

Étude bibliographique

Sommaire

1.1	Introduction	4
1.2	Contexte de travail : la modélisation moléculaire	4
1.2.1	Le <i>docking</i> moléculaire	4
1.2.2	Recherche de solutions de <i>docking</i> moléculaire	6
1.2.3	<i>Docking</i> moléculaire en environnement virtuel	8
1.2.4	Plateformes collaboratives pour la biologie moléculaire	13
1.3	Approche collaborative pour les problèmes complexes	16
1.3.1	La distribution cognitive des charges de travail	17
1.3.2	La facilitation sociale	20
1.3.3	La paresse sociale	22
1.4	Collaboration en environnement virtuel	25
1.4.1	Mécanismes de la communication de groupe	25
1.4.2	Communication en environnement virtuel	29
1.4.3	Stratégies de collaboration	30
1.5	Conclusion	34

1.1 Introduction

Ce travail de thèse aborde de nombreux concepts, de la biologie moléculaire au système interactifs temps-réel en passant par la psychologie sociale. Il est nécessaire de fixer le contexte dans lequel se place nos travaux : le *docking* moléculaire. Ce dernier offre un contexte de travail extrêmement complexe, idéal pour justifier une approche par le travail collaboratif.

Cette étude bibliographique permettra dans un premier temps de comprendre les contraintes de complexité qui s'appliquent au *docking* moléculaire ainsi que les solutions actuellement proposées. Dans un second temps, nous verrons les apports de la collaboration pour la résolution de problèmes complexes en soulignant les avantages et les inconvénients d'une telle approche. Pour terminer, nous nous intéresserons plus précisément à la collaboration au sein d'un environnement virtuel, la manière dont elle s'organise et les concepts essentiels à la mise en place d'une plateforme.

1.2 Contexte de travail : la modélisation moléculaire

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous allons nous intéresser à la modélisation moléculaire et plus précisément au *docking* moléculaire¹. Cette section a pour objectif de présenter le *docking* moléculaire puis expose les différentes solutions existantes pour traiter ce problème.

1.2.1 Le *docking* moléculaire

Dans le domaine de la modélisation moléculaire, le *docking* moléculaire consiste à prédire la conformation optimale entre deux molécules afin de créer un complexe de molécules stable (voir figure 1.1 page ci-contre). Le *docking* moléculaire permet soit de découvrir de nouvelles molécules (par assemblage de deux ou plusieurs molécules), soit de comprendre la nature d'un complexe de molécules obtenu par cristallographie². FISCHER et BEENSCH [1894] illus-

1. Pour la suite des développements, l'expression « *docking* moléculaire » sera utilisée plutôt que sa traduction « amarrage moléculaire » [NURISSO 2010] qui est peu citée dans la littérature française.

2. La cristallographie permet de déterminer les molécules présentes dans un complexe de molécules mais ne permet pas de déterminer avec précisions comment elles sont assemblées.

trent le *docking* moléculaire avec le modèle « clef-serrure » décrit de la façon suivante.

Um ein Bild zu gebrauchen, will ich sagen, daß Enzym und Glycosid wie Schloß und Schlüssel zueinander passen müssen, um eine chemische Wirkung aufeinander ausüben zu können.

On trouve une traduction en français de cette citation dans [HASENKNOPF 2005].

Pour utiliser une image, je dirais que l'enzyme et le glucoside doivent être ajustés comme la serrure et la clef, pour exercer une action chimique l'un sur l'autre.

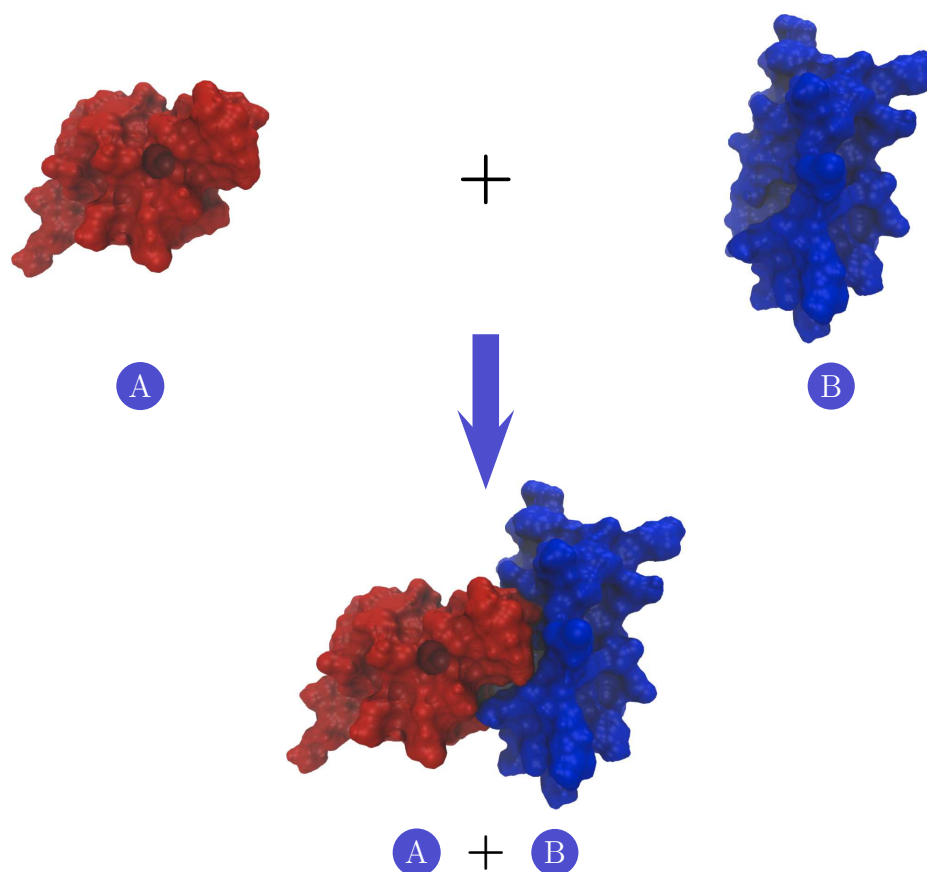


Figure 1.1 – Complexe de molécules assemblé à partir de deux molécules

La métaphore s'arrête ici. En effet, si pour vérifier la concordance d'une clef avec une serrure, il suffit de tester l'ouverture de la serrure, l'évaluation d'un complexe de molécules est moins évidente. La stabilité d'un complexe de molécules est principalement évaluée selon deux critères : la complémentarité

géométrique et la complémentarité chimique (voir figure 1.2). La complémentarité géométrique, parfois nommée complémentarité structurelle [CHURCH *et al.* 1977], consiste à trouver les parties de chaque molécule qui s’imbriquent le mieux l’une avec l’autre, comme un puzzle en 3D. JIANG *et al.* [2003] montre l’importance de la complémentarité géométrique dans le *docking* moléculaire dans l’évaluation d’un complexe de molécules. La figure 1.2a illustre la complémentarité géométrique dans une représentation simplifiée en 2D.

Cependant, la stabilité d’un complexe de molécule s’accompagne également d’une évaluation de la complémentarité chimique comme décrit par KESSLER *et al.* [1999]. Cette complémentarité tient compte des interactions chimiques entre les molécules comme les charges électrostatiques [MCCOY *et al.* 1997], les ponts hydrogènes [ARUNAN *et al.* 2011] ou encore les régions hydrophiles et hydrophobes [BLALOCK et SMITH 1984]. La figure 1.2b illustre la complémentarité électrostatique.

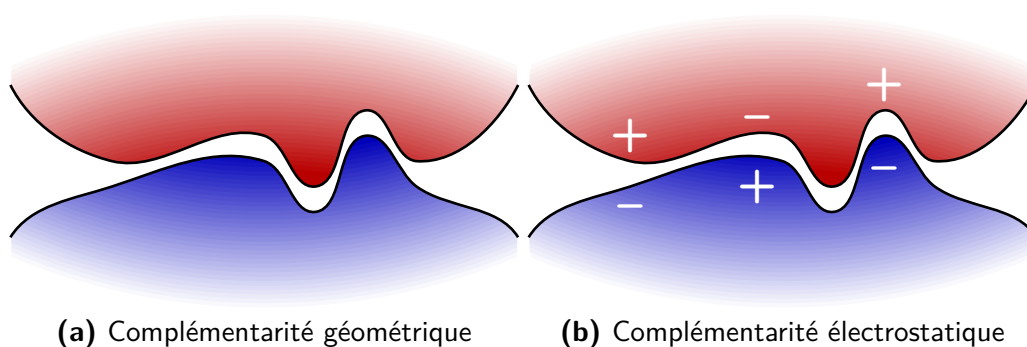


Figure 1.2 – Mesures pour l'évaluation du *docking* moléculaire

Le nombre de combinaisons géométriques et le nombre de contraintes chimiques font du *docking* moléculaire une tâche de recherche très complexe. Une exploration exhaustive de l'espace de recherche est impossible. La section suivante présente les différentes solutions logicielles existante pour tenter de trouver des solutions de *docking* moléculaire.

1.2.2 Recherche de solutions de *docking* moléculaire

La recherche de solutions de *docking* moléculaire consiste à trouver les zones de liaisons entre les molécules. Les algorithmes de recherche se basent principalement sur deux éléments : l'évaluation et l'optimisation. L'évaluation consiste à calculer un score pour la conformation trouvée. L'optimisation s'intéresse à l'amélioration et à l'affinage des conformations.

SCHULZ-GASCH et STAHL [2004] ou encore LEACH *et al.* [2006] proposent un état de l’art sur les moyens d’évaluer un *docking* moléculaire. Les algorithmes de recherche commencent par identifier les différents sites de liaisons potentiels par complémentarité géométrique. Cette première évaluation permet de filtrer l’espace des solutions. Puis une évaluation chimique partielle ou complète est éventuellement effectuée.

Parmi les algorithmes d’optimisation les plus utilisés, on peut citer les algorithmes génétiques, les ICMS (*Iterated Conditional Modes*), la méthode de MONTE-CARLO ou encore la reconstruction incrémentale autour d’une base protéinique. À chaque algorithme est associé une ou plusieurs solutions logicielles dont les plus référencées selon GROSDIDIER [2007] sont AutoDock (27 %), GOLD (15 %), FlexX (11 %), DOCK (6 %) ou encore ICMDocking (6 %). La table 1.1 page 9 propose une liste de solutions logicielles de *docking* moléculaire.

