

CHAPITRE QUATRIÈME

**NUTRI-EXPERT et NUTRI-ADVICE,
deux logiciels d'aide à la construction de
repas équilibrés pour l'éducation
nutritionnelle.**

Jean-Christophe BUISSON^{*†‡}

* IRIT (Institut de Recherche en Informatique de Toulouse)

118 route de Narbonne, 31062 Toulouse

† ENSEEIHT, 2 rue Camichel, 31071 Toulouse

‡ Hôpitaux de Toulouse, CHU Rangueil,
avenue Jean Poulhes, 31403 Toulouse

Abstract

Nutri-Expert et Nutri-Advice sont deux programmes d'éducation nutritionnelle utilisés par les patients eux-mêmes pour améliorer l'équilibre de leurs repas. Nutri-Expert est utilisé à domicile sous une forme interactive, tandis que Nutri-Advice est utilisé en restaurant d'entreprise ou en cantine scolaire avec une interface utilisant un lecteur de codes barres et un écran tactile. L'un et l'autre exploitent un noyau commun, capable d'effectuer un bilan détaillé d'un repas en utilisant l'arithmétique floue. Nutri-Expert utilise également un algorithme de recherche heuristique pour réparer les repas et les rendre conformes aux besoins de l'utilisateur. La saisie des aliments d'un repas et de leurs quantités utilise des images prototypiques de plats, alors que la présentation visuelle des résultats par rapport aux normes médicales est fondée sur un composant graphique original semblable à un galvanomètre; ces deux techniques d'interfaces entretiennent des rapports étroits avec la nature imprécise des données sous-jacentes, qui sont discutés en détail. Finalement, les résultats d'évaluations médicales sont présentés.

Mots-clés : Nutri-Expert, Nutri-Advice, nutrition, flou, imprécision, recherche heuristique

Abstract

Nutri-Expert and Nutri-Advice both are educational softwares used by patients in order to improve the balance of their daily meals. Nutri-Expert is used at home in an interactive manner, whereas Nutri-Advice is used in a cafeteria or a restaurant at work or at school, using a barcode reader and a touchscreen as an interface. Both use a common software kernel, able to perform a detailed assessment of a meal, using fuzzy arithmetic. Nutri-Expert also uses a heuristic search algorithm in order to repair unbalanced meals et make them adapted to the patient's needs. The foods of a meal are described using snapshots of dishes, and the compatibility of the meal with medical norms is presented using an original visual component analogous to a galvanometer; the relationship between these interface techniques and the imprecise nature of the underlying data is discussed at length. Finally, the results of medical experiments are presented and discussed.

Mots-clés : Nutri-Expert, Nutri-Advice, nutrition, fuzzy, imprecision, heuristic search

1 INTRODUCTION

Un homme français sur trois et une femme sur cinq ont un surpoids, à des degrés divers; cette fréquence de l'obésité dans les pays occidentaux est un facteur de risque important pour les maladies cardio-vasculaires notamment, et elle est ainsi responsable d'une forte morbidité. Le surpoids est reconnu depuis plusieurs années comme un problème de santé publique, mais la plupart des traitements envisagés échouent au long terme [16]. Parmi les mesures envisageables, l'éducation nutritionnelle, et en particulier celle des enfants, semble être la mieux à même de modifier durablement les habitudes alimentaires des patients.

Dans de nombreux services hospitaliers, des structures spécialisées réalisent des stages d'éducation nutritionnelle pour les diabétiques et les obèses non diabétiques, et emploient parfois des outils informatiques simples de calcul de bilan. Le service de Diabétologie du CHU de Toulouse-Rangueil a fait un pas de plus en réalisant des outils informatiques avancés pour la nutrition, domaine dans lequel il est pionnier depuis 1990, et pour lequel il a dédié une unité fonctionnelle spécialisée, dirigée par le docteur Marie-Christine Turnin [16]. Ces outils sont destinés à assister concrètement les utilisateurs lorsqu'ils sont à leur domicile, à l'école ou à leur lieu de travail.

Nutri-Expert et Nutri-Advice sont de tels systèmes d'éducation nutritionnelle. Nutri-Expert est le plus ancien, développé initialement sous la forme

d'un système à base de règles, qui tentait déjà d'équilibrer les repas saisis. Nutri-Advice est un développement très récent, et il vient d'être mis en service dans le restaurant d'une grande entreprise toulousaine.

Nutri-Expert et Nutri-Advice font partie de la famille des systèmes à base de connaissances appliqués au domaine médical, avec une particularité importante à noter : ils fournissent tous deux un service médical utile, et qui complète l'action du médecin nutritionniste prescripteur sans interférer avec lui. En effet celui-ci, durant ses consultations avec un patient, va lui donner des objectifs à atteindre, des conseils généraux et éventuellement des menus-types, mais il n'aura ni le temps ni la possibilité de l'aider au jour le jour à composer ses repas à partir des aliments achetés, ou à choisir ses plats s'il mange dans un restaurant collectif. Or c'est essentiellement au travers de ces activités concrètes que les habitudes alimentaires peuvent se modifier, d'où l'importance d'outils d'assistance à cette étape.

Rares sont en effet les systèmes experts médicaux qui ont réussi à s'insérer harmonieusement dans le processus médical. Depuis l'engouement pour ces programmes, dû en partie à leur capacité à prendre en compte l'incertitude, et qui a commencé avec MYCIN [14], la grande majorité des systèmes se sont attachés à des tâches de diagnostic. Ainsi, parmi les plus notables d'entre-eux, citons CADIAG-2 [9] qui effectue un diagnostic différentiel en médecine interne générale, et RENOIR [1] spécialisé dans le diagnostic de l'arthrite et des maladies liées au collagène. De tels systèmes ont été cependant délaissés partout où des médecins spécialisés étaient disponibles pour effectuer le diagnostic; quant aux programmes destinés à fonctionner sur des navires ou des endroits isolés, ou destinés à la médecine d'urgence, ils se sont plutôt confrontés à la tâche - experte en elle-même - de recueil des symptômes.

Nutri-Expert et Nutri-Advice s'appuient sur la théorie des possibilités pour le traitement de l'incertitude et de l'imprécision dans les calculs. L'usage détaillé de cette théorie dans ces systèmes a déjà été présenté dans [3, 2]. Le présent article, tout en résumant ces aspects, met aussi l'accent sur les problèmes posés par l'interaction avec l'utilisateur, en particulier ceux spécifiques à la prise en compte de l'imprécision.

La première section décrira les fonctionnalités communes et distinctes des deux logiciels. La seconde montrera comment les aspects flous des données sont modélisés, et quels éléments de l'interface ont dû être conçus pour les visualiser. Ces rapports entre flou et interface sont discutés en détail. La quatrième section décrit la procédure de réparation des repas fondée sur un

algorithme de recherche heuristique, et les modalités de présentation des résultats; la cinquième décrit brièvement les résultats d'une importante évaluation médicale. Les aspects techniques concernant l'arithmétique floue et la recherche heuristiquement ordonnée font l'objet de deux annexes.

2 LES SYSTÈMES NUTRI-EXPERT ET NUTRI-ADVICE

2.1 Les fonctionnalités communes

Ces deux logiciels ont un noyau commun important :

- tous deux évaluent le contenu nutritionnel d'un repas en utilisant les mêmes représentations fondées sur l'arithmétique floue ;
- ils exploitent une base de données commune sur les aliments. Dans leur version française, ils utilisent actuellement une table alimentaire française de plus de 2500 aliments développée au CHU de Toulouse, et qui contient la plupart des aliments que l'on peut trouver sur les marchés, dans les grandes surfaces, les restaurants, les cantines et les restaurants d'entreprises. Ils peuvent également fonctionner avec la table alimentaire américaine développée par le ministère de l'agriculture américain [13], qui contient plus de 5900 aliments, avec des données sur une vingtaine de nutriments en moyenne. On rappelle qu'un nutriment est un composé biochimique particulier assimilable par l'organisme, par exemple les glucides. Les nutriments sont organisés hiérarchiquement, les lipides se subdivisant par exemple en lipides saturés et insaturés. Au sommet de la hiérarchie se situe le (quasi-)nutriment 'énergie', qui représente le total énergétique du repas, exprimé en joules ou en calories. On peut noter dès maintenant que pour beaucoup d'aliments, les valeurs de certains nutriments ne sont pas du tout connues, ou sont connues avec incertitude (par exemple les valeurs non vérifiées fournies par les groupes alimentaires industriels).
- tous deux mettent en correspondance les quantités cumulées de nutriments avec les normes médicales en vigueur, et calculent des indices de compatibilité en termes de possibilité et de nécessité.

