reste entier. Théoriquement, sur la base des 8 distinctions exhaustives admises généralement dans les théories topologiques qualitatives et en définissant un mouvement comme une transition élémentaire entre deux états différents, on arrive déjà à 56 cas possibles. Dans la mesure où la plupart des changements qui définissent un mouvement “naturel” présupposent un ou plusieurs états intermédiaires (“traverser une région de l’espace” par exemple est défini par Galton comme une transition impliquant 4 états différents), et même si on l’on peut réduire leur nombre en tenant compte de certaines impossibilités intuitives, il reste potentiellement un nombre considérable de configurations de mouvements. On imagine le résultat de la combinaison de tous les facteurs géométriques qui peuvent intervenir dans le cas général (avec des distances et des directions en plus de la topologie). Nous allons donc voir maintenant quelles sont les classes de mouvement isolables par une étude des catégories linguistiques qui impliquent un mouvement et qui sont donc partie intégrante de nos conceptions dynamiques de l’espace. Ce qu’apportent en effet les approches linguistiques est un éventail de classification de phénomènes spatiaux qui apparaissent représentées par des structures linguistiques, que ce soit directement par des unités lexicales (verbes ou prépositions) ou par la combinaison de plusieurs éléments (phrase, groupe prépositionnel, complexe verbe+préposition). Nous allons donc présenter ici quelques études pertinentes sur l’expression du mouvement dans le langage (en français ou en anglais) qui peuvent faire émerger des structures conceptuelles génériques du mouvement qui seraient d’essence qualitative.

Nous soulignons avant de commencer cette exposition que les auteurs font des choix de représentation de leurs analyses qui ne s’accordent pas toujours entre elles (ce qui n’est guère surprenant), mais surtout que leurs considérations linguistiques se mélangent souvent avec des présupposés hérités des disciplines dont l’espace est un champ d’étude beaucoup plus traditionnel, comme la géométrie ou la physique, et les postulats associés à ces disciplines sont souvent repris sans discussion. On verra dans quelle mesure ceci doit être isolé de l’analyse plus proprement conceptuelle du langage. Nous n’allons présenter dans cette section que des approches *sémantiques* du mouvement, en laissant de côté les aspects syntaxiques liés à l’expression du mouvement (pour les problèmes liés à la syntaxe du mouvement, cf. (Laur, 1991; Sablayrolles, 1995; Tenny, 1995)). Nous présenterons tout d’abord les classifications qui insistent sur une vision du mouvement comme ensemble de contraintes sur un chemin sous-jacent à l’expression langagière d’un mouvement.

2.2.2 Le mouvement en tant que chemin

L’analyse conceptuelle de Jackendoff L’analyse sémantique du mouvement de Jackendoff, présentée dans (Jackendoff, 1983) s’attache aux structures conceptuelles qui semblent s’appliquer à l’espace et qui se reflètent dans le langage. D’après lui le mouvement est exprimé en langage naturel comme une relation entre un mobile et un ensemble de lieux (ce qui exclut les mouvements du corps et autres expressions analogues qui n’impliquent pas un déplacement du mobile mais plutôt des mouvements de parties autour d’une position globale à peu près fixe), ces lieux étant des objets de référence. Un mouvement est alors un chemin limité par de tels objets de référence (*aller à Paris, arriver de Toulouse*), ou bien par une direction par rapport à un objet (*chevaucher vers l’horizon, s’écarter du feu*), ou bien un itinéraire (*aller de Clermont à Toulouse en passant par Bordeaux*). De plus la relation à chaque instant entre un objet quelconque et un objet de référence se ramène toujours à une des re-

lations suivantes : *inside, against, near, far* (respectivement, à l'intérieur, contre, près de, loin de) et cette structuration de la localisation spatiale est soi-disant suffisante pour caractériser n'importe quel événement de déplacement correspondant aux formes syntaxiques suivantes : [Verbe+ [Groupe prépositionnel]]. Cette conception du mouvement en tant que trajectoire dans l'espace (sur un chemin) est commune à beaucoup d'analyses des verbes de mouvement, notamment (Krifka, 1995; Hays, 1989; Laur, 1991). Krifka par exemple représente le mouvement par une fonction continue ayant pour domaine d'application un ensemble d'instantanés (le temps étant alors assimilé à la droite réelle) et pour ensemble d'arrivée un ensemble de positions dans l'espace, vraisemblablement l'espace métrique euclidien (vu ses autres hypothèses). De même, on retrouve cette conception dans les travaux de (Boons, 1985; Laur, 1991). Chez Ellen Hays, cette hypothèse conduit à la représentation du mouvement comme contrainte sur une trajectoire d'un point correspondant à un "centroïde" (plus ou moins le barycentre d'un polygone censé représenter l'objet en mouvement). Il est remarquable que toutes ces approches reprennent à leur compte, sans discussion et comme postulat de départ, qu'il faut représenter les relations spatiales véhiculées par le langage naturel avec les outils habituels de la physique et de la géométrie classique et faire rentrer des concepts dont le domaine est pourtant très différent, dans le moule Cartésien de l'espace-temps. De fait l'analyse du mouvement porte alors plutôt sur des aspects connexes (agentivité du mouvement, manière de se déplacer, etc). De fait, Jackendoff ne précise jamais plus les concepts qu'il introduit pour parler de structures spatiales.

Un enrichissement formel : Asher et Sablayrolles Dans ce paragraphe nous allons présenter une tentative de formalisation du mouvement qui s'inspire de ces approches, mais qui utilise une base géométrique qui se veut plus proche du sens commun où les relations entre entités ne font mention que des régions de l'espace occupées par les entités (et pas des points abstraits). Reprenant la structure du mouvement supposée par Jackendoff, selon qui le mouvement met en relation un mobile et un ensemble de lieux qui peuvent être à la source, au but ou le long du chemin de l'événement considéré, (Asher et Sablayrolles, 1995) font un pas de plus dans la représentation de l'information lexicale en traduisant des classes de verbes en types de transition dans une théorie de l'espace et du temps plus explicite. Les verbes eux-mêmes sont divisés en trois catégories : changement de lieu (cette classe équivaut aux verbes étudiés par Jackendoff), changement de position (déplacement plus général, comme *courir sur le terrain*) et changement de posture (mouvement d'une partie par rapport à un tout sans changement de position, comme *se pencher à la fenêtre*) ; seule la première catégorie a en fait reçu un traitement formel.

