

	Compte-rendu de fin de projet	

Projet ANR-09-JCJC-0068

DOPAGE

Programme ANR JCJC 2009

A	IDENTIFICATION.....	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics	2
B.2	Résumé consolidé public en français	3
B.3	Résumé consolidé public en anglais.....	5
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....	7
C.1	Résumé du mémoire	8
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	9
C.3	Approche scientifique et technique.....	10
C.4	Résultats obtenus	11
C.5	Exploitation des résultats.....	11
C.6	Discussion	12
C.7	Conclusions.....	12
C.8	Références.....	12
D	LISTE DES LIVRABLES.....	13
E	IMPACT DU PROJET	13
E.1	Indicateurs d'impact	13
E.2	Liste des publications et communications.....	14
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	15
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	16

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	DOPAGE
Titre du projet	Diminution Optimale des PAramètres d'un GraphE
Coordinateur du projet (société/organisme)	Cédric Bentz (anciennement LRI-Université Paris-Sud, actuellement CEDRIC-CNAM)
Période du projet (date de début – date de fin)	1er octobre 2009 30 septembre 2012
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Cédric Bentz
Téléphone	01 85 50 86 14
Adresse électronique	cedric.bentz@cnam.fr
Date de rédaction	14 janvier 2013

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	LRI-Université Paris-Sud et CEDRIC-CNAM
---	---

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.

***Titre d'accroche du projet** (environ 80 caractères espaces compris)*

Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.

Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.

***Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique** (150 caractères max espaces compris)*

***Paragraphe 1 :** (environ 1200 caractères espaces compris)*

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 2 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

Résultats majeurs du projet (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.

Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

Illustration

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

Informations factuelles

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

Etude de problèmes de graphe en lien avec certaines notions de fiabilité dans les réseaux

- 1) Conception d'algorithmes et étude de complexité pour le problème consistant à tester la fiabilité d'un réseau, pour certains modèles de fiabilité

Etre capable de garantir la fiabilité d'un réseau est une tâche de plus en plus essentielle. En modélisant les réseaux à l'aide d'objets formels appelés *graphes*, on peut répondre à la question de savoir si un réseau donné est fiable, par rapport à un modèle de fiabilité donné, en résolvant un certain problème d'optimisation dans le graphe sous-jacent. On peut alors étudier la complexité intrinsèque associée à la notion de fiabilité considérée en déterminant celle du problème de graphe qui lui correspond. On s'intéresse ici à des notions de fiabilité pouvant se modéliser sous la forme de la question suivante : combien de liens du réseau doivent-ils tomber en panne pour qu'un paramètre donné du graphe associé, dont la valeur mesure le bon fonctionnement du réseau, puisse descendre en-dessous d'une certaine valeur (et qu'une portion donnée du réseau cesse donc de fonctionner correctement) ? On cherche en particulier, pour différents paramètres de graphes pertinents, à concevoir des algorithmes efficaces permettant de répondre à cette question, ou bien à démontrer que, sous certaines

hypothèses communément admises par la communauté scientifique, de tels algorithmes ne peuvent pas exister.

- 2) Résolution du problème étudié via des algorithmes approchés, la programmation mathématique, ou des algorithmes exacts pour certains cas particuliers

L'objectif du projet est d'utiliser « l'arsenal » de l'optimisation combinatoire et de la théorie de la complexité pour étudier la difficulté intrinsèque de la notion de fiabilité associée à certains paramètres de graphes donnés. Lorsque l'on parvient à identifier des cas particuliers pertinents, dont on pense qu'ils peuvent être résolus par un algorithme polynomial (c'est-à-dire efficace) exact, on a notamment à notre disposition, pour concevoir de tels algorithmes, toutes les techniques classiques du domaine (comme, par exemple, la programmation dynamique). En revanche, dans le cas où on a pu démontrer que, sous certaines hypothèses communément admises par la communauté scientifique, de tels algorithmes n'existent pas (car le problème est intrinsèquement difficile, du point de vue de la complexité algorithmique), on cherche à le résoudre soit à l'aide d'algorithmes approchés (ou heuristiques), dont on peut parfois garantir a priori la qualité, soit à l'aide de la programmation mathématique. Dans le second cas, il faut d'abord formuler le problème à l'aide d'un modèle connu (par exemple, sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers), puis le résoudre à l'aide d'un des nombreux solveurs (commerciaux ou non) existants.