Ils sont par contre très différents dans leurs interactions avec les utilisateurs.

2.2 Utilisation spécifique de Nutri-Expert

Nutri-Expert est composé de quatre modules, qui fonctionnent en relation étroite les uns avec les autres.

- le module 'dossier médical' permet à l'utilisateur de saisir ses principales caractéristiques biométriques, une description de ses éventuels problèmes médicaux et le niveau de son activité physique. Le poids lui est demandé au plus une fois par semaine, et il doit préciser à chaque session le nombre et la nature des repas qu'il a ou qu'il va effectuer dans la journée, de façon à pouvoir fractionner les besoins énergétiques d'une journée pour chaque repas.
- le module d'analyse des repas, qui permet de décrire en détail tous les éléments d'un repas réel ou hypothétique, puis d'en faire un bilan complet par rapport à tous les nutriments que l'on souhaite étudier.

En pointant sur des photos de plats ou en utilisant un langage spécifique (voir plus loin), l'utilisateur va par exemple indiquer qu'il veut manger pour son déjeuner environ 150g de steak grillé, une portion moyenne de salade et une grande portion de frites.

Il peut alors transformer les quantités et la nature des aliments de son repas pour le rendre équilibré, mais cette tâche est difficile car la modification d'une quantité d'un aliment par exemple va se traduire par une modification simultanée de la plupart des indicateurs. Augmenter la quantité de frites par exemple va agir à la fois sur le total des graisses, mais aussi sur celui des glucides. Une connaissance approximative de la composition des aliments et du poids calorique de chaque nutriment aiderait à réaliser cette opération d'équilibrage, mais c'est justement cette connaissance qui manque à l'utilisateur et que Nutri-Expert doit l'aider à acquérir.

Une fonction de correction automatique est donc disponible, qui utilise un algorithme de recherche heuristique, et qui fournit une correction du repas minimale en nombre d'actions effectuées. L'utilisateur est libre de suivre ou non ces conseils. Sur le repas saisi précédemment, la fonction de réparation automatique pourrait conseiller de rajouter un yaourt et de diminuer la quantité de frites, par exemple.

- le module des menus-types qui fournit des menus pour une journée dont le contenu et les quantités sont adaptés aux besoins de l'uti-

lisateur. Un menu produit par ce module peut être facilement basculé dans le module d'analyse, pour y être testé et/ou transformé.

- le module d'encyclopédie générale sur la nutrition et le module de recettes, qui fournissent des informations ou des recettes de cuisine sous forme d'hypertexte.

L'utilisation du logiciel est très interactive, facilitant ainsi l'acquisition de compétences en nutrition. L'utilisateur peut facilement analyser des repas hypothétiques, les faire corriger par le logiciel, ne réaliser qu'une partie des conseils donnés etc. Cette expérimentation active procure progressivement à l'utilisateur un savoir-faire pratique sur l'alimentation au quotidien, comme cela a été montré dans les études médicales.

2.3 Utilisation spécifique de Nutri-Advice

Le logiciel Nutri-Advice s'utilise quant à lui dans les restaurants d'entreprises. Chaque utilisateur possède une carte qui lui a été fournie par la médecine du travail, sur laquelle est inscrit un code-barre qui décrit ses besoins nutritionnels et ses éventuels problèmes médicaux. Une borne est présente à l'entrée du restaurant, qui contient une base de données décrivant la composition de tous les plats servis ce jour. L'utilisateur passe sa carte devant un lecteur placé sur la borne, et trois suggestions de repas sont fournies, imprimées sur un ticket. Une version légèrement différente existe également pour les cantines scolaires en self-service, pour laquelle la borne dispose en plus d'un écran tactile sur lequel sont affichées les photos des plats servis. L'enfant passe sa carte dans le lecteur, puis appuie sur la photo d'un plat qu'il souhaite prendre : les photos d'autres plats à prendre avec celui-ci sont mises en relief, fournissant un conseil de repas. Le calcul du conseil est identique à celui des restaurants d'entreprises, mais il est fait avec la contrainte initiale du plat choisi en premier. Ces deux versions de Nutri-Advice exploitent la même partie applicative que Nutri-Expert, pour les calculs en arithmétique floue et la recherche heuristique d'une solution.

3 FLOU ET INTERFACE

3.1 Intervalle flou

Un intervalle flou généralise le concept d'intervalle fermé, incluant les nombres réels. Il est capable de modéliser la zone d'appartenance d'une variable x avec plus de sophistication qu'un intervalle ordinaire. Plus précisément, il permettra de représenter à la fois le sous-ensemble appelé 'noyau' des valeurs les plus plausibles, ainsi que le sous-ensemble appelé 'support' des valeurs possibles à un degré non nul, qui est donc l'intervalle d'appartenance le plus large.

Un intervalle flou est un moyen commode de représenter des quantités imprécises. Dans beaucoup de situations où nous devons évaluer un certain paramètre, non connu avec précision, un intervalle fermé ordinaire n'est pas satisfaisant. Si nous prenons un intervalle plutôt large dans le but d'être certain que la vraie valeur du paramètre y est incluse, les calculs ultérieurs risquent de conduire à des résultats trop vagues pour être exploitables. À l'inverse, si l'intervalle est choisi trop étroit, on prend le risque que la vraie valeur n'y soit pas, et la précision des calculs obtenue sera illusoire. L'intervalle flou nous permet d'être à la fois optimiste et pessimiste, en choisissant un support suffisamment large pour garantir qu'aucune valeur ne sera indûment exclue, tout en indiquant dans le noyau ce que nous pensons être les valeurs les plus plausibles.

3.2 Origine et détermination de l'imprécision des données manipulées

Il y a deux sources d'imprécision dans Nutri-Expert et Nutri-Advice. La première se situe dans les données issues des tables alimentaires. Certaines valeurs sont clairement des moyennes, comme par exemple les quantités de nutriments pour les fruits et les légumes. La quantité de glucides dans 100g de pomme n'est pas constante; c'est bien sûr une moyenne pour différentes variétés à différents stades de maturité. D'autres valeurs sont absolument inconnues; nos bases de données référencent un grand nombre de nutriments dont certains sont peu étudiés, et pour lesquels peu de données sont disponibles. Par ailleurs, les fabricants de produits alimentaires ne fournissent pas toujours toutes les données voulues. Parfois aussi, des fabricants fournissent des valeurs inexactes, et on peut mettre en doute leur bonne foi.

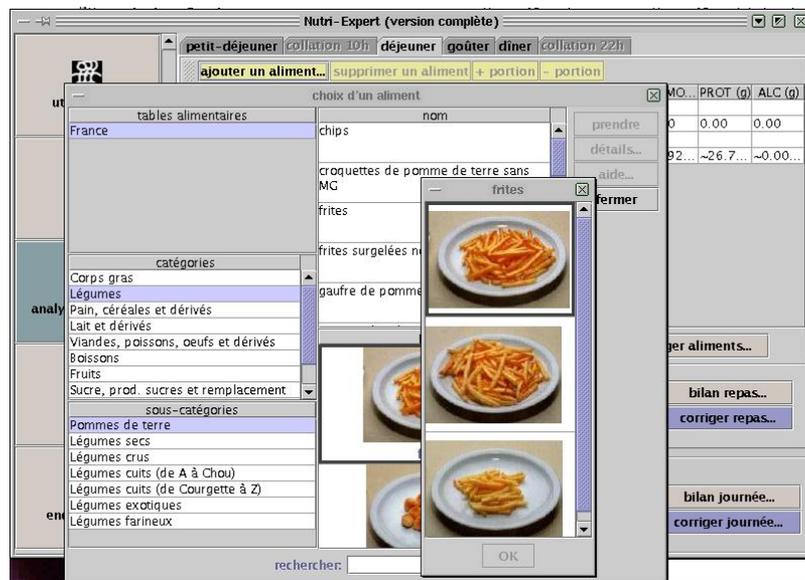


Figure 1: Différentes portions d'un même aliment

Il s'agit alors ici d'incertitude et non d'imprécision, mais elle n'a pas été prise en compte dans nos programmes.

