Titre : Une expérience de monitoring

Résumé : Partant de la façon dont un problème nouveau a été résolu, ce papier montre la variété des méthodes qui sont utilisées en monitoring. Dans le monitoring, le sujet se place au niveau méta : il examine ce qu'il est en train de faire pour mieux diriger sa recherche. On montre ensuite qu'un certain nombre de méthodes de monitoring, qui se sont révélées très utiles pour trouver la solution, ne sont pas encore incorporées dans les systèmes d'IA qui doivent résoudre des problèmes.

Mots-clés : monitoring, métaconnaissance, résolution de problèmes, intelligence artificielle.

Title : An experiment in monitoring

Abstract : Starting from the observation of a subject solving an original problem, the paper shows the diversity of monitoring methods. When we monitor the solution of a problem, we are at the metalevel: we are studying what we are doing in order to direct the search more efficiently. It appears that several methods, which were very useful for solving the problem, are not yet included in AI problem solving systems.

Key-words : monitoring, metaknowledge, problem-solving, artificial intelligence.

UNE EXPÉRIENCE DE MONITORING

Jacques Pitrat

Avant-propos

Les publications scientifiques classiques établissent des normes très strictes ; ces normes font qu'il est difficile de présenter des expériences indiquant seulement des voies de recherche que l'on pense intéressantes. En exigeant trop de rigueur scientifique, nous excluons les tâtonnements, les erreurs qui sont inévitables dans toute recherche. Quand nous résolvons un problème, nous présentons la solution sans mentionner toutes les maladresses que nous avons commises avant de la trouver bien qu'elles en aient été des étapes indispensables. Quand nous résolvons seuls un problème, cela a l'inconvénient de cacher des méthodes de résolution de problème, mais cela ne nuit pas à la découverte de la solution. Par contre, nous devons attaquer collectivement les problèmes trop complexes pour être résolus par un seul chercheur, comme celui de réaliser des systèmes aussi intelligents que nous. Nous nous interdisons d'arriver un jour à la solution si nous ne pouvons transmettre aux autres chercheurs que des résultats parfaitement présentés et rigoureusement établis. Nous devons avoir un autre type de publication où nous présentons un état intermédiaire de notre recherche, où nous pensons avoir des idées utiles bien qu'elles ne soient pas totalement claires et formalisées.

Me basant sur mon comportement pendant la résolution d'un problème original, j'ai constaté que j'appliquais un certain nombre de méthodes qui m'ont été fort utiles. Ces méthodes peuvent être regroupées sous le nom de "monitoring". Nos systèmes actuels de résolution de problème en sont par contre presque totalement dépourvus. Je fais part de cette expérience en espérant que cela incitera à réaliser des systèmes qui seront plus performants, et surtout plus généraux, en introduisant peu à peu certaines de ces méthodes de monitoring. C'est d'ailleurs dans cette direction que je développe actuellement MALICE, le résolveur de problèmes du système MACISTE.

1. Introduction

Le but de ce papier est de montrer l'importance du monitoring, activité qui se passe au niveau méta lors de la résolution d'un problème. Il consiste à examiner comment se déroule cette résolution pour mieux piloter les étapes suivantes. Le monitoring comporte de multiples facettes : prédire les chances de succès d'une certaine méthode, comparer ce qui était prévu et ce qui s'est réellement passé, comprendre les raisons d'un écart avec les prévisions, changer de direction de façon raisonnée si les perspectives de succès paraissent devenues trop faibles, établir des propriétés du problème, découvrir des faits surprenants et savoir en profiter.

Un bon monitoring semble l'élément principal du succès des sujets humains qui résolvent un problème dans un domaine qui leur est nouveau. Certains des sujets que Schoenfeld [Schoenfeld 1985] a observés n'étaient pas experts du domaine étudié, mais ils étaient experts en résolution de problèmes ; ils passaient une grande partie de leur temps à des activités de monitoring. Ils avaient de meilleurs résultats que d'autres sujets qui connaissaient mieux le domaine, mais ne savaient pas monitorer leur recherche. Malheureusement, la quasi-totalité des systèmes d'IA actuels font très peu ou pas du tout de monitoring.

A partir d'un problème que j'ai résolu, sans l'aide d'ordinateur, je veux montrer quelques uns des mécanismes de monitoring que j'ai utilisés. Je ne prétends pas faire œuvre de psychologue, je ne me suis pas enregistré en video pendant que je cherchais la solution, j'ai seulement analysé ce que je faisais et j'ai étudié mes brouillons. Il ne suffit pas d'étudier parfaitement la résolution dans un temps limité de problèmes qui sont alors forcément assez simples. Il faut aussi étudier comment nous résolvons des problèmes difficiles ; mais alors, comme l'observation porte sur plusieurs jours, il n'est pas possible qu'elle soit aussi détaillée et précise que pour un problème plus simple. Toutefois, une étude, même critiquable du point de vue de la psychologie, est utile pour l'IA si elle donne des idées pour réaliser des programmes. Nous ne voulons pas imiter le comportement humain, mais nous en inspirer. Même si je n'ai pas décrit tous les processus qui sont intervenus pendant que je résolvais ce problème, j'en ai observé un certain nombre dont il serait utile de doter nos systèmes.

J'inclus dans ce texte des essais qui se sont révélés inutiles et maladroits. Quand on publie des résultats, on omet en général de parler des impasses où l'on s'est trouvé. Elles sont pourtant intéressantes parce que, dans d'autres circonstances, elles pourraient mener au succès. De plus, en les examinant, nous pouvons trouver des méthodes qui permettront d'éviter bien des essais inutiles en les sélectionnant mieux. J'utilise souvent mal le monitoring, mais un mauvais monitoring vaut certainement mieux que pas de monitoring du tout.

Après avoir décrit le problème, je présenterai les trois essais que j'ai tentés, le dernier ayant finalement conduit à la solution. Nous verrons ensuite comment j'ai commencé l'étude de cinq autres problème voisins, tirant parti de l'expérience acquise avec le problème précédent. Je reprends enfin quelques aspects du monitoring qui sont apparus comme importants dans cette expérience.

Je distinguerai deux niveaux dans ce texte. Dans les sections 2 à 4, le récit de ma démarche est imprimé en Times ; j'y ai inclus essentiellement ce que j'ai fait en monitoring. Les remarques sur cette activité monitoring sont en Geneva.

2. Le problème

Je me suis posé un problème nouveau lié à la réalisation d'une phrase réflexive. Une phrase réflexive décrit une partie de son propre contenu, par exemple elle indique le nombre d'occurrences de chacune des lettres de l'alphabet dans la phrase elle-même. Dans un autre rapport [Pitrat 1996], j'ai montré qu'un programme combinatoire était capable d'engendrer de nombreuses phrases de ce type. J'ai appelé "corps" d'une phrase réflexive la partie de la phrase qui ne contient pas les nombres d'occurrences des lettres qui y apparaissent. Dans près de deux fois sur trois, en partant d'un corps quelconque, ce programme arrive à trouver les nombres qui décrivent le nombre d'occurrences de chaque lettre. Souvent même, il trouve plusieurs solutions pour le même corps. Le titre de ce rapport était un exemple d'une telle phrase.

J'ai essayé de résoudre une variante de ce problème. Georges Perec a réussi un tour de force en écrivant un roman, *La disparition*, qui ne contient pas une seule fois la lettre E. J'ai adapté cette idée en me donnant comme but de créer une phrase réflexive qui ne contiendrait pas la lettre E.

La première chose que j'ai faite a été d'examiner quels chiffres ne contenaient pas la lettre E. Il y en a très peu, ce qui est une des raisons de la difficulté du problème : 1, 3, 5, 6, 8, 10, 18, 20, 23, 25, 26, 28. J'appellerai par la suite ces nombres les "nombres permis" La liste ne s'arrête pas là, mais le nombre suivant sans E est 1.000.000, ce qui ne le rend pas utilisable, pas plus que ses successeurs comme 1.000.000.000 ; dans une phrase normal, le nombre d'occurences de la lettre la plus fréquente est largement inférieur à cent.

Pourquoi ai-je immédiatement examiné les chiffres qui ne contenaient pas la lettre E ? Qu'il faille le faire semble une évidence. Mais quelles connaissances faut-il donner à un système pour qu'il le fasse dès qu'il reçoit l'énoncé du problème précédent ? Tout cela fait partie de ma métaexpertise en résolution de problèmes, qui comme toute expertise, est largement inconsciente. Là, il n'y a pas de monitoring, mais un comportement d'expert qui sait tout de suite ce qu'il doit faire.

Dans une deuxième étape, j'ai déterminé pour chaque lettre les nombres où elle apparaissait, en me contentant des nombres simples qui sont formés d'un seul mot : les six premiers nombres et le nombre 20. Les cinq autres nombres permis sont composés, ils sont la combinaison de deux des nombres précédents. Au total, 14 lettres apparaissent dans ces nombres :

C	5
D	10
G	20
H	8
I	3, 5, 6, 8, 10, 20
N	1, 5, 20
O	3
Q	5
R	3
S	3, 6
T	3, 8, 20
U	1, 8
V	20
X	6, 10

Les lettres A (4, 14), F (9), P (7) et Z (11, 12, 13, 14, 15, 16), qui apparaissent dans des nombres, sont toujours liés à la lettre E, donc ne figurent pas dans les nombres permis. Comme le G et le V apparaissent toujours ensemble (dans 20), il suffit de 13 nombres pour déterminer une phrase réflexive sans E. Le problème est donc plus simple au point de vue combinatoire que le problème général qui demandait de découvrir 18 nombres.

Aucune lettre n'apparaît deux fois dans un nombre simple (ce qui arrivait avec E dans "treize" ou "seize"). Par contre certaines peuvent apparaître deux fois dans un nombre composé, par exemple I dans "dix-huit" et "vingt-trois" ou T dans "vingt-trois".

