

### 3.1 Introduction

La fusion d'informations a beaucoup évolué ces dernières années : dans différents domaines, et en particulier en vision et en robotique, les sources d'informations se sont multipliées, qu'il s'agisse de capteurs, d'informations a priori, de connaissances génériques, etc. Chaque source d'information étant en général imparfaite, il est important d'en combiner plusieurs afin d'avoir une meilleure connaissance du monde. Puisque l'IRM peut fournir des informations diverses sous forme d'intensités d'images liées à l'anatomie par une variété de séquences d'excitations, (par exemple **T1**, **T2**, et **DP**), c'est un outil puissant pour améliorer le diagnostic clinique. La fusion d'informations peut alors se définir comme la combinaison d'informations (souvent imparfaites et hétérogènes) afin d'obtenir une information globale plus complète, de meilleure qualité, et permettant de mieux décider et agir.

Dans ce chapitre, nous présentons les notions de base pour appliquer la fusion d'information dans l'imagerie médicale IRM cérébrale.

### 3.2 Définition de fusion :

Plusieurs définitions de la fusion de données ont été proposées [65] cherchant à être la plus générale possible. Mais il paraît difficile, voire impossible, d'avoir une définition globale, chacune d'entre elles se référant à un domaine d'application.

**Définition** : La fusion d'informations consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision [66].

Cette définition est issue de discussions menées au sein du groupe de travail sur la fusion d'informations du GDR-PRC ISIS. Elle s'applique parfaitement aux problèmes de traitement du signal et des images tout en étant suffisamment générale, les termes "informations" (numériques ou symboliques) et "sources" englobant de nombreuses possibilités. De même, la notion d'amélioration dépend fortement de l'application.

### 3.3 Intérêt de la fusion

La fusion envisagée concerne l'agrégation d'images IRM issues de différentes techniques d'acquisition. Les informations à combiner sont donc homogènes, et suivant le type d'acquisition l'image offrira des contrastes plus ou moins prononcés entre les tissus ou entre parenchyme et pathologie. Un des intérêts principaux de la fusion sera alors d'exploiter en particulier la complémentarité entre les différentes images. De nombreuses applications peuvent bénéficier de cette technique. Citons entre autres :

- La détection de zones tumorales

L'IRM permet d'apprécier facilement une extension tumorale, particulièrement lorsque des produits de contraste sont utilisés. Avec certaines techniques d'acquisition, la spécificité est aussi plus grande permettant dans certains cas la distinction entre tumeur et œdème. Tout l'intérêt va donc résider en une combinaison de ces techniques avec une acquisition plus anatomique (de type pondérée en T1) pour évaluer l'extension tumorale. Par exemple, un glioblastome cérébral (tumeur affectant la plus grande partie d'un ou des deux hémisphères) peut être précisément localisé par fusion d'images pondérées en T1 et T2, où la première apporte une information anatomique et la seconde permet de mieux évaluer l'extension de la tumeur [67]. De même, les anomalies superficielles (affections des méninges, encéphalites, atteintes corticales) peuvent être étudiées par fusion entre une image pondérée en T1 et une image issue d'une séquence FLAIR avec injection de produit de contraste. La pondération T1 apporte l'information anatomique et la séquence FLAIR fournit un contraste entre la pathologie et le parenchyme sans qu'il n'y ait de rehaussement des vaisseaux adjacents à circulation lente [68];

- La quantification des volumes de tissus cérébraux

De par sa précision anatomique et la variété des techniques d'acquisition, l'IRM permet d'apprécier la distribution des différents tissus cérébraux suivant plusieurs contrastes. La quantification volumique de ces tissus est cliniquement fondamentale pour l'étude de nombreuses pathologies qui affectent la matière blanche, la matière grise ou le liquide cérébro-spinal [69], ou simplement pour la mesure des volumes chez des sujets sains [70].

### **3.4 Caractéristiques générales des données**

Dans cette partie, nous décrivons succinctement les caractéristiques générales des informations à fusionner, qui doivent souvent être prises en compte dans un processus de fusion. Une première caractéristique concerne le type d'information à fusionner. Il peut s'agir d'observations directes, de résultats de traitements sur ces observations, de connaissances plus génériques, exprimées sous forme de règles par exemple, ou d'avis d'experts. Ces informations peuvent être exprimées sous forme numérique ou sous forme symbolique. Une attention particulière doit être portée à l'échelle utilisée pour représenter les informations, afin de garantir une commensurabilité.