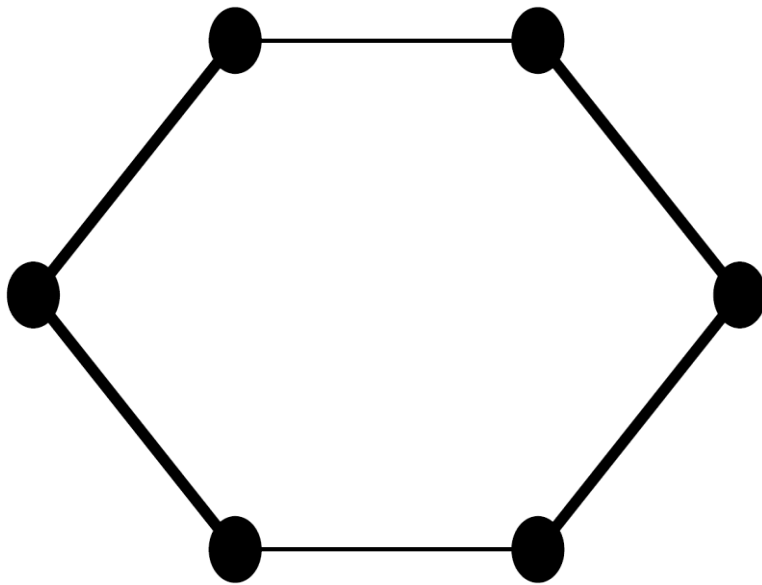
- 3) Résultats majeurs

Les principaux résultats obtenus à l'issue du projet sont essentiellement d'intérêt et de nature théorique (bien que certains algorithmes développés puissent fournir des solutions exploitables). Nous avons notamment identifié deux classes de graphes (et donc deux topologies de réseaux) où le problème de fiabilité consistant à décider, dans un réseau où certains nœuds prédéfinis comme *importants* doivent communiquer entre eux, combien de pannes sont nécessaires pour que le réseau soit considéré comme défaillant, était plus difficile si on exigeait qu'une partie seulement (et non la totalité) de ces nœuds ne puissent plus communiquer ; de telles topologies n'étaient pas connues avant.

- 4) Production scientifique

Les résultats obtenus dans le cadre du projet ont donné lieu à des publications de nature diverse. Une partie d'entre eux a notamment été publiée dans trois des meilleures revues internationales du domaine (Journal of Combinatorial Optimization, Journal of Discrete Algorithms, et Theoretical Computer Science), ou d'autres dans trois conférences internationales (une en 2009, une autre en 2011, et la dernière en 2012). Enfin, un chapitre portant sur les aspects algorithmiques d'une des notions de fiabilité étudiées a été rédigé, et l'ouvrage le contenant est paru en 2011.

5) Illustration



Dans ce graphe, tout couplage maximum (tout couplage de taille trois, ici) contient deux des quatre arêtes en gras, mais retirer ces quatre arêtes ne fait pas pour autant diminuer la taille d'un couplage maximum de deux (puisque'il reste alors un couplage de taille deux). Ceci illustre la difficulté à déterminer la meilleure façon de faire diminuer la valeur d'un paramètre pourtant classique, même dans des classes de graphes très simples (ici, un cycle).

6) Informations factuelles

Le projet DOPAGE est un projet de recherche de nature fondamentale, coordonné par l'Université Paris-Sud (par l'intermédiaire de Cédric Bentz, rattaché au LRI durant toute la durée du projet), et qui compte également le Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) comme partenaire (par l'intermédiaire de deux chercheurs du laboratoire CEDRIC du CNAM). Le projet a commencé le 1^{er} octobre 2009, a duré 36 mois, et a bénéficié d'une aide ANR de 60000 €.