"un" est un cas spécial, car si une lettre n'apparaît qu'une fois, nous pouvons aussi bien ne pas la mettre : si nous disons qu'il y a "un W", nous pouvons l'omettre puisque la lettre W n'apparaît que pour indiquer qu'elle n'est pas ailleurs ! Par ailleurs, "un" n'apparaît pas dans les nombres permis composés puisque "vingt et un" contient un E. Il est donc possible d'en faire abstraction et de faire comme si "un" n'était pas dans les nombres permis.

Un fait remarquable m'a surpris : I apparaît une fois dans chacun des six nombres simples restants.

L'examen des caractéristiques du problème semble être faite sans idée préconçue. Je ne pensais pas a priori regarder si une lettre apparaissait dans tous les nombres. Je l'ai pourtant vu. Nous avons une expertise générale de détection d'anomalies encore pilotée par des mécanismes inconscients.

I apparaît deux fois dans les cinq nombres composés : 18, 23, 25, 26, 28. Le nombre de I sera ainsi relativement stable puisqu'il ne changera que si l'on passe d'un nombre avec un I à un nombre avec deux I ou l'inverse, ce qui sera sans doute rare. Par contre, son nombre d'occurrence sera forcément élevé, puisqu'il apparaît au moins quatorze fois pour les quatorze lettres qui figurent dans les nombres permis, et plus si l'on a des nombres composés ou si l'on utilise aussi des lettres qui ne figurent pas dans les nombres permis.

Cette justification du fait que le nombre de I sera assez stable et élevé a été mise pour convaincre pour le lecteur. En réalité, je suis arrivé à la conclusion qu'il y aurait beaucoup de I et que leur nombre changerait peu en remarquant qu'il était présent dans tous les nombres et je n'avais pas essayé de le justifier davantage.

3. La résolution du problème

J'ai fait trois tentatives pour trouver une solution, l'analyse de chacune de ces tentatives me donnant l'idée de la suivante.

3.1. Utilisation du programme de recherche de phrase réflexive

Je disposais d'un programme qui trouvait avec beaucoup d'efficacité des phrases réflexives. Aussi ai-je tout naturellement essayé de l'adapter à la recherche de solutions pour ce nouveau problème dont l'énoncé est très voisin de celui pour lequel le programme a été écrit.

Une première adaptation devait être faite parce qu'il ne doit plus y avoir de E. Je ne considère donc que des corps sans E. Mais comme le système les compte quand même, il ne faut pas qu'il indique "zéro" E, ce qui amènerait à compter un Z, un R, un O et un E interdit ! Pour cela, il a suffi de mettre dans les données du programme que la suite de symboles correspondant à 0 est la suite vide. Ne mentionnant plus E, je me suis dit que je pouvais aussi bien ne plus mentionner toutes les lettres. Cela est possible pour celles qui n'apparaissaient que parce que l'on dit qu'elles sont présentent une fois : plus besoin de dire qu'il y a un J, un K, un W ou un Y. Il n'est pas indispensable d'inclure dans la suite des lettres de l'alphabet qui figure dans le corps une lettre qui n'apparaît pas ailleurs dans le corps et qui n'apparaît dans aucun des chiffres permis. Au total, douze lettres peuvent être dans ce cas :

A, B, E, F, J, K, L, M, P, W, Y, Z

J'appelle ces lettres "stables", car leur nombre d'occurrences est déterminé par le corps et ne change pas si les nombres changent. Il faut les mettre si elles apparaissaient au moins une fois dans le corps, sinon on les met ou on les omet comme cela nous arrange. Les lettres stables que l'on a décidé de ne pas inclure sont dites "interdites" ; E en fait toujours partie. Naturellement, les quatorze autres lettres seront appelées "instables".

Pour engendrer de nombreuses phrases, le programme recevait un noyau commun à toute une famille de corps, les différents corps étant engendrés par des ajouts divers à ce noyau. Par exemple on pouvait mettre ou ne pas mettre des morceaux de phrase comme "cher lecteur", "ami lecteur", "chers lecteurs" en début de phrase, ou "pour finir", "finalement", "enfin", "pour terminer", "en dernier" juste avant le nombre d'occurrences du Z final. Avec plusieurs points d'insertion possibles et plusieurs possibilités à chaque point, cela permettait d'engendrer des milliers de corps possibles à partir d'un seul noyau. Avec seulement les deux groupes précédents, et en tenant compte que l'on peut aussi ne rien mettre, on engendre 24 corps à partir d'un noyau. Naturellement, le corps et les ajouts ne devront maintenant contenir ni E, ni aucune de celles des onze lettres précédentes que l'on a décidé d'omettre.

Mais il ne suffit plus d'avoir une solution du problème, il faut aussi que son nombre de E soit nul. En effet, on peut très bien avoir dans cette solution des nombres contenant des E comme 4 ou 12 ce qui la rend inacceptable. Si par contre l'on n'utilise aucun des lettres interdites, et en particulier si le nombre d'occurrences de E est nul, la solution est correcte.

Cela s'est heurté à de sérieuses difficultés venant de deux sources différents. La première est que, dans ce nouveau contexte, il est difficile d'engendrer de nombreux corps à partir d'un noyau. En effet, il faut que les corps ne soient pas trop importants du fait qu'il n'y a pas de nombres permis entre 10 et 18. Il faut donc éviter cette zone, ce qui conduit à avoir la plupart des nombres d'occurrences inférieurs ou égaux à 10, limitant donc la taille des corps. Les ajouts ne peuvent alors être ni trop nombreux, ni comporter trop de lettres. Naturellement, ils ne doivent pas avoir de E, ce qui en écarte beaucoup, mais on peut en trouver qui s'insèrent de façon optionnelle dans une phrase comme "à la fin", "au total" ou "pour finir". Une nouvelle difficulté vient de ce que les nombres permis ne sont pas à la suite les uns des autres à l'exception de 5 et 6. Supposons que nous voulions prendre comme ajout "à la fin". Le mettre va ajouter deux A, un F, un I, un L et un N ; A, F et L n'apparaissent pas dans les nombres. Il faut donc que dans le corps on ait 5 ou 25 F et 5 ou 25 L pour que cela donne un nouveau nombre permis, dans le cas présent 6 ou 26. Pour le A nous pouvons en avoir 3, 6, 8, 18, 23 ou 26 dans le corps, car ce sont les seuls nombres tels qu'un ajout de 2 soit encore permis. Cela contraint déjà fortement dans le cas d'un seul ajout ; le problème devient inextricable si nous voulons tenir compte de ce qu'il y a plusieurs autres ajouts.

La découverte qu'il n'était plus possible d'engendrer les corps automatiquement a été une mauvaise surprise que je n'avais absolument pas prévue. Une fois découverte, j'en ai facilement vu la gravité et le fait qu'il n'était pas possible de l'éviter. Toutes les explications données ci-dessus ont été trouvées après que je me sois rendu compte de la difficulté d'engendrer des familles de corps. Je les ai encore plus détaillées pour convaincre le lecteur.

Il résulte de ce qui précède qu'il faut engendrer spécialement chacun des corps que l'on essaiera. Malheureusement, il est difficile de créer un corps satisfaisant. D'abord, il n'a pas de E et il est difficile de créer des phrases quand on n'a pas le droit d'utiliser la lettre E ; Perec a vraiment réussi un tour de force en écrivant tout un livre sans utiliser un seul E. De plus, il faut vérifier, pour chacune des lettres stables qui ne sont pas interdites, que leur nombre d'occurrences est permis. Aussi n'ai-je pu faire qu'un nombre limité d'essais. Pour chacun de ceux où le programme trouvait une solution, le nombre de E présents a toujours été largement supérieur à 0 : la plus petite valeur obtenue pour le nombre d'occurrences de E a été 5.

J'ai fait rapidement fait le bilan de ces essais. J'étais très loin de la solution, les meilleurs essais ayant encore beaucoup trop de nombres comportant un E. De plus, il était peu probable, vu la quasi-impossibilité d'engendrer les corps automatiquement, que j'arrive à créer assez de corps pour avoir la chance d'arriver à une solution qui ne comporte aucun nombre sans E. Cette voie était à abandonner.

Un des avantages du monitoring est d'éviter de perdre son temps dans une voie qui semblait prometteuse, mais qui se révèle rapidement sans espoir par suite de difficultés que l'on n'avait pas prévues.

3.2. Création d'un nouveau programme de recherche de solution

Nous avons vu que la combinatoire est bien plus faible pour ce nouveau problème, avec 13 nombres à déterminer au lieu de 18. Malgré cela, la méthode précédente prenait beaucoup de temps, car l'on partait toujours de nombreux points de départ et l'on faisait beaucoup d'étapes pour chacun d'entre eux. Pourtant, elle n'assurait même pas que l'on découvre une solution quand il en existe une. C'est pourquoi j'ai décidé d'écrire un programme qui aurait deux avantages sur le précédent : être sûr de trouver une solution s'il en existe une et le faire plus rapidement.

Je suis allé un peu vite ici. Les succès d'une approche combinatoire pour d'autres problèmes et l'assurance de trouver une solution quand il en existait une m'ont amené à me lancer bien légèrement dans cette voie. Le programme que j'ai réalisé a atteint ces deux buts, mais il s'est révélé inutilisable pour une autre raison. J'avais pourtant tous les éléments pour me rendre compte que cette approche ne pouvait réussir.

Le nombre associé à I a un rôle particulier puisqu'il peut être déterminé tant que les autres nombres sont inférieurs ou égaux à 10 et différents de 1, chacun d'entre eux contenant exactement un I. Nous pouvons donc fixer le nombre de I avec le corps. Il doit être au moins égal à 15 (un pour chacune des treize lettres permises autres que I, un ou deux pour le nombre de I, un pour indiquer que l'on compte la lettre I et éventuellement un pour chaque lettre stable que l'on utilise). On doit donc prendre 18 ou un nombre permis supérieur, mais on peut le déterminer quand le corps est connu. De même, G et V n'apparaissant que dans 20 seront connus si l'on connaît ne nombre de I. Il ne reste donc plus que 11 nombres à déterminer.