Cependant, les solutions présentées ci-dessus se basent sur une approximation importante de l’environnement moléculaire : les molécules sont considérées comme des corps rigides. En effet, une molécule est constituée d’un ensemble d’atomes possédant chacun une mobilité par rapport à ces voisins ; une molécule s’apparente plutôt à un corps flexible. La flexibilité d’une molécule peut être vue à différents niveaux de granularité, de l’atome aux molécules en passant par les structures secondaires (hélices- α et feuillets- β). On peut distinguer trois niveaux de flexibilité différentes :

Niveau inter-moléculaire Cette déformation au niveau macro-moléculaire concerne des transformations de grande amplitude sur chaque molécule. Elle permet de trouver la meilleure concordance entre les molécules en terme de position et d’orientation.

Niveau intra-moléculaire Cette déformation est au niveau moléculaire. L’amarrage de deux molécules (ou plus) permet d’obtenir de nombreux sites de liaison qui doivent être optimisées en fonction de critères variés (la complémentarité géométrique, les forces électrostatiques, *etc.*). La flexibilité s’organise alors autour de macro-structures telles que les structures secondaires qui font de la molécule une sorte de chaîne articulée (voir figure 1.3 page suivante).

Niveau atomique Cette déformation très fine va optimiser la position des atomes au niveau du site de liaison en modifiant l’état des résidus (groupement d’atomes). L’intérêt de cette étape sera portée sur plusieurs types d’interactions chimiques à échelle réduite (les ponts hydrogènes, les zones hydrophobiques et hydrophylles, les ponts salins, les forces de VAN DER WAALS [P. MÜLLER 1994], *etc.*).

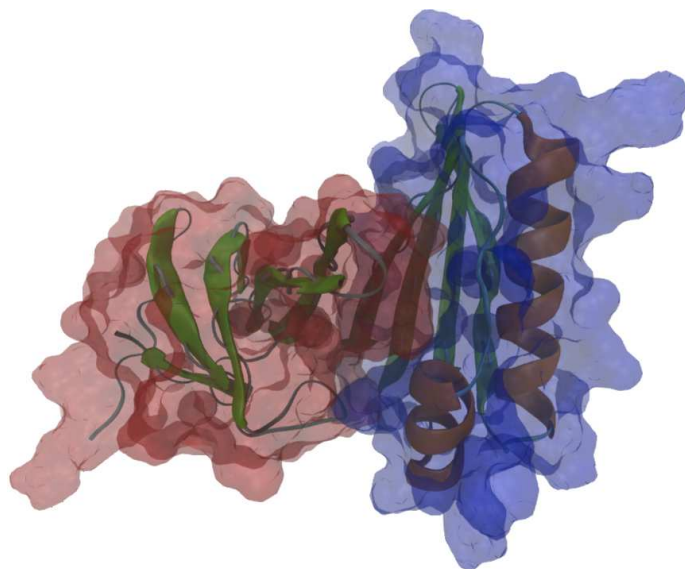


Figure 1.3 – Illustration d'une molécule avec ces hélices- α et ces feuillets- β

La complexité induite par la flexibilité rend l'exploration de l'espace de recherche encore plus complexe par rapport aux corps rigides considérés précédemment. Afin de répondre à cette problématique supplémentaire, différentes approches, basées sur des plateformes de *docking* moléculaire (voir table 1.1 page ci-contre), ont été proposées afin de réduire l'espace de recherche :

- Une partie du complexe de molécules étudié est rendue rigide ;
- Utiliser plusieurs conformations rigides d'une molécule [MEAGHER et CARLSON 2004] ;
- Découper l'espace de recherche avec une granularité plus grossière pour améliorer les performances d'évaluation [ÖSTERBERG *et al.* 2002].

La flexibilité introduit une complexité importante dans la recherche de solutions en *docking* moléculaire. Cependant, nous allons voir dans la section suivante que l'utilisation des capacités combinées de l'humain et de la machine permet une approche différente face à ce problème complexe.

1.2.3 *Docking* moléculaire en environnement virtuel

Malgré une communauté scientifique très active pour améliorer les solutions de *docking* moléculaire existantes et se rapprocher toujours plus près de conditions biologiques réalistes, la complexité du problème rend difficile la découverte de solutions pertinentes. Devant cette complexité, une approche alternative basée sur l'introduction de l'humain et de ses capacités de décisions au sein du processus de recherche. En effet, bien que moins rapide pour

1.2. Contexte de travail : la modélisation moléculaire

Logiciel	Algorithme	Références
AutoDock	Algorithme génétique	[G. M. MORRIS <i>et al.</i> 1998] [ÖSTERBERG <i>et al.</i> 2002]
DOCK	Reconstruction incrémentale	[EWING <i>et al.</i> 2001]
ICMDocking	Méthode ICM	[ABAGYAN et TOTROV 1994] [ABAGYAN <i>et al.</i> 1994]
GOLD	Algorithme génétique	[JONES <i>et al.</i> 1997]
FlexX	Reconstruction incrémentale	[RAREY <i>et al.</i> 1997] [RAREY <i>et al.</i> 1999]
Glide	Méthode de MONTE-CARLO	[FRIESNER <i>et al.</i> 2004] [HALGREN <i>et al.</i> 2004]
BoxSearch	Méthode de MONTE-CARLO	[HART et READ 1992] [CUMMINGS <i>et al.</i> 1995]

Table 1.1 – Liste non-exhaustive de solutions logicielles de *docking* moléculaire

traiter un grand nombre de données, un expert est capable de classer plus intelligemment les solutions pertinentes et les solutions aberrantes.

L'idée d'immerger un humain au sein du processus de *docking* moléculaire date de 1967 avec le projet GROPE comme l'explique GRÜNWALD [2008]. L'intervention d'un expert durant le processus de recherche est effectuée par l'immersion dans des environnements de réalité virtuelle. BATTER et BROOKS JR. [1972] proposent les premières solutions d'immersion visuelle grâce à ce projet GROPE.

Avec l'immersion dans un environnement virtuel, le problème de la représentation des molécules se pose rapidement. BERGMAN *et al.* [1993] proposent la plateforme VIEW avec différentes possibilités de rendus graphiques pour représenter une molécule (voir figure 1.4 page suivante). Les environnements virtuels offrent une certaine souplesse dans la représentation des molécules ce qui a permis d'imaginer différentes manières d'afficher une molécule en fonction des informations à mettre en évidence. Des logiciels dédiés à ce genre de tâche ont alors pu voir le jour comme VMD [HUMPHREY *et al.* 1996] ou PYMOL [DELANO 2002].

Cependant, la nature statique de ces visualisations ne permet pas de comprendre la dynamique chimique au sein d'une molécule. HUITEMA et LIERE [2000]

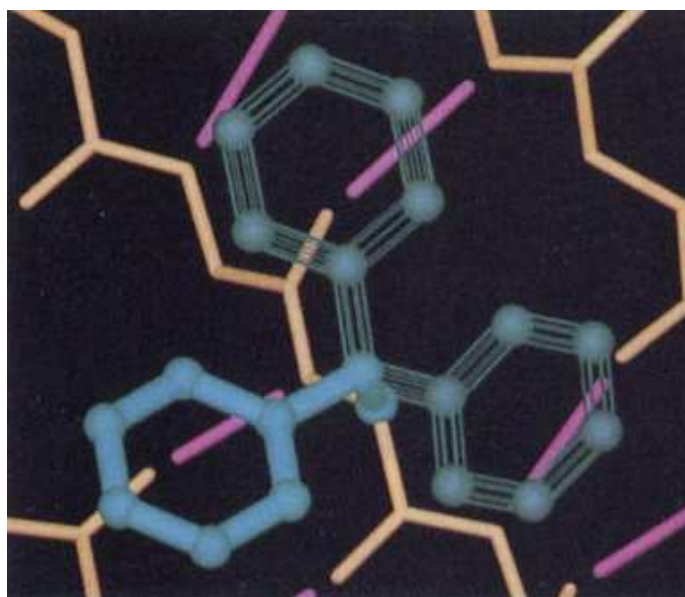


Figure 1.4 – Représentation avancée proposée par BERGMAN *et al.* [1993]

proposent un outil pour visualiser des trajectoires d'atomes afin d'appréhender la dynamique des protéines. Puis KŁOSOWSKI *et al.* [2002] franchissent une étape supplémentaire en proposant une visualisation temps-réel de la dynamique d'une molécule à l'aide du moteur de simulation Gromacs [BERENDSEN *et al.* 1995 ; HESS *et al.* 2008]. Enfin, KŘENEK *et al.* [1999] puis DAVIES *et al.* [2005] apporte une visualisation multimodale avec la combinaison des retours visuels et haptiques pour percevoir les champs de force électriques d'une molécule (voir figure 1.5 page ci-contre).

L'utilisation de l'haptique dans ce contexte n'est d'ailleurs pas nouveau. En effet, les biologistes ont également cherché à interagir virtuellement avec les molécules afin de pouvoir s'affranchir de la manipulation dans le monde réel nécessitant une procédure plus longue et plus complexe. Le projet GROPEHaptic³ se propose d'utiliser la modalité haptique pour interagir avec les molécules [BROOKS JR. *et al.* 1990 ; OUH-YOUNG *et al.* 1988]. Puis, une plateforme pour la modélisation moléculaire assistée par ordinateur est proposée avec HIMM (*Highly Immersive Molecular Modeling*) [DREES *et al.* 1996 ; DREES *et al.* 1998] ; l'objectif est de proposer une plateforme immersive et modulable afin de pouvoir facilement changer les différents outils d'interaction. Certains proposent même des interfaces tangibles se substituant aux molécules à manipuler comme WEGHORST [2003] et J.-I. KIM *et al.* [2004].