Voyons d'abord quelles sont les contraintes qui pèsent sur le mouvement de façon générale : un événement de mouvement a trois phases sur lesquelles chaque verbe insiste de façon différente : une phase initiale, une phase médiane et une phase finale (ceci vient en fait des travaux initiateurs de (Boons, 1985; Laur, 1991)). Chaque événement a de plus une source, un but (goal) et un chemin associé (path). L'ontologie des auteurs inclut la notion de lieu, qui ne reçoit pas de caractérisation précise, et est même un peu ambiguë : cette notion caractérise d'une part les entités introduites par une préposition dans les expressions verbales (*entrer dans le jardin*), et parfois n'importe quelle portion d'espace qui peut être caractérisée comme une position notamment dans la définition du *path*, ce qui est un peu gênant quand on veut distinguer les classes de verbes "changements de lieux" et "changements de position". Pour rester cohérent, il faudrait plutôt considérer le *path* comme un ensemble de positions, mais là encore, ces emplacements sont introduits de façon arbitraire.

Nous avons dit que la géométrie utilisée traite directement de régions occupées par les objets. Elle reprend en fait seulement certains prédicats de base d'une théorie plus large (nous reviendrons sur les

théories du même type au chapitre 3) : P désigne la relation d'inclusion spatiale d'une région dans une autre, EC désigne un contact externe entre deux régions de l'espace, et O désigne un recouvrement. L'événement de mouvement considéré sera désigné par e . Un *path* est alors un ensemble de séquences de lieux :

$$path(e) \triangleq \{s \mid s = \langle l_1, \dots, l_m \rangle\}$$

Le référent spatial de l'événement fait partie de l'union (\sum) des lieux d'une séquence de son *path*, et deux lieux successifs de la séquence se touchent :

$$\langle l_1, \dots, l_n \rangle \in path(e) \rightarrow [P(e, \sum_{i=1}^n l_i) \wedge (\forall (1 \leq i \leq n) EC(l_i, l_{i+1}))]$$

Il existe une séquence dont les lieux extrémités sont la source et le but de l'événement :

$$\exists x \in path(e) x = \langle source(e), \dots, goal(e) \rangle$$

Enfin, dans tous les cas les lieux extrémités recouvrent la source et le goal :

$$\langle l_1, \dots, l_n \rangle \in path(e) \rightarrow [O(l_1, source(e)) \wedge O(l_n, goal(e))]$$

En plus du *path*, les auteurs définissent un “strict internal path” qui est l'ensemble des séquences privées de source et but. En plus du manque de justification de l'existence de ces lieux mal définis, on peut se demander si la relation EC entre deux régions incluant la trajectoire est vraiment adéquate. Le principe est de trouver un pendant “qualitatif” à la notion de trajectoire physique dans un espace euclidien, mais les raisonnements que l'on peut faire sur cette base ne sont pas clairs (et pas étudiés par les auteurs, dont les préoccupations sont plus liées à l'interprétation du discours). Cette structure compliquée (un ensemble de listes en fait) est justifiée par la nécessité de pouvoir traiter des raffinements éventuels, au cours du discours, de la description des mouvements d'un mobile, mais il n'y a aucun exemple qui permette d'étayer cette thèse et de comprendre la nécessité réelle de cette structure. Elle correspond en fait à une résurgence d'une vision absolutiste (c'est à dire utilisant un espace absolu) du déplacement, considéré comme une fonction du temps vers un ensemble de “places” spatiales occupées successivement au cours du mouvement.

Par la suite, les auteurs représentent la classe des changements de lieu par rapport à des zones de l'espace définies par le mobile et un lieu de référence du mouvement (défini au niveau du discours). Ces zones sont au nombre de sept et devaient constituer en fait un raffinement des quatre relations de Jackendoff (inside, against, near, far). Ces zones sont illustrées figure 2.2, et définies logiquement ci-dessous. Les auteurs parlent en fait de relations qui caractérisent la localisation de deux régions, mais leurs définitions font presque toujours appel à des zones définies fonctionnellement à partir des entités de base et on préférera donc parler de zones (dans la représentation finale des verbes, seules des zones sont utilisées).

Les relations correspondant à ces zones utilisent les notions suivantes : f_int et f_ext sont des fonctions qui donnent la région de l'espace qui correspond à la zone “fonctionnelle” respectivement intérieur et extérieur déterminée pour deux entités et qui correspondent aux endroits où il y peut y avoir des interactions entre eux (pour une voiture et un humain, f_int donne l'habitacle, et ce que donne f_ext est loin d'être clair –et n'est jamais précisé) ; $prox(x, y, C)$ donne la zone de “proximité” dans

un contexte C , autrement dit elle n'est pas définie de façon simple (c'est d'ailleurs un sujet d'étude en soi en raisonnement spatial qualitatif cf (Hernández, 1994)). Par ailleurs PP désigne l'inclusion spatiale stricte, et WC un contact "naturel" entre deux objets distincts matériellement. Les relations "inner-halo", "contact", "outer halo" et "outer most" correspondent aux relations de Jackendoff et les trois autres sont censées être les relations de transitions entre les précédentes :

Inner halo $inner_halo(x, y) \triangleq PP(x, f_int(y, x))$

Inner Transit $inner_transit(x, y) \triangleq EC(x, y)$

Contact $contact(x, y) \triangleq PP(x, f_ext(y, x)) \wedge WC(x, y)$

Outer halo $outer_halo(x, y, C) \triangleq PP(x, prox(y, x, C))$

Contact transit $contact_transit(x, y, C) \triangleq contact(x, y) \wedge outer_halo(x, y, C)$

Outer most $outer_most(x, y, C) \triangleq \neg PP(x, prox(y, x, C)) \wedge PP(x, f_ext(y, x))$

Outer Transit $outer_transit(x, y, C) \triangleq outer_most(x, y, C) \wedge outer_halo(x, y, C)$

L'ensemble de ces définitions est très sous-spécifié, visiblement incomplet (toutes les transitions entre zones ne sont pas présentes), voire même incohérent ("outer transit" combine les définitions – contradictoires – de "outer most" et "outer halo") ; de plus on pourrait s'attendre à ce que ces zones soient disjointes si elles doivent caractériser des types de déplacement différents, mais il semble clair d'après leurs définitions logiques que quelles que soient les contraintes qui portent sur la zone de proximité et les espaces fonctionnels, la zone de contact est contenue dans la zone de contact-transit elle-même incluse dans celle d'outer-halo. Pourtant le schéma que donnent les auteurs (reproduit figure 2.2) semblent indiquer une interprétation différente. Ceci n'est donc à tout prendre pas beaucoup plus précis d'un point de vue spatial que les relations de Jackendoff, et ne fait donc que proposer une structuration différente (et discutable) de l'espace d'un point de vue langagier. Le résultat de ces distinctions est alors une dizaine de classes de mouvement qui correspondent aux distinctions que l'on peut faire en considérant la position du mobile pendant la phase initiale, finale ou médiane du processus ; elles sont résumées table 2.1, où G symbolise le goal, S la source et SIP le chemin (strict internal path) du mouvement. Par exemple, l'expression x sort de y est représenté, en faisant abstraction du temps verbal, par :

$$\begin{aligned} mobile(e) = x \quad & \wedge P(source(e), Zone_inner_halo(x, y)) \\ & \wedge P(goal(e), Zone_outer_halo(x, y)) \\ & \wedge P(SIP(e), Zone_inner_transit(x, y)) \end{aligned}$$