J'utilise à fond un résultat trouvé précédemment : I apparaît une fois dans chacun des nombres simples permis. La combinatoire va porter sur un élément de moins. L'expérience que j'ai d'autres problèmes m'a montré qu'avec 11 nombres et une gamme de variation de 5 valeurs, on arrive à des temps de l'ordre de la seconde tout en ayant une réponse parfaitement sûre. Cela m'encourage à continuer. Les hypothèses sur les possibilités de variation des nombres d'occurrences ne sont pas rigoureuses. Je dois en particulier écarter la possibilité de la valeur dix-huit pour une des onze lettres qui amène deux I d'un coup, donc entraînerait une erreur sur le nombre de I prévu. Je ne l'avais pas vu tout de suite ; il y avait ainsi un bogue dans la première version du programme qui autorisait aussi dix-huit pour valeur possible des 11 nombres.

Chacun des onze nombres qui restent peut prendre les valeurs 3, 5, 6, 8 ou 10. Nous nous arrangeons pour prendre un corps tel que la valeur 18 soit impossible à atteindre pour ces nombres. Nous allons nous servir du résultat suivant, qui est évident, mais que j'encadre parce qu'il est essentiel quand on traite de phrases réflexives :

On ne change pas le nombre de lettres dans une phrase en permutant les nombres affectés aux chiffres.

Il n'est donc pas besoin de savoir à quelle lettre chaque nombre est affecté, il suffit de savoir combien de fois chaque nombre est affecté à une des lettres permises. Par exemple, si l'on a "six H, cinq C", on aura le même nombre de chaque lettre que si l'on avait "cinq H, six C". Si les nombres réels sont bien 5 pour H et 6 pour C, on a une solution en permutant les deux nombres. Pour compter le nombre de lettres, il suffit de savoir que l'on a une occurrence de "cinq" et une occurrence de "six".

Ce résultat fondamental était déjà largement utilisé dans le programme précédent où l'on reconnaissait qu'il y avait une solution quand l'ensemble des lettres affichées était le même que l'ensemble des lettres réelles. Bien que je sois conscient de ce résultat et qu'il soit trivial, je ne le maîtrise pas : je ne m'en sers pas dans des cas où il serait pourtant utile et, quand je l'utilise, j'ai de la difficulté à bien m'en servir. Dans le cas présent, il m'a fallu du temps pour m'assurer que je l'utilisais correctement.

Une solution est donc définie par le nombre de fois qu'un nombre est affecté à une des lettres figurant dans un nombre permis Nous nous intéressons aux lettres autres que G, I et V et nous supposons que leurs occurrences sont supérieures à 1 et inférieures à 18. Il suffit alors d'engendrer tous les bags de onze de ces nombres. Nous avons ainsi à considérer successivement :

3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 5
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 6
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 8
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 10
3 3 3 3 3 3 3 3 3 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3 3 5 6
3 3 3 3 3 3 3 3 3 5 8
3 3 3 3 3 3 3 3 3 5 10
3 3 3 3 3 3 3 3 3 6 6
……………………

Pour chaque bag, on détermine les nombres d'occurrences réels de ces lettres, puisque tout est connu, le corps, le nombre d'occurrences des nombres liés aux lettres stables et les nombres d'occurrences des nombres liés aux lettres permises qui sont donnés par le bag des nombres en cours d'examen. On vérifie ensuite si ces nombres sont une permutation des nombres de ce même bag. Si cela est vrai, on a une solution. Sinon, ce bag n'est pas une solution. Tout cela est très rapide : en un temps de l'ordre de la seconde, le programme donne la réponse pour un corps donné.

Deux facteurs m'ont incité à écrire ce programme : l'assurance qu'il donnait son résultat dans un temps très court et le fait que c'était une procédure de décision. En effet, s'il y a une solution, il la trouve certainement. Ces avantages m'ont aveuglé et je n'ai pas pris la peine d'évaluer la chance d'arriver ainsi à une solution.

Certes, la méthode n'est pas totalement rigoureuse, car on ne trouve pas ainsi une solution où l'une des onze lettres n'apparaîtrait qu'une seule fois. Cela arrive avec une lettre instable pour laquelle le nombre lié (par exemple 8 pour H) n'apparaît pas du tout. On aurait alors le nombre "un" à cause de sa présence dans le corps ; comme il ne contient pas I, cela fausserait notre calcul du nombre de I. Cela signifierait qu'un des cinq chiffres permis compris entre 3 et 10 n'apparaîtrait pas du tout, ce qui est peu probable. Pour simplifier, on engendre tous les bags, même ceux qui ne satisfont pas à ce critère : le premier bag de la série donnée plus haut ne contient que des "trois", donc pas de H, ni de X ! De toutes les façons, on ne cherche pas toutes les solutions, mais seulement une solution. Risquer de manquer une solution très peu probable est admissible. De plus, si le système avait donné une solution, je l'aurais vérifiée ; il n'y a donc pas de risque de garder une solution fausse.

Nous avons une grande aptitude à faire des raisonnements presque corrects qui simplifient considérablement la solution au prix de risquer des erreurs : soit trouver une solution qui n'en est pas une (mais ici, il est facile de vérifier si une phrase réflexive est correcte), soit de ne pas trouver une solution qui existe pourtant. L'abandon de la rigueur fait gagner beaucoup de temps et simplifie les méthodes de résolution ; il est malheureusement difficile de donner de telles possibilités à un système d'IA. L'évolution de l'écart avec la rigueur est une opération importante en monitoring. On accepte un tel écart tant qu'il est faible ; mais s'il existe, même faible, on fait davantage de vérifications.

Malheureusement, si l'on avait immédiatement des résultats sûrs, ces résultats ont toujours été négatifs. De plus, la détermination d'un corps sans E, avec un nombre satisfaisant de I et des nombres permis d'occurrences pour les lettres stables est long et difficile. Il n'a donc pas été possible de faire beaucoup d'essais.

Constatant ces insuccès, j'ai voulu voir s'il y avait des chances d'obtenir un succès en continuant d'utiliser ce programme. Pour cela , j'ai estimé la fréquence de phrases réflexives sans E à partir d'un corps qui le permettait, c'est à dire sans E et ayant des nombres permis d'occurrences pour les lettres stables. Nous pouvons supposer que, en dehors de la lettre I, les nombres d'occurrences sont au plus égaux à 12. En effet, nous nous arrangeons pour que le corps ne soit pas trop important ; comme les lettres autres que le I apparaissent dans peu de nombres, il est peu probable que leur nombre d'occurrences dépasse 12. Cela écarte aussi toute variation pour les lettres G et V puisque seul I peut avoir la valeur 20 ou au-dessus et alors on le sait. Nous avons alors parmi ces nombres six de permis et six contenant E, donc une chance sur deux d'avoir un nombre permis. Comme il y a 11 nombres à déterminer, cela fait une probabilité de 2^{-11}, soit de 1/2000, de n'avoir parmi ces 11 nombres que des nombres permis. C'est donc un événement très peu probable, il faudrait créer quelques milliers de corps. Il est difficile, aussi bien manuellement qu'automatiquement, d'engendrer des corps satisfaisant à toutes les conditions ; aussi, cette voie est-elle apparue sans espoir.

Il était possible de faire ce raisonnement bien plus tôt, en voyant les insuccès du premier programme. La présence de deux facteurs favorables m'a poussé trop hâtivement à la tâche pourtant lourde d'écrire un programme sans assez réfléchir auparavant à ses chances de succès. Remarquons l'utilisation d'un raisonnement approximatif dans l'estimation précédente. Il faut savoir simplifier à bon escient pour ne pas rester dans une situation réelle trop complexe. Je n'ai aucune idée de la probabilité réelle de succès, mais je serais très étonné si elle était inférieure à 1/1000 et cela suffit à me dissuader de continuer. En même temps que le résultat approximatif, on a une idée d'une fourchette. Comment nous établissons cette fourchette reste assez mystérieux.

Toutefois, cette étape n'a pas été aussi infructueuse qu'elle paraît au premier abord, car elle m'a donné l'idée de m'intéresser aux bags de nombres attachés aux lettres instables.

3.3. Recherche d'une solution sans aide informatique

Après cet essai inutile, il fallait faire un bilan. La méthode adoptée dans le premier programme avait bien réussi pour le problème pour lequel elle avait été conçue. En effet, ce problème a beaucoup de solutions et il est facile d'engendrer un grand nombre de corps. La situation est très différente pour le problème traité ici : nous venons de voir qu'il a très peu de solutions et qu'il est très difficile d'engendrer des corps. Par contre, il a un avantage important sur le premier problème, car la combinatoire est bien plus réduite : il suffit de trouver 14 nombres et trois d'entre eux, ceux liés aux lettres I, G et V sont très fortement contraints. En effet, les nombres de 3 à 10 ainsi que 20 ont tous un I alors que 18 et les nombres permis de 23 à 28 ont tous deux I. De plus il est peu probable que les nombres contenant 20, les seuls contenant G et V, apparaissent plus d'une fois ; si c'est le cas, c'est pour indiquer le nombre de I. J'ai alors établi la méthode suivante de résolution que j'ai suivie jusqu'au succès final :

On commence par déterminer a priori les nombres d'occurrences de toutes les lettres qui sont donc les nombres affichés. On suppose que toutes les lettres instables sont présentes et on décide quelles lettres stables seront admises. On choisit pour toutes ces lettres les nombres d'occurrences affichées. Leurs nombres d'occurrences réelles sont partiellement connues : on sait combien de fois elles apparaissent dans les nombres précédents et on sait de plus qu'elles apparaissent une fois pour indiquer leur nombre. Par différence entre les nombres affichés et les nombres ainsi calculés, on a ainsi le nombre de lettres dans la partie du corps qu'il reste à déterminer. Au lieu de partir du corps et de trouver les nombres affectés aux lettres instables, on part des nombres affectés aux lettres, stables et instables, et on détermine les lettres composant le corps. On créera enfin un anagramme de ces lettres qui devra avoir un sens acceptable.