3. Le projet GROPEHaptic a été réaliser dans le prolongement du projet GROPE.



Figure 1.5 – Visualisation multimodale proposée par DAVIES *et al.* [2005]

En tenant compte de la flexibilité des molécules, les besoins en interaction se sont affinés ; il n'est plus question de modifier la position d'une molécule, on cherche à présent à modifier la position d'un atome ou d'un groupe d'atomes. Le modèle d'interaction proposé est la traction des atomes par un simple modèle masse-ressort [HAAN *et al.* 2002 ; KOUTEK *et al.* 2002] ce qui permet une déformation des atomes de manière locale. Puis Y.-G. LEE et LYONS [2004] propose de baser les modèles d'interactions haptiques sur l'approximation du champ de force décrit dans [LENNARD-JONES 1924a,b] (voir équation 1.1) ; ce modèle de force a l'avantage de permettre une relative stabilité du retour haptique (voir figure 1.6 page suivante).

$$V_{LJ} = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r_m} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_m} \right)^6 \right] \quad (1.1)$$

Les différents outils de manipulation moléculaire se mettant en place, les chercheurs se sont de nouveau orientés vers l'une de leur première problématique : le *docking* moléculaire. Après les projets comme GROPE, d'autres projets de *docking* moléculaire comme STALK [LEVINE *et al.* 1997] voient le jour. La communauté haptique commence également à s'intéresser à cette problématique [SUBAŞI 2006 ; SUBAŞI et BAŞDOĞAN 2006, 2008]. Par exemple,

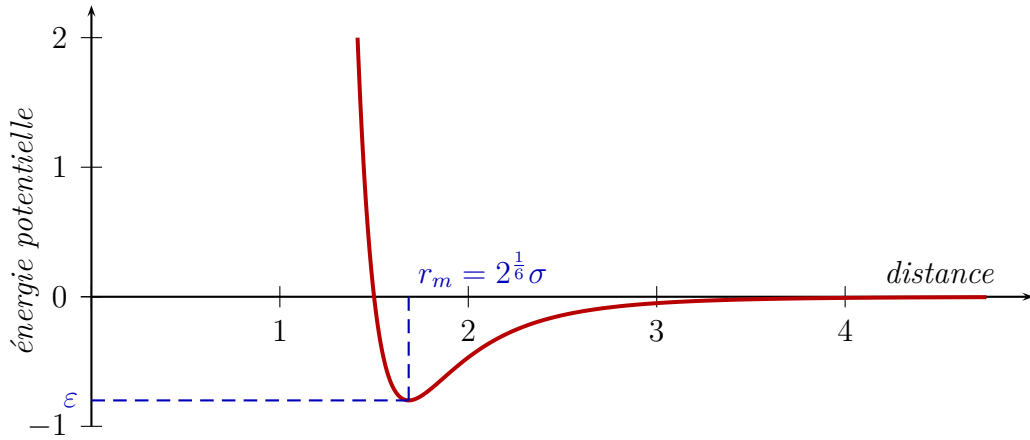


Figure 1.6 – Potentiel de LENNARD-JONES [1924a]

LAI-YUEN et Y.-S. LEE [2005] proposent une interface haptique avec cinq DDLs (voir figure 1.7 page suivante) afin d’effectuer du *docking* moléculaire [LAI-YUEN et Y.-S. LEE 2006]. Puis, à l’aide d’interfaces haptiques comme le Virtuouse™ 6D35–45 (six DDLs), la manipulation moléculaire [DAUNAY *et al.* 2007] puis le *docking* moléculaire [DAUNAY et RÉGNIER 2009] accompagné d’une évaluation temps-réel de l’énergie du complexe moléculaire devient possible. Le *docking* moléculaire faisant intervenir des champs de force spécifiques, HOU et SOURINA [2010] proposent des modèles de retours haptiques permettant de ressentir les moments⁴ interviennent au niveau de structures intra-moléculaires ou inter-moléculaires.

Plus récemment, deux projets ont permis d’aboutir à des plateformes de manipulation haptiques de molécules avec un moteur de simulation en temps-réel. Tout d’abord, REDON *et al.* [2005] développent des algorithmes pour la simulation en temps-réel de corps articulés avec un grand nombre de DDLs. Puis, il adapte son travail pour créer un moteur de simulation moléculaire ce qui lui permet d’obtenir des simulations temps-réel [ROSSI *et al.* 2007], utilisable pour la manipulation haptique [BOLOPION *et al.* 2009]. En suivant un cheminement similaire, DELALANDE *et al.* [2009] proposent un outil permettant d’obtenir des simulations moléculaires en temps-réel. Puis dans un second temps, DELALANDE *et al.* [2010] rendent possible la manipulation haptique temps-réel de molécules en proposant la déformation au niveau atomique.

Les différentes briques techniques et logicielles permettant d’effectuer du *docking* moléculaire flexible interactif existent. BOLOPION *et al.* [2009] puis

4. Utilisé ici dans le sens mécanique, force autour d’un pivot (moment ou couple).



Figure 1.7 – *Docking* moléculaire à l'aide d'une interface à cinq DDLs [LAI-YUEN et Y.-S. LEE 2006]

DELALANDE *et al.* [2010] nous montrent la faisabilité des simulations moléculaires réalistes et interactives. Puis DAUNAY et RÉGNIER [2009] offrent un moyen d'évaluer en temps-réel ces simulations. Le logiciel VMD offre une plateforme de visualisation moléculaire permettant de connecter des outils haptiques [STONE *et al.* 2010]. Des modèles de forces haptiques spécifiques au *docking* moléculaire sont développés [HOU et SOURINA 2010].

En fournissant tous ces outils de visualisation et d'interaction avec des environnement moléculaires virtuels, les possibilités des biologistes sont augmentées. Cependant, la complexité du problème de *docking* moléculaire est tellement importante que nous allons avoir recours à une aide supplémentaire : le travail collaboratif.

1.2.4 Plateformes collaboratives pour la biologie moléculaire

Les applications collaboratives en biologie moléculaire ont commencé à être développées pour répondre au besoin de travailler à plusieurs. L'une des premières application a été proposée par CASHER et RZEPA [1995] sous le nom de EyeChem. Cette application constituée d'une nœud serveur et de nœuds clients sur un réseau interne, permet à plusieurs utilisateurs d'éditer et de manipuler une molécule de manière synchrone.

Sur le même principe, BOURNE *et al.* [1998] développent MICE (*Molecular*

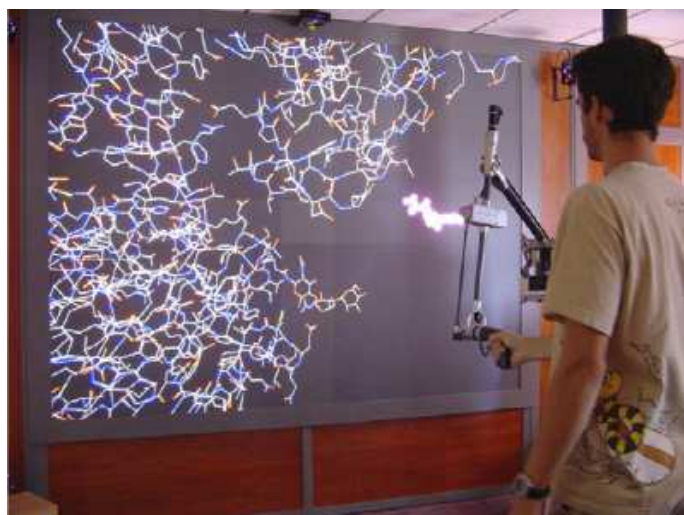


Figure 1.8 – Docking moléculaire rigide avec le Virtuose™ 6D35–45 [DAUNAY et RÉGNIER 2009]

Interactive Collaborative Environment), permettant de visualiser des molécules en collaboration distante. Cette application se distingue par l'utilisation d'Internet comme réseau ce qui permet une plus grande souplesse dans le déploiement. TATE *et al.* [2001] étendent les possibilités de MICE en permettant l'édition, la manipulation et l'interaction d'une même molécule par plusieurs utilisateurs. Un projet similaire appelé Chimera, développé par PETTERSEN *et al.* [2004], existe également et propose le même type de fonctionnalités.

Puis, basé sur la plateforme de J.-I. KIM *et al.* [2004] permettant de faire de la modélisation de molécules par gestes, PARK *et al.* [2006] proposent un système distribué de collaboration distante. C'est l'une des premières applications qui aborde le problème du *docking* moléculaire. Les gestes sont effectuées avec des *haptic eggs*, deux petites interfaces tangibles placées dans chaque main de l'utilisateur, chaque *haptic egg* étant l'abstraction d'une molécule. Cependant, le système de communication est déporté dans le temps puisque les utilisateurs ont la possibilité de commenter et de donner des opinions sur la manière de réaliser le *docking* moléculaire à l'aide d'un système de messagerie instantanée. Les décisions sont alors transmises à l'utilisateur qui s'occupe des manipulations en environnement virtuel. Plus récemment, le projet *eMinerals* [DOVE *et al.* 2005], fournit une solution pour la collaboration entre biologistes (messagerie instantanée, vidéo-conférence, serveur centralisé, *etc.*) comme on peut le voir sur la figure 1.9 page ci-contre. Cependant, il s'agit surtout de collaboration distante et permet un travail synchrone ou asynchrone.

1.2. Contexte de travail : la modélisation moléculaire

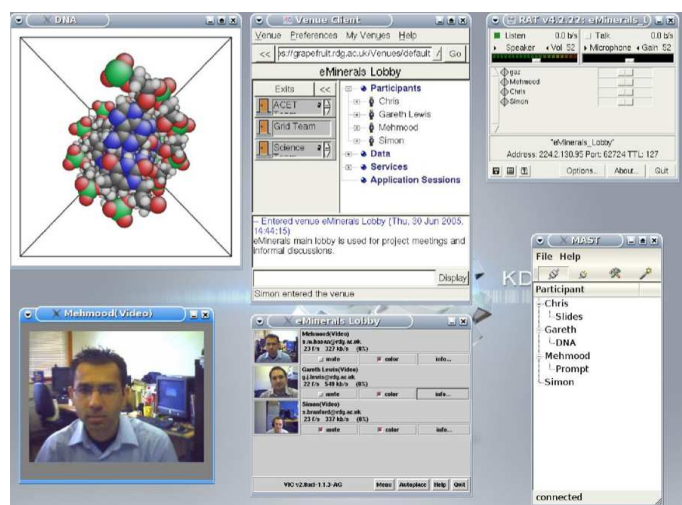


Figure 1.9 – Plateforme de collaboration inter-universités proposée par [DOVE *et al.* 2005]

Parmi les applications collaboratives de biologie moléculaire permettant une interaction synchrone, CHASTINE *et al.* [2005] sont les premiers à s'intéresser aux problèmes de communication entre les sujets (voir section 1.4.1 page 25). À travers l'application AMMP-Vis, il propose des outils pour désigner des zones de l'environnement virtuel. Afin d'améliorer la communication, il propose également de modéliser les mains de chaque utilisateur dans l'environnement virtuel pour que chacun ait conscience des agissement des partenaires (voir figure 1.10 page suivante). Cette plateforme a ensuite été réutilisée sous la forme de AMMP-EXTN afin d'introduire des procédures de contrôle d'accès. Pour éviter les conflits entre les utilisateurs, les différentes strates d'informations (paramètres de visualisation, modélisation, modification des données) ont été soumises à différents droits de visualisation et de modification [MA 2007 ; MA *et al.* 2007].