Une classe supplémentaire "dévier" fait appel à des modalités (par rapport à une trajectoire probable) qui ne sont pas définis dans ce cadre là et elle a donc été laissée de côté ((Gayral *et al.*, 1994) tente de modéliser logiquement cette notion de trajectoire potentielle, qui nous paraît trop complexe et trop dépendante du contexte pour être étudiable dans le cadre que nous nous sommes fixé). Représenter le mouvement comme un ensemble de lieux définis par rapport à des zones construites autour d'un objet de référence (bien qu'elles soient qualitatives) pose des problèmes importants pour la définition de ces régions. Il est loin d'être clair si certaines doivent être considérées comme primitives ou bien

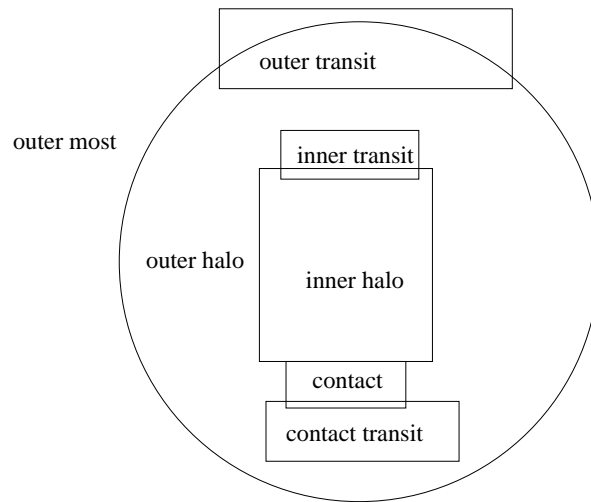


FIG. 2.2 - *Les sept relations de Asher et Sablayrolles*

TAB. 2.1 - *Les 10 classes de changement de lieu*

	Inner	Inner transit	Contact	Contact transit	Outer Halo	Outer Transit	Outer most
entrer	G	SIP			S		
sortir	S	SIP			G		
arriver	G				SIP		S
partir	S				SIP		G
s'approcher					G	SIP	S
s'éloigner					S	SIP	G
se poser			G	SIP	S		
décoller			S	SIP	G		
passer	SIP				S/G		

définies à partir de certaines propriétés (mais alors lesquelles) qui dépendent de l'objet à localiser, de l'objet de référence ou du contexte (comme *l'intérieur*), quand ce n'est pas les trois à la fois. On peut se dire que la tentative de forcer le mouvement dans un moule topologique relationnel mélangé à des considérations non relationnelles et non topologiques était voué à l'échec dans le cas général, puisque qu'il est absurde de vouloir y réduire des expressions verbales comme *s'approcher de* ou *aller vers*. Il serait sans doute plus approprié d'admettre qu'il y a d'autres aspects (liés à l'orientation ou la distance) qui interviennent et que l'on ne peut définir que de façon partielle la sémantique des verbes en termes topologiques.

2.2.3 Le mouvement en tant que relation

Nous allons maintenant nous intéresser aux travaux de Leonard Talmy, dont l'approche est différente des travaux précédents dans la mesure où il ne s'intéresse pas à des zones spatiales mais à des relations entre objets ; ces relations ne sont pas uniquement topologiques et décrivent des configurations géométriques variées. Talmy se concentre sur ce qu'il appelle les "idéalisations" qui sont faites lorsque l'on décrit des configurations spatiales, plus précisément dans (Talmy, 1975) sur les mouvements correspondants à des changements de position dans la terminologie de Asher et Sablayrolles. Dans ce cas précis, un verbe de mouvement exprime une relation entre la trajectoire d'un mobile et un objet de référence qui possède certaines propriétés. Selon lui on peut abstraire les situations suivantes à partir des objets dans l'espace ou le temps : un point sans dimension (dans le temps ou l'espace) un "point" étendu, une étendue illimitée ou non, dans le temps ou l'espace. Un point étendu, si l'on accepte cette appellation un peu contradictoire, est en fait une région spatiale. Les mouvements possibles se rangent en cinq catégories selon ces abstractions :

1. (a) un point se déplace à partir d'un point
(b) un point se déplace vers un point
2. un point se déplace à travers un point étendu.
3. (a) un point se déplace le long d'une étendue spatiale
(b) un point se déplace d'un bout à l'autre d'une étendue spatiale bornée.

Les cas 1 et 2 interviennent pendant un point temporel alors que les cas 3 interviennent pendant une étendue temporelle. Ces structures de mouvement correspondent aux distinctions topologiques que l'on a vu à la section précédente avec quelques raffinements qui insistent sur le type de chemin suivi par le mobile dans les cas 2 et 3. Talmy prend de plus en compte certaines propriétés géométriques des objets de référence qui interviennent dans les expressions de mouvement considérées. Les objets qui apparaissent dans les constructions de mouvement sont abstraits à partir des objets du discours, et violent un peu les appellations mathématiques courantes: ainsi une sphère désignera une surface complètement ou presque close (comme l'ouverture d'une fenêtre), un cylindre désignera la même chose étirée selon une droite (comme un tunnel), un plan sera une surface (à deux dimensions), un cercle sera une courbe fermée (ou presque, comme une arche) et une ligne sera n'importe quelle courbe (une dimension). Talmy classe géométriquement les événements de mouvement sur la base d'une étude de linguistique comparée. La figure 2.3 montre différentes idéalisations de mouvement de type 2 (les exemples sont de (Talmy, 1975)) ; pour chaque cas on a indiqué le mobile par un point, traversé par un vecteur indiquant la direction du mouvement. Le disque ombré représente une surface.

- 1) devant un point, par exemple *The boat sails past his head* (le bateau est passé devant sa tête).

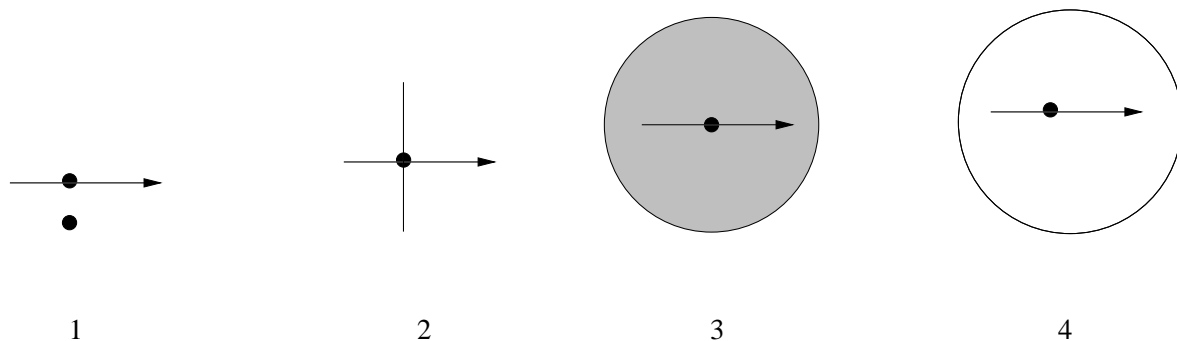


FIG. 2.3 - Les quatre cas de trajets de points

- 2) à travers une ligne, par exemple *The ball rolled across the border* (la balle a roulé de l'autre côté de la frontière).
- 3) à travers un plan, par exemple *The ball sailed through the windowpane* (la balle est passée à travers la fenêtre).
- 4) à travers un cercle, par exemple *The ball sailed through the arch* (la balle est passée à travers l'arche).