Cette méthode m'est apparue directement, sans tâtonnements. Une explication est que j'ai un répertoire de méthodes et que mon inconscient choisit parmi celles-ci. La façon dont un algorithme apparaît est vraiment mystérieuse. Des détails d'implémentation ont été précisés en le faisant tourner. En réalité, j'avais déjà envisagé vaguement une méthode de ce type quand j'avais examiné le problème de la découverte de phrases réflexives pour la première fois il y a six ans. Je n'avais pas poussé davantage son examen pour trois raisons. D'abord, le programme avait d'excellents résultats. Ensuite, je me rendais compte que cette méthode conduisait à une tâche difficile pour moi. J'avais enfin l'impression que les phrases ainsi engendrées ne seraient ni très élégantes, ni très adaptables : avec la méthode que je viens de définir, on essaye bien de créer une phrase qui ait un sens, mais on est très limité pour choisir ce sens à l'avance. Avec la méthode utilisée auparavant, on pouvait choisir le corps que l'on voulait, donc créer une phrase réflexive qui aurait le sens que l'on souhaitait lui donner. C'est devenu très difficile avec la nouvelle méthode.

Supposons que le choix des nombres d'occurrences soit le suivant :

A	8
C	5
D	6
G	3
H	6
I	25
L	5
N	10
O	8
Q	5
R	10
S	10
T	18
U	10
V	3

X	8

Nous verrons plus tard comment l'on peut déterminer une suite de valeurs qui ait des chances raisonnables de succès. J'ai choisi d'utiliser deux lettres stables : A et L. Il y a donc au total 16 nombres qui se répartissent ainsi (en décomposant "dix-huit" en "dix" et "huit" et "vingt-cinq" en "vingt" et "cinq") : 2 "trois", 4 "cinq", 2 "six", 4 "huit", 5 "dix" et 1 "vingt". J'ai cumulé les occurrences des lettres de ces nombres et je leur ai ajouté une unité pour tenir compte de ce que chaque nombre est suivi de la lettre qu'il représente. J'ai obtenu ainsi les nombres d'occurrences suivants dans les nombres et dans la liste des lettres présentes :

A	1
C	5
D	6
G	2
H	5
I	19
L	1
N	6
O	3
Q	5
R	3
S	5
T	8
U	5
V	2
X	8

Comme nous pouvions nous attendre, le nombre de I est élevé puisqu'il apparaît au moins une fois dans chacun des nombres et deux fois dans dix-huit et vingt-cinq. Par différence entre les deux tableaux, j'ai obtenu le nombre de lettres que je devais utiliser pour construire le début de la phrase réflexive :

A	7
G	1
H	1
I	6
L	4
N	4
O	5
R	7
S	5
T	10

U	5
V	1

J'ai maintenant dû à faire un anagramme géant ; il ne s'agit pas seulement de trouver un mot, mais un ensemble de mots qui ait un sens et qui respecte les règles de la syntaxe en utilisant toutes les lettres précédentes. Les nombres de départ ont naturellement été choisis pour que les nombres des lettres ainsi obtenus ne soient pas trop défavorables. Un certain nombre de connaissances m'ont aidé à définir des contraintes sur le choix des nombres :

* Je m'étais intéressé dans ma jeunesse à la cryptographie et j'en avais retenu l'ordre de fréquence des lettres les plus fréquentes de la langue française. Par ordre décroissant, il est :

ESARINTULOC

Naturellement, le E, qui est nettement détaché devant ses suivants, est exclus. Il est souhaitable que l'ordre de fréquence des autres lettres ne s'éloigne pas trop de ce qu'indique la suite précédente.

* Pour avoir une chance de faire une phrase, le rapport des consonnes et des voyelles doit correspondre à ce que l'on trouve dans les phrases normales, où il y a un peu plus de consonnes que de voyelles. 3 consonnes pour 2 voyelles est un rapport assez satisfaisant. Notons que ce rapport n'est pas celui qui se trouve pour les nombres donnés au départ, mais ceux obtenus après soustraction. En effet, les nombres permis ont un nombre anormalement élevé de consonnes par rapport aux voyelles : le double pour "six" ou "dix" et quatre fois plus pour "vingt".

* Il vaut mieux éviter d'avoir des lettres difficiles à placer comme Q ou X. Il vaut mieux ne pas avoir trop des lettres à fréquence basse comme D, G, H et V.

J'avais dès le départ les connaissances précédentes, je ne les ai pas découvertes. Il m'est apparu évident avant tout essai qu'il fallait les utiliser. Le seul paramètre que je n'avais pas est le rapport consonnes/voyelles que j'ai établi très vite après les premiers essais. En effet, je voyais s'il me restait à placer à la fin des consonnes ou des voyelles et je faisais les choix suivants en augmentant le nombre d'éléments en nombre insuffisant ou en réduisant ceux en excès.

A partir de cela, j'ai créé le premier ensemble de nombres qui m'a donné le premier jeu de lettres. Il est évident qu'il faut des A pour améliorer l'équilibre entre les voyelles et les consonnes ; de plus, le A est la voyelle la plus fréquente après le E. Mais comme ils ne sont pas pris par les nombres, ceux que l'on met sont tous utilisables. Par ailleurs, il faut beaucoup de I puisqu'il y en a déjà un au moins pour chaque lettre présente ce qui en fait déjà une douzaine de pris ; de plus c'est la voyelle qui vient après le A en fréquence. Il en faut donc au moins 18. Le T risque de poser un problème, car c'est une consonne assez fréquente qui se trouve dans trois des nombres permis. En mettre 10 en laissera trop peu pour la constitution de la partie initiale de la phrase, mais par contre en en prenant 18, j'en aurai trop et j'aurai de la difficulté à les placer. Le saut de 10 à 18 est très gênant.

Je suis donc parti d'un premier choix pour les nombres et je l'ai modifié ensuite en tenant compte des difficultés rencontrées lors des essais précédents. J'ai ainsi augmenté un peu le nombre de R et de A , le nombre de I est passé de 18 à 25 (ce qui a introduit les lettres G et V) et le nombre de T de 10 à 18. J'ai surtout hésité pour savoir quelles lettres en dehors du A j'allais ajouter. Après des essais avec le M, j'ai choisi le L, la seule lettre de la liste ESARINTULOC qui n'était pas représentée ; il se trouve dans des mots commodes comme l'article ou pronom "la" et le pronom "il" et son nombre est même finalement passé de 3 à 5. Au bout de quelques essais, je suis arrivé à l'ensemble de nombres donné plus haut à partir duquel j'ai trouvé une solution.

Les nombres étant choisis, on a ainsi automatiquement l'ensemble des lettres qui constituent l'anagramme. Je commençais alors par construire un morceau de phrase qui avait un sens et qui utilisait la plupart des lettres. Une fois ceci fait, je me suis servi de méthodes d'adaptation du texte qui ajoutent des lettres restant en attente ou qui en libèrent pour une autre utilisation. :

* Utilisation d'un L : "on" devient "l'on".

* Utilisation simultanée d'un U et d'un N : ajouter une lettre qui n'apparaissait pas et qui apparaître donc maintenant avec le nombre "un".

* Utilisation ou redistribution d'un I et d'un T : un passé simple en "A" devient un imparfait en "AIT" ou l'inverse. "trouvait" est ainsi devenu "trouva" en libérant un I et un T.

* Décomposition d'un mot en deux mots indépendants : "surtout" est devenu "sur" et "tout".

* Remplacer un mot par un autre dont le sens est proche. Par exemple échange possible entre "sous" et "sur", ce qui libère O et U, mais utilise R.

* Pour placer un H, on peut se servir d'une interjection.

* Il est possible de remplacer un verbe par une séquence de verbes séparés par des virgules ; c'est comme cela que j'ai ajouté "rit" qui m'a permis de caser les trois dernières lettres qui restaient.

Je n'avais aucune connaissance consciente a priori des règles précédentes, j'aurais été incapable de les lister. Je regardais le texte et j'essayais de trouver des idées de modifications, plutôt que de systématiquement essayer des règles connues de modification. Je ne me disais pas "regardons les possibilités de modification des flexions", mais voyant "trouvait", je me disais qu'il était possible d'enlever le I et le T finals. J'ai établi les règles précédentes une fois le problème résolu en examinant quelques unes des modifications que j'avais tentées. Il y en a eu bien d'autres.

C'est à partir de l'ensemble de nombres donnés plus haut que je suis arrivé enfin à une phrase proche de la solution que j'ai réussi à transformer en solution complète en utilisant les méthodes ci-dessus :

> Ha, l'on trouva la solution ; il rit, titra tout, sans tri, sur un trait gras : dix 'n', cinq 'q', vingt-cinq 'i', trois 'v', cinq 'c', trois 'g', dix 's', huit 'x', six 'h', dix 'r', cinq 'l', dix-huit 't', six 'd', huit 'a', dix 'u', huit 'o'.

J'ai très mal utilisé l'outil puissant dont j'ai déjà parlé : la possibilité de permuter les nombres d'occurrences. Dans le cas précédent, en voyant les nombres d'occurrences des lettres, j'aurais pu remarquer qu'il restait un H qui n'est pas toujours facile à placer. Par contre il n'y avait aucun C, lettre plus facile à caser. J'aurais donc dû changer les nombres associés et remplacer le "cinq 'c', six 'h'" par "six 'c', cinq 'h'". Je n'ai vu cette possibilité qu'en rédigeant ce papier ; remarquant alors que "ha" pourvait devenir "ça", il a été facile de trouver une autre solution du problème :

> L'on trouva la solution ; il rit, titra tout ça, sans tri, sur un trait gras : dix 'n', cinq 'q', vingt-cinq 'i', trois 'v', six 'c', trois 'g', dix 's', huit 'x', cinq 'h', dix 'r', cinq 'l', dix-huit 't', six 'd', huit 'a', dix 'u', huit 'o'.