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

Studying several graph problems related to some aspects of network reliability

- 1) Designing algorithms for and determining the complexity of the problem of checking the reliability of a network, for some notions of reliability

Nowadays, being able to guarantee the reliability of a network is important, and it becomes more and more essential. By modeling networks as formal objects known as *graphs*, one can answer the question of checking whether a given network is reliable, with respect to a given notion of reliability, by solving some optimization problem in the underlying graph. One can then study the complexity inherent in the notion of reliability under consideration by determining the one of the corresponding graph problem. Here we are interested in reliability notions than can be modeled as the following question: how many links of the network must fail in order to ensure that a given parameter of the associated graph, whose

value indicates whether the network works properly or not, can be decreased by a given amount (and hence that a given portion of the network stops working properly)? In particular, our goal is, for several relevant graph parameters, to design efficient algorithms that can answer this question, or to prove that, under some assumptions widely believed as true by the scientific community, such algorithms cannot exist.

- 2) Solving the problem under study by using approximation algorithms, mathematical programming, or exact algorithms for some special cases

The goal of the project is to use the numerous tools from discrete optimization and the theory of computational complexity in order to study the hardness inherent in the notions of reliability associated with some given graph parameters. When we are able to exhibit relevant special cases, which we believe to be solvable by a polynomial (i.e., efficient) algorithm, we have in particular the possibility to use all classical techniques for designing such algorithms (like, for instance, dynamic programming). However, in case where we were able to prove that, under some assumptions widely believed as true by the scientific community, such algorithms do not exist (because the problem is intrinsically hard, from the computational complexity point of view), we try to solve the problem either by using approximate (or heuristic) algorithms, whose quality can sometimes be ensured, or by using mathematical programming. In the latter case, we must first formulate the problem by using some known model (for instance, as an integer linear program), and then solve it by using one of the numerous (free or not) solvers that exist.

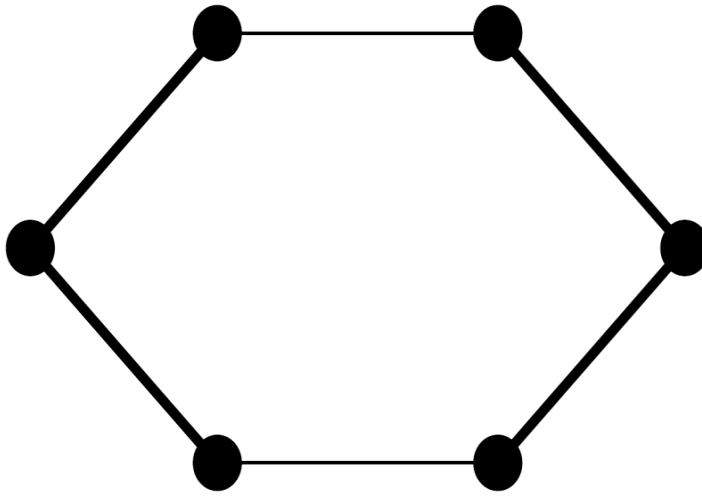
- 3) Major results

The main results obtained during the project are theoretical by essence (although some of the algorithms that have been designed can actually be used to provide good solutions). In particular, we have exhibited two classes of graphs (and hence two network topologies) where the reliability problem that consists in deciding, in a network where some nodes prespecified as *important* must communicate with each other, how many failures are necessary in order for the network to stop working properly, was harder if one requires that only a portion of these nodes (and not all of them) are not able to communicate with each other any more; such topologies were not known before.

- 4) Scientific production

The results obtained during the project have led to several types of publications. Parts of them have in particular been published in three of the main international journal of the field (Journal of Combinatorial Optimization, Journal of Discrete Algorithms, and Theoretical Computer Science), while others have been published in three international conferences (one in 2009, another one in 2011, and the last one in 2012). Finally, a chapter discussing the algorithmic aspects of one of the reliability notions we studied has been written, and the book that contains it was released in 2011.