Ces cas correspondent en fait à des situations où il est fait abstraction de la dimension des entités mises en jeu, et c'est à ce titre que l'on peut parler de "point" ou de point étendu (ce qui est un peu dangereux si on considère le sens habituel de ce mot).

La figure 2.4 montre des schémas de mouvement de type 3 (un point le long d'une ligne par rapport à une étendue spatiale, correspondant aux cas suivants, qui mélangent des aspects à la fois topologiques et géométriques (la forme des trajectoires ainsi que la distance entre les objets jouent un rôle) :

- A) le long d'une étendue spatiale parallèle à une ligne (bornée). Par exemple *He walked up the ladder (in 5 minutes)* : Il a monté l'échelle (en cinq minutes).
- B) le long d'une étendue spatiale, parallèle à et sur une ligne. Par exemple *He walked on the path (for 20 minutes)* : Il a marché sur le chemin (pendant 20 minutes).
- C) le long d'une étendue parallèle et à côté d'une ligne. Par exemple *He walked along the row of houses* : Il a marché le long de la rangée de maisons.
- D) le long d'une étendue contenue dans un cylindre et parallèle au cylindre. Par exemple *He walked along inside the tunnel for 10 minutes* : Il a marché dans le tunnel pendant dix minutes.
- E) le long d'une étendue à l'intérieur d'un cylindre et parallèle au cylindre (borné). Par exemple *He walked through the tunnel in 20 minutes* : Il a traversé le tunnel en 20 minutes.
- F) sur un plan. Par exemple *He walked across the field (in 5 minutes)* : Il a traversé le champ (en cinq minutes).
- G) le long d'une ligne qui fait le tour d'un point *He ran around the house (in 40 seconds)* : Il a couru autour de la maison en 40 secondes.

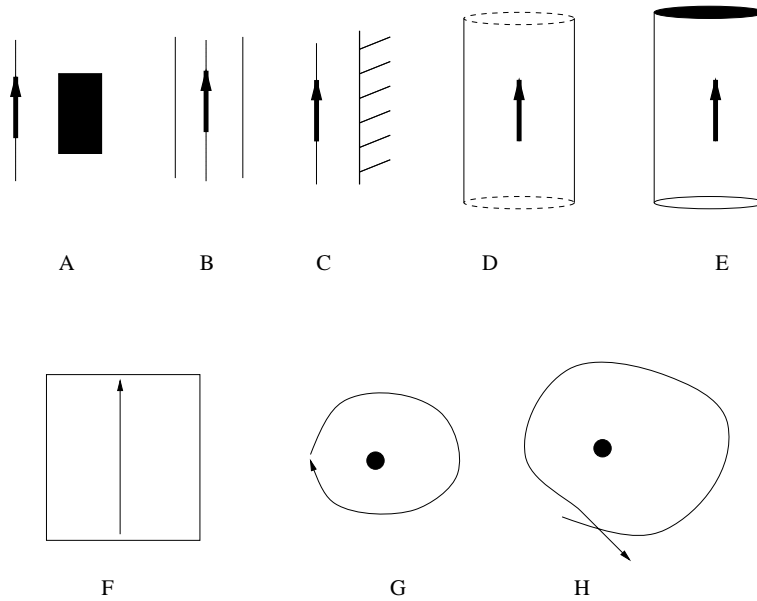


FIG. 2.4 - Les sept cas de mouvement “linéaires” (cas 3).

H) autour d’un point, par exemple *He ran around the house for 20 minutes* : Il a couru autour de la maison pendant 20 minutes.

On voit donc que les concepts géométriques pertinents selon cette analyse semblent être : la dimension “perçue” des repères (points, lignes, surfaces ou volumes) et des contraintes de forme sur la trajectoire du mobile par rapport au mobile.

Bien qu’il fournisse un ensemble de distinctions qualitatives intéressantes pour des configurations spatiales décrites par des verbes, le travail de Talmy ne présente pas de justification particulière des raisons qui le conduisent à regrouper certaines configurations dans un même ensemble, puisqu’il n’utilise que quelques notions géométriques. L’utilisation de notions géométriques n’est ici en fait qu’un maquillage des abstractions souhaitables dans la mesure où Talmy n’utilise pas les propriétés mathématiques des objets qu’il manipule : sans cela, à quoi correspond réellement sa notion de cylindre par exemple ? Le fait que ces configurations correspondent à des expressions langagières précises est cependant le garant de la pertinence cognitive de ces distinctions. On voit donc qu’un petit ensemble de traits bien choisis (les concepts de ligne, surface, volume et quelques notions de forme de trajectoires – cercle, etc.) permet de véhiculer de manière sous-spécifiée des informations très expressives. C’est la modélisation de ces traits qui doit être l’objectif d’une explication cognitive du mouvement. Il faut cependant sans doute isoler plus précisément que ne le fait Talmy les concepts à caractériser, et étudier l’adéquation des concepts géométriques utilisés, par exemple en testant les inférences souhaitables permises par ces représentations.

Nous allons maintenant voir de plus près quelques études réellement empiriques sur le mouvement dans le langage, dans le sens où elles s’appuient sur une analyse de corpus.

2.2.4 Classifications basées sur des corpus

Quelques travaux en linguistique se distinguent méthodologiquement des approches précédentes en fondant leurs analyses sur l'étude de corpus de textes ou de dialogues faisant essentiellement intervenir des descriptions spatiales qui utilisent abondamment des verbes de mouvement. Le premier travail que nous présentons utilise un corpus de prescriptions d'itinéraires pour classer les types de descriptions verbales de mouvement et proposer un modèle générique de ce type particulier d'interaction langagière, le second utilise un corpus de constats d'accidents de voiture riche en description dynamiques et vise à interpréter formellement leur contenu. L'intérêt de l'utilisation de corpus est évident quand il s'agit de faire émerger les possibilités offertes réellement par le langage pour décrire des situations spatiales, sans compter que cela peut éviter l'arbitraire (parfois contestable) des exemples construits.