Cependant, les applications présentées ne concerne que des application de collaboration distante. La manipulation colocalisée permet de créer un environnement de travail social qui permet une meilleure communication. L'application PaulingWorld [SU et LOFTIN 2001 ; SU *et al.* 2000] propose une des premières applications de collaboration colocalisée pour la visualisation et l'interaction. La visualisation s'effectue sur un *Workbench* ce qui permet aux utilisateurs d'avoir un niveau d'interaction similaire dans l'application. Pour améliorer l'immersion, KRIZ *et al.* [2003] proposent aux utilisateurs la visualisation de molécule au travers différents équipements dont un CAVE à l'aide de l'application DIVERSE.

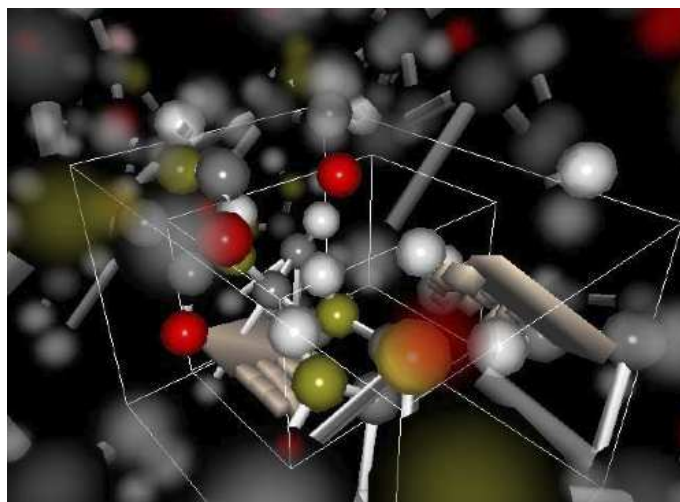


Figure 1.10 – Manipulation collaborative de molécule avec représentation des mains des participants [CHASTINE *et al.* 2005]

Nous venons de présenter plusieurs solutions logicielles et matérielles permettant de créer un espace de collaboration pour la modélisation moléculaire et le *docking* moléculaire. Cependant, la présentation de ces travaux abordent surtout les contraintes techniques nécessaires à la mise en place de tels systèmes sans évoquer les contraintes humaines de la collaboration. Seul CHASTINE *et al.* [2005] semblent avoir abordé les aspects de communication dans ces applications. La prochaine section va nous permettre d’aborder cette problématique.

1.3 Approche collaborative pour les problèmes complexes

C’est grâce à la communauté en psychologie sociale que nous allons à présent définir et caractériser les différents aspects d’une collaboration entre humains. Quels sont les avantages d’un travail en collaboration ? Quels en sont les inconvénients ? En quoi le travail collaboratif est-il un choix pertinent pour appréhender des tâches complexes ?

Avant d’aborder ces différents points, il est nécessaire de préciser la distinction entre travail coopératif et travail collaboratif. Pour comprendre cette différence, nous nous appuyons sur la définition relativement claire proposée par ROSHELLE et TEASLEY [1995].

Cooperative work is accomplished by the division of labour among participants, as an activity where each person is responsible for a portion of the problem solving. We focus on collaboration as the mutual engagement of participants in a coordinated effort to solve the problem together.

dont on trouve une traduction en français dans les travaux de KNAUF [2010]

Le travail coopératif implique une division du travail entre les participants, chaque participant étant responsable d'une partie du problème à résoudre. Dans la collaboration, les participants s'engagent tous dans les mêmes tâches, en se coordonnant, afin de résoudre le problème ensemble.

Les travaux présentés ici concernent le travail collaboratif et ne traiterons pas de travail coopératif, sauf mention contraire.

1.3.1 La distribution cognitive des charges de travail

BANDURA [1986] puis FOUSHEE et HELMREICH [1987] sont parmi les premiers à avoir l'intuition que le travail collaboratif apporte plus qu'une simple multiplication des ressources : les interactions entre les individus font émerger des compétences propre au groupe. Par exemple, WEGNER [1987] s'intéresse à la distribution de mémoire dans un groupe : chaque individu ne détient qu'une partie de l'information mais la capacité mémorielle du groupe dans son ensemble est plus importante. GEORGE [1990] souligne également que l'état émotionnel de chacun affecte l'état émotionnel du groupe⁵.

HOLLAN *et al.* [2000] proposent de définir la distribution cognitive de la façon suivante

Unlike traditional theories, however, [the theory of distributed cognition] extends the reach of what is considered cognitive beyond the individual to encompass interactions between people and with resources and materials in the environment.

pour laquelle CONEIN [2004] propose une traduction

On peut déplacer la frontière de l'unité cognitive d'analyse au-delà de l'enveloppe corporelle de l'individu de façon à inclure le matériel et l'environnement social comme composant d'un système cognitif plus étendu.

5. YAMMARINO et MARKHAM [1992] ont remis en cause les conclusions obtenues mais le travail de GEORGE [1990] a été de nouveau confirmé par GEORGE et L. R. JAMES [1993].

C'est HUTCHINS [1995] qui met en évidence la notion de distribution cognitive des charges de travail avec une étude des interactions qui ont lieu dans un cockpit d'avion. Ces conclusions sont confirmées et explicitées grâce à ses observations en psychologie sociale et ses connaissances en anthropologie [HUTCHINS 1996] : il fait une distinction entre les propriétés cognitives d'un individu et les propriétés cognitives d'un groupe. Ces travaux donnent lieu à la création de deux communautés ; ceux qui considèrent que le travail cognitif d'un groupe d'individus est une somme des propriétés cognitives de chaque individu ; et ceux qui considèrent que certains aspects cognitifs d'un groupe d'individus sont propres à la collaboration.

Pour justifier le rejet de l'approche individualiste, A. CLARK [1998] explique que lorsque notre cognition s'appuie sur une aide externe, elle devient interactive et relationnelle, c'est-à-dire non détachable d'un composant externe présent dans l'environnement. De plus, A. CLARK [2001] évoque le lien étroit entre la notion d'extension cognitive et les processus cognitifs complexes : les problèmes de nature complexe stimule cette extension cognitive.

Plus récemment, ZHANG et PATEL [2006] synthétisent la distribution cognitive comme des systèmes ayant des interactions externes (avec des matériels) [ZHANG et D. A. NORMAN 1994] et des interactions internes (avec des collaborateurs) comme illustré sur la figure 1.11 page suivante. Ces éléments externes sont inclus dans le processus de distribution cognitive puisqu'il permettent également de soulager la charge cognitive des individus. D'ailleurs, une liste des propriétés cognitives auxquelles peuvent répondre ces éléments externes est dressées par ZHANG [1997] :

- fournir une aide mémorielle à court ou long terme afin de réduire la charge cognitive ;
- améliorer et simplifier la perception de l'information pour la rendre rapidement accessible et appréhendable ;
- fournir des connaissances et des compétences qui ne sont pas disponibles en interne ;
- aider les opérateurs pour la perception afin qu'ils identifient facilement les caractéristiques et puisse effectuer des déductions ;
- structurer et fixer les comportements cognitifs de manière inconsciente ;
- changer la nature de la tâche en générant des séquences d'actions plus efficaces ;
- arrêter le temps ou permettre des répétitions afin de rendre visible et durables des informations qui ne le sont pas ;
- limiter l'abstraction ;
- maximiser la précision et minimiser l'effort dans la prise de décisions pour déterminer une stratégie.

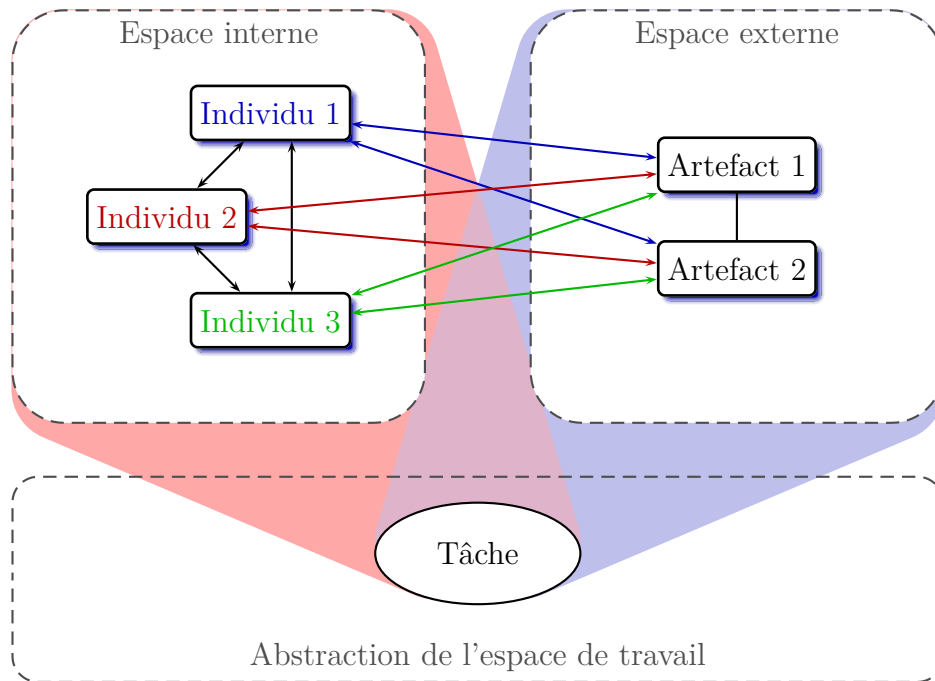


Figure 1.11 – Représentation d'un système cognitivement distribué

Les éléments externes de la distribution cognitive, que D. A. NORMAN [1991] et KIRSH [1999] appellent artefact, répondent au besoin d'affordance. Le concept d'affordance a été identifié par GIBSON [1977]. L'affordance est l'ensemble des possibilités d'interaction d'un acteur sur et avec un artefact [GIBSON 1979] mais cette définition s'est par la suite réduite aux seules possibilités dont l'acteur est conscient. C'est D. A. NORMAN [1988] qui utilise ce terme pour la première fois dans le contexte de la distribution cognitive. Il en fait une description très précise lorsqu'il se rend compte que ce terme est parfois mal utilisé par la communauté [D. A. NORMAN 1999]. Le terme est ensuite utilisé par les fondateurs de la psychologie cognitive sociale [PATEL *et al.* 2000]. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'affordance au sein de la conception de plateformes collaboratives.