La seconde source d'imprécision concerne les quantités des aliments saisies par les utilisateurs lorsqu'ils décrivent la composition d'un repas. Le logiciel leur donne deux possibilités :

- taper une valeur numérique en grammes, soit sous forme d'un nombre exact, soit en utilisant un langage permettant de modéliser un intervalle aux frontières imprécises. Par exemple, ~ 100 signifie 'environ 100g'; ' < 30 ' signifie 'moins de 30g' etc. On verra plus loin la syntaxe et la sémantique exactes de ces expressions.
- choisir une photo d'une assiette contenant l'aliment en différentes quantités. La quantité est supposée entachée d'imprécision (voir fig. 1). C'est en pratique le mode d'utilisation le plus fréquent.

3.3 Modélisation de l'imprécision des données fournies par l'utilisateur

3.3.1 Nombres flous

Les nombres et les intervalles de valeurs manipulés sont représentés dans Nutri-Expert et Nutri-Advice par des distributions de possibilités de formes trapézoïdales (voir appendice A), qui permettent de modéliser aussi bien des valeurs précises que des valeurs imprécises ou floues. La modélisation de l'imprécision des données manipulées consiste donc en l'élicitation de telles distributions de possibilités trapézoïdales à partir des indications fournies par l'utilisateur au travers de l'interface graphique.

Un problème central consiste donc à établir une correspondance entre des quantités numériques sur un domaine continu et un vocabulaire (textuel, iconique, etc.) de taille finie. Notre solution, fondée sur l'emploi des ensembles flous, permettra d'éviter des discontinuités dans les conclusions lorsque les données d'entrée varient continuellement, procurant au système une grande robustesse.

3.3.2 Language d'écriture des nombres flous

Les nombres flous trapézoïdaux sont représentés en interne sous forme de quadruplets. La signification des quatre valeurs est décrite précisément dans l'annexe A; disons simplement ici que les deux premières valeurs représentent le noyau de la valeur, et que les deux suivantes représentent l'étalement du support à gauche et à droite du noyau.

Comme pour toute représentation interne qu'un utilisateur est amené à manipuler, se pose le problème de lui adjoindre un *lecteur* et un *imprimeur*, et donc de définir une syntaxe d'écriture. Il faut dans notre cas qu'elle soit simple, car les patients et les nutritionnistes sont amenés à les utiliser, mais aussi pas trop simplificatrice pour ne pas caricaturer les résultats, ni surtout les données d'entrée.

Il a été décidé avec l'équipe médicale qu'elle serait la suivante :

- l'écriture habituelle des nombres entiers et à virgule désigne les nombres connus exactement. Par exemple, '150' représente le quadruplet (150, 150, 0, 0).
- l'écriture '~<val>' représente un nombre imprécis, connu à plus ou moins 10 pour-cent près. Par exemple, '~100' représente (90, 110,

10, 10).

- l'écriture ' $\sim\sim\langle\text{val}\rangle$ ' représente un nombre imprécis, connu à plus ou moins 20 pour-cent près. Par exemple, ' $\sim\sim 100$ ' représente (80, 120, 20, 20).
- l'écriture ' $\sim\langle\text{inf}\rangle\text{-}\langle\text{sup}\rangle$ ' représente un intervalle flou, dont les bornes sont graduelles à plus ou moins 10 pour-cent de la valeur médiane. Par exemple, ' $\sim 8\text{-}12$ ' représente (8, 12, 1, 1).
- l'écriture ' $\langle\text{val}\rangle$ ' représente un nombre imprécis dont on ne connaît qu'une borne supérieure. Par exemple, ' $\langle 25$ ' représente (0, 25, 0, 0).
- l'écriture ' $\rangle\text{val}$ ' représente un nombre imprécis dont on ne connaît qu'une borne inférieure. Par exemple, ' $\rangle 25$ ' représente (25, infini, 0, infini).
- l'écriture '??' représente un nombre flou positif totalement inconnu, c'est-à-dire (0, infini, 0, infini).

Cette écriture est employée par les patients eux-même lorsqu'ils changent la quantité d'un aliment directement dans le tableau des aliments saisis.

De la même façon, les valeurs des nutriments stockées dans la base de données des aliments peuvent être entachées d'imprécision, voire même être totalement inconnues. Lorsque la nutritionniste en charge de la saisie des données tape une nouvelle valeur, elle utilise cette syntaxe étendue d'écriture des nombres flous. En pratique, elle tapera par exemple ' $\langle 5$ ' pour un taux de lipides saturés dont elle n'a trouvé nulle part la valeur, mais pour laquelle elle est certaine que 5 est une borne supérieure, par analogie avec des aliments de même famille. Lors d'un calcul de cumul, une telle indication permettra par exemple de conclure que le total des lipides saturés sur le repas est inférieur à 6 g, et donc que la norme en lipides saturés est vérifiée. On a là un exemple où les données sont imprécisément connues, mais où on peut tout de même fournir des conclusions de manière tout à fait certaine.

Bien sûr, il faut noter que certains nombres flous, même de forme trapézoïdale, seront mal représentés à l'aide de cette syntaxe. En pratique, on peut montrer que les opérations qui sont réalisées dans Nutri-Expert (essentiellement additions et multiplications) laissent les nombres dans des formes trapézoïdales qu'il est facile de décrire de manière la plus exacte possible sous une des formes décrites plus haut. De toutes façons, les déformations ne

peuvent intervenir qu'en entrée des données initiales et en sortie des résultats finaux, toutes les autres formes intermédiaires utilisant le codage interne exact sous forme de quadruplet.

3.3.3 Adjectifs qualificatifs, photos et nombres flous

Il s'agit dans cette section de préciser en matière de poids des aliments, les rapports qu'entretiennent les valeurs objectives mesurables d'une part, et leur catégorisation perceptive sous forme visuelle et/ou verbale d'autre part.



Figure 2: Quels rapports unissent ces trois éléments?

Pour prendre un exemple concret, quels sont les rapports entre le nombre flou représenté par '~150', le choix d'une photo représentant 150g de frites, et l'expression 'beaucoup de frites'?

Percevoir un objet, c'est voir à travers lui tous ceux du même type qu'on a perçus dans le passé [4], et en particulier les plus typiques d'entre eux en termes de taille ou quantité : les 'grands', les 'moyens' et les 'petits'. La langue française (entre autres) a aidé à cette cristallisation autour de trois valeurs prototypiques; les autres qualifications usuelles étant des sous-partitions de ces trois principales ('très petit', etc.). L'existence naturelle et culturelle de ces catégories perceptives va influencer en retour notre façon d'interpréter les indices sensoriels, renforçant de manière circulaire ce partitionnement. En d'autres termes, il y a interaction entre l'observateur et la chose perçue, avec des circularités déformantes qui reflètent des catégories linguistiques.

Si cette analyse psychologique de la perception des quantités est exacte, un nombre de photos précisément égal à trois, et correspondant aux trois adjectifs précités pour la langue française, est nécessaire pour rendre compte des besoins de l'utilisateur. On peut citer en sa faveur l'existence de catalogues de photos de portions d'aliments tels que [5] dans lesquels il y a exactement trois photos par aliment.

Dans [7], les auteurs proposent une discussion de la façon de représenter des mots, et en particulier des adjectifs de quantité, à l'aide de sous-ensembles flous. Ils ont également constaté que le sens d'un adjectif tel que 'grand' en terme de nombre flou dépend des autres mots mis à disposition de l'utilisateur pour s'exprimer, c'est-à-dire qu'il aura un sens assez large si l'utilisateur n'a que 'grand' et 'petit' dans son répertoire, et un sens plus restreint s'il a 'grand', 'moyen' et 'petit'; on retrouve ici l'idée que la perception est déformée par des a priori cognitifs et/ou culturels.

[8] présente des arguments en faveur d'une représentation des jugements humains (la perception d'une quantité par exemple) qui préserve leurs aspects flous, plutôt qu'une représentation en termes de 'mesure avec erreur', héritée des sciences physiques. Il propose un algorithme interactif de construction des représentations sémantiques de labels linguistiques ('un peu', 'moyen', etc.) à partir d'exemples.

[10, 11] étudient également ce problème à l'aide du concept original de capteur flou symbolique, qui sert d'intermédiaire entre le monde réel et l'agent cognitif, et qui effectue à la place de ce dernier la tâche d'interpréter éventuellement de façon déformante les signes du monde réel, pour finalement fournir une interprétation symbolique à l'agent. Une mesure est alors définie comme une correspondance injective de l'ensemble des sous-ensembles de labels linguistiques vers l'ensemble des sous-ensembles du domaine numérique associé.