Si j'étais parti dès le départ de cette nouvelle affectation des nombres aux lettres, j'aurais sans doute construit une phrase très différente et moins alambiquée. Par ailleurs, la permutation des lettres est vraiment un outil puissant pour modifier une phrase : on ne change pas les mots de la phrase, mais les lettres permises. Si l'on a par exemple au départ choisi huit O et dix U et que l'on reste avec deux U en trop et qu'on aimerait avoir deux O de plus, il n'est pas nécessaire de tout recommencer. Il suffit d'éliminer deux des U et ajouter deux O et compléter la phrase en tenant compte des nouvelles lettres restantes. En effet, dix O et huit U ont toujours un "dix" et un "huit" et ne changent pas les nombres d'occurrences des autres lettres. Si j'avais à résoudre d'autres problèmes du même type, j'essayerais certainement d'utiliser bien plus systématiquement cette possibilité. C'est comme cela que l'on se bâtit une expertise.

4. Etude de problèmes voisins

J'ai voulu voir comment je pouvais estimer rapidement un nouveau problème en tenant compte de l'expérience acquise avec le problème précédent. J'ai donc examiné, en général sans les résoudre, cinq nouveaux problèmes en observant comment j'évaluais leur difficulté et quelle direction initiale de recherche de la solution je voyais.

4.1. Phrase réflexive sans E en anglais

Il est normal de s'intéresser à ce qui se passe dans une autre langue ; l'anglais s'imposait puisque c'est la langue que je connais le moins mal après le français. La première chose est d'énumérer les nombres permis :

2, 4, 6, 30, 32, 34, 36, 40, 42, 44, 46, 50, 52, 54, 56, 2000, 2002…

Première constation, il y en plus qu'en français, quinze avant 100 au lieu de douze pour le français et de nombreux nombres à partir de 2000. Mais ils sont très mal distribués, puisqu'il n'y en a aucun entre 6 et 30. Je n'estime même pas nécessaire de déterminer les lettres apparaissant dans chaque nombre permis, je suis convaincu que le problème est impossible à moins de créer une phrase tellement alambiquée qu'elle n'a aucun intérêt. En effet, pour certaines lettres il faudra plus de 6 occurrences et on devra alors en avoir au moins 30 ; cela conduirait à une phrase anormalement longue. Ayant vu les difficultés que posaient en français le saut de 10 à 18, il n'y a aucun espoir à mon avis.

A la suite de la résolution du premier problème, j'ai établi une méthode systématique de résolution : commencer par regarder les nombres permis, puis, si la situation apparaît favorable, déterminer pour chaque lettre les nombres permis où elle apparaît.

Ma certitude de l'impossibilité de ce nouveau problème ne repose sur rien de rigoureux : la vision du saut de 6 à 30 et le souvenir des difficultés qu'apportaient un saut bien moindre pour le français m'ont convaincu. La justification est basée sur mon expérience d'un problème analogue et elle me suffit largement. Si je devais convaincre quelqu'un d'autre de cette impossibilité, je ferais remarquer qu'il n'y a que 3 "petits" chiffres, donc qu'ils apparaîtront souvent et par conséquent, leurs lettres aussi apparaîtront souvent ; on ne peut donc se contenter de petits chiffres. S'il y a beaucoup de grands chiffres (supérieurs ou égaux à 30), on arrivera bien à construire une phrase, mais elle sera monstrueuse.

Ce raisonnement n'est toujours pas rigoureux ; on pourrait le rendre encore plus convaincant en comptant les occurrences des lettres dans les nombres permis, puis en montrant que l'on échoue à réaliser une phrase de taille raisonnable. Mais il est impossible d'être totalement rigoureux, car il est certainement possible de construire une telle phrase si l'on accepte qu'elle soit très longue. La question est de savoir quelle limite de complexité nous acceptons pour une phrase et cela varie selon les individus.

4.2. Phrase réflexive sans I

Ma première impression est qu'il doit s'agir d'un problème difficile, car j'avais été frappé par l'omniprésence du I dans les nombres permis lors de la recherche d'une phrase sans E. Pour estimer la difficulté de créer une phrase réflexive sans I, commençons par examiner la liste des nombres permis : 1, 2, 4, 7, 9, 11, 12, 14, 30, 31, 32, 34, 37, 38, 40, 41, 42, 44, 47, 49, 100…Il vient ensuite les nombres précédents précédés de 100, 200, 400, 700, 900 et c'est tout. Tous les autres nombres contiennent I. Il n'existe que cent-vingt-cinq nombres sans I et le plus grand d'entre eux est 949. Par ailleurs, les lettres C, G, H, V et naturellement I n'apparaissent dans aucun nombre sans I.

La première remarque est que l'on a assez de petits nombres, par contre une difficulté viendra de l'intervalle entre 14 et 30. Il y a sept nombres utilisables entre 2 et 14 ce qui donne pas mal de possibilités d'ajustement pour la plupart des lettres. Pour le E, 14 sera certainement trop petit, même en prenant de très petits nombres pour les autres lettres. En effet, E apparaît une fois et une seule dans les sept premiers nombres (excluant le 1 qui ne sert à rien) et au moins deux fois dans les nombres à partir de 30. 14 est insuffisant dès qu'il faut indiquer les valeurs d'au moins quatorze lettres. Mon premier choix serait de prendre 30 pour E, quitte à l'augmenter, il y a des possibilités jusqu'à 49 qui est largement suffisant. Nous avons par ailleurs un gros avantage par rapport au cas sans E : nous pouvons utiliser le nombre "deux". Si donc nous avons besoin d'une lettre exotique, nous pouvons la mettre en n'ayant qu'une seule occurrence dans la partie à synthétiser, sans être obligés d'avoir une deuxième occurrence à caser. On peut prévoir au départ deux ou trois fois le nombre 2, sans être obligé de l'affecter à une lettre particulière, et choisir au cours de la construction du corps quelle lettre on voudra avoir en un exemplaire. Cela laisse une marge de manœuvre qui sera certainement très utile.

Avec cette dernière remarque, je trouve encore un nouveau moyen de tirer parti du résultat fondamental dont nous avons déjà parlé : il est possible de faire une permutation des nombres.

Nous avons un dernier avantage évident par rapport à la phrase sans E : nous pouvons utiliser le E dans la phase anagramme, ce qui laisse beaucoup plus de latitude pour trouver les mots qui constitueront le corps. Le I n'est que la cinquième lettre en fréquence dans la langue française, son absence est gênante, mais sans aucune commune mesure avec l'absence de E.

Dans cette analyse, je récolte un certain nombre d'avantages et d'inconvénients du problème. Je les évalue, en particulier en les comparant avec ce qui se passe dans le problème déjà résolu. Il suffit ensuite de faire le bilan. Avoir repéré une difficulté dans le premier problème est très utile, car on peut voir si elle existe encore dans le nouveau problème. Par exemple, l'impossibilité d'utiliser le "deux" avait été très gênante pour la phrase sans E. De même, la difficulté de faire des phrases sans E, vu sa fréquence dans la langue. Il est naturel de voir si elle subsiste pour le nouveau problème. Par contre, si une difficulté nouvelle apparaissait, je risque de ne pas la voir dans cette phase.

A la fin de ce premier examen, je pense que ce problème est plus facile que celui de la découverte d'une phrase sans E. J'ai une idée claire de la liste des nombres que je choisirai, et que j'affinerai en comptant le nombre d'occurrences des lettres dans les huit nombres suivant 1 (de 2 à 30). Je suis certain que j'arriverai à construire, sans trop d'effort, une phrase bien moins alambiquée que la phrase sans E trouvée précedemment. Le problème est plus facile que je ne l'avais pensé en voyant l'omniprésence des nombres contenant un I pour la phrase sans E.

4.3. Phrase réflexive sans T

A priori, cela ne soit pas être trop difficile, surtout la partie anagramme où l'on pourra se passer sans trop de difficulté du T, seulement septième lettre en fréquence. Commençons par lister les nombres sans T : 1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 19, 1000…Il y en a ensuite pas mal en combinant ces nombres par exemple 5016 ou 16011, sans compter ceux avec des millions ou des milliards. Mais, et c'est une très mauvaise surprise, il y en a très peu avant 1000, et surtout aucun entre 19 et 1000. Il est certain qu'il faudra avoir 19 E .Il faut examiner les occurrences des lettres dans les dix nombres permis entre 2 et 19. E apparaît dans sept d'entre eux, et même deux fois dans 16. I apparaît six fois, N et U cinq fois. Par contre, aucun nombre permis ne contient A, H, P, R et naturellement T. De toutes les façons, il faudra mettre des A pour rééquilibrer les voyelles et introduire une lettre très fréquente en français. Nous aurons donc au moins à mettre les occurrences de 13 lettres, donc 13 nombres qui contiendront environ 10 E plus celui qui y est obligatoirement. Il ne restera donc que de l'ordre de 8 E dans la partie linguistique de la phrase, ce qui est peu, mais faisable. Il faudra aussi prévoir sans doute des nombres au moins égaux à 10 pour les trois lettres qui apparaissent dans beaucoup de nombres : I, N et U.

Au total, après ce premier examen, le problème semble soluble, mais moins facile qu'il ne semblait au premier abord. Il faudra avoir un corps court, ce qui ne facilitera pas la partie anagramme, et pas trop de lettres stables pour ne pas trop allonger la phrase par la présence de leur nombre d'occurrences. La solution de l'anagramme sera aussi rendue plus difficile en raison du peu de E disponibles et du petit nombre de lettres différentes que l'on pourra prendre. Contrairement à ma première impression, il doit être plus difficile de faire une phrase sans T qu'une phrase sans I.