Nous venons de voir que la collaboration permet de créer une intelligence de groupe mais cette intelligence permet-elle d'augmenter les performances d'un groupe ? FOUSHEE et HELMREICH [1987] montrent qu'une configuration de travail collaboratif peut amener un gain en efficacité mais peut également amener une perte d'efficacité. Par exemple, PATEL *et al.* [1999] montrent une perte d'efficacité sur une application permettant la collaboration distante. ZHANG [1998] esquisse une explication dépendant de la répartition des connaissances dans un groupe : si les connaissances sont complémen-

taires, il y a un gain en efficacité. Nous allons voir dans les sections suivantes que différents phénomènes influent sur les performances d'un groupe.

1.3.2 La facilitation sociale

La *facilitation sociale* est un phénomène qui a été mis en évidence par TRIPLETT [1898]. Il s'est intéressé aux résultats de coureurs cyclistes ayant concouru dans trois conditions différentes :

1. Course seul ;
2. Course avec un meneur (également appelé *lièvre*) ;
3. Course dans des conditions de compétition.

Les résultats (voir figure 1.12), largement étudiés par SEASHORE [1899], montrent que les coureurs en présence d'autres individus sont plus rapides que les coureurs effectuant l'épreuve seuls.

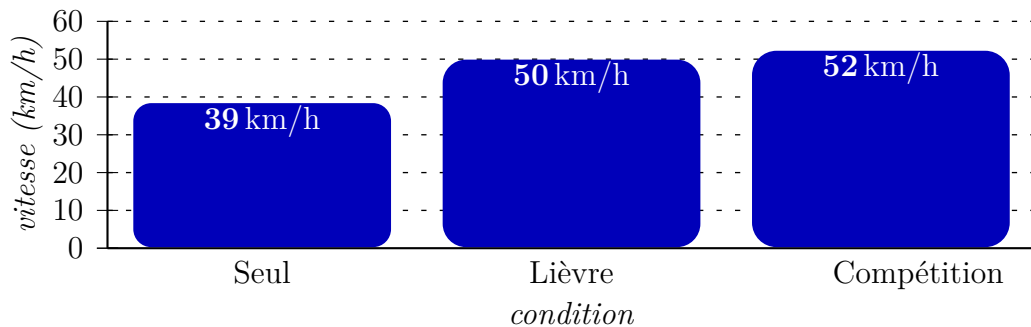


Figure 1.12 – Résultats obtenus par TRIPLETT [1898] avec des cyclistes

Suite à ces résultats, des expérimentations ont été menées sur des étudiants par MAYER [1903] puis par MEUMANN [1904]. MAYER [1903] confronte les étudiants à la réalisation d'une tâche (rédaction de dictée ou résolution de problème arithmétique) sous le regard d'un observateur. Il constate que les étudiants sont plus performants lorsqu'ils sont en présence d'un autre individu. MEUMANN [1904] ajoute une pierre à l'édifice en confirmant avec des tests plus poussés (tests de mémoire, ergographe et dynamomètre) que les étudiants sont toujours moins performants lorsqu'ils sont seuls.

D'après STRAUSS [2002] qui propose un état de l'art sur le sujet, le terme *facilitation sociale* est utilisé pour la première fois par ALLPORT [1924]. Il en donne la définition suivante.

The action prepared or in progress is some response participated in by all, and the social stimuli releasing or augmenting such response are the sight and sound of others doing the same thing.

qui peut-être traduite par

Une action collaborative préparée ou en progression possède une réponse et la stimulation sociale provoque une augmentation de cette réponse uniquement à la vue et au son provoqué par d'autres effectuant les mêmes mouvements.

ALLPORT [1924] aborde ce phénomène par une collaboration où chaque individu effectue la même tâche. Dans ce même contexte, ROETHLISBERGER *et al.* [1939]⁶ constate que le travail en groupe génère une stimulation qui augmente les performances du groupe : les performances du groupe sont meilleures que la somme des performances individuelles de chacun des membres. La *facilitation sociale* a également été observée sur des animaux comme les cafards [ZAJONC 1969] ou les singes [DINDO *et al.* 2009].

Cependant, des nuances de ce phénomène commencent à être observées. Par exemple, des différences de performances sont observées en fonction de la nature de la tâche. Déjà, YERKES et DODSON [1908] avait constaté, dans un contexte non-collaboratif, que les performances d'un individu pouvait dépendre de la complexité de la tâche et du niveau de stimulation. Une trop faible ou une trop forte stimulation diminue les performances de l'individu lors de la réalisation d'une tâche complexe (voir figure 1.13 page suivante). Une trop faible stimulation désintéresse l'individu de la tâche alors qu'une stimulation trop importante génère un stress diminuant les capacités de l'individu.

ZAJONC [1965] fait le lien entre la loi de YERKES et DODSON [1908] et la *facilitation sociale*. En effet, la présence de partenaires dans la réalisation d'une tâche permet une stimulation globale du groupe. Dans le cadre d'une tâche simple, chacun des membres est confiant dans ses propres capacités à réaliser la tâche et la présence d'observateurs va stimuler son besoin de bien réussir la tâche. Les individus ne craignent pas d'être évalué par les collaborateurs sur le travail réalisé. Cependant, l'évaluation par les collaborateurs dans le cadre d'une tâche complexe est différente : la tâche n'étant ni habituelle, ni facile, les membres du groupe perdent leur confiance et craignent un jugement dépréciatif.

6. ROETHLISBERGER *et al.* [1939] basent leurs conclusions sur les travaux non-publiés de Elton MAYO connus sous le nom de « l'étude *Hawthorne* », du nom de l'entreprise *Hawthorne Works* dans laquelle l'étude a été réalisée.

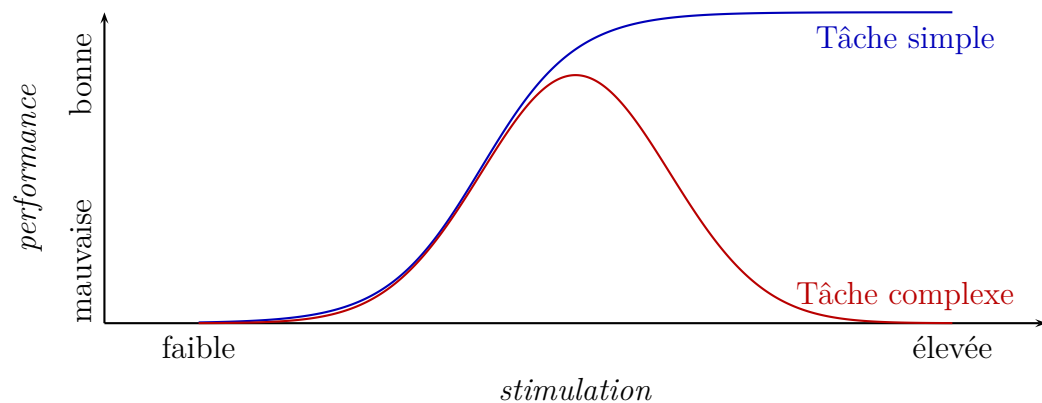


Figure 1.13 – Loi de YERKES et DODSON [1908] sur le lien entre la stimulation des individus et les performances

Malgré cela, CASTRO [1994] montre que la stimulation sociale est meilleure lorsque les participants se connaissent entre eux. En effet, les participants qui se connaissent déjà vont s’affranchir de la peur d’être évalué.

Dans cette section, nous avons présenté la *facilitation sociale*. Ce phénomène permet, par la simple présence ou la participation de plusieurs collaborateurs, de stimuler un groupe et d’en augmenter les performances. Cependant, nous allons voir dans la section suivante qu’une autre théorie vient compléter celle de la *facilitation sociale* : la *paresse sociale*.

1.3.3 La paresse sociale

RINGELMANN [1913] est le premier à constater le phénomène de *paresse sociale*⁷ dans un rapport technique qui sera signalé quelques années plus tard par MOEDE [1927] puis repris de manière détaillée dans la littérature scientifique par KRAVITZ et B. MARTIN [1986]. Il propose une expérience de traction de corde à plusieurs individus et observe la traction totale exercée par le groupe en faisant varier la taille des groupes. La traction totale observée pour un groupe est inférieure à la somme des efforts individuels (voir figure 1.14 page ci-contre). SCHERMERHORN *et al.* [2009] définit la *paresse sociale* de la manière suivante

The tendency of group members to do less than they are capable of as individuals.

7. Ce phénomène de *paresse sociale* est d’ailleurs parfois nommé « effet de RINGELMANN [1913] ».

qui peut être traduite par

Tendance à fournir un effort moindre lorsqu'une tâche est effectuée en groupe plutôt qu'individuellement.

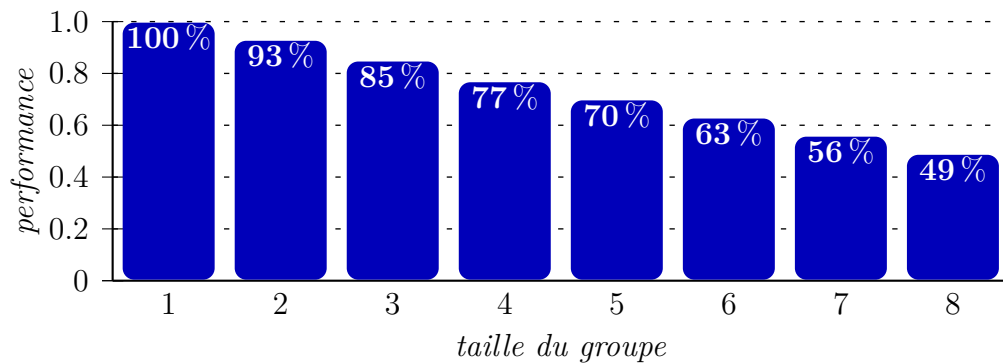


Figure 1.14 – Résultats obtenus par RINGELMANN [1913] et présentés par KRAVITZ et B. MARTIN [1986]

Cependant, les résultats de RINGELMANN [1913] ne permettent pas de déterminer si la perte d'efficacité est liée à un effort individuel plus faible ou à un manque de coordination entre les membres du groupe [STEINER 1972]. Entre temps, LATANÉ *et al.* [1979] ont recréé l'expérience proposée par RINGELMANN [1913] en modifiant le protocole expérimental afin de réduire les erreurs de mesure liées aux conflits de coordination. Bien que les résultats varient légèrement, les conclusions sont les mêmes que celles avancées précédemment. Les travaux de KERR et BRUUN [1981] permettent d'apporter des précisions pour définir les raisons de cette paresse sociale. Chaque membre effectuant strictement la même tâche que ses partenaires, il considère que le travail sera effectué par les autres et qu'il n'a pas besoin de s'investir autant que s'il était seul.