Il nous faut donc tenir compte des déformations dans la perception lorsque nous assignons à une photo d'aliment un nombre flou représentant sa quantité. Nous venons de montrer que, plus le nombre de catégories proposées était petit, plus les nombres flous qui les représentent devaient être élargis. Si on proposait à l'utilisateur un grand nombre de photos d'un plat, ordonnées par quantité, on pourrait déterminer pour chacune un nombre flou qu'on pourrait appeler 'perception objective'. Avec un nombre de photos restreint (ici trois), les catégories floues associées doivent être beaucoup plus larges que les 'perceptions objectives', et doivent se recouvrir mutuellement à un degré important.

Cela conduit à des distributions de possibilités telles que celle de la figure 3, qui ont été dessinées de manière empirique (à l'aide de notre propre perception déformante!), et où on a indiqué en pointillés et à titre illustratif ce que pourraient être les 'perceptions objectives'.

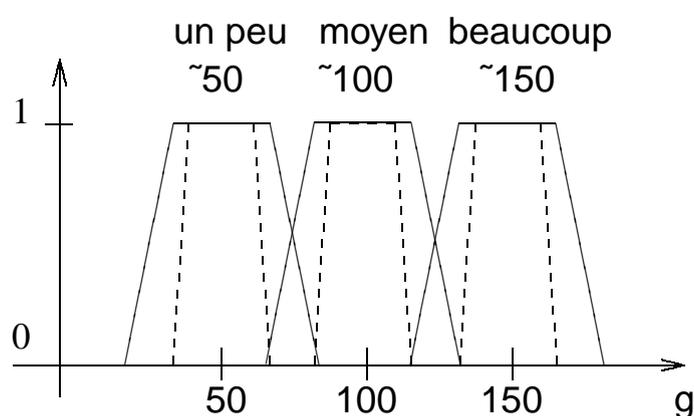


Figure 3: Distributions de possibilités associées aux trois portions prototypiques d'un aliment. En pointillés figurent des représentations non déformées.

3.4 Evaluation d'un repas et présentation visuelle.

En utilisant les opérations d'arithmétique floue décrites appendice A, le programme est capable de calculer pour chaque nutriment sa quantité totale dans le repas, sous forme d'un nombre flou. Se pose maintenant le problème du classement de ces quantités par rapport aux normes médicales. Celles-ci sont bien sûr elles-mêmes des intervalles aux frontières imprécisément délimitées, qu'on peut également représenter à l'aide de quadruplets. Par exemple la norme : "le total des lipides du repas doit être compris entre 25% et 35% de la ration calorique prescrite" peut être traduite sous forme du quadruplet (5, 25, 35, 5) si on suppose que les valeurs limites admettent une imprécision maximum de 5%.

Le filtrage (pattern-matching) flou, décrit en appendice A, fournit pour chaque nutriment i deux indices de compatibilité Π_i et N_i du total de nutriment D_i avec la norme P_i qui lui correspond. Π_i et N_i prennent tous deux leurs valeurs entre 0 et 1 et sont respectivement des mesures de possibilité et de nécessité (certitude) de cette compatibilité.

Dans Nutri-Expert, des indicateurs en forme de galvanomètres tels que ceux de la figure 4 traduisent en permanence les valeurs de ces indices.

On voit figure 5 comment est élaboré l'affichage de tels galvanomètres.

Le noyau de la norme P_i est la zone centrale verte de la couronne; le

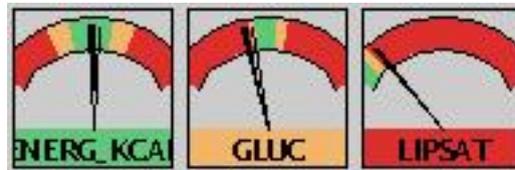


Figure 4: Galvanomètres d'affichage de la compatibilité avec les normes. De gauche à droite, la compatibilité est totale (verte), partielle (orange) et nulle (rouge).

support est la zone plus large de couleur orange. Le reste du domaine est en rouge.

L'aiguille, qui représente la donnée D_i , a elle-même une épaisseur de la taille de son support; la compatibilité est complète si toute l'épaisseur de l'aiguille est dans la partie verte de la couronne, et elle est nulle si toute l'aiguille est incluse dans la partie rouge de la couronne.

Le pied dans lequel le nom du nutriment est affiché (ici LIPSAT, pour "lipides saturés") est de couleur verte si la certitude (nécessité) de compatibilité N_i est égale à 1, rouge si la possibilité Π_i de cette compatibilité est nulle, et orange si la situation est intermédiaire (comme c'est le cas ici).

En pratique, les aiguilles associées aux nutriments se déplacent progressivement au fur et à mesure que l'utilisateur ajoute des aliments ou ajuste les quantités, et celui-ci voit les couleurs de compatibilité évoluer progressivement.

3.5 Evaluation de l'ensemble d'un repas

Nutri-Expert et Nutri-Advice travaillent sur le même ensemble de 12 nutriments pour évaluer l'équilibre d'un repas. Il s'agit de l'énergie, des glucides, des glucides purs, des glucides complexes, des glucides simples, des protéines, des lipides, des lipides saturés, des lipides mono-insaturés, des lipides poly-insaturés, de l'alcool, du calcium. Les normes associées à ces nutriments sont celles fournies par les recommandations médicales internationales, notamment celles de l'OMS.

L'évaluation d'un repas est l'agrégation des indices de compatibilité Π_i et N_i pour chacun de ces nutriments. L'appendice A décrit le détail du calcul qui permet de les agréger, conduisant à deux indices Π et N de compatibilité

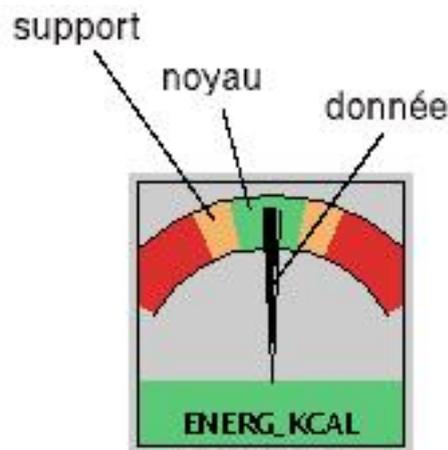


Figure 5: Donnée, noyau et support dans un galvanomètre. On notera l'épaisseur de l'aiguille, due à une valeur énergétique imprécise. Cela n'empêche pas la compatibilité d'être totale.

globale de l'ensemble du repas par rapport à toutes les normes.

Il est tenu compte dans ce calcul du fait que les normes sur les nutriments n'ont pas la même importance relative. D'après l'équipe médicale, les normes sur les graisses saturées et sur les glucides sont de loin les plus importantes; d'autres encore peuvent prendre plus d'importance selon l'âge du sujet (calcium pour les enfants) ou ses problèmes médicaux.

Le repas est considéré comme globalement équilibré lorsque le 'pattern matching' pondéré global conduit aux indices $\Pi = 1$ et $N \geq 0.7$. Dans le cas de Nutri-Expert, si le repas est déséquilibré, le programme cherche le nutriment responsable du déséquilibre, et affiche un commentaire selon un algorithme décrit plus bas.

3.6 Qualification linguistique d'un déséquilibre

Cette section ne concerne que Nutri-Expert, qui seul affiche à l'utilisateur une information détaillée sur l'équilibre des repas. Nutri-Advice quant à lui élimine simplement de sa recherche les repas déséquilibrés.

Si les indices de compatibilité d'un nutriment par rapport à la norme 'nor-

mal' sont mauvais (c'est-à-dire $\Pi = 1$ et $N \geq 0.7$), un calcul de compatibilité est fait avec les quatre autres normes (très-hypo, hypo, hyper, très-hyper). Il faut alors classer ces quatre paires d'indices.

On utilise généralement l'ordre de Pareto [6] pour ordonner de telles paires, de la façon suivante (les symboles N sont des degrés de nécessité, et les symboles Π des degrés de possibilité) :

(Π_1, N_1) est plus grand que (Π_2, N_2) si et seulement si $\Pi_1 > \Pi_2$ et $N_1 \geq N_2$, ou $\Pi_1 \geq \Pi_2$ et $N_1 > N_2$.