Le niveau de l'information qui va être fusionnée est également un aspect très important. On distingue généralement le bas niveau (typiquement les mesures originales),

d'un niveau plus élevé nécessitant des étapes préliminaires de traitement, d'extraction de primitives et de structuration de l'information.

D'autres distinctions sur les types de données sont également intéressantes à souligner, car elles donnent lieu à des modélisations et à des types de traitements différents : données fréquentes ou rares, informations factuelles ou génériques, génériques ou spécifiques, etc.

Les informations manipulées dans un processus de fusion sont d'une part les informations à fusionner, et d'autre part des informations supplémentaires qui servent à guider ou aider la combinaison. Il peut s'agir d'informations sur les informations à combiner telles que des informations sur les sources, sur leur dépendance, sur leur fiabilité, des préférences sur les informations à combiner, etc. Il peut s'agir également d'informations contextuelles, sur le domaine. Ces informations supplémentaires ne sont pas forcément exprimées dans le même formalisme que les informations à combiner, mais elles peuvent intervenir dans le choix de la modélisation des informations à fusionner.

Une des caractéristiques importantes de l'information en fusion est son imperfection. Celle-ci est toujours présente (sinon la fusion ne serait pas nécessaire). Elle peut prendre diverses formes, qui sont brièvement décrites ci-dessous, d'une manière qui convient bien au problème de la fusion, mais qui n'est sûrement pas universelle.

**L'incertitude** est relative à la vérité d'une information, et caractérise son degré de conformité à la réalité [71]. Elle fait référence à la nature de l'objet ou du fait concerné, à sa qualité, à son essence ou à son occurrence.

**L'imprécision** concerne le contenu de l'information et mesure donc sur défaut quantitatif de connaissance, sur une mesure [71].

**L'incomplétude** caractérise l'absence d'information apportée par la source sur certains aspects du problème.

**L'ambiguïté** exprime la capacité d'une information de conduire à deux interprétations. Elle peut provenir des imperfections précédentes.

**Le conflit** caractérise deux ou plusieurs informations conduisant à des interprétations contradictoires et donc incompatibles. Les situations conflictuelles sont fréquentes dans les problèmes de fusion, et posent toujours des problèmes difficiles à résoudre. Tout d'abord, la détection des conflits n'est pas forcément facile. Ils peuvent facilement être confondus avec d'autres types d'imperfection, ou même avec la complémentarité des sources. Ensuite, leur

identification et leur typologie est une question qui se pose souvent, mais de manière différente suivant leur domaine. Enfin, leur résolution peut prendre différentes formes. Elle peut reposer sur l'élimination de sources non fiables, sur la prise en compte d'informations supplémentaires, etc. Dans certains cas, il peut être préférable de retarder la combinaison et d'attendre d'autres informations susceptibles de lever les conflits, ou même de ne pas fusionner du tout.

D'autres caractéristiques de l'information sont plus positives, et sont exploitées pour limiter les imperfections :

**La redondance** est la qualité de sources qui apportent plusieurs fois la même information. La redondance entre les sources est souvent observée, dans la mesure où les sources donnent des informations sur le même phénomène. Idéalement, la redondance est exploitée pour réduire les incertitudes et les imprécisions [71].

**La complémentarité** est la propriété des sources qui apportent des informations sur des grandeurs différentes. Elle vient du fait qu'elles ne donnent en général pas d'informations sur les mêmes caractéristiques du phénomène observé. Elle est exploitée directement dans le processus de fusion pour avoir une information globale plus complète et pour lever les ambiguïtés [71].

### 3.5 Systèmes de fusion

#### 3.5.1 Les étapes de fusion

En général, la fusion n'est pas une tâche simple. Elle peut se décomposer de manière schématique en plusieurs tâches. Considérons un problème général de fusion pour lequel on dispose de  $l$  sources  $S_1, S_2, \dots, S_l$ , et pour lequel le but est de prendre une décision dans un ensemble de  $n$  décisions possibles  $d_1, d_2, \dots, d_n$ . Les principales étapes à résoudre pour construire le processus de fusion sont les suivantes :

1. Modélisation : cette étape comporte le choix d'un formalisme, et des expressions des informations à fusionner dans ce formalisme. Cette modélisation peut être guidée par les informations supplémentaires (sur les informations et sur le contexte ou le domaine). Supposons pour fixer les idées que chaque source  $S_j$  fournisse une information représentée par  $M_i^j$  sur la décision  $d_i$ . La forme de  $M_i^j$  dépend bien sûr du formalisme choisi.