Par la suite, les travaux de recherche ont tenté de modéliser l'évolution de la paresse sociale en fonction du nombre de participants. INGHAM *et al.* [1974] puis KARAU et K. D. WILLIAMS [1993] montrent que l'ajout d'un premier puis d'un deuxième collaborateur a des conséquences importantes sur la paresse sociale mais que l'ajout de collaborateurs supplémentaires provoque une baisse plus modérée. [SULEIMAN et WATSON 2008] proposent une synthèse de la collaboration, illustrée sur la figure 1.15 page suivante.

Cependant, différentes études proposent des solutions pour contrer les effets de la paresse sociale. Deux propositions ressortent particulièrement : l'identification et l'auto-évaluation. Selon KERR et BRUUN [1981], l'identification a pour objectif de donner un rôle défini et unique à chaque participants.

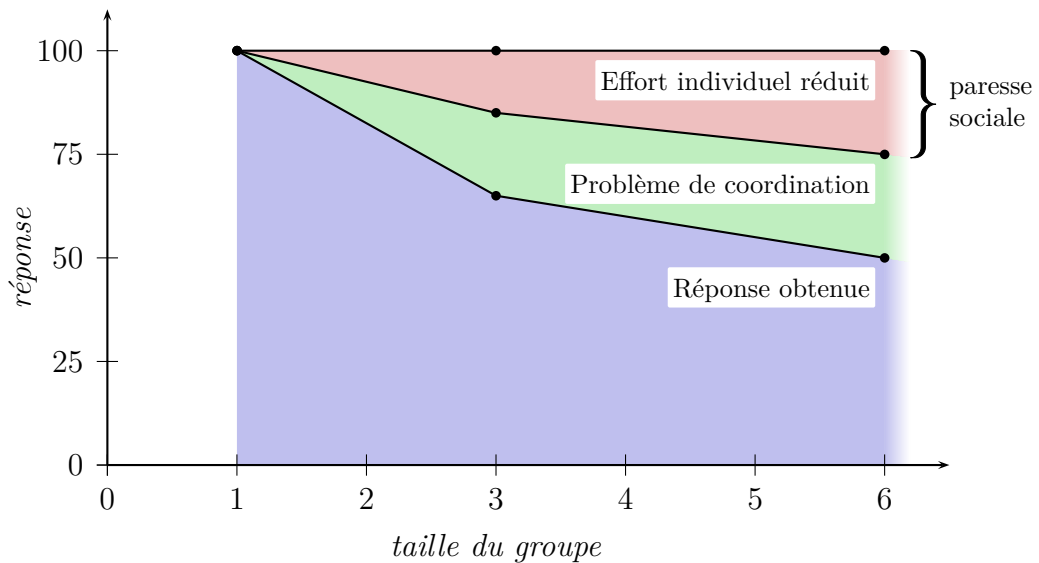


Figure 1.15 – Synthèse des effets de la collaboration selon SULEIMAN et WATSON [2008]

Cette identification permet de responsabiliser chaque participant. LATANÉ *et al.* [1979] en avaient déjà eu l'intuition puisqu'ils proposent une telle solution dans leurs perspectives. KARAU et K. D. WILLIAMS [1993] repris par KRAUT [2003] mettent en avant cette idée d'identification à la suite d'expérimentations.

D'ailleurs, KARAU et K. D. WILLIAMS [1993] ont également proposé le principe d'auto-évaluation pour neutraliser les effets de la paresse sociale. De cette manière, les utilisateurs peuvent s'auto-évaluer et évaluer leurs collaborateurs ce qui génère une pression sociale pour favoriser la facilitation sociale [S. G. HARKINS et SZYMANSKI 1988; SZYMANSKI et S. G. HARKINS 1987]. Dans une étude dans laquelle il compare entre autre une configuration de travail collaboratif distribuée avec une configuration colocalisée, CHIDAMBARAM et TUNG [2005] montrent qu'un travail colocalisé permet de faciliter l'auto-évaluation et augmente cette pression sociale. En effet, le travail colocalisé permet d'avoir une meilleur perception des actions de chacun des membres et ainsi d'évaluer de façon plus précise le travail des collaborateurs.

Cependant, CHIDAMBARAM et TUNG [2005] constatent un effet parallèle : certains membres du groupe donne simplement l'impression qu'ils travaillent sans être réellement effectif. On trouve également les récents travaux de BUISINE *et al.* [2011] qui montrent que l'occupation spatiale de l'environnement est importante : un accès limité à l'espace de travail provoque de la paresse

sociale. En effet, si l'accès à une ressource externe ne permet que la présence d'un seul membre du groupe, les autres membres ne pouvant pas l'utiliser peuvent générer le phénomène de *paresse sociale*. Il est donc préférable d'avoir un accès équitable à l'espace de travail pour tous les membres du groupe (une table ronde par exemple).

La *paresse sociale* est un phénomène qui apporte des contraintes importantes au travail de groupe. Cependant, fournir une identification des rôles de chacun est une première réponse à ce problème, l'auto-évaluation étant la seconde. Comme l'a montré CHIDAMBARAM et TUNG [2005], la collaboration colocalisée est une solution appropriée pour survenir aux besoins de l'auto-évaluation. Cependant, la mise en place d'une plateforme collaborative doit également permettre à chaque utilisateur de s'identifier au sein du processus collaboratif.

1.4 Collaboration en environnement virtuel

Dans la section précédente, nous avons identifié deux types d'éléments qui vont interagir au sein d'un système collaboratif :

Les participants qui sont les individus qui vont contribuer directement ou indirectement à la réalisation d'une tâche en collaboration ;

Les artefacts qui sont les différents composants ou matériels avec lesquels ou sur lesquels la collaboration peut s'appuyer.

Dans cette section, nous allons décrire les interactions qui ont lieu entre les différents acteurs d'un système collaboratif.

1.4.1 Mécanismes de la communication de groupe

Certains mécanismes de la communication sont relativement implicites et difficilement observables. D'autres sont plus concrets mais apportent également leurs contraintes et leurs limites. Cette section a pour but de décrire les mécanismes que sont la conscience périphérique et le *grounding*.

La conscience de groupe

La conscience de groupe, également nommée *awareness*, a été définie par DOURISH et BELLOTTI [1992].

Awareness is an understanding of the activities of others, which provides a context for your own activity.

traduit en français par BETBEDER et TCHOUNIKINE [2004]

[La conscience de groupe est une] compréhension des activités des autres, qui permet de donner un contexte à sa propre activité.

La conscience des autres partenaires peut concerner aussi bien la position spatiale (réelle ou virtuelle), des informations durables sur un collaborateur (âge, sexe, spécialité, culture, *etc.*) ou encore l'action réalisée par celui-ci [COCKBURN et WEIR 1999]. Cette conscience est bien souvent inconsciente et de nombreux événements peuvent survenir autour d'un participant sans qu'il n'y prête attention. Parfois, ce manque d'attention permet un gain de temps dans l'achèvement de la tâche (par exemple, si le collaborateur éternue, cela n'a pas d'influence sur la réalisation de la tâche). Cependant, le fait de savoir qu'un collaborateur s'est absenté (pour aller aux toilettes par exemple) est beaucoup plus pertinent car il n'est alors plus question de compter sur son aide pendant quelques minutes.

CAHOUR et PENTIMALLI [2005] identifient trois avantages d'avoir une bonne conscience du groupe en étudiant la coopération entre serveurs et cuisiniers d'un café-restaurant :

- l'économie collective de déplacements et actions, grâce à une vision périphérique des mouvements des collègues ;
- le besoin de communications rapides et non intrusives en écoutant sur un mode périphérique les messages oraux adressés dans le brouhaha du café ;
- le besoin d'éviter des collisions dans un petit espace partagé grâce à des modalités visuelles et kinesthésiques.

Cependant, la conscience de groupe est constituée de plusieurs aspects que les sociologues ont cherché à segmenter. GUTWIN *et al.* [1996] propose les quatre catégories de conscience suivantes⁸ :

Conscience informelle Ce sont les informations générales sur les collègues, le type d'informations que les gens connaissent lorsqu'ils travaillent dans le même bureau (âge, origines culturelles, situation familiale, *etc.*) ;

Conscience sociale Ce sont les informations que chacun établit dans n'importe quelle relation sociale comme l'état émotionnel de l'interlocuteur, son niveau d'attention ou encore son niveau d'intérêt ;

Conscience de la structure du groupe C'est la connaissance de la hiérarchie du groupe, les rôles et responsabilités de chacun, leurs assignations sur une tâche ou leur statut ;

8. Les catégories en anglais sont les suivantes : *informal awareness*, *social awareness*, *group-structural awareness* et *workspace awareness*.

Conscience de l'espace de travail C'est la conscience des actions et interactions des autres membres du groupe sur et avec l'espace de travail et les artefacts.

Parmi tous ces types de conscience, seule la conscience de l'espace de travail nécessite une mise à jour en temps-réel des informations environnantes par les membres du groupe, surtout dans le cadre d'une collaboration synchrone. Chaque collaborateur émet des informations (action en cours, position du curseur, *etc.*) de manière consciente ou inconsciente. Pour les informations émises de manière inconsciente, elles seront plus ou moins visibles des autres collaborateurs en fonction de leur attention. Cependant, lorsqu'un utilisateur souhaite émettre une information, il doit également être sûr que l'information a été comprise correctement.

Cette notion d'inter-référencement, récemment mise en évidence à travers la plateforme AMMP-Vis [CHASTINE *et al.* 2006 ; CHASTINE *et al.* 2005], a été définie par CHASTINE [2007] de la manière suivante

The ability for one participant to refer to a set of artifacts in the environment, and for that reference to be correctly interpreted by others.

qu'on traduira par

La capacité pour un des participants de désigner un ensemble d'artefacts dans l'environnement et que cette désignation soit correctement comprise par les autres collaborateurs.

Au travers de ces travaux de thèse, CHASTINE [2007] aborde en détail la notion d'inter-référencement. Un utilisateur initie une désignation d'un élément de l'environnement puis un (ou plusieurs) utilisateur(s) reçoit(reçoivent) cette désignation. Cette désignation est caractérisée par plusieurs paramètres :

- une technique de sélection ;
- un groupe d'éléments sélectionnés ;
- une technique de représentation ;
- une relation entre l'initiateur et l'élément sélectionné ;
- une relation entre le (ou les) receveur(s) et l'élément sélectionné ;
- un contexte entre l'initiateur et le (ou les) receveur(s) ;
- un moyen d'accuser réception du référencement (optionnel).