Cependant, l'ordre de Pareto est un ordre partiel, et il y a des situations où

$\Pi(P; D_1) > \Pi(P; D_2)$ et

$N(P; D_1) < N(P; D_2)$

Dans Nutri-Expert, les normes ont été choisies avec un fort recouvrement de façon à minimiser ces situations d'ambiguïté.

Finalement, l'algorithme de production de phrases est le suivant :

1. si pour les quatre normes très-hypo, hypo, hyper, très-hyper on a $\Pi = 1$ et $N < 0.2$, la situation est jugée ambiguë et on ne produit aucun commentaire. Ce cas ne se produit que rarement, dans des situations où trop d'aliments dont la composition est mal connue sont utilisés.
2. sinon, on ordonne les quatre paires d'indices conformément à l'ordre de Pareto, de façon à repérer la norme qui décrit le mieux la situation. Pour cette norme, si le degré de nécessité est supérieur à 0.8, on produit une phrase ayant un caractère de certitude telle que "votre repas est trop riche en graisses saturées". Si le degré de nécessité est entre 0.5 et 0.8, ou entre 0.2 et 0.5, on modère la certitude par des phrases telles que "votre repas est certainement trop riche en graisses saturées" et "votre repas semble trop riche en graisses saturées" respectivement.

4 LA RÉPARATION DES REPAS DANS NUTRI-EXPERT

Cette section ne concerne que Nutri-Expert. Lui seul possède cette fonctionnalité de pouvoir corriger des repas pour les rendre équilibrés et adaptés aux besoins énergétiques et aux éventuels problèmes médicaux de l'utilisateur. C'est une tâche difficile, car on constate vite à l'essai que toute modification d'un repas entraîne la modification simultanée de la plupart des indicateurs.

Le problème peut sembler au premier abord essentiellement numérique et linéaire. En réalité, deux éléments essentiels nous obligent à modifier ce jugement :

- pour beaucoup d'aliments, la quantité ne se modifie pas continûment, mais par portions (yaourts, fruits, etc.) ;
- de telles équations linéaires n'ont pas de solution simples dans le cadre de l'arithmétique floue.

Après en avoir discuté avec l'équipe médicale, la notion d'actions possibles sur le repas est apparue comme centrale. Face à un repas donné, un nutritionniste repère immédiatement quels aliments devraient ou pourraient être supprimés (par rapport aux problèmes médicaux de l'utilisateur), ainsi que les catégories d'aliments manquantes (un laitage au petit-déjeuner, un féculent lors d'un repas principal, etc.). Il s'agit ici d'actions de retrait ou d'ajout sur le repas. Ensuite, pour les aliments du repas qui ne sont pas à supprimer, des actions de modification des quantités sont possibles. Ces modifications ne sont jamais continues : il s'agira toujours de fixer la quantité à un nombre de portions naturelles de l'aliment.

Ainsi, à partir de l'état initial que constitue un repas réel ou hypothétique, on peut recenser l'ensemble fini et limité des actions possibles sur lui, donnant lieu à un ensemble de repas transformés. Sur chacun de ces repas, on peut reproduire le même processus, construisant de proche en proche un espace d'états associé au problème. Cet espace n'est fourni qu'implicitement, par la donnée du repas initial et des règles permettant de former les actions possibles sur lui.

Par ailleurs, si on assigne un coût aux actions de transformation, nous disposons de tous les éléments pour mettre en place une recherche heuristique de solution. Les bases théoriques et algorithmes de ce type de recherche sont résumés dans l'appendice B.

D'un point de vue pratique, le coût lié aux actions est directement lié à la gêne que cette action de modification entraîne pour l'utilisateur. Le plus simple pour lui est de modifier une quantité; on assignera à cette action un coût de 1. Supprimer un aliment qu'il avait prévu est simple, mais contrariant; on lui assigne un coût de 2. Remplacer un aliment par un autre, ou ajouter un nouvel aliment a un coût élevé de 4, puisque cela peut éventuellement conduire à refaire des achats, ou plus radicalement à ne pas pouvoir suivre le conseil.

4.1 Les algorithmes de correction de Nutri-Expert

Une étude détaillée a été menée pour trouver le meilleur algorithme possible pour corriger les repas dans Nutri-Expert; ses principales étapes sont résumées dans cette section. Une base de tests de 3479 repas effectivement saisis par des utilisateurs a servi à mesurer les performances de tous les algorithmes candidats. Il a été décidé qu'un algorithme corrigeait un repas s'il trouvait une solution avant d'avoir développé 20000 états.

Il faut noter que, pour qualifier un repas hypothétique généré par l'algorithme, les calculs flous décrits dans les sections précédentes doivent être utilisés. L'exception la plus notable est la fonction de coût, qui a pour valeur un entier ordinaire. Si cette valeur était rendue floue, le tri des états par ordre de coût compliquerait de manière excessive la mécanique de recherche heuristique.

4.1.1 Premiers algorithmes

Les premiers algorithmes ont été basés sur les actions de transformation de repas suivantes, pour chaque aliment :

- modification de la quantité à un minimum,
- modification de la quantité à une valeur moyenne,
- modification de la quantité à un maximum,
- suppression de l'aliment,
- remplacement de l'aliment par une quantité moyenne d'un aliment de substitution.

A titre de référence, la recherche en largeur d'abord a été implémentée, et a permis de corriger 2392 repas sur les 3479, soit un taux de réussite d'environ 68%.

Le premier algorithme A a ensuite été construit, avec un terme h calculé comme suit :

$$h = \sum_{n \in \text{“nutriments hors norme”}} \omega_n \quad (1)$$

où ω_n mesure l'importance du nutriment n , en pratique 2 pour les nutriments importants et 1 pour les autres.

Confronté à la base de tests, cet algorithme a corrigé 2569 repas, soit un taux de succès de 73%.

En examinant en détail le fonctionnement de l'algorithme, il nous est apparu que l'absence de solutions était souvent due à un écart trop grand entre les quantités minimale/moyenne/maximale.

4.1.2 Nouvel ensemble d'actions sur un repas

Il nous est alors apparu que, pour chaque aliment f , il existe une quantité a^f qui est la plus petite portion de f qui peut être considérée en pratique. Nous avons appelé cette quantité *l'incrément* de l'aliment; c'est par exemple une cuillerée à café pour de nombreux liquides, etc. Les quantités minimum/moyenne/maximum utilisées précédemment sont des multiples entiers de a^f , mais a^f est souvent strictement plus petit que la quantité minimum. En modifiant les quantités d'aliments par incréments a^f , nous allons augmenter légèrement le nombre d'actions sur chaque repas, donc la taille de l'espace de recherche, mais la situation d'échec précédente due à un écart trop grand entre les portions se produira beaucoup moins souvent.

Le nouvel ensemble d'actions sur un repas a été défini comme suit :

- ajouter une quantité a^f à la quantité de l'aliment f ,
- soustraire une quantité a^f à f ,
- remplacer f par la même quantité d'un aliment équivalent.

Ce nouvel ensemble d'actions pose des problèmes supplémentaires. Si on incrémente, puis décrémente la quantité d'un aliment, le coût de ces transformations sera non nul. Il faut toutefois noter que le terme g est le coût *minimal* d'obtention d'un repas à partir de la racine. Il faudra tout de même prendre garde à ne pas inclure le repas obtenu dans la liste "repas générés" pour que l'espace de recherche demeure arborescent.

Un nouveau calcul du terme g a également été introduit. Il est maintenant :

- 1 pour une incrémentation de la quantité de f de a^f
- 1 pour une décrémentation, ou *DeletionCost* si cette décrémentation cause une suppression de l'aliment
- *ReplaceCost* pour un remplacement de l'aliment par un meilleur équivalent

4.1.3 Utilisation de nouvelles heuristiques

Ayant maintenant amélioré le jeu des actions possibles sur un repas et la fonction de calcul de coût, les améliorations possibles vont porter sur le terme heuristique h .

La première des nouvelles heuristiques utilisées a été :

$$h = \frac{\sum_{n \in \text{“nutriments”}} w_n \cdot (1 - N_n)}{2} \quad (2)$$

Par rapport à la base de tests, 2757 repas sur 3479 ont été corrigés, soit un taux de réussite de 79%.

Après analyse, il est apparu que le terme $1 - N_n$ est presque toujours égal à 1, et ne décroît que lorsqu'un nutriment est très près de la compatibilité parfaite.