2. Estimation : la plupart des modélisations nécessitent une phase d'estimation (par exemple toutes les méthodes utilisant des distributions). Là encore les informations supplémentaires peuvent intervenir.

3. Combinaison : cette étape concerne le choix d'un opérateur, compatible avec le formalisme de modélisation retenu, et guidé par les informations supplémentaires.

4. Décision : c'est l'étape ultime de la fusion, qui permet de passer des informations fournies par les sources au choix d'une décision  $d_i$ .

### 3.6 Architecteur de système de fusion

A partir des étapes de système de fusion et son architecture, nous avons distingué deux systèmes :

- Les systèmes décentralisés dans lesquels des décisions locales sont prises au niveau de chaque source séparément puis sont fusionnées en une décision globale.
- Les systèmes centralisés dans lesquels on combine par une opération  $F$  tous les  $M_i^j$  relatifs à la même décision  $d_i$ , pour obtenir une forme fusionnée  $M_i = F(M_i^1, M_i^2, \dots, M_i^L)$  puis une décision est prise sur le résultat de cette combinaison.

### 3.7 Classification des types de fusion

Une formalisation possible de la fusion d'information introduit trois niveaux conceptuels correspondant à trois types d'information :

- La fusion de données : c'est le niveau conceptuel le plus bas. Elle consiste essentiellement à marier des informations de bas niveau comme par exemple des primitives, dans le but de rendre l'information moins bruitée que celle obtenue avec une seule source d'information.
- La fusion de décisions : ce type de fusion agit au niveau de l'espace de décision. Elle effectue l'association d'informations élaborées (numériques ou symboliques) qui peuvent être considérées comme des propositions de décision.
- La fusion de modèles : ce cas est celui dans lequel les aspects complémentaires de différentes approches sont mis à partie pour combler les imperfections dont souffrent chacune d'entre elles indépendamment.

### 3.8 La fusion de données

Les notions de certitude et de précision sont souvent antagonistes. De cet antagonisme naissent souvent des contradictions en agrégation de données [72] puisque si celles-ci sont précises, alors elles sont probablement incertaines et risquent d'être en contradiction.

Un système de fusion doit donc gérer incertitude et imprécision pour éviter les incohérences. Le terme « fusion » possède de nombreuses acceptions suivant la communauté de pensée et les habitudes de travail de chacun. Dans la suite de ce manuscrit, nous envisageons la fusion de données comme une agrégation d'informations ambiguës, conflictuelles, complémentaires et redondantes, autorisant une interprétation des données plus précise et/ou moins incertaine. Cette définition permet, en particulier, de lever toute ambiguïté quant à l'interprétation du terme, notamment dans le domaine de l'imagerie médicale où l'expression « fusion » est quelquefois employée pour désigner un recalage ou une superposition d'images. Nous ne considérons de plus que la fusion au niveau le plus bas de la représentation de l'information. En d'autres termes, pour le problème d'imagerie qui nous concerne, nous fusionnons les informations issues des images voxel à voxel.

### 3.9 Classification des opérateurs de fusion

Nous considérons, dans la suite, la fusion d'informations issues de deux sources. Plus précisément, étant donné un couple d'informations ( $n_1$ ,  $n_2$ ) fourni par deux capteurs sur un même événement ou phénomène, nous considérons le problème de fusion qui agrège ces deux informations en exploitant au mieux l'ambiguïté et la complémentarité des données.

Cette agrégation est réalisée par un opérateur binaire  $F(.,.)$  auquel on impose une contrainte de fermeture (la valeur retournée doit être de même nature que les informations d'entrée, par exemple probabiliste). Le cas d'une fusion entre un nombre plus important de sources a été discuté par ailleurs pour les théories exposées dans [73] [71] [74], et ne fait pas l'objet de notre propos.