Un corpus d'itinéraires Le travail d'Agnès Gryl (Gryl, 1996) sur les verbes de mouvement est à replacer dans son objectif plus global de développement d'un modèle générique d'itinéraires pour la génération automatique de prescriptions d'itinéraires. Dans ce but, elle a étudié un corpus de descriptions d'itinéraires recueillies sur le campus de Paris-XI, pour extraire les classes conceptuelles de configurations spatiales qui interviennent dans ces descriptions, ce qui inclut des événements de mouvement à travers des expressions verbales. Nous revenons sur cette catégorie spéciale de description spatiale qu'est un itinéraire au chapitre 8 ; il suffit à ce stade de garder en mémoire que les itinéraires décrivent une trajectoire à travers un environnement fixe et normalement connu des interlocuteurs, généralement celle d'une personne et dans un environnement dont l'échelle est au moins celle d'un bâtiment. Les verbes concernés sont donc essentiellement des changements de lieu, suivant la terminologie de Sablayrolles, où des changements d'orientation (comme *tourner*). Gryl distingue en fait les expressions verbales un peu différemment, puisqu'elle établit deux grandes catégories d'événements de mouvement : les expressions verbales de *progression* et *d'orientation*. La première classe caractérise des mouvements sans changement explicite de direction par rapport à la direction initiale du mobile (par exemple *aller tout droit*). La deuxième classe regroupe au contraire ces mouvements caractérisés par un changement de direction (comme *tourner à gauche*). D'après (Denis, 1994), les itinéraires sont en effet composés uniquement d'une alternance de ces deux types d'expressions. Gryl introduit un autre type de classification, orthogonale à la première, en termes de dimensionalité. Les verbes considérés sont en effet décrits en termes de propriétés regroupés en deux classes : les propriétés unidimensionnelles (1D) et bidimensionnelles (2D). Les propriétés unidimensionnelles sont les suivantes :

- avoir un but explicite, atteint ou non, par exemple *aller à x*, ou *aller vers x*.
- avoir une origine explicite (ex : *sortir de*).
- être borné (ex : *aller de x à y*).
- être quantifié (*marcher 2km*).
- exprimer des relations latérales (*longer*), frontales (*aller tout droit*) ou verticales (*descendre les escaliers*).

Les propriétés bidimensionnelles regroupent :

- les relations impliquant des lieux, "fermés" (*entrer dans*) ou non (*aller sur*).
- les relations de support (*passer sur, au-dessus*).

les relations de dépassement (*dépasser, passer devant*)

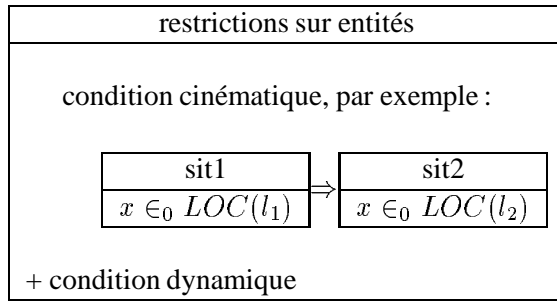
L'objectif de cette analyse était d'isoler les propriétés spatiales qui distinguent ces expressions quand elles interviennent dans un itinéraire afin de pouvoir construire une description verbale quand on ne dispose à l'inverse que de ces données spatiales. Les distinctions qui interviennent dans cette classification sont malheureusement au moins aussi hétérogènes que celles faites par Talmy. Il est évident que certaines propriétés se combinent dans certaines expressions (par exemple la quantification et le but comme dans *aller vers x pendant 10mn*), mais que cela n'est pas toujours le cas et il serait important de préciser ces contraintes sur la description. Les distinctions qui sont faites entre les descriptions manquent de justification : il semble que les propriétés unidimensionnelles soient en fait une énumération d'une partie des structures syntaxiques que l'on peut rencontrer dans ce corpus (qu'y a-t-il à une dimension dans la verbalisation d'un but ou d'une origine au mouvement ?), alors que les propriétés 2D caractérisent aussi des propriétés des objets mis en jeu (d'une façon assez floue d'ailleurs, cf. par exemple la mention "un lieu fermé", une notion qui nous semble en effet difficile à caractériser). Le plus gros reproche que l'on peut donc faire à ces travaux qui ont un souci empirique méritoire est en fait justement de ne pas faire émerger les catégories spatiales de l'analyse du corpus, mais de trier ce corpus sur la base de distinctions qui ont l'air d'avoir été faites a priori, suivant des critères qui ne sont jamais explicités et qui ne sont pas très clairs. Sont-ils syntaxiques ? sémantiques ? géométriques ? ontologiques ? Il en résulte un mélange entre des notions très hétérogènes dont nous avons ne pas comprendre l'objectif. Certaines catégories sont de plus introduites alors qu'aucune expression correspondante n'a été trouvée dans le corpus (par exemple les expressions verbales de progression avec quantification sur un angle, p206), ce qui semble confirmer le caractère a priori des classifications. L'arbitraire qui semble avoir délimité cette classification est d'autant plus regrettable que cette étude fournit quand même un matériau assez rare qui permet d'attester de nombreuses constructions verbales pour décrire des mouvements. Il prouve au moins que les expressions verbales de mouvement sont essentiellement relationnelles ou caractérisent la forme de la trajectoire (par exemple "tourner à gauche") en tenant compte éventuellement des propriétés des repères disponibles.

Un corpus de constats d'accidents L'autre approche du mouvement basée sur un matériau empirique constitué par un corpus de texte est propre à un projet regroupant les équipes du Greyc à Caen ((Enjalbert et Victorri, 1994)), de sémantique de l'EHESS ((Abraham, 1994)), et d'une équipe de Paris-13 ((Gayral *et al.*, 1994)), pour ne citer que quelques travaux inspirés de cette masse de données (le numéro 35(1) de la revue T.A.L. a été consacré à la présentation des travaux de ce groupe). Le corpus est constitué de constats d'accidents établis par les participants à destination de leur assureur (la MGEN) ; ces descriptions mettent en jeu les mouvements qui ont amené la situation d'accident et sont une source d'exemples d'utilisation des verbes de mouvement dans le contexte du monde de la route. Les différentes équipes ont tenté de rendre compte des informations (souvent incohérentes) présentes dans ces textes, notamment en définissant une sémantique des expressions liées à l'espace et en particulier des verbes de mouvement. Le travail sur le corpus complet n'a pas été présenté mais ((Enjalbert et Victorri, 1994) présente le cadre de représentation général pour le mouvement en donnant quelques exemples, et ((Abraham, 1994) fait de même avec un formalisme différent (cf aussi ((Flageul, 1997)).