4.1.4 La notion de distance avant compatibilité

Une nouvelle notion importante que ces analyses ont fait apparaître est la notion de distance avant compatibilité pour un nutriment. Elle mesure le nombre minimum d'opérations d'incrément ou de décrémentation qui sont nécessaires pour normaliser un nutriment. On peut la calculer comme suit :

$$\Delta_n(m, goal) = \frac{\phi_n^{goal} - \phi_n^m}{\alpha_n^{max}} \quad (3)$$

où ϕ_n^{goal} est la quantité objectif pour le nutriment n , ϕ_n^m la quantité de nutriment n dans le repas m et α_n^{max} est l'incrément maximum du nutriment n en une opération :

$$\alpha_n^{max} = \max_{f \in \text{“foods”}} (a^f \varphi_n^f) \quad (4)$$

avec φ_n^f quantité du nutriment n dans 1g de l'aliment f et a^f la quantité incrément de l'aliment f .

Pour équilibrer un repas, tous les nutriments doivent être normalisés, et la plus proche solution a un coût nécessairement au moins égal à :

$$h^m = \max \left(0, \max_{n \in \text{“nutriments”}} (\Delta_n(m, goal)) \right) - \min \left(0, \min_{n \in \text{“nutriments”}} (\Delta_n(m, goal)) \right) \quad (5)$$

[3] décrit en détail comment ce terme peut être calculé exactement. Il est apparu que ce calcul, effectué en utilisant l'arithmétique floue, prenait un temps excessif. Un calcul approximatif beaucoup plus rapide a été conçu, sans dégradation des performances de l'algorithme. Il corrige maintenant 3059 repas sur 3479, soit un taux de réussite de 88% qui est notre meilleur résultat jusqu'à maintenant.

5 EVALUATIONS MÉDICALES

Une première étude médicale importante [15] a été menée auprès de patients diabétiques. Elle a montré qu'une mise à disposition non supervisée de Nutri-Expert durant 3 mois améliorait significativement les connaissances en nutrition et les habitudes alimentaires des utilisateurs. Elle a montré également un accroissement du dialogue entre les patients et leur médecin généraliste.

Une autre étude randomisée récente [16] auprès de patients obèses a été menée. Deux groupes ont été suivis durant une année; le groupe suivait un enseignement traditionnel sur la nutrition, tandis que l'autre utilisait de surcroît le système Nutri-Expert. 557 patients ont été recrutés dans cette étude auprès de 16 centres français de diabétologie et de nutrition. L'indice de masse corporelle (BMI), des tests de connaissance en nutrition et des mesures biologiques centralisées ont été réalisés à l'inclusion, à 6 mois puis à 12 mois. Le groupe utilisant Nutri-Expert a obtenu un score significativement supérieur au groupe témoin. Pour tous les patients, l'éducation nutritionnelle a conduit à une amélioration significative des connaissances, sans qu'il y ait une différence significative entre les deux groupes. 5 ans après la fin de l'étude, les poids de 148 de ces patients ont été mesurés; leurs BMI avaient significativement baissé, sans qu'on puisse mettre en évidence une différence significative entre les deux groupes.

6 CONCLUSIONS

Il a été montré comment l'utilisation de l'arithmétique floue dans Nutri-Expert et Nutri-Advice apportait une plus grande souplesse dans le traitement des données, au prix d'un surcoût acceptable en temps de calcul.

Cette utilisation a été rendue totalement transparente dans les phases de saisie, jugées déjà trop lourdes dans Nutri-Expert. Elle est bien sûr invis-

ible lors des calculs internes de cumul des quantités de nutriments et de calcul de compatibilité. Cette compatibilité est bien exprimée par les deux indices de possibilité et de nécessité, qui se traduisent très directement par l'emploi d'adjectifs lors de la formulation linguistique du bilan d'un repas. L'utilisation nouvelle de galvanomètres pour montrer de manière synthétique la compatibilité d'une quantité de nutriment avec une norme a été très bien acceptée des utilisateurs et des professionnels de la nutrition. La métaphore du galvanomètre, dans laquelle la donnée est représentée sous la forme d'une aiguille et la norme sous la forme de deux plages emboîtées, avec les couleurs des feux de signalisation, s'est montrée très adaptée.

De manière moins visible, l'algorithme de correction des repas a été grandement amélioré, et trouve des solutions dans la plupart des situations courantes. Il s'avère être d'une grande aide aux utilisateurs débutants.

Nutri-Expert et Nutri-Advice sont tous deux écrits en langage Java, avec un accès aux données des tables alimentaires sous forme d'un pont JDBC. Il fonctionne actuellement sur toute plate-forme Windows, Mac-OS X et Unix. Les calculs de l'arithmétique floue prennent un temps qui n'est pas sensible au niveau de l'utilisation interactive, et seule la réparation des repas peut provoquer des délais plus longs.

Enfin, une amélioration prévue de l'interface de Nutri-Expert va consister à présenter les conseils de réparation d'un repas de manière uniquement visuelle et iconique, les portions conseillées étant par exemple décrites avec des photos. Cela contribuera à cacher plus encore les aspects numériques et calculatoires.

A ARITHMÉTIQUE FLOUE

A.1 Nombres et intervalles flous

Un intervalle flou est un ensemble flou [17] de nombres réels, dénoté M , avec une fonction d'appartenance μ_M qui est unimodale et semi-continue en haut, c'est-à-dire : $\forall \alpha \in]0, 1], M_\alpha = \{r | \mu_M(r) \geq \alpha\}$ (l'_α - coupe de M) est un intervalle fermé (cf fig. 6)

Le support $S(M) = \{r | \mu_M(r) \geq 0\}$ est l'intervalle d'appartenance de x le plus large (x ne peut pas prendre une valeur en dehors de $S(M)$), tandis que le noyau $\overset{\circ}{M} = \{r | \mu_M(r) = 1\}$ est l'ensemble des valeurs les plus plausibles de x , appelées valeurs modales.

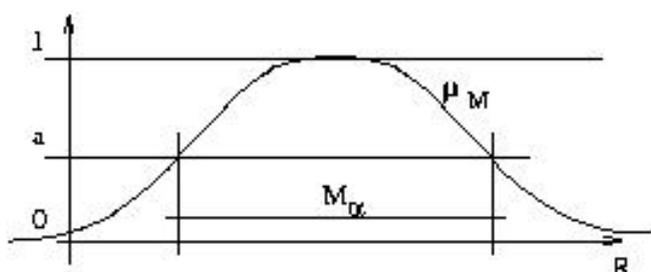


Figure 6: Intervalle flou

Pour une valeur x qui est dans le support M , mais en dehors de son noyau, le degré d'appartenance est $\mu(x) \in]0, 1[$.

Le plus important est de bien déterminer l'ensemble des valeurs qui sont totalement impossibles pour x (celles pour lesquelles $\mu(x)$ est égal à 0) et l'ensemble des valeurs qui sont tout à fait possibles (pour lesquelles $\mu(x)$ est égal à 1); les sous-ensembles restants du domaines sont calculés par des transitions graduelles. Ce qui est important, c'est de respecter l'ordre des degrés de possibilité entre 0 et 1, plutôt que les valeurs absolues.

Du point de vue de la représentation et du calcul informatique, de tels intervalles seront modélisés par des quadruplets $(\underline{m}, \overline{m}, \alpha, \beta)$. Ils permettent de représenter d'une manière unifiée les valeurs précises, les intervalles ordinaires, les nombres et les intervalles flous.