La croyance qu'un corps court rend la résolution de l'anagramme plus difficile est bien ancrée chez moi. Elle ne repose que sur une intuition : elle n'a pas été justifiée, elle ne vient pas de l'expérience et je suis incapable d'en trouver l'origine. Elle est sans doute due au sentiment que si l'on a beaucoup de lettres à sa disposition, la phrase est longue et on a plus de places où l'on peut insérer des mots supplémentaires comme "rit" et plus d'opportunités de petites modifications comme le L de "l'on". Pour conforter ce sentiment, j'ai depuis longtemps l'impression que le programme qui engendre les phrases réflexives a plus de succès quand les corps sont longs ; mais je n'ai pas essayé de vérifier cette impression par des statistiques.

La croyance que l'anagramme est plus difficile si le nombre de lettres différentes est faible vient de l'expérience. Lors de la réalisation de la phrase sans E, il était frustrant de ne pouvoir prendre des mots qui auraient été parfaits au point de vue du sens simplement parce que l'on n'avait pas droit à une des lettres qu'ils contenaient

4.4. Phrase réflexive sans U

Le U apparaissant dans beaucoup de petits nombres, la construction d'une telle phrase peut être difficile. Voyons d'abord quels sont les nombres permis : 3, 5, 6, 7, 10, 11, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 33…Inutile d'aller plus loin, il y a assez de petits nombres, beaucoup de nombres plus grands et pas d'intervalle gênant. Comme U n'est que la huitième lettre en fréquence, l'anagramme ne posera guère de problème bien qu'on ne puisse utiliser le U. C'est certainement un problème facile à résoudre.

4.5. Phrase réflexive sans N

Le N est également fréquent dans les nombres. Les nombres permis sont : 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 1000,…La situation est très proche de celle de la phrase sans T et les conclusions sont les mêmes : il faudra des corps courts, il faudra choisir d'avoir 18 E, mais il ne restera pas beaucoup de E pour le corps. Le problème est faisable par la méthode de l'anagramme, mais pas facile.

Il commence à apparaître une expertise d'analyse de problèmes. Ce problème est facilement analysé en utilisant les résultats d'un problème analogue. L'analogie est très complète : à peu près la même quantité de petits nombres, arrêt des nombres utilisables au même niveau et fréquence des lettres dans la langue très proche.

Je me demande alors si le programme général de construction de phrases réflexives ne pourrait pas être utilisé, car il ne manque que quatre nombres jusqu'à 18 si nous ne tenons pas compte du "un" : "cinq", "neuf", "onze" et "quinze". Cela vaudrait la peine d'être tenté en envisageant un certain nombre d'ajouts à un noyau de base. A partir du moment où la densité des nombres permis est assez élevée, les ajouts sont envisageables.

Là encore, je ne prends pas la peine de justifier rigoureusement qu'avec une densité élevée, le mécanisme des ajouts fonctionnera. C'est pour moi une évidence qu'il m'est difficile de justifier davantage ce que je n'ai pas envie de faire parce que j'en suis convaincu.

J'ai quand même voulu voir si ma conjecture était exacte. J'ai donc appliqué mon ancien programme à ce nouveau problème, en considérant comme correcte une solution seulement si elle ne comportait pas de N, lequel ne figure naturellement pas dans le corps. Pensant que moins il y avait de nombres, plus il y avait de chances de les avoir tous sans N, je n'ai pas inclus dans le corps les lettres C et F. J'ai été surpris de voir que j'avais souvent des solutions avec deux N résiduels, mais aucune avec zéro ou un N. En examinant les résultats avec deux N, je comprends qu'il est normal d'avoir souvent deux N, car si l'on a un seul "cinq", cela fait automatiquement deux N, celui du "cinq" et celui du "un" lié à la lettre C. Il en est de même si l'on a un seul "neuf". De plus, si l'on a deux "cinq" ou deux "neuf", on a également deux N. J'ai donc commencé par être persuadé que l'on ne pouvait pas avoir de solutions avec un seul N. C'est alors que le programme m'a surpris en trouvant une solution avec un seul N, le N venant du "un" lié à N :

> Tu sais, pour ta phrase très pourrie, tu as sept A, six D, quatorze E, deux H, dix I, un ???, six O, sept P, trois Q, dix R, douze S, treize T, dix U, sept X et quatre Z.

J'ai mis des points d'interrogation pour marquer la place du N qui ne figure pas dans le corps, mais qui est présent dans la phrase parce qu'il apparaît quand même une fois et justement dans le nombre qui lui est affecté ! On pourrait penser qu'il suffirait de faire disparaître ce "un", ce qui rendra immédiatement correct le nombre de N qui devient à juste titre nul. Mais il restera un U de trop. J'ai donc essayé de modifier la phrase pour caser le U venant de ce "un" qui est compté ; il faut le mettre quelque part si je ne veux pas changer le nombre "dix" pour U ce qui m'entraînerait trop loin. En utilisant des méthodes proches de la recherche de l'anagramme, j'ai vu que si l'on enlève le "très", les lettres E, R, S, T deviennent disponibles ; avec le U qu'il faut placer, cela donne les mots "et" et "sur". On peut ajouter le "et" en début de phrase et remplacer le "pour" par "sur". Mais il reste alors un "pour" en trop. Heureusement, il est possible de le mettre à la fin en inversant le nombre de Z et la lettre Z elle-même. Cela donne alors la phrase suivante qui est une solution du problème :

> Et tu sais, sur ta phrase pourrie, tu as sept A, six D, quatorze E, deux H, dix I, six O, sept P, trois Q, dix R, douze S, treize T, dix U, sept X et pour Z quatre.

Cela a mal commencé, le programme ne trouve pas de solution. L'examen des premiers résultats me fait croire qu'il ne peut y avoir de phrase avec un seul N. Cette hypothèse est fausse, car, surprise, le programme engendre une phrase qui a un seul N justement dans le "un" qui indique cette présence. J'ai tiré parti de cette réflexivité locale en l'éliminant. Pour régler le cas du U en trop, il était naturel d'utiliser les méthodes de modification de phrase qui avaient déjà servi en phase finale de la recherche de l'anagramme.

En reprenant les résultats du programme, j'ai eu l'impression que son insuccès venait de la nécessité d'annuler simultanément les nombres de C, de F et de N, ce qui était mal adapté au programme qui annulait successivement et non simultanément les écarts. Il est possible que la méthode initiale de Hofstadter aurait mieux valu pour ce problème. Aussi ai-je essayé de voir ce que donnait une modification du programme où l'on mettait systématiquement ces nombres à 0 à chaque étape. En considérant de nombreux ajouts à un noyau unique, le nouveau programme a trouvé une solution :

> Pour ta phrase assez pourrie, tu as six A, sept D, douze E, trois H, dix I, six O, huit P, deux Q, sept R, douze S, dix T, dix U, sept X et puis quatre Z.

Nous pouvons constater que le programme permet de trouver des phrases bien plus concises que ce que pourrait donner l'anagramme pour lequel je pensais qu'il faudrait 18 E. La qualité de la phrase est évidemment bien meilleure si l'on peut choisir le corps en premier plutôt que de devoir le construire à partir d'un ensemble de lettres.

Je me suis trompé sur l'évaluation des chances de succès de l'ancien programme pour ce nouveau problème et j'ai dû m'adapter à cette situation. Une croyance a joué un rôle important sur le choix des corps : moins on a de lettres à compter et plus on a de chances de succès. Cela m'a conduit à ne mettre aucune lettre n'apparaissant pas dans les nombres et à ne pas prendre non plus les lettres C et F qui n'apparaissent pas dans les nombres dans N. Cela a compliqué la construction du noyau et des ajouts, par exemple je ne pouvais utiliser le mot "cette", si utile pour indiquer explicitement la réflexivité. En effet, moins on a de lettres et plus il est difficile de déterminer des ajouts satisfaisants ; cela explique que le choix des mots qui apparaissent dans les deux phrases créées ici est loin d'être satisfaisant. Cette croyance avait pour origine l'idée que moins il y a de nombres, plus il y a de chance qu'ils soient tous sans N. Cela paraît raisonnable, mais n'a pas été vérifié expérimentalement.

Il est difficile d'analyser sur quoi repose mon intuition qu'il faut annuler simultanément les nombres de C, F et N. Cela a donné un résultat, mais est-ce dû à la chance ou ai-je raison ? J'ai un modèle très vague du fonctionnement de l'algorithme et je ne le sens pas fonctionner s'il faut que trois lettres disparaissent simultanément.

5. Quelques caractéristiques importantes du monitoring

Reprenons quelques unes des caractéristiques qui sont apparues dans le comportement étudié. Elles devraient être données aux systèmes de résolution de problèmes, car elles se sont montrées très utiles.

5.1. Découverte de métathéorèmes sur le problème

Dans le cas présent, le métathéorème qui a joué le plus grand rôle est celui de la possibilité de permuter les nombres affectés aux lettres. Une permutation ne change pas l'ensemble des nombres réels. Je ne l'ai pas prouvé rigoureusement à partir d'axiomes et en utilisant des règles de dérivation, c'est une évidence qui ne serait d'ailleurs pas facile à prouver dans un système formel. Par mon expérience préalable de la construction de phrases réflexives, j'en avais déjà connaissance au moment où j'ai commencé la résolution de ce problème. J'en avais pris conscience en constatant que si l'on a "quatre P, cinq Q" dans la phrase alors que les nombres réels sont 5 pour P et 4 pour Q, il suffit de changer ces deux nombres ce qui ne modifie pas les nombres d'occurreences des lettres, donc laisse inchagé les autres nombres. Il faudrait que les systèmes d'IA puissent "démontrer" de tels métathéorèmes d'une façon analogue, c'est à dire sans passer par un système formel.