Une classification des opérateurs suivant leur comportement et leur attitude vis-à-vis du contexte a été proposé dans [73]. Dans la suite, le comportement de  $F$  est qualifié de :

- sévère si  $F(n_1, n_2) \leq \min(n_1, n_2)$  ;
- prudent si  $\min(n_1, n_2) \leq F(n_1, n_2) \leq \max(n_1, n_2)$  ;
- indulgent si  $F(n_1, n_2) \geq \max(n_1, n_2)$  ;

En relation avec les notions de conjonctions (T-normes) et de disjonctions (T-conormes) développées dans [75]. Un opérateur sévère suppose que les deux capteurs sont fiables et exploite l'information commune aux deux mesures. Au contraire, un opérateur indulgent agit sur des sources a priori en conflit. Il augmente la certitude sur l'événement observé (et donc augmente l'imprécision...) et exprime la redondance entre les informations.

Un opérateur prudent adopte une attitude entre ces deux extrêmes. Nous rappelons brièvement la taxinomie qui nous permettra de caractériser le comportement des fusions présentées dans les paragraphes suivants.

### **3.9.1 Opérateurs à comportement constant et indépendant du contexte**

Cette première classe est composée d'opérateurs ayant le même comportement quelles que soient les valeurs  $n_1$  et  $n_2$  à agréger. Le résultat de la fusion est de plus indépendant du contexte de l'agrégation. L'opérateur  $F$  est donc exclusivement sévère, indulgent ou prudent. Dans la suite, cette classe sera notée CCIC.

### **3.9.2 Opérateurs à comportement variable et indépendant du contexte**

Cette seconde classe regroupe les opérateurs qui ne dépendent pas du contexte mais dont le résultat est fonction des valeurs  $n_1$  et  $n_2$  (de leur valeur absolue par exemple). Cette classe sera notée CVIC dans la suite du manuscrit.

### **3.9.3 Opérateurs dépendant du contexte**

Enfin, la dernière classe regroupe les opérateurs dépendant du contexte. La valeur retournée par  $F$  ne dépend plus seulement de  $n_1$  et  $n_2$ , mais aussi d'une connaissance a priori sur le système de capteurs ou le phénomène étudié. Il est ainsi possible de construire des opérateurs dont le comportement sévère (respectivement indulgent) est une fonction croissante (respectivement décroissante) de l'accord entre les deux capteurs. Cette classe d'opérateurs, qui sera notée CDC, nous intéressera tout particulièrement dans la suite.

### **3.9.4 Quelques propriétés**

Nous énonçons enfin quelques propriétés qui doivent participer à la construction d'un opérateur de fusion. Outre la contrainte de fermeture, un opérateur doit être si possible associatif et commutatif (l'opérateur étant alors indépendant de l'ordre de présentation des informations), continu (ce qui assure la robustesse de la combinaison pour des couples de mesures voisins) et strictement croissant par rapport au couple  $(n_1, n_2)$ .

**Exemple [76]**

$$\text{FOP1: } \pi_T(v) = \min (\pi_T^{T1}(v), \pi_T^{T2}(v), \pi_T^{DP}(v)) + 1-h \quad (3.1)$$

$$\text{FOP2: } \pi_T(v) = \max \left( \frac{\min (\pi_T^{T1}(v), \pi_T^{T2}(v), \pi_T^{DP}(v))}{h}, 1-h \right) \quad (3.2)$$

$$\text{FOP3: } \pi_T(v) = \min \left( 1, \frac{\min (\pi_T^{T1}(v), \pi_T^{T2}(v), \pi_T^{DP}(v))}{h} + 1-h \right) \quad (3.3)$$

Avec:

$$h = 1 - \sum_{v \in \text{Image}} | \pi_T^{T1}(v), \pi_T^{T2}(v) - \pi_T^{DP}(v) | / |\text{Image}|$$

$$\text{FOP4: } \pi_T(v) = \frac{(\pi_T^{T1}(v) + \pi_T^{T2}(v) + \pi_T^{DP}(v))}{3} \quad (3.4)$$

### 3.10 Les applications médicales de la fusion de données

Elles peuvent être classifiées en quatre catégories principales [77] : la fusion intra sujet et intra modalité, la fusion intra sujet et inter modalité, la fusion inter sujet et la fusion sujet et modalités.