Les contraintes sur le mouvement de ((Enjalbert et Victorri, 1994)² sont exprimées à partir d'expressions en géométrie classique, à base de points, de courbes paramétrées et d'angles, et on a déjà parlé

2. On peut voir aussi ((Jaye, 1993).

des problèmes inhérents à ce genre d'approche non qualitatives. Le modèle de représentation présenté par Abraham est un peu différent. Il est de la forme suivante :



représente la sémantique d'une expression verbale de mouvement.

La condition cinématique décrit des situations et des transitions entre situations. La relation \in_0 met en relation un objet et un lieu (on a donc une logique typée). La condition dynamique porte en fait sur la condition cinématique, ce qui donne par exemple pour le verbe *déplacer* (Flageul, 1998) :

$x \text{ CONTR } (x \text{ FAIRE } ((y \in_0 \text{ loc}_1) \text{ MOUVT } (y \in_0 \text{ loc}_2)))$

ce qui est paraphrasé par "x contrôle et fait que y passe d'un lieu loc_1 à un lieu loc_2 . Pris à la lettre ce type de représentation semble impliquer une logique d'ordre 2 (les relations portant sur des propositions), inexploitable informatiquement. On pourrait considérer que c'est une réécriture de quelque chose qui serait en fait de premier ordre, en introduisant des événements à la Davidson :

$$\begin{aligned} \text{controle}(x, e) \quad \wedge \text{agent}(x, e) \wedge \text{mouvement}(e, x, y) \wedge \text{partie}(e_1, e) \wedge \in_0(y, \text{loc}_1, e_1) \\ \wedge \text{partie}(e_2, e) \wedge \in_0(y, \text{loc}_2, e_2) \end{aligned}$$

Outre que nous ne sommes pas sûrs ce qui est voulu par les membres de l'équipe de l'EHESS, il faut constater que ces descriptions ne sont pas très précises au niveau spatial. La seule relation entre les entités du discours et leurs localisations possibles est celle d'appartenance, ce qui paraît largement insuffisant (cette relation semble parfois correspondre à un opérateur de localisation sans que sa sémantique soit clarifiée à aucun moment). Cela rapproche ces représentations d'approches absolues, où les entités sont assimilées à des points d'un espace muni de localisation arbitraire. La sémantique de ces descriptions n'est pas précisée et on ne sait donc pas comment on peut combiner des descriptions différentes dans un même texte (et donc le discours est hors de portée de telles représentations). Nous signalons cette approche parce qu'elle se préoccupe de la sémantique des marqueurs spatiaux et notamment des verbes, mais elle ne nous paraît être qu'une représentation à un niveau trop abstrait pour prétendre refléter la signification des verbes au niveau qui nous intéresse, qui est celui du comportement spatio-temporel. Son intérêt porte plutôt sur d'autres aspects (manière de se déplacer, restrictions sur propriétés des entités qui se déplacent, un peu dans la même perspective que les travaux déjà cités (section 2.2.2) de Hays (1989)).

2.2.5 Synthèse des apports de la linguistique lexicale

Les apports de la linguistique lexicale pour la compréhension de l'espace de sens commun peuvent se résumer en quelques caractéristiques :

- Importance des relations entre entités par opposition à l'usage de positions dans un espace absolu physique. Ceci est largement confirmé par l'étude de l'espace d'un point de vue statique, principalement la localisation avec des prépositions, cf notamment (Vandeloise, 1986;

Herskovits, 1982; Frawley, 1992). Les abstractions de la géométrie classique (points sans dimension, droites) sont généralement absentes, du moins en tant que telles et avec toutes leurs propriétés mathématiques, voir aussi (Aurnague *et al.*, 1997).

- Importance de la trajectoire pour le mouvement, à travers les travaux de Talmy notamment. Celui-ci a de plus montré que le mouvement peut expliquer certaines expressions statiques (comme *le long de*), à travers une notion de mouvement potentiel.
- Hiérarchisation des concepts spatiaux : les concepts géométriques interviennent avec des importances diverses (topologie, orientation relative des entités, distance, forme des objets et des trajectoires), accompagnées de facteurs liés à la nature des objets (la distinction entre lieux et objets, mouvants ou servant de repère, semble omniprésente) ou à leur fonction (qui détermine par exemple l'espace de localisation admissible par rapport à un objet, cf. la section 2.2.2).
- La plupart des configurations spatiales décrites par le langage sont sous-spécifiées par rapport à plusieurs éléments et susceptibles de raffinement par d'autres expressions, (Talmy, 1983), ce qui est explicable par la nature modulaire de telles expressions, et explique qu'une approche absolue n'est pas adaptée à la modélisation de telles expressions.

L'étude des approches linguistiques nous permet donc d'isoler les concepts centraux de la cognition spatiale, même si les conclusions de la plupart des auteurs montrent des divergences fortes quant aux outils de représentation les plus appropriés ; la présence envahissante de la géométrie classique est sans doute un obstacle à la représentation de l'espace d'un point de vue conforme aux intuitions de langage. La pertinence des distinctions présentées par les divers travaux mentionnés est de plus souvent discutable, car elles sont incompatibles dans une large mesure. Nous avons cependant présenté ces approches non seulement pour les considérations sur la nature du sens commun qu'elles apportent, mais aussi pour donner une idée des objectifs de représentation que l'on peut se fixer. Une modélisation du mouvement de sens commun doit en effet pouvoir prouver qu'elle est adéquate à représenter au moins certains des concepts présentés dans ces études descriptives en respectant les propriétés centrales que nous venons de résumer.

2.3 Approches spatio-temporelles en I.A.

Nous allons présenter maintenant des travaux qui sont encore plus ou moins directement dans une approche euclidienne du mouvement, mais qui effectue un choix ontologique différent du classique produit cartésien $\text{espace} \times \text{temps}$ pour représenter le mouvement. Les auteurs de ces travaux cherchent à reconstruire le temps et l'espace à partir de l'espace-temps et non l'inverse, faisant ainsi un pas vers une approche plus globale et donc plus facilement sous-spécifiée que les représentations de la physique qualitative. Nous allons voir l'intérêt que peut avoir cette approche et quelles sont ses limites.