5) Illustration



In this graph, any maximum matching (i.e., any matching of size three) contains two of the four edges in bold, but removing these four edges is not sufficient to make the size of a maximum matching decrease by two (since there remains a matching of size two). This shows how hard finding the best way to decrease the value of such a classical parameter is, even in very simple classes of graphs (e.g., cycles).

6) Facts about the project

The research covered by the project DOPAGE is of fundamental nature. The project has been managed by the Université Paris-Sud (more precisely, Cédric Bentz was the scientific coordinator, and was affiliated to the LRI laboratory during the whole project), and also involved the Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) as a partner (more precisely, two CNAM researchers from the CEDRIC laboratory were involved). The project started on 1st October 2009, lasted for 36 months, and has been granted by the ANR a budget of 60000 €.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Maximum 5 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.

Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.

Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.

Etre capable de garantir la fiabilité d'un réseau est une tâche de plus en plus essentielle. En modélisant les réseaux à l'aide d'objets formels appelés *graphes*, on peut répondre à la question de savoir si un réseau donné est fiable, par rapport à un modèle de fiabilité donné, en résolvant un certain problème d'optimisation dans le graphe sous-jacent. On peut alors étudier la complexité intrinsèque associée à la notion de fiabilité considérée en déterminant celle du problème de graphe qui lui correspond. On s'intéresse ici à des notions de fiabilité pouvant se modéliser sous la forme de la question suivante : combien de liens du réseau doivent-ils tomber en panne pour qu'un paramètre donné du graphe associé, dont la valeur mesure le bon fonctionnement du réseau, puisse descendre en-dessous d'une certaine valeur (et qu'une portion donnée du réseau cesse donc de fonctionner correctement) ? On cherche en particulier, pour différents paramètres de graphes pertinents, à concevoir des algorithmes efficaces permettant de répondre à cette question, ou bien à démontrer que, sous certaines hypothèses communément admises par la communauté scientifique, de tels algorithmes ne peuvent pas exister.

L'objectif du projet est d'utiliser « l'arsenal » de l'optimisation combinatoire et de la théorie de la complexité pour étudier la difficulté intrinsèque de la notion de fiabilité associée à certains paramètres de graphes donnés. Lorsque l'on parvient à identifier des cas particuliers pertinents, dont on pense qu'ils peuvent être résolus par un algorithme polynomial (c'est-à-dire efficace) exact, on a notamment à notre disposition, pour concevoir de tels algorithmes, toutes les techniques classiques du domaine (comme, par exemple, la programmation dynamique). En revanche, dans le cas où on a pu démontrer que, sous certaines hypothèses communément admises par la communauté scientifique, de tels algorithmes n'existent pas (car le problème est intrinsèquement difficile, du point de vue de la complexité algorithmique), on cherche à le résoudre soit à l'aide d'algorithmes approchés (ou heuristiques), dont on peut parfois garantir a priori la qualité, soit à l'aide de la programmation mathématique. Dans le second cas, il faut d'abord formuler le problème à l'aide d'un modèle connu (par exemple, sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers), puis le résoudre à l'aide d'un des nombreux solveurs (commerciaux ou non) existants.

Les principaux résultats obtenus à l'issue du projet, qui a duré 3 ans et qui impliquait à la fois des chercheurs du LRI (de l'Université Paris-Sud) et du laboratoire CEDRIC (du Conservatoire National des Arts et Métiers), sont essentiellement d'intérêt et de nature théorique (bien que certains algorithmes développés puissent fournir des solutions exploitables). Une partie d'entre eux a notamment été publiée dans trois des meilleures revues internationales du domaine (Journal of Combinatorial Optimization, Journal of Discrete Algorithms, et Theoretical Computer Science), ou d'autres dans trois conférences internationales (une en 2009, une autre en 2011, et la dernière en 2012). Enfin, un chapitre portant sur les aspects algorithmiques d'une des notions de fiabilité étudiées a été rédigé, et l'ouvrage le contenant est paru en 2011.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).