Afin de résoudre cette problématique, CHASTINE *et al.* [2007] se proposent, dans un contexte de collaboration distante, d'utiliser des techniques de réalité augmentée pour désigner les éléments (voir figure 1.16 page suivante). Dans une étude l'année suivante, CHASTINE *et al.* [2008] montrent que les techniques qu'ils proposent pour améliorer l'inter-référencement permettent de limiter les ambiguïtés et d'améliorer les performances globales du groupe.

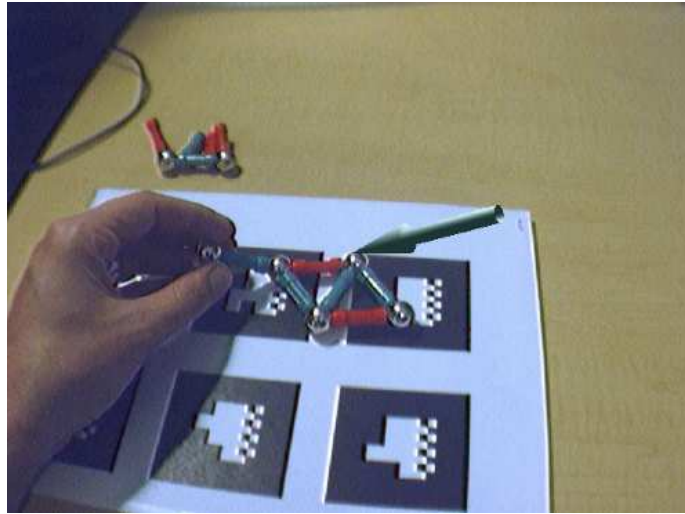


Figure 1.16 – Inter-référencement visuel proposé par CHASTINE *et al.* [2007] à l'aide de techniques de réalité augmentée

L'inter-référencement fait partie du processus d'échange et de communication au sein d'une collaboration synchrone (distante ou colocalisée). Afin d'effectuer des désignations à un collaborateur, il est nécessaire de savoir si le collaborateur est attentif. Il est également nécessaire d'adapter la manière de procéder en fonction des connaissances et des compétences de ce collaborateur. La conscience de groupe prend donc une place importante dans ce processus d'inter-référencement.

Le *grounding*

Cette notion, mise en évidence par Herbert H. CLARK et SCHAEFER [1989], est nécessaire à la collaboration. Herbert H. CLARK et BRENNAN [1991] expliquent ce besoin de *grounding* par la définition suivante.

[A group] cannot even begin to coordinate on content without assuming a vast amount of shared information or common ground – that is, mutual knowledge, mutual beliefs, and mutual assumptions.

qu'on pourrait traduire par

Un groupe ne peut pas commencer à se coordonner sur une tâche sans supposer une quantité importante d'informations partagées ou d'une base commune – c'est-à-dire des connaissances mutuelles, des convictions communes et des hypothèses communes.

Le *grounding* est nécessaire à la transmission d'informations. En effet, un locuteur qui souhaite transmettre une information doit savoir quel jargon il peut utiliser avec son interlocuteur ; il faut également que les deux interlocuteurs aient accès aux mêmes données concernant l'environnement sur lequel ils travaillent. DILLENBOURG *et al.* [1996] étudient ce partage d'informations sur une enquête fictive à propos d'un meurtre. Il constate que chaque membre du groupe se construit sa propre représentation de l'environnement dans lequel il se trouve et évolue en fonction des informations que chacun trouve et de sa culture existante [BAKER *et al.* 1999].

Lors d'un travail de collaboration, chaque membre possède déjà sa propre base de connaissances qui peut être complémentaire ou recouvrir partiellement celle des autres membres. Cependant, durant la réalisation de la tâche, une base de connaissance commune va se créer. HERTZUM [2008] lie les processus de recherche d'informations et de *grounding*. En effet, la recherche d'informations mène les membres du groupe à découvrir l'environnement dans lequel ils évoluent ensemble pour étoffer leur base de connaissance commune. Cependant, en observant le travail d'un hôpital où plusieurs médecins sont à la recherche de symptômes pour diagnostiquer un patient et fournir un traitement approprié, HERTZUM [2010] s'est rendu compte que chaque médecin est capable individuellement de découvrir des symptômes mais que le manque d'échanges entre les différents médecins ne permettait pas toujours d'établir le bon diagnostic.

Afin de constituer correctement une base de connaissance commune, les membres du groupe doivent communiquer. En particulier, ils doivent continuellement être sûr que les éléments dont ils parlent sont bien les mêmes afin de transmettre l'information. Fournir des outils appropriés pour l'inter-référencement devrait permettre d'améliorer la constitution de cette base commune de connaissance.

1.4.2 Communication en environnement virtuel

La communication en environnement virtuel est constituée de différentes composantes. Elle inclut la communication entre les collaborateurs et la communication avec ou à travers l'environnement. DIX [1997] a proposé de classer la communication en quatre catégories différentes.

Communication directe

C'est le moyen de communication le plus naturel. La communication se fait de manière orale ou gestuelle principalement. Elle est consciente la plupart du temps mais peut contenir une part de communication inconsciente d'après GUTWIN et GREENBERG [2000].

Contrôle et retour sensoriel

C'est l'interaction entre un participant et un artefact. Cette interaction est bidirectionnelle car le participant agit sur l'artefact qui produit un retour sur un ou plusieurs des modalités du participants (vue, ouïe, toucher, *etc.*).

Feedthrough

C'est un canal de communication indirect où les participants communiquent entre eux par l'intermédiaire des artefacts [DIX *et al.* 2003]. Les actions effectuées par un participant à l'aide et sur l'artefact modifient l'environnement ce qui donne des informations sur les actions et les intentions au collaborateur. JUNUZOVIC et DEWAN [2009] utilisent même le terme *feedthrough* pour une communication indirecte avec un participant en intermédiaire.

Grounding

Les participants doivent posséder au moins un niveau de compréhension commun (même langue parlée, même base culturelle, même jargon, *etc.*) afin de se comprendre [DIX *et al.* 2003]. Cet aspect de la communication est inconscient mais est nécessaire pour la collaboration.

1.4.3 Stratégies de collaboration

Avec les différents canaux de communication décrits dans la section 1.4.2 page précédente, conscients pour certains (communication directe, contrôle et retour sensoriel) et inconscients pour d'autres (*feedthrough* et *grounding*), il est possible de définir trois scénarios de collaboration différents basés sur les travaux de DIX *et al.* [2003] et de GRASSET [2004].

Collaboration à plusieurs utilisateurs

Illustré sur la figure 1.17, c'est l'aspect le plus naturel de la distribution cognitive des charges que nous avons déjà découvert dans la section 1.3.1 page 17 : on souhaite diviser la tâche à réaliser entre plusieurs utilisateurs car elle trop complexe ou trop fastidieuse. Chaque participant peut accéder librement aux artefacts et possède la possibilité d'analyser l'environnement par l'observation ou par les retours sensoriels des artefacts.

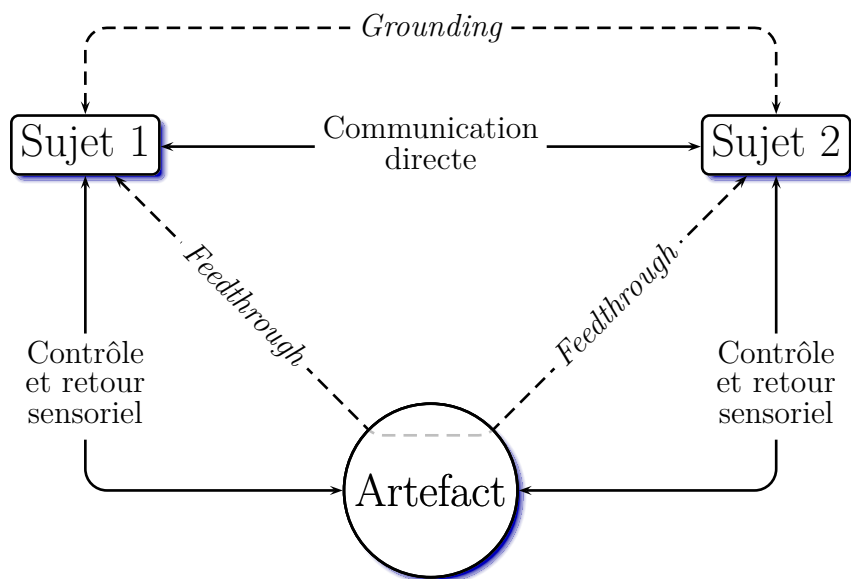


Figure 1.17 – Collaboration à plusieurs utilisateurs

Ce scénario permet une collaboration avec un même niveau d'interaction et d'accès aux ressources entre les collaborateurs ce qui peut faciliter la communication. Cependant, nous avons vu dans la section 1.3.3 page 22 sur la paresse sociale qu'une identification des rôles était préférable. Ce type de scénario aura tendance à favoriser la paresse sociale en proposant des rôles strictement identiques aux utilisateurs.

De plus, on notera que tous les participants accèdent aux mêmes artefacts. Si deux collaborateurs accèdent, modifient ou manipulent en même temps un même artefact, cela peut poser des problèmes de cohérence de l'environnement virtuel ou de sécurité de l'information comme l'explique DEWAN et H. SHEN [1998]. DEWAN et H. SHEN [1998] énoncent une liste de conditions à respecter (automatisation, généralisation, médiation totale, privilège minimum, facilité d'utilisation, efficacité) pour limiter les problèmes de concurrences

d'accès aux codes sources dans le développement de programmes informatiques. Quelques années plus tard, l'outil de développement informatique collaboratif SUBVERSION [2011] voit le jour. GRASSET et GASCUEL [2002] sont également confrontés à ce problème d'accès aux ressources sur sa plateforme multi-utilisateurs MARE et propose un système de contrôle d'accès aux informations. Toutefois, BUISINE *et al.* [2011] soulignent qu'une possibilité d'accès aux artefacts équitablement distribuée entre les utilisateurs permet de réduire la paresse sociale. En effet, si un utilisateur ne parvient pas à accéder aux artefacts, il va s'isoler.

Collaboration à plusieurs experts

Le scénario à plusieurs experts se distingue du scénario à plusieurs utilisateurs par la compétence des membres du groupe : les experts proviennent de spécialités différentes. La médecine est un domaine qui s'adapte très bien à ce type de scénario étant donné le nombre important de spécialités différentes [ALTHOFF *et al.* 2007a ; ALTHOFF *et al.* 2007b]. Les experts possédant des connaissances différentes, il est nécessaire pour eux d'avoir des artefacts adaptés aux besoins de chacun (voir figure 1.18 page suivante). Si on prend l'exemple du *docking* moléculaire, un biologiste n'aura pas les mêmes besoins en information qu'un chimiste et leurs actions sur la tâche à réaliser seront également de natures différentes. Les artefacts se synchronisent entre eux afin de conserver un environnement virtuel cohérent pour l'ensemble des experts.