Un autre métathéorème a été considéré : quand toutes les lettres ne figurent pas dans l'énoncé, on peut ajouter de 1 à n "un", si n est le nombre de ces lettres stables. En effet, on peut ajouter qu'il y a un K ou un W à n'importe quelle phrase qui ne les contient pas et le nombre d'occurrences de K ou de W sera correct. Naturellement, à chaque ajout, il faut augmenter d'une unité les nombres d'occurrences des lettres U et N.

Un troisième métathéorème est la possibilité d'introduire, lors de la construction de l'anagramme, un exemplaire d'une lettre quelconque, à condition d'avoir au préalable réservé un certain nombre de fois le nombre "deux". En effet, le nombre 2 couvre à la fois l'occurrence où l'on indique le nombre d'occurrences de cette lettre et son apparition. Cela n'a pu servir dans la construction de la phrase sans E puisque "deux" y est interdit, mais cela aurait pu faciliter la solution d'autres phrases réflexives.

5.2. Utiliser les métathéorèmes

Traduire un métathéorème en un ou plusieurs modes d'emploi pour aider la résolution n'est pas une tâche naturelle. Bien que connaissant le métathéorème sur la permutation des nombres, j'ai mis du temps à savoir l'appliquer efficacement. Il est pourtant essentiel, car il permet d'agir localement, donc apporte une compensation au caractère cahotique du problème. On peut d'un côté penser à s'en servir pour voir que l'on a la solution par une simple permutation des nombres et d'un autre côté ne pas y penser pour modifier les occurrences des lettres dans la phase anagramme.

Nous avons vu un autre résultat utile : l'introduction d'un certain nombre de "deux" (quand ce nombre est permis) qui permettent l'utilisation de la lettre que l'on veut parmi celles qui n'ont pas été utilisées : ce pourra être aussi bien un M qu'un B ou qu'un Y. On augmente ainsi la souplesse dans la réalisation de l'anagramme, car on diffère des choix.

Dans d'autres cas, j'ai fait une utilisation exagérée d'un métathéorème : j'étais tellement content d'en avoir trouvé un que j'ai voulu m'en servit même quand cela n'apporte rien. Par exemple, j'ai accordé trop d'importance à la possibilité d'introduire des "un". Cela permet dans la phrase anagramme d'enlever simultanément si cela nous arrange un U et un N qui seraient en trop : si l'on n'a pas encore de K, il suffit d'ajouter à la phrase "un K". J'avais même tenu compte de cette possibilité dans le programme combinatoire décrit dans la section 3.2. En réalité, cela ne m'a jamais été utile.

5.3. Comment penser à un nouveau métathéorème ?

Il est utile d'avoir des métathéorèmes, mais comment pensons-nous à considérer leur énoncé ? Prenons le cas du troisième métathéorème envisagé dans la section 5.1 sur l'utilisation du nombre "deux". Au cours de la construction de la phrase sans E, il n'était pas possible de se servir de "deux". Aussi, le plus petit nombre que l'on pouvait lier à une lettre qui apparaissait dans la phrase était le nombre "trois". Si l'on avait besoin d'une lettre rare comme J ou Y pour exprimer ce que l'on souhaitait, on devait lui associer au moins le nombre 3. Une occurrence était prise pour indiquer le nombre d'occurrences de cette lettre, une autre dans le mot pour lequel on avait choisi de faire intervenir cette lettre, mais il restait une troisième occurrence à placer, ce qui n'est pas facile pour une lettre peu fréquente en français. D'où une sérieuse difficulté que j'ai souvent rencontrée ; il était évident que cela était dû à ce que l'on ne pouvait se servir du nombre "deux". J'ai donc établi ce métathéorème qui permet l'introduction d'une lettre nouvelle en un seul exemplaire si c'est utile. J'y suis arrivé justement parce que je ne pouvais pas m'en servir dans le problème étudié !

5.4. Croyances

Les croyances sont ici des métaénoncés. Une croyance peut être un métathéorème que je n'ai pas pris la peine de démontrer. Ce peut être également un résultat qui est presque toujours vrai, mais qui comporte des exceptions. Elles sont très utiles pour le monitoring, en indiquant des directions prometteuses, en en déclarant d'autres sans espoir, en aidant à déterminer la valeur initiale de certains éléments. Leur démonstration n'est donc pas indispensable puisqu'elle n'ont qu'un rôle heuristique. Elle serait difficile et je les justifie plus que je ne les prouve ; je n'ai pas de formalisme dans lequel je pourrais les établir. Parfois, elles sont basées sur l'expérience. Rappelons quelques unes des croyances que nous avons vues :

L'anagramme est plus difficile si le corps est court.

L'anagramme est plus difficile s'il y a peu de lettres différentes.

Il est intéressant d'utiliser le mécanisme de construction de corps par ajouts à un noyau quand la densité des nombres permis est élevée.

Un saut important dans la séquence des nombres permis augmente considérablement la difficulté du problème.

Moins il y a de lettres que l'on compte et plus il y a de chance que leurs nombres d'occurrences aient tous la propriété recherchée.

Moins il y a de lettres utilisées et plus il est difficile de trouver un bon ensemble d'ajouts.

Comment pensons-nous à établir une nouvelle croyance ? Elle vient souvent de l'impression qu'il y a une corrélation, positive ou négative, entre l'augmentation de la difficulté du problème et l'augmentation de la valeur d'un paramètre. Dans d'autres cas, elle apparaît parce que l'existence d'une caractéristique du problème amène immédiatement une difficulté pour déterminer des éléments de la solution. C'est ainsi que l'existence d'un saut important dans la séquence des nombres rend difficile la détermination de la valeur des nombres dont la "bonne" valeur serait au milieu du saut, comme par exemple le nombre de T pour la phrase sans E. Il est alors justifié de conclure au caractère néfaste de cette caractéristique.

5.5. Savoir profiter des surprises

Il est extraordinaire de voir comme nous savons détecter des caractéristiques utiles pour chaque problème. La façon dont nous sommes amenés à y penser reste mystérieuse. Avons-nous des codelets explorateurs [Hofstadter 1995] qui examinent en parallèle la situation jusqu'à ce qu'ils tombent sur quelque chose d'utile ? Par exemple, pour la phrase sans E, une découverte a amené un peu d'ordre dans le chaos : tous les nombres sans E à l'exception du "un" ont un I s'ils sont simples et deux I s'ils sont composés. Mais elle était totalement inattendue. Schoenfeld avait déjà noté cet aspect important du monitoring : déceler des surprises et savoir les utiliser.

Un autre exemple de surprise utile a été vu au cours de la réalisation d'une phrase sans N. En examinant les résulats, j'avais fait l'hypothèse qu'il ne pouvait y avoir de phrases avec un seul N. Quand le système en a engendré une, je l'ai naturellement examinée de très près. Cela m'a donné l'idée de supprimer le "un" où ce N apparaissait et de caser dans le reste de la phrase le U qui était alors en trop.

5.6. Raisonnement approximatif

Qu'il s'agisse de métathéorèmes ou de croyances, il existe plusieurs niveaux pour les justifier. Quand on s'adresse à soi, on accepte beaucoup d'approximations : la quasi-totalité de mes raisonnements ne sont pas rigoureux. Par contre, pour le lecteur, j'ai parfois ajouté en cours de rédaction des justifications supplémentaires. Cela était net quand j'ai montré l'impossibilité de réaliser une phrase réflexive sans E en anglais. Une des raisons de ce décalage est que j'ai acquis une expérience concrète du problème en faisant des essais, expérience que le lecteur n'a pas en général ; aussi est-il nécessaire de compenser cette inexpérience par des arguments supplémentaires. Enfin, les habitudes de publication exigent une certaine rigueur ; nous nous croyons obligés, quand nous nous adressons à quelqu'un, de prendre une démarche plus rigoureuse que celle que nous avons nous-mêmes en cours de résolution. Pour un publication dans une revue, il faudrait atteindre un degré de rigueur encore plus élevé.

Un système d'IA devrait se contenter, comme je l'ai fait, d'un niveau faible de justification pour ne pas perdre trop de temps à établir des résultats qui ne lui seront peut-être pas utiles. La rigueur coûte cher et elle est d'autant plus dangereuse dans la phase de résolution qu'elle ne servira à rien : on ne publiera à la fin que ce qui est nécessaire pour justifier le résultat obtenu, mais rien sur ce qui nous a incité à faire les essais qui ont permis d'établir ce résultat. Elle est de plus souvent impossible à atteindre faute de connaissances suffisantes sur les méthodes de résolution du problème.

Malheureusement nous ne savons pas très bien comment faire faire par un système d'IA des raisonnements non rigoureux ; il s'agit d'une logique qui n'a guère été étudiée par les logiciens. L'absence de rigueur n'est absolument pas gênante au niveau méta ; le seul point où il faut être rigoureux se trouve au niveau de base, quand on compte les lettres présentes dans une phrase. Un programme fait d'ailleurs cela bien mieux que nous. Pour tout le reste, une erreur de raisonnement en monitoring ne conduit qu'à une perte de temps pour trouver la solution, voire à un échec de la résolution du problème. Mais l'on ne croira jamais vrai un résultat faux si l'on prend la précaution de compter les lettres des phrases réflexives obtenues. Il faut bien distinguer la rigueur indispensable au niveau de base de celle qui est souvent néfaste, car trop coûteuse, au niveau méta. Tout ce qui intervient dans les décisions de monitoring n'a nul besoin d'être rigoureux.