Il peut exister plusieurs façons de mesurer la fiabilité d'un réseau. En modélisant un réseau sous la forme d'un graphe, ces différentes façons peuvent se formuler sous la forme de différents problèmes d'optimisation dans les graphes. L'un de ces problèmes est le problème classique de la k -connexité d'un graphe. Un graphe est k -connexe si le nombre minimum de sommets (ou d'arêtes) qui doivent être supprimés du graphe de façon à le rendre non connexe est au moins k . On peut alors considérer qu'un graphe est fiable si, après une ou plusieurs pannes (c'est-à-dire si on supprime un(e) ou plusieurs sommets ou arêtes), les sommets restants peuvent toujours continuer à communiquer entre eux. Donc, si la probabilité que strictement plus que $k-1$ sommets (ou arêtes) tombent en panne en même temps est négligeable, alors on pourra considérer dans ce cas qu'un graphe (ou réseau) est fiable si et seulement si il est k -connexe.

On s'intéresse dans le cadre du projet DOPAGE à des notions de fiabilité plus récentes (la grande majorité des papiers mentionnant les problèmes étudiés datent d'après 2005), et moins classiques. Par exemple, imaginons un réseau dans lequel des paires de sommets prédéfinies doivent communiquer entre elles, soit (dans un premier modèle) simplement par l'intermédiaire de chemins quelconques dans le graphe (ou réseau), soit (dans un second modèle) par l'intermédiaire de chemins tous disjoints par les arêtes (pour des raisons de partage de ressources). Si on se place maintenant dans le cadre d'une étude de fiabilité, et qu'on suppose donc que certains liens du réseau (arêtes du graphe) peuvent tomber en panne, on aimerait savoir combien de pannes sont nécessaires pour que le nombre de paires de sommets prédéfinies qui puissent continuer à communiquer ne dépasse pas un certain seuil (dans le premier modèle, ou dans le second). Dans les deux cas, on cherche donc à faire diminuer un certain paramètre de graphe (le nombre de paires de sommets prédéfinies qui restent connectées, ou le nombre maximum de chemins disjoints entre des paires de sommets prédéfinies) d'une quantité donnée, en supprimant un nombre minimum d'arêtes. Le premier modèle peut se formuler comme un problème de *multicoupe* partielle minimum dans un graphe ; le second comme un problème de *d-bloqueur* minimum de chemins disjoints. Néanmoins, dans le cas où ce seuil est égal à 0, les deux modèles sont équivalents au problème de multicoupe classique.

Ce sont donc essentiellement ces deux familles de problèmes qui ont été étudiées : les problèmes de (multi)coupe partielle (qui incluent toutes les variantes de multicoupe partielle minimum), et les problèmes de d -bloqueurs minimums (pour certains paramètres de graphe, mais en particulier, comme cela a déjà été indiqué, pour le nombre maximum de chemins disjoints par les arêtes). Notre objectif était d'obtenir une classification de la complexité de ces problèmes (du point de vue de la résolution exacte, ou approchée), et de fournir des algorithmes efficaces (exacts ou approchés) pour les résoudre (dans le cas général, ou dans des cas particuliers pertinents).

La complexité et l'approximabilité du problème de multicoupe classique (et d'une bonne partie de ses variantes) a été étudiée depuis plus de 30 ans, mais les chercheurs ne se sont intéressés qu'assez récemment aux variantes partielles de ces problèmes. Les variantes

partielles étant plus générales que les variantes classiques (pour s'en convaincre, il suffit de fixer le seuil, tel que défini auparavant, à 0), elles sont aussi plus difficiles. Tous les résultats « négatifs » connus pour les problèmes de coupe classique s'appliquent donc aux variantes partielles ; en revanche, il est nécessaire de concevoir des algorithmes spécifiques aux variantes partielles pour pouvoir les résoudre. Deux articles parus en 2006 ([2] et [3]) se sont intéressés à la conception d'algorithmes approchés efficaces pour le problème de multicoupe partielle, mais ce sont, avant les travaux développés dans le cadre de ce projet, les seules tentatives de ce genre à recenser.