Certaines tâches sont très adaptées à ce type de collaboration. Elle permet une identification des rôles de chacun et limite ainsi la paresse sociale : chaque utilisateur ne peut se fier qu'à lui-même pour réaliser la tâche. De plus, l'accès aux artefacts devient simplifié puisqu'il n'y a plus d'accès concurrent à un même artefact par deux utilisateurs. Cependant, une synchronisation entre les artefacts est nécessaire afin de conserver une cohérence de l'environnement virtuel pour l'ensemble des utilisateurs ce qui peut poser quelques difficultés techniques. BARBIČ et D. L. JAMES [2007] ainsi que GAUTIER *et al.* [2008] abordent ces problèmes de synchronisation sur des simulations d'objets déformables.

Dans les scénarios à plusieurs experts, les bases de connaissances sont plutôt complémentaires. Il est nécessaire d'identifier les connaissances communes selon BACH *et al.* [2010], notion déjà identifiée comme le *grounding* par Herbert H. CLARK et BRENNAN [1991] (voir section 1.4.1 page 28). Par exemple, le jargon utilisé entre deux experts de spécialités différentes peut devenir une importante contrainte à la communication directe.

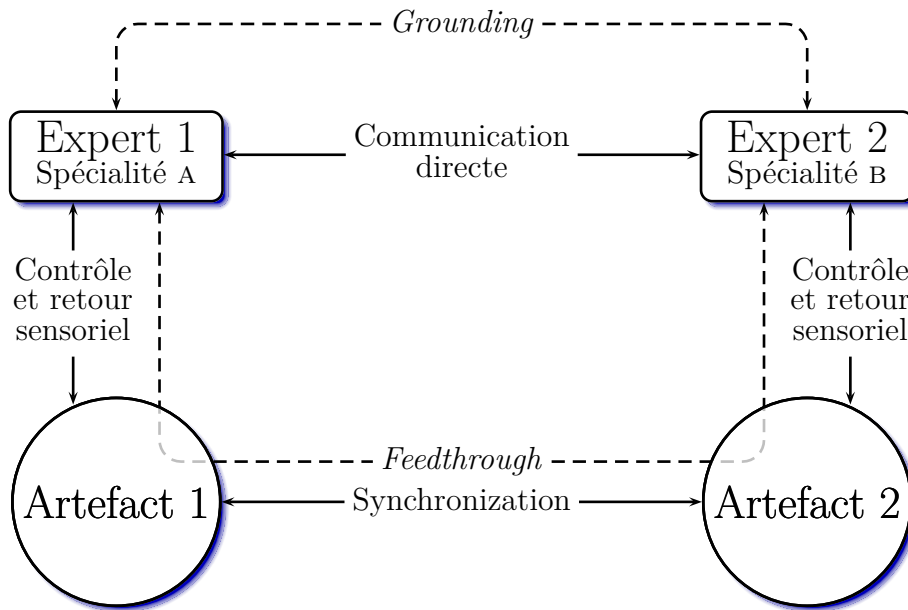


Figure 1.18 – Collaboration à plusieurs experts

Collaboration par manipulateur et observateur

Dans les deux scénarios précédents, il est difficile de synchroniser les actions des différents utilisateurs. Dans le scénario à plusieurs utilisateurs, c'est l'accès concurrent aux artefacts qui pose problème ; dans le scénario à plusieurs experts, c'est la synchronisation entre les artefacts. Afin de passer outre ces contraintes, le scénario par manipulateur et observateur propose un accès aux artefacts exclusif à un seul utilisateur du groupe, les autres n'ayant que la possibilité d'interagir directement avec cet utilisateur (voir figure 1.19 page suivante). L'observateur agit alors sur les artefacts par l'intermédiaire du manipulateur.

Ce scénario permet de s'affranchir des contraintes d'accès concurrent aux artefacts ou de synchronisation entre les artefacts. Les observateurs possèdent également une charge de travail cognitive beaucoup plus faible et peuvent se consacrer de manière plus importante à l'analyse des données disponibles et à la proposition de solutions pertinentes.

Cependant, l'activité de l'observateur le mène à désigner des objectifs au manipulateur ce qui augmente le besoin de communication. Cette action renvoie aux travaux de CHASTINE [2007] sur l'inter-référencement (voir section 1.4.1 page 25). De plus, un travail récent cherchant à caractériser « l'intelligence d'un groupe » a conclu que l'un des facteurs d'intelligence d'un groupe était

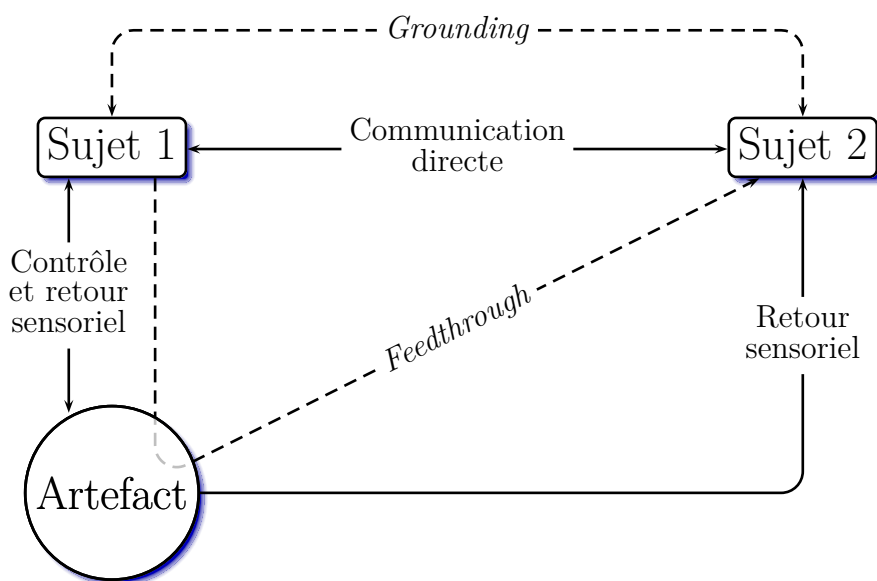


Figure 1.19 – Collaboration par manipulateur et observateur

la répartition équitable des charges de travaux entre les membres du groupe [WOOLLEY *et al.* 2010]. Dans ce scénario, l'asymétrie entre les différents rôles (manipulateur et observateur) semble favoriser un déséquilibre important des charges de travail ce qui n'est pas idéal pour la collaboration.

1.5 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons découvert la complexité que représente la tâche de *docking* moléculaire. En proposant des plateformes collaboratives, les scientifiques ont permis d'améliorer les résultats obtenus mais la collaboration reste relativement faiblement couplée (messages textuels ou verbaux, vidéo-conférence, *etc.*). Pourtant, de récents développements nous permettent enfin d'envisager d'immerger les scientifiques au sein d'une simulation moléculaire en temps-réel. C'est donc afin de répondre à la complexité du *docking* moléculaire que nous souhaitons proposer une plateforme collaborative synchrone et colocalisée pour la déformation moléculaire interactive et temps-réel.

Dans ce chapitre, nous avons également mis en évidence les avantages et les contraintes de la collaboration. La distribution cognitive des charges de travail permet d'apporter une réponse pertinente à la réalisation d'un problème extrêmement complexe tel que le *docking* moléculaire. Cependant, de nom-

breux facteurs (facilitation sociale, paresse sociale, *grounding*, conscience de groupe, *etc.*) interviennent et influent sur la communication et les interactions entre les acteurs de la collaboration. C'est la raison qui nous encourage à envisager la modalité haptique comme un support supplémentaire adéquat pour améliorer les communications et les interactions entre les collaborateurs.

Cependant, un tel contexte de travail (collaboration synchrone et colocalisée, manipulation moléculaire temps-réel, interaction avec retour haptique) n'a encore jamais été étudié. Aucune donnée ne permet d'infirmier ou de confirmer les théories sur la collaboration dans ce contexte bien que des hypothèses puisse être formulées.

Afin d'étudier ce contexte de travail, nous avons souhaiter segmenter les étapes de la déformation moléculaire en nous basant sur les travaux de BOWMAN [1999]. Il identifie quatre tâches élémentaires pour segmenter une interaction en environnement virtuel, nommées *Primitives Comportementales Virtuelles* (PCVs) par FUCHS *et al.* [2006]. Les quatre PCVs pour la manipulation moléculaire, illustrée dans la figure 1.20 page suivante, sont expliquées ci-dessous :

Exploration Cette tâche concerne la recherche et l'identification d'une cible (atome, résidu, structure secondaire, *etc.*) en fonction de critères multiples (articulations, bilan énergétique, régions hydrophobique, *etc.*).

Sélection Une fois la cible trouvée, la tâche consiste à accéder puis à sélectionner la cible par l'intermédiaire d'un périphérique d'entrée (une souris, une interface haptique, *etc.*).

Déformation Cette étape consiste à manipuler la cible précédemment sélectionnée pour déformer la structure moléculaire au niveau atomique, intra-moléculaire ou inter-moléculaire. L'objectif inhérent à cette tâche et d'atteindre l'objectif fixé (par exemple, minimiser l'énergie totale du système).

Évaluation Cette dernière partie concerne l'évaluation du travail précédemment réalisé en observant différents indicateurs (énergie potentielle, énergie électrostatique, complémentarité des surfaces, *etc.*). En fonction de la synthèse des résultats de cette dernière phase, un nouveau cycle pourra recommencer (recherche, sélection, déformation, évaluation, *etc.*).

Sur la base de ces PCVs, nous avons segmenté notre étude en deux parties distinctes ; une centrée sur le processus d'exploration et de sélection (voir chapitre 3 page 53) ; la seconde centrée sur les processus de manipulation et d'évaluation (voir chapitre 4 page 81). Dans un troisième temps, nous avons souhaiter augmenter la taille des groupes étudiés (voir chapitre 5 page 111).

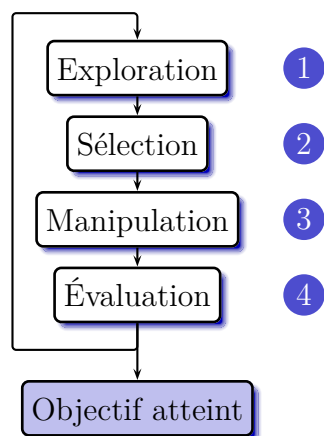


Figure 1.20 – Processus de déformation moléculaire en quatre étapes