Ces raisonnements approximatifs sont souvent de nature probabilistes. C'est naturel, puisque, dans le monitoring, nous nous intéressons surtout aux chances de succès d'une méthode ou à la chance pour le problème d'avoir une solution. Il n'est pas possible en général de faire des probabilités de façon rigoureuse, soit que cela soit trop compliqué, soit qu'il manque des éléments pour évaluer certaines probabilités. Nous ne savons pas quelle est la probabilité de construire une phrase correcte syntaxiquement et sémantiquement quand nous connaissons le nombre de chacune des lettres que l'on doit utiliser ! Dans la construction de l'anagramme, comment évaluer rigoureusement le changement de la probabilité de succès quand on ajoute deux A à l'ensemble des lettres de départ ? Mais si nous manquions de voyelles, il est presque certain que cette probabilité va augmenter et cela nous suffit.

Le raisonnement approximatif est plus facile pour nous que le raisonnement rigoureux, puisque de nombreux cas particuliers sont éliminés. La difficulté est de choisir ce que l'on va éliminer. Reprenons l'exemple de la phrase sans E avec la découverte que le I est présent dans tous les nombres permis sauf "un". Pourquoi pouvons-nous négliger le cas du "un" ? Parce qu'un "un" a peu de chances d'apparaître, car nous ne mettons que les lettres apparaissant dans les nombres permis et comme il y a peu de nombres permis, il est probable que chacun d'entre eux, donc chacune de ses lettres, apparaîtra au moins une fois ; de plus, certaines lettres se trouvent dans plusieurs nombres permis, comme T ou X, ce qui augmente la probabilité de leur apparition. Nous faisons très souvent du calcul des probabilités qualitatif, estimant les probabilités comme négligeables, très faibles, faibles, moyennes, élevées et quasi certaines ; de plus, nous savons combiner ces probabilités qualitatives. Il se peut aussi que l'on simplifie le problème dans une première phase ; nous pouvons ensuite calculer les probabilités rigoureusement dans le problème simplifié, comme lorsque j'ai évalué les chances de succès du programme décrit dans la section 3.2.

5.7. Connaissances initiales

Certaines connaissances initiales se sont révélées très utiles. Un certain nombre d'entre elles viennent de ce qu'il m'est arrivé de jouer à des jeux de lettres comme le Lexicon ou le Scrabble. J'avais donc disponible l'idée de construire un mot à partir de ses lettres, des méthodes de découverte d'anagrammes, de méthodes de modification de mots pour avoir un résultat plus satisfaisant. Une autre connaissance utiles est celle de la liste ordonnée des lettres les plus fréquentes en français ; elle m'a beaucoup aidé pour choisir les nombres affectés aux lettres ainsi que les lettres stables que j'introduirais.

Toutefois la connaissance qui m'a sans doute le plus aidé est celle de l'informatique. C'était évidemment utile pour réaliser le deuxième programme quoique, paradoxalement, elle ait joué un rôle négatif : si j'avais moins bien su programmer, j'aurais passé plus de temps à évaluer les chances de succès de ce programme avant de l'écrire. Curieusement, cette expertise m'a été encore plus utile pour le troisième essai où je n'ai pas écrit de programme. L'algorithme de résolution, que j'ai suivi sans le programmer, m'est venu instantanément et je n'ai pas eu à le modifier par la suite. Mon expertise informatique a certainement été cruciale ; malheureusement, comme dans tout résultat obtenu par expertise, les mécanismes inconscients sont prédominants. Aussi est-il difficile de savoir ceux qui ont été utilisés pour établir cet algorithme.

5.8. Evaluation des chances de succès

Estimer les chances de succès d'un problème ou d'une méthode pour le résoudre permet de ne pas perdre son temps dans des voies sans issue et de choisir en priorité la méthode qui a le plus de chances de réussir. Cette estimation est souvent grossière et basée uniquement sur la présence de caractéristiques favorables ou défavorables dont l'expérience nous a montré l'importance pour le succès ou l'échec. Dans certains cas, nous pouvons aussi avoir un modèle approximatif qui donne directement une mesure des chances de succès. J'ai pu le faire par exemple quand j'ai évalué la probabilité de succès de la méthode décrite dans la section 3.2.

Nous pouvons distinguer trois cas où l'estimation des chances de succès intervient :

* Un nouveau problème a-t-il une solution ?

Je me basais sur la présence des facteurs favorables ou défavorables qui ont été décelés dans les expériences préalables avec des problèmes analogues. Je mesurais la gravité de ces facteurs et je faisais la balance entre les aspects positifs et négatifs. Cela m'a évité de perdre mon temps sur un problème que j'ai estimé insoluble comme la construction d'une phrase réflexive sans E en anglais. Cette analyse a aussi l'avantage de bien faire apparaître les difficultés et donc de limiter les valeurs envisageables pour certains paramètres. Par exemple, pour réaliser une phrase sans T, il faudra presque certainement avoir dix-neuf E.

* La méthode que nous voulons essayer a-t-elle une chance de conduire à la solution ?

Il est inutile de choisir une méthode qui a peu de chances de mener au succès. Nous en avons vu un exemple avec la réalisation du programme de la section 3.2. Deux facteurs très favorables pour cette méthode étaient évidents au départ : c'était une procédure de décision et la réponse était très rapide. Malheureusement, la présence de ces deux facteurs m'a incité à me lancer dans cette voie sans faire une estimation de ses chances de succès. Après les premières déconvenues, cette étude a montré qu'il n'y avait que très peu de chances qu'elle conduise au résultat. Cela aurait pu être fait plus tôt, ce qui aurait encore amélioré l'intérêt du monitoring. Le monitoring s'est révélé très utile, mais il aurait pu être bien mieux fait.

* Sommes-nous proches du succès ?

Quand nous résolvons un problème, nous avons souvent un sens de la proximité du succès. Cette estimation est facile à faire quand nous avons une mesure concrète de cette proximité. Par exemple, pour la résolution de la phrase sans E avec le premier programme, elle était donnée par le nombre de E qui restaient dans les phrases réflexives engendrées. Le fait que, dans le meilleur cas rencontré, il restait encore cinq E m'a fait sentir que j'étais très loin de la solution. Pour la dernière méthode utilisée, j'avais comme mesure le nombre de lettres qui restaient à placer et que je n'arrivais plus à mettre dans la phrase. A la fin d'une demi-journée d'essais, j'avais essayé plusieurs ensembles de nombres où il ne me restait plus à la fin que deux ou trois lettres à placer. J'étais alors absolument certain que je réussirai à trouver un bon ensemble de nombres, ce que j'ai fait en quelques heures le lendemain. Ce sentiment de proximité est important pour piloter le monitoring. Si nous doutons, nous analysons les chances de succès ; si le résultat n'est pas très positif, nous nous donnons peut-être une dernière chance, mais nous sommes prêts à changer de direction. Si, par contre, nous avons le sentiment d'être proches du succès, nous poursuivons les essais avec opiniâtreté dans la même direction en modifiant un peu les paramètres pour éliminer les derniers obstacles qui nous écartent encore de la solution.

6. Importance du monitoring

Estimer la probabilité de succès d'un problème, évaluer les chances de succès d'une méthode, déterminer les valeurs des paramètres qui ont le plus de chance de conduire au succès, analyser les raisons d'un échec, découvrir une caractéristique surprenante sont des éléments souvent présents dans cette expérience ; ils ont joué un rôle essentiel pour sa réussite. Le monitoring n'a pas toujours été fait de façon efficace, mais je ne serais jamais arrivé sans lui à résoudre ce problème.

La nécessité du monitoring est étroitement liée au fait que, en général, il n'est pas possible de prévoir avec une précision totale ce que donnera une tentative de solution du problème. La seule exception est celle de l'expert qui peut faire cette prévision dans le domaine limité qu'il connaît bien. Schoenfeld a bien constaté que l'expert va directement à la solution sans faire de monitoring. Nous devons donc utiliser le monitoring pour contrebalancer les effets néfastes de cette imprécision. Plus un domaine est nouveau et plus le monitoring est important. Cette phase de monitoring permet justement en plus de construire une expertise.

Malheureusement, les systèmes actuels de résolution de problèmes sont totalement dépourvus de telles possibilités. C'est le créateur du système qui fait ce travail et en fait profiter le système par l'intermédiaire des heuristiques qu'il lui donne. Ces systèmes arrivent parfois à résoudre des problèmes qui sont difficiles pour nous soit parce que leur auteur a découvert de bonnes heuristiques, soit parce qu'ils compensent leurs faiblesses en monitoring par leur puissance de calcul.

Tant que les systèmes d'IA ne seront pas capables d'analyser les énoncés des problèmes pour en déduire des méthodes de solution, de prévoir ce que donneront ces diverses méthodes, d'analyser les raisons des écarts entre ce qui était prévu et ce qui a été obtenu, ils manqueront de généralité puisqu'ils dépendront d'une aide humaine différente pour chaque nouveau problème. Ils manqueront aussi d'efficacité parce qu'ils ne sauront pas observer et utiliser des faits imprévus. Les systèmes d'IA ne mériteront d'être appelés intelligents que quand ils seront dotés de capacités analogues aux nôtres pour monitorer la recherche de la solution dans un domaine nouveau et pour eux et pour le concepteur humain du système.

Références

Hofstadter D., *Metamagical Themas*, Basic books, 1985.

Hofstadter D. and the Fluid Analogies Research Group, *Fluid Concepts and Creative Analogies*, Basic Books, 1995.

Pitrat J., *Ce titre contient quatre 'a', un 'b', cinq 'c', cinq 'd', dix-neuf 'e', deux 'f', un 'g', deux 'h',treize 'i', un 'j', un 'k', un 'l', un 'm', seize 'n', trois 'o', quatre 'p', sept 'q', sept 'r', sept 's', quinze 't', dix-huit 'u', un 'v', un 'w', six 'x', un 'y' et quatre 'z'.*, Rapport LAFORIA 96/26, Université Paris 6, 1996.

Schoenfeld, A., Mathematical Problem Solving, Academic Press, 1985.