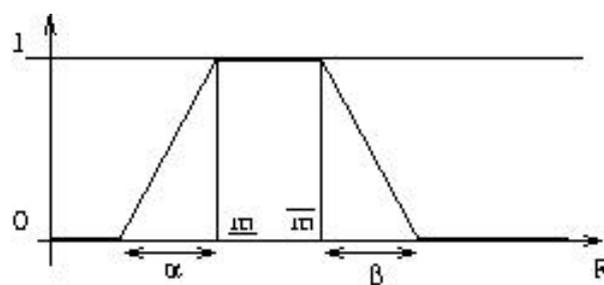


Figure 7: Intervalle flou modélisé par un quadruplet

A.2 Calculs sur les intervalles flous

Nous avons besoin d'effectuer sur des intervalles flous les opérations arithmétiques d'addition, soustraction et multiplication sur la demi-droite des réels positifs. Pour cela, on utilise le principe d'extension de Zadeh [17], qui permet de calculer la zone des valeurs de $M * N$, où M et N sont deux intervalles flous associés aux variables x et y respectivement, et où $*$ est une opération sur les nombres réels. On peut montrer que, pour des opérations $*$ telles que les quatre opérations arithmétiques sur la demi-droite des réels positifs, on a :

$$(M * N)_\alpha = M_\alpha * N_\alpha = \{u * v | u \in M_\alpha, v \in N_\alpha\} \quad (6)$$

Si M et N sont respectivement $(\underline{m}_1, \overline{m}_1, \alpha_1, \beta_1)$ et $(\underline{m}_2, \overline{m}_2, \alpha_2, \beta_2)$, on montre facilement que :

$$M + N = (\underline{m}_1 + \underline{m}_2, \overline{m}_1 + \overline{m}_2, \alpha_1 + \alpha_2, \beta_1 + \beta_2) \quad (7)$$

$$M - N = (\underline{m}_1 - \overline{m}_2, \overline{m}_1 - \underline{m}_2, \alpha_1 + \beta_2, \beta_1 + \alpha_2) \quad (8)$$

Pour la multiplication, une approximation doit être faite, car le résultat n'est pas de forme trapézoïdale. On peut néanmoins calculer exactement le support et le noyau du résultat, et on transforme en droite les autres parties du domaine. Cette approximation laisse inchangé l'ordre entre les degrés de possibilité, ce qui est la propriété fondamentale à préserver. On vérifie que :

$$M \times N = (\underline{m}_1 * \underline{m}_2, \overline{m}_1 * \overline{m}_2, \alpha_3, \beta_3) \quad (9)$$

$$\text{où} \quad \begin{aligned} \alpha_3 &= \alpha_2 * (\underline{m}_1 - \alpha_1) + \alpha_1 * \underline{m}_2 \\ \beta_3 &= \beta_1 * \overline{m}_2 + (\overline{m}_1 + \beta_1) * \beta_2 \end{aligned}$$

A.3 Filtrage ('pattern matching') flou

A chaque nouvelle mise à jour des cumuls de nutriments, les nouvelles valeurs doivent être comparées aux normes médicales. Appelons P et D les intervalles flous représentant la norme (pattern) et la donnée respectivement, et appelons μ_P et μ_D leurs fonctions d'appartenance sur le même domaine U . Si P était un sous-ensemble ordinaire, le degré de correspondance d'un élément $d \in U$ serait 1 si d appartenait à P , 0 sinon. Lorsque P devient un

sous-ensemble flou, ce degré de correspondance devient le degré d'appartenance $\mu_P(d)$. Si maintenant D est imprécis ou flou, ce degré d'appartenance devient lui-même un nombre flou sur le domaine $]0, 1[$, appelé degré de compatibilité de D par rapport à P, noté $\mu_{P|D}$ avec une fonction d'appartenance $\mu_{P|D}$ définie par le principe d'extension :

$$\forall \alpha \in]0, 1[, \quad \mu_{P|D}(\alpha) = \sup \{ \mu_D(u) \mid \mu_P(u) = \alpha \} \quad (10)$$

Ce nombre flou contient toute l'information voulue sur la compatibilité de D par rapport à la norme P, mais il a l'inconvénient d'être difficilement compréhensible. Deux mesures scalaires sont préférées pour estimer cette compatibilité : un degré de possibilité $\Pi(P; D)$ que D corresponde à P, et un degré de nécessité $N(P; D)$ que D corresponde à P, définis par [18] :

$$\Pi(P; D) = \sup_{u \in U} \min(\mu_P(u), \mu_D(u)) \quad (11)$$

$$N(P; D) = \inf_{u \in U} \max(\mu_P(u), 1 - \mu_D(u)) \quad (12)$$

La mesure $\Pi(P; D)$ estime à quel degré il est possible que P et D se réfèrent à la même valeur u ; en d'autres termes $\Pi(P; D)$ est un *degré de recouvrement entre P et D*. La mesure $N(P; D)$ estime à quel degré il est *nécessaire (i.e. certain) que la valeur à laquelle D se réfère est compatible avec P*; en d'autres termes, $N(P; D)$ est un degré d'inclusion de D dans P.

La dualité possibilité/nécessité, exprimée par le fait que la nécessité d'un événement correspond à l'impossibilité de l'événement contraire, se traduit par la relation :

$$N(P; D) = 1 - \Pi(\bar{P}; D) \quad (13)$$

où $\mu_{\bar{P}} = 1 - \mu_P$ est la fonction d'appartenance à \bar{P} , complémentaire de P. A l'évidence on a toujours $\Pi(P; D) > N(P; D)$. De plus on a $N(F; F) = 1$ si et seulement si μ_F est la fonction d'appartenance à un sous-ensemble ordinaire de U; sinon on a seulement $N(F; F) \geq 1/2$.

Les cas limites où $\Pi(P; D)$ et $N(P; D)$ prennent les valeurs 0 et 1 sont également intéressants à caractériser. Si on appelle $S(F)$ et $\overset{\circ}{F}$ le support et le noyau de F respectivement, on peut montrer que :

1. $\Pi(P; D) = 0$ si et seulement si $S(P) \cap S(D) = \phi$

2. $\Pi(P; D) = 1$ si et seulement si $\overset{\circ}{P} \cap \overset{\circ}{D} \neq \emptyset$
3. $N(P; D) = 1$ si et seulement si $S(D) \subseteq \overset{\circ}{P}$

On peut noter que la troisième propriété définit une inclusion plus forte entre sous-ensembles flous qu'entre sous-ensemble ordinaires, puisque $\mu_D \leq \mu_P$ implique seulement $N(P; D) \geq 0.5$.

En résumé, $\Pi(P; D)$ et $N(P; D)$ ne sont pas des mesures de similitude ad hoc; elles ont une sémantique claire qui correspond bien à la nature du 'pattern matching' flou.

A.4 Calcul des indices de 'pattern matching' flou

Le calcul de $\Pi(P; D)$ et $N(P; D)$ lorsque P et D sont de forme trapézoïdale est un simple calcul basé sur des intersections de droites. Si les représentations de P et D sont $(\underline{M}_P, \overline{M}_P, \alpha_P, \beta_P)$ and $(\underline{M}_D, \overline{M}_D, \alpha_D, \beta_D)$ respectivement, on montre que :

$$\Pi(P; D) = \min(1, \max(0, 1 - \frac{\underline{m}_D - \overline{m}_P}{\alpha_D + \beta_P}), \max(0, 1 - \frac{\underline{m}_P - \overline{m}_D}{\alpha_P + \beta_D})) \quad (14)$$

$$N(P; D) = \min(1, \max(0, \frac{\overline{m}_P - \overline{m}_D + \beta_P}{\beta_P + \beta_D}), \max(0, \frac{\underline{m}_D - \underline{m}_P + \alpha_P}{\alpha_P + \alpha_D})) \quad (15)$$

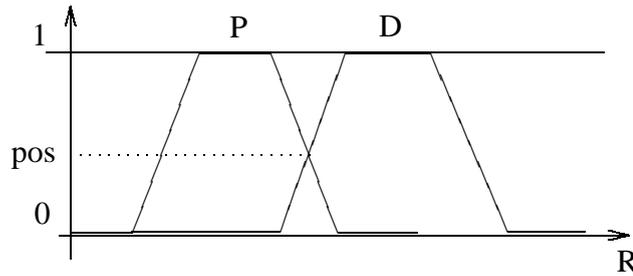


Figure 8: Calcul de la mesure de possibilité

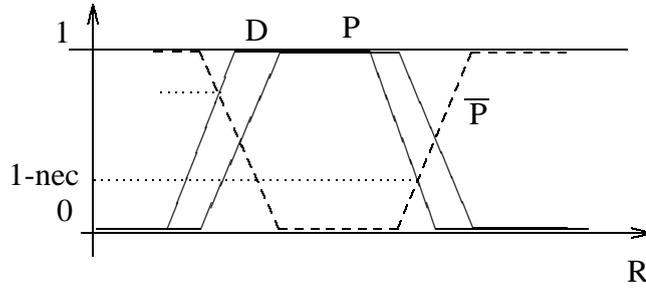


Figure 9: Calcul de la mesure de nécessité

A.5 Agrégation des indices de compatibilité

L'évaluation d'un repas est l'agrégation des évaluations partielles pour chacun des nutriments considérés. Notons D_1, D_2, \dots, D_N les données connues sur ces N nutriments, et P_1, P_2, \dots, P_N les normes correspondantes. Puisque les variables considérées sont non-interactives, on montre que (voir par exemple [6]) :

$$\Pi(P_1 \times \dots \times P_N; D_1 \times \dots \times D_N) = \min_{i=1, N} \Pi(P_i; D_i) \quad (16)$$

$$N(P_1 \times \dots \times P_N; D_1 \times \dots \times D_N) = \min_{i=1, N} N(P_i; D_i) \quad (17)$$

où \times est le produit cartésien d'ensembles flous défini par :

$$\forall u_i \in U_i, \forall u_j \in U_j, \quad \mu_{P_i \times P_j}(u_i, u_j) = \min(\mu_{P_i}(u_i), \mu_{P_j}(u_j)) \quad (18)$$

Cette agrégation utilisant le 'min' préserve la sémantique des mesures de possibilité et de nécessité; elle suppose aussi que les éléments agrégés ont la même importance relative.