2.3.1 Les histoires de Hayes

Nous avons déjà parlé du *Manifeste de la Physique Naïve* pour l'importance qu'il a pris dans la redéfinition des objectifs de l'Intelligence Artificielle. Afin de montrer comment appliquer la méthode qu'il prônait, Hayes a également écrit une étude de certains phénomènes de sens commun sur les liquides (“An ontology for liquids” (Hayes, 1985a)) dans lequel il faisait de nombreuses propositions

pour raisonner sur le temps et l'espace, dans l'esprit de la physique naïve. La complexité du problème abordé (les liquides touchent de près ou de loin à tous les concepts que l'on pouvait juger à l'époque comme indispensables à une physique de sens commun) nécessitait une théorie très vaste et difficile à juger du fait de ses nombreux axiomes ; sa portée étant somme toute marginale en dehors d'une démonstration méthodologique, ses propositions concrètes sur le temps et l'espace ont rarement été reprises par des travaux postérieurs. La proposition peut-être la plus originale de ce travail était de considérer tous les phénomènes physiques visés comme des "histoires" de l'espace-temps, de ramener la cinématique à une géométrie de ces histoires et plus globalement la physique à une théorie dans laquelle les entités primitives seraient ces régions de l'espace-temps. Un objet physique serait par exemple représenté par un volume fini correspondant à sa durée de vie dans l'espace temps. Un "instant" ou encore "situation" est une histoire très courte et spatialement illimitée. Un certain nombre de fonctions sont définies pour manipuler ces histoires. Par exemple $h@s$ désigne la partie de l'histoire h qui correspond à l'instant s (l'intersection de ces deux histoires en fait), les instants $begin(h)$ et $end(h)$ définissent les bornes temporelles de l'histoire h , et $start(h)$ et $finish(h)$ les états correspondants $h@begin(h)$ et $h@end(h)$. Les fonctions $when(h)$ et $where(h)$ désignent respectivement l'étendue temporelle et spatiale de l'histoire h . Hayes peut alors définir certaines relations entre histoires, par exemple :

$$Episode(h_2, h_1) \leftrightarrow (begin(h_2) > begin(h_1) \wedge end(h_2) < end(h_1) \wedge \forall t (t \in when(h_2) \rightarrow h_2@t = h_1@t))$$

Qui exprime que h_2 est une partie de h_1 limitée dans le temps. L'inclusion purement spatiale d'histoires est définie comme suit :

$$In(h_1, h_2) \leftrightarrow (when(h_1) = when(h_2) \wedge \forall t (t \in when(h_1) \rightarrow In(h_1@t, h_2@t)))$$

La figure 2.5 reprend une illustration de Hayes pour l'inclusion spatiale de deux histoires h_1 et h_2 , ici en 3 dimensions, dont une pour le temps.

Ces définitions montrent en fait que les instants sont des primitives ontologiques de la théorie, munie d'une relation d'ordre $<$ total, et que les prédicats spatio-temporels sont définis par rapport à des prédicats primitifs purement spatiaux dont les arguments sont les tranches $h@t$ qui ne sont donc pas mises sur le même plan que les histoires. La fonction $where$ qui attribue une extension spatiale à une tranche d'histoire est en fait une projection spatiale, sur un espace qu'on est bien obligé de considérer comme préexistant (ce que confirme la définition des prédicats spatio-temporel à partir de prédicats sur les tranches). Tout ceci suggère fortement qu'Hayes fonde sa théorie spatio-temporelle sur des notions spatiales et temporelles initialement séparées, et qu'il se propose de raisonner sur la globalité ensuite. L'objectif de Hayes dans "Ontology for liquids" était de représenter le comportement des liquides et il a ainsi proposé quelques distinctions comme les faits pour un liquide de couler le long d'une surface où de tomber d'une hauteur. Il introduit donc plusieurs sortes d'événements, dont les mouvements, parmi lesquels on trouve notamment les mouvements de liquides. La caractérisation la plus générale d'un mouvement par les histoires est le suivant :

$$\begin{aligned} movement(h) \rightarrow & arriving(in(h)) \wedge leaving(out(h)) \\ & \wedge inward(in(h), h) \wedge inward(out(h), h) \\ & \wedge height(in(h)) > height(out(h)) \end{aligned}$$

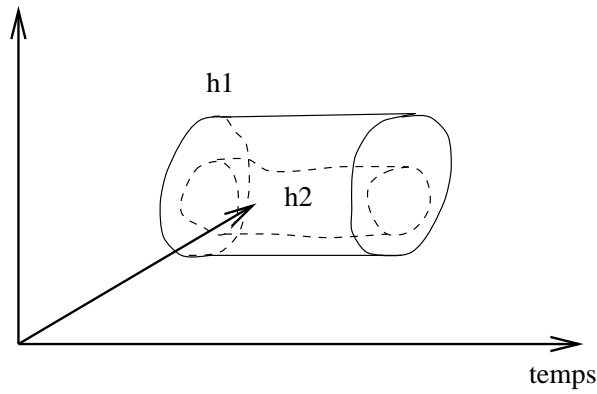


FIG. 2.5 - Inclusion d'histoires

$$\wedge \text{direction}(h) = \langle \text{in}(h), \text{out}(h) \rangle$$

Ici $\text{in}(h)$ et $\text{out}(h)$ sont les faces extrémités d'un mouvement (orientées vers l'intérieur de h , ce qu'indique le prédicat *inward*). La fonction *height* désigne la hauteur, et $\text{direction}(h)$ est une fonction mal spécifiée qui serait l'orientation de l'histoire considérée à partir des deux faces *in* et *out* (mais comment?). On voit ici où le bât blesse dans cette approche axiomatique foisonnante : la plupart des prédicats et des fonctions introduits ne sont pas ou très peu caractérisés formellement ; laissés dans le vague le plus total, la plupart de ces prédicats sont inutilisables, d'autant plus que la sémantique voulue est loin d'être évidente : que peut être la direction d'une histoire ? (même si on la considère comme un volume en 3D pour simplifier la visualisation). Qu'est ce que la hauteur d'une face ? Beaucoup de prédicats spatiaux généralisent hâtivement des notions de géométrie ponctuelle à des régions de l'espace et de l'espace-temps et ceci est loin d'être évident, au point que ce soit justement l'objet d'une bonne partie des recherches menées actuellement en raisonnement spatial qualitatif, y compris le travail de cette thèse. On peut particulariser un peu plus les mouvement plus précis, comme *falling* (chute d'un liquide), ce qui confirme cette observation :

$$\begin{aligned} \text{falling}(h) \rightarrow & \text{vertical}(\text{direction}(h)) \wedge \text{where}(\text{in}(h)) = d(\text{top}(h), \text{where}(h)) \\ & \wedge \text{where}(\text{out}(h)) = d(\text{bottom}(h), \text{where}(h)) \end{aligned}$$

Là encore, l'attribution de surface "haut" et "bas" (*top* et *bottom*) à la projection spatiale d'une histoire n'est pas évidente, rendant cet axiome difficilement compréhensible. La définition proposée plus tôt est que la surface doit avoir une normale dont la composante vertical est positive ; mais d'une part cela paraît très sous-spécifié par rapport au but visé, mais de plus le concept de normale à une surface n'est pas modélisé dans la théorie globale. Il semble donc y avoir une grande confusion entre les propriétés des modèles visés par l'axiomatisation (à l'évidence, le produit cartésien classique d'une géométrie ponctuelle à l'évidence euclidienne avec un ordre temporel linéaire ponctuel lui aussi) et celle de la théorie axiomatique elle-même. Cette confusion est surtout lié au flou méthodologique de Hayes, notamment vis à vis de l'utilisation de la logique, que nous avons mentionné en introduction. On voit le danger d'une utilisation un peu trop libérale, même consciente, de la logique, alors qu'Hayes lui même avait mis en garde dans son manifeste contre ce problème. Le flou qui en résulte rend la théorie proposée à la limite de l'incompréhensible dans beaucoup de cas, et il faut reconnaître que cet article n'a pas eu

la notoriété qu'a eu le manifeste de la physique naïve. Nous retiendrons cependant l'idée originale de départ, même si elle a été pervertie dans la pratique, d'exprimer les contraintes liées au mouvement de manière globale sur les trajectoires des objets physiques dans l'espace-temps. Il manque à l'évidence à cette tentative une géométrie proprement spatio-temporelle, et nous verrons plus loin quelles devraient en être les caractéristiques (chapitre 4).