Concernant les problèmes de d-bloqueurs, on peut citer les travaux préalables effectués sur les d-bloqueurs minimums de couplages maximums dans [4] et [6], ainsi que les travaux concernant un problème « dual » (dans lequel, étant donné un nombre maximum d'arêtes à enlever, on cherche à faire diminuer le plus possible la valeur d'un des paramètres du graphe), qui a été étudié pour différents types de paramètres : par exemple, la taille d'un stable maximum (dans [1]), ou la taille d'un couplage maximum (dans [5]). En revanche, à notre connaissance, il n'existe pas de travaux antérieurs dans lesquels les auteurs se sont intéressés à des d-bloqueurs minimums pour d'autres types de paramètres (comme, par exemple, le nombre de chemins disjoints par les arêtes dans un graphe).

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Pour étudier les problèmes mentionnés précédemment, l'approche développée dans le projet a systématiquement consisté à commencer par essayer de classer les différentes variantes de chaque problème (ou sous-problème) en fonction de leur complexité algorithmique. En d'autres termes, si nous pensions qu'un des problèmes était probablement NP-difficile, nous commençons par en établir la preuve formelle. Dans le cas contraire, nous avons cherché à concevoir des algorithmes polynomiaux de résolution exacte, en utilisant différents types de techniques (parfois même issues de la géométrie algorithmique).

Puis, si un problème était identifié comme NP-difficile, nous avons essayé de concevoir des algorithmes approchés polynomiaux pour le résoudre. Cela n'a pas toujours été possible, car certains des problèmes étudiés généralisaient plusieurs problèmes plus classiques, pour lesquels il semblait difficile de réussir à concevoir une seule méthode permettant de généraliser et d'unifier les méthodes de résolution spécifiques à chacun d'entre eux. Bien évidemment, l'une des difficultés de ce travail était de comprendre comment il était possible (et si cela était possible tout court) de réutiliser les idées exploitées dans différents algorithmes adaptés aux variantes plus classiques (par exemple, pour la multicoupe) pour les faire fonctionner dans des algorithmes résolvant nos variantes plus générales. Il est à noter que certains des problèmes n'admettaient pas d'algorithmes approchés pour certains ratios d'approximation ; nous nous sommes alors efforcés d'en apporter la preuve formelle.

Enfin, nous avons essayé, lorsque cela était possible, d'élaborer des formulations par programmation mathématique (et en particulier par programmation linéaire en nombres entiers, ou par programmation biniveau) des problèmes étudiés, dans le but de pouvoir les résoudre à l'aide de solveurs existants (commerciaux ou non).

C.4 RESULTATS OBTENUS

Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.

On regroupe ici par catégories les principaux résultats obtenus (sans donner tous les détails). Concernant la complexité des problèmes ou leur résolution en temps polynomial :

- Des preuves de NP-difficulté ou des algorithmes polynomiaux pour certains cas particuliers du problème de multicoupe, dans lesquels la multicoupe classique et la multicoupe partielle sont équivalentes (ou bien ont in fine la même complexité), et qui étaient encore ouverts, parfois depuis longtemps (voir [B09, B11, B12]).
- Une preuve de la NP-difficulté de la multicoupe partielle dans les étoiles orientées, alors que la multicoupe classique y est polynomiale [BCR13] (c'est ainsi la première classe de graphes identifiée où les deux problèmes n'ont pas la même complexité).
- Une preuve de NP-difficulté pour les d-bloqueurs minimums des stables de poids maximum dans les graphes scindés non pondérés, et des algorithmes polynomiaux pour différents cas particuliers (graphes bipartis non pondérés, arbres, etc.), qui permettent d'affiner de façon notable la frontière entre les cas « faciles » et « difficiles » connus pour ce problème [BdWCPR11a, BdWCPR11b, BCdWPR12, CdWP11].
- Des algorithmes polynomiaux pour les d-bloqueurs minimums de chemins disjoints par les arêtes dans les arbres (dans le cas où les chemins peuvent relier toute paire des sommets d'un ensemble donné) et les arborescences [ABPR13], qui constituent les premiers résultats positifs connus pour ce problème.