Supposons qu'on veuille tenir compte d'importances relatives différentes entre nutriments, comme il est discuté dans le corps de l'article.

Note w_1, w_2, \dots, w_n les degrés d'importance des nutriments dont les normes sont P_1, P_2, \dots, P_n pour un patient donné. $\forall i, w_i \in [0, 1]$, on supposera que plus w_i est proche de 1, plus l'importance du nutriment est grande; par

ailleurs on suppose que $\max_{i=1,n} w_i = 1$, c'est-à-dire que les nutriments les plus importants ont un poids de 1. Si s_i représente le degré de compatibilité (possibilité ou nécessité) de D_i par rapport à P_i , il a été montré [6] que :

$$s = \min_{i=1,n} \max(1 - w_i, s_i) \quad (19)$$

On notera que si tous les w_i valent 1, on retrouve les résultats de (16) et (17), et que si $w_i = 0$, la compatibilité avec P_i n'est pas prise en compte.

En fait, l'introduction de ces poids équivaut à modifier les normes P_i en P_i^* telles que :

$$\mu_{P_i^*}(u) = \max(\mu_{P_i}(u), 1 - w_i)$$

B RECHERCHE HEURISTIQUEMENT ORDONNÉE

B.1 Algorithmes de recherche dans les espaces d'état

Une recherche dans un espace d'états consiste à trouver un chemin dans un graphe, appelé espace de recherche, depuis un noeud origine r appelé racine jusqu'à un noeud t appelé but. Le graphe de recherche est défini par un noeud origine et un ensemble de règles de transformation qui, par application, permettent de calculer les noeuds successeurs d'un noeud donné. Une solution est constituée par la suite des actions de transformation qui ont permis d'aboutir à un état solution t à partir de l'état racine r . L'algorithme général d'une telle recherche est le suivant :

repeat

a choisir un état m dans "états générés" – "états visités"

b tester le succès de l'état m

c générer les successeurs de l'état m par application des règles de transformation et les mettre dans "états générés"

d placer m dans "états visités"

until test en **b** positif

On notera que cet algorithme ne précise pas comment est effectué le choix de l'état à considérer à l'étape a. Si par exemple on gère la liste "états générés" comme une structure FIFO, on aboutit à une forme particulière de recherche connue sous le nom de "recherche en largeur d'abord".

On va chercher maintenant à particulariser cet algorithme pour qu'il cherche d'abord les solutions de coût minimal, et ce dans le temps le plus court.

B.2 Algorithmes de recherche heuristique

Chaque opération de transformation d'un état en un autre a maintenant un coût. Le coût d'obtention d'un état transformé est la somme des coûts des transformations qui ont permis de le construire. On va noter, pour un état m :

- g le coût (minimum) de production de m à partir l'état initial racine r
- h une estimation heuristique du coût pour aller de m au plus proche état solution
- f la somme $g + h$

L'algorithme précédent devient :

repeat

a choisir un état m dans "états générés"—"états visités" parmi ceux qui ont la meilleur évaluation f

b tester le succès de l'état m

c générer les successeurs de l'état m par application des règles de transformation et les mettre dans "états générés". Pour chaque état généré, calculer l'évaluation $f = g + h$

d placer m dans "états visités"

until test en **b** positif

Un tel algorithme est appelé "algorithme A". Si h est toujours plus petit que le coût réel de la plus proche solution, alors l'algorithme est appelé A^* et on prouve que la première solution trouvée a nécessairement le plus petit coût possible [12].

REFERENCES

- [1] M. Belmonte-Serrano, C. Sierra et Ramon López de Mántaras. Renoir: An expert system using fuzzy logic for rheumatology diagnosis. *International Journal of Intelligent Systems*, 9:985–1000, 1994.
- [2] Jean-Christophe Buisson. Nutri-expert, an educational software in nutrition. *International Journal of Intelligent Systems*, 12:915–933, 1997.
- [3] Jean-Christophe Buisson. Knowledge development expert systems and their application in nutrition. In C.T. Leondes, éditeur, *Knowledge*

Based Systems - Techniques and Applications, pages 37–65. Academic Press, 2000.

- [4] Jean-Christophe Buisson. A computer model of interactivism and piagetian assimilation applied to visual perception. Paper presented at the 31th Annual Symposium of the Jean Piaget Society, June 2001, Berkley (<ftp://diabeto.enseiht.fr/pub/publis/jps01art.rtf>), 2001.
- [5] Candia, éditeur. *SU.VI.MAX: Portions alimentaires, manuel photo pour l'estimation des quantités*. Polytechnica, 1997.
- [6] Didier Dubois et Henri Prade. *Possibility theory - An approach to the computerized processing of information*. Plenum Press, New-York, 1988.
- [7] Henri Farreny et Henri Prade. Dealing with the vagueness of natural languages in man-machine communication. In W. Karwowski et A. Mital, éditeurs, *Applications of Fuzzy Set Theory in Human Factors*, pages 71–84. Elsevier, 1986.
- [8] C. Freska. Linguistic description of human judgments in expert systems and in the 'soft' sciences. In Gupta M.M. et Sanchez E., éditeurs, *Approximate Reasoning in Decision Analysis*, pages 297–305. North-Holland, 1982.
- [9] Adlassnig K.-P. Update on *cadiag-2*: a fuzzy medical expert system for general internal medicine. In W. H. Janko et al., éditeur, *Progress in Fuzzy Sets and Systems*, pages 1–6. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1990.
- [10] G. Mauris, E. Benoit et L. Foulloy. Fuzzy symbolic sensors - from concept to applications. *Measurement*, 12:357–384, 1994.
- [11] G. Mauris, E. Benoit et L. Foulloy. The aggregation of complementary information via fuzzy sensors. *Measurement*, 17(5):236–249, 1996.
- [12] N. Nilsson. *Principles of Artificial Intelligence*. Tioga Pub. Co., Palo Alto, Ca, 1980.
- [13] PR Pehrsson, DB Haytowitz, JM Holden, CR Perry et DG Beckler. Usda's national food and nutrient analysis program: Food sampling. *J. Food. Comp. Anal.*, 13:379–389, 2000.
- [14] E. H. Shortliffe. *Computer-based medical consultation, MYCIN*. Elsevier, North-Holland, New-York, 1976.
- [15] Marie-Christine Turnin, Rene Beddok, Jaqueline Clottes, Robert Abadie, Pascale Martini, Jean-Christophe Buisson, Chantal Soule-

- Dupuy, Francis Bayard et Jean-Pierre Tauber. Telematic expert system diabeto : a new tool for diet self monitoring for diabetic patients. *Diabetes Care*, 15(2), 1992.
- [16] M.C. Turnin, O. Bourgeois, G. Cathelineau, A.M. Leguerrier, S. Halimi, D. Sandre-Banon, V. Coliche, M. Breux M., E. Verlet, F. Labrousse, D. Bensoussan, J.L. Grenier, M.F. Poncet, F. Tordjman and J.M. Brun, J.F. Blicke, C. Mattei C., C. Bolzonella, J.C. Buisson, D. Fabre, J.P. Tauber et H. Hanaire-Broutin. Multicenter randomized evaluation of a nutritional educational software in obese patients. *Diabetes and Metabolism*, 27:139–147, 2001.
- [17] L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.
- [18] L.A. Zadeh. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1):3–28, 1978.