#### 3.10.1 La fusion intra sujet et intra modalité

Concerne la fusion entre différents jeux de données provenant d'une même modalité pour un sujet. A cette catégorie correspondent trois principaux objectifs cliniques :

- le suivi dans le temps de modifications dans l'anatomie du patient.
- la comparaison de différents états.
- l'imagerie par soustraction.
- Suivi de l'évolution :

Le suivi dans le temps des modifications dans l'anatomie du patient permet, par exemple, de suivre la croissance ou d'étudier l'évolution d'une zone lésionnelle ou les effets d'un traitement thérapeutique. En chirurgie ou en radiothérapie, ce contexte de fusion permet de comparer des images pré- et post-opératoires ou pré- et post-traitement.

- Comparaison des états :

Ce contexte de fusion peut aussi être utilisé pour permettre la comparaison des différents états du sujet. En IRM fonctionnelle, les mesures d'activations fonctionnelles peuvent être réalisées par la comparaison statistique d'images acquises respectivement dans des états successifs d'activité et de repos [78]. La comparaison de deux examens TEMP



(tomographie d'émission mono-photonique), acquis respectivement avant une crise d'épilepsie (inter-ictal) et juste après la crise (ictal-un traceur est injecté au tout début de la crise.

- Imagerie par soustraction :

L'imagerie par soustraction est basée sur le calcul d'une différence entre des images correspondant à deux acquisitions différentes réalisées avec et sans traceur ou agent de contraste. En imagerie vasculaire, ce processus de soustraction extrait les vaisseaux sanguins des images.

### **3.10.2 La fusion intra sujet et inter modalité :**

Concerne la fusion entre des données multi modalité d'un même sujet. Aucune modalité d'imagerie médicale ne permet d'explorer toutes les structures anatomiques ou de fournir, à la fois, des informations anatomiques et fonctionnelles à la plus haute résolution spatiale et temporelle. Cette deuxième catégorie d'applications permet de profiter de la nature complémentaire des différentes modalités d'imagerie et pour différentes zones anatomiques (tête, cœur [79], poitrine [80], thorax [81], foie ou abdomen [82], reins, rachis [83], pelvis, fond d'œil [84], etc.). La mise en correspondance entre des données CT et IRM facilite la localisation anatomique conjointe des structures osseuses et des tissus mous [85]. La mise en correspondance entre des données d'IRM anatomique, de TEP ou de TEMP permet une corrélation anatomo-fonctionnelle , utile notamment dans des études pré-chirurgicales. Par exemple dans le contexte de la chirurgie de l'épilepsie, l'analyse d'informations multimodales permet une meilleure compréhension du réseau épileptogène et l'identification des structures intervenant lors des crises.

### **3.10.3 La fusion inter sujet et intra ou inter modalité :**

Concerne la fusion entre des données mono ou multi modalité concernant des sujets différents. Les applications principales de cette catégorie sont liées à l'étude de la variabilité anatomique ou fonctionnelle au sein d'une population de sujets (sujets sains ou patients). Ce type de recalage permet de construire des modèles moyens (appelé Template) [86], de comparer les données d'un sujet à un atlas ou à un « Template », de comparer, via un «Template », des données concernant des sujets différents appartenant à une même population ou, enfin, de comparer deux populations de sujets [87]. Cette catégorie de contextes de fusion sert de cadre à des méthodes de segmentation [88] s'appuyant sur l'utilisation de modèles. Les méthodes et applications liées à cette catégorie font

encore actuellement, et pour une grande majorité d'entre elles, partie du domaine de la recherche.

#### **3.10.4 La fusion sujette et modalités :**

Cette catégorie de fusion concerne la fusion entre l'espace du sujet réel et les données images. Globalement, elle concerne la mise en correspondance géométrique entre le sujet réel, les outils (comme les outils chirurgicaux, les systèmes robotiques ou les systèmes d'imagerie interventionnelle) et des images ou mesures pré ou intra opératoires.

### **3.11 Conclusion**

La fusion d'image est un grand progrès dans l'imagerie médicale car elle permet d'assister considérablement le médecin dans son diagnostic.

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions fondamentales sur la fusion d'information, son intérêt, son classification, ses étapes et son architecteur. Au dernier nous avons consacré sur la fusion de données de l'approche proposée pour répondre à la problématique de l'extraction des connaissances par fusion floue/possibiliste de données et les opérateurs de fusion.