Concernant la résolution de ces problèmes par des algorithmes approchés :

- Plusieurs algorithmes approchés (FPTAS, à ratio constant, ou à ratio polynomial) pour la multicoupe partielle (orientée ou non) dans différents cas particuliers, qui généralisent des algorithmes déjà connus pour la multicoupe [BCR13, BLB12].
- Un algorithme approché à ratio 2 pour les d-bloqueurs minimums de chemins disjoints dans les arbres non pondérés quelconques, et qui constitue le premier résultat de ce type connu pour ce problème [ABPR13].

Enfin, il est à noter qu'une nouvelle formulation par la programmation linéaire en nombres entiers a été obtenue pour la multicoupe partielle, mais les quelques tests effectués dessus (à l'aide du solveur CPLEX) ont montré que son exploitation efficace pour obtenir de bonnes solutions rapidement nécessiterait une étude plus approfondie.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les principaux résultats obtenus à l'issue du projet ont été publiés dans trois des meilleures revues internationales du domaine (Journal of Combinatorial Optimization, Journal of Discrete Algorithms, et Theoretical Computer Science), mais également dans trois conférences internationales (une en 2009, une autre en 2011, et la dernière en 2012). Enfin, un chapitre portant sur les aspects algorithmiques d'une des notions de fiabilité étudiées a été rédigé, et l'ouvrage le contenant est paru en 2011.

C.6 DISCUSSION

Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.

A l'issue du projet, les aspects « complexité » et « conception d'algorithmes exacts » pour des cas particuliers polynomiaux ont été relativement bien couverts, ainsi que l'aspect « conception d'algorithmes approchés » pour certains cas particuliers. En revanche, les aspects « résolution exacte » (à l'aide de la programmation mathématique) et « conception d'algorithmes approchés pour les problèmes de d-bloqueurs minimums » n'ont pas été traités de façon aussi complète que nous l'avions initialement souhaité. Les problématiques soulevées par ces aspects se sont révélées extrêmement compliquées à résoudre, et nécessiteraient davantage de temps pour être étudiées en profondeur, notamment à cause du fait que les problèmes considérés généralisent beaucoup d'autres problèmes (déjà) difficiles.

C.7 CONCLUSIONS

Ce projet est un premier pas dans l'étude de la complexité algorithmique de problèmes liés à de nouvelles notions de fiabilité dans les réseaux (d-bloqueurs minimums pour différents paramètres de graphes, multicoups partielles), et les recherches qui ont été menées durant ces 36 mois ont montré que la difficulté intrinsèque de tels problèmes était souvent bien supérieure à celle des variantes plus classiques. La classification, du point de vue de la NP-difficulté, de ce type de problèmes, est à présent beaucoup plus complète, et il existe désormais des algorithmes (exacts ou approchés) pour les résoudre dans un certain nombre de cas. En revanche, des recherches plus poussées doivent encore être menées pour concevoir de bons (ou de meilleurs) algorithmes approchés pour les problèmes de d-bloqueurs, mais également pour rendre plus efficaces, pour de tels problèmes, les méthodes exactes basées sur une (ou des) formulation(s) par la programmation mathématique.