2.3.2 Une approche relationnelle par les points

Pour finir, notons qu'une approche existe pour une géométrie spatio-temporelle, basée sur des primitives différentes, mais qui en est encore à un stade embryonnaire. Nous la présentons tout de même car elle souligne certaines difficultés que l'on pense inhérentes à l'approche elle-même, à base de primitives classique (points et lignes). Le travail de Balbiani et Fariñas (Balbiani et Fariñas, 1995; Balbiani et Fariñas, 1998) s'attache à définir une théorie de l'espace où le mouvement est primitif : cette théorie met en relation des "mobiles" c'est-à-dire des lignes de l'espace-temps représentant des trajectoires de points à vitesse constante, et montrer comment on peut donner une structure à ce domaine qui soit équivalente à la construction classique du mouvement en termes de positions spatiales variant avec le temps.

Les deux structures ponctuelles dont l'équivalence est prouvée sont les suivantes :

- Une structure d'espace-temps, construit à partir d'un ensemble de positions S , d'instant T , d'un ensemble de lignes de l'espace-temps L et muni des relations \leq_T (un ordre total sur les instants) et in une relation d'incidence entre des éléments de $S \times T$ et des éléments de L (que l'on peut assimiler à une "appartenance" à la ligne en géométrie euclidienne).
- Une structure de "mobiles" constituée d'un ensemble de mobiles M , d'une relation R exprimant une rencontre entre deux mobiles, d'une relation $=_S$ portant sur les points de rencontre (sur le graphe de $R : (u, v) =_S (x, y)$ si et seulement si la position des rencontres entre u et x d'un côté et v et y d'un autre côté sont égales. Enfin la structure comporte également une relation \leq_T d'ordre sur les points de rencontre, interprétée temporellement. La relation $=_S$ est une relation d'équivalence sur les arcs du graphe de R (elle-même irréflexive, symétrique et sérielle), et la relation d'ordre temporelle est totale.

Les auteurs montrent alors le résultat suivant : à chaque structure de mobiles on peut associer une structure spatio-temporelle et réciproquement. A partir d'une structure d'espace-temps (S, T, L, \leq_T, in) on peut définir une structure de mobiles $(M, R, =_S, \leq_T)$ avec $M = L$, la relation R définie à partir de la relation d'incidence entre point et lignes (les mobiles) : deux mobiles sont en relation s'ils ont un point incident commun. L'ordre temporel est dérivé de l'ordre sur les points incidents à une ligne de L , et la colocation $=_S$ est dérivée de l'égalité de points de S sans difficulté. Réciproquement à partir d'une structure de mobiles, on construit $L = M, S$ comme l'ensemble des classes d'équivalence par rapport à $=_S$ des éléments du graphe de R , et T comme l'ensemble des classes d'équivalence par rapport à $=_T$ (défini à partir de \leq_T) des éléments du graphe de R . La relation d'ordre temporel sur T dérive directement de celle sur la structure de mobiles.

Ce que montrent ces résultats est en fait l'équivalence de deux géométries d'incidences, une classique avec un ensemble de points et de lignes muni d'une relation d'incidence augmentée d'un ordre temporel entre les points, et une autre, construite sur un ensemble de lignes muni des relations qui permettent de définir des "projections" sur un espace et un temps construits à partir des lignes de départ et

d'une relation d'intersection entre lignes. Les auteurs interprètent ces structures comme des structures spatio-temporelles à cause de la présence d'un ordre temporel mais il faut remarquer que les trajectoires étant des lignes droites dans l'espace-temps, on voit mal comment on pourrait généraliser ce genre de travaux aux mouvements d'objets solides (à moins de se limiter à une translation uniforme et universelle de tous les objets du monde ce qui paraît un peu restreint, et il resterait quand même le problème de l'extension des objets). Ce travail a cependant le mérite de montrer formellement (même sur une structure très inadaptée à la modélisation de l'espace de sens commun) quelques équivalences entre des structures où le temps et l'espace sont séparées et des structures où ils sont intrinsèquement liés. L'utilisation d'une géométrie assez peu générale semble une nouvelle fois indiquer qu'une structure spatio-temporelle intéressante devrait partir de bases plus structurellement plus faibles pour garantir une expressivité suffisante.

2.4 Synthèse

Nous avons vu que les premières tentatives de modélisation du mouvement dans le but de reproduire des raisonnements de sens commun se sont soldées par un aveu d'échec (par certains des auteurs eux-mêmes, comme Forbus) lié surtout à un problème méthodologique, comme l'a souligné (Cohn, 1996). La physique qualitative a en effet fait des choix de représentation qui ont semblé évidents à tous ses auteurs parce qu'ils mettaient plus l'accent sur le raisonnement et les mécanismes de raisonnement que sur les problèmes de fondements de représentation. Bloqués par les limites du cadre physique classique, ils n'ont pu que développer des calculs limités à des cas jouets et peu généralisables. Nous avons vu que la nature de l'espace cognitif présente des caractéristiques complètement ignorées par ces auteurs, et nous avons présenté certains de ces aspects afin de fournir des objectifs empiriques plausibles. Les travaux linguistiques montrent la nécessité d'une clarification des concepts pertinents pour la modélisation de l'espace d'une façon conforme à l'intuition. Nous avons alors abordé un premier changement ontologique visant à surmonter certains des problèmes d'une approche purement héritée de la physique newtonienne, notamment en fournissant un vocabulaire pour l'expression plus générique de certains comportements d'objets physiques d'un point de vue cinématique. Ceci dit, ces approches formelles (ainsi que toutes celles présentées dans ce chapitre) ne sont pas réellement qualitatives, soit à cause de l'usage d'un produit espace \times temps absolu soit à cause du recours à des abstractions géométriques non "réalistes" (points, droites). Nous allons maintenant étudier le courant qui est parti des raisons de l'échec de la physique qualitative pour bâtir des modèles structurellement plus faibles de l'espace et fournir ainsi des théories exploitables et plus conformes au sens commun, car qualitatives. Nous verrons ainsi comment on peut utiliser ces théories pour la représentation du mouvement sur une base plus appropriée.