C.8 REFERENCES

- [1] C. Bazgan, S. Toubaline, Z. Tuza. The most vital nodes with respect to independent set and vertex cover. *Discrete Applied Mathematics* 159 (2011), pp. 1933-1946.
- [2] D. Golovin, V. Nagarajan, M. Singh. Approximating the k-multicut problem. *Actes SODA* (2006), pp. 621-630.
- [3] A. Levin, D. Segev. Partial multicuts in trees. *Theoretical Computer Science* 369 (2006), pp. 384-395.
- [4] B. Ries, C. Bentz, C. Picouleau, D. de Werra, M.-C. Costa, R. Zenklusen. Blockers and Transversals in some subclasses of bipartite graphs: when caterpillars are dancing on a grid. *Discrete Mathematics* 310 (2010), pp. 132-146.
- [5] R. Zenklusen. Matching Interdiction. *Discrete Applied Math.* 158 (2010), pp. 1676-1690.
- [6] R. Zenklusen, B. Ries, C. Picouleau, D. de Werra, M.-C. Costa, C. Bentz. Blockers and Transversals. *Discrete Mathematics* 309 (2009), pp. 4306-4314.

D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
	1				

Aucun livrable mentionné lors de la soumission du projet.

E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

Comptabiliser séparément les actions monoparttenaires, impliquant un seul partenaire, et les actions multiparttenaires résultant d'un travail en commun.

Attention : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

		Publications multiparttenaires	Publications monoparttenaires
International	Revue à comité de lecture	1	2
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	1	
	Communications (conférence)	1	4
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		1
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	

Rien à indiquer dans cette rubrique.

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

Revue internationale :

1. **[BCdWPR12]** C. Bentz, M.-C. Costa, C. Picouleau, B. Ries, D. de Werra. d-Transversals of Stable Sets and Vertex Covers in Weighted Bipartite Graphs. Journal of Discrete Algorithms 17 (2012) 95-102.
2. **[B11]** C. Bentz. On the hardness of finding near-optimal multicuts in directed acyclic graphs. Theoretical Computer Science 412 (2011) 5325-5353.
3. **[CdWP11]** M.-C. Costa, D. de Werra, C. Picouleau. Minimum d-blockers and d-transversals in graphs. Journal of Combinatorial Optimization 22 (2011) 857-872.

Chapitres d'ouvrage :

[BdWCPR11b] C. Bentz, D. de Werra, M.-C. Costa, C. Picouleau, B. Ries. Weighted transversals and blockers for some optimization problems in graphs. Chapitre de l'ouvrage "Progress in Combinatorial Optimization", pp. 203-222, Wiley, 2011.

Conférences internationales avec comité de sélection et actes :

1. **[B12]** C. Bentz. A Polynomial-Time Algorithm for Planar Multicuts with Few Source-Sink Pairs. Actes IPEC (2012) 109-119.
2. **[BdWCPR11a]** C. Bentz, D. de Werra, M.-C. Costa, C. Picouleau, B. Ries. Minimum d-transversals of maximum-weight stable sets in trees. Actes EUROCOMB 2011, Electronic Notes in Discrete Mathematics 38 (2011) 129-134.
3. **[B09]** C. Bentz. New results on planar and directed multicuts. Actes EUROCOMB 2009, Electronic Notes in Discrete Mathematics 34 (2009) 207-211.

Conférences internationales avec sélection sur résumé :

1. **[BLB12]** C. Bentz, P. Le Bodic. On the complexity of Partial Colored Multiterminal Cut problems. Actes ISCO (2012).
2. **[CdWP10]** M.-C. Costa, D. de Werra, C. Picouleau. Minimum d-blockers and d-transversals for the maximum stable set problem. Actes EURO (2010).

Conférences nationales :

[BLB11] C. Bentz, P. Le Bodic. Problèmes de coupe multiterminale partielle. Actes ROADEF (2011).

Articles soumis ou en cours de rédaction :

1. **[ABPR13]** K. Adjetey, C. Bentz, C. Picouleau, B. Robillard. Minimum d-blockers for edge disjoint paths in trees. Manuscrit, en cours de rédaction pour soumission (2013).
2. **[B13]** C. Bentz. Separating prespecified vertices. Manuscrit, en cours de rédaction pour soumission (2013).
3. **[BCR13]** C. Bentz, D. Chalu, B. Robillard. Efficient algorithms for partial multicut problems. Manuscrit, en cours de rédaction pour soumission (2013).

Session invitée :

Organisation par C. Bentz d'une session invitée lors de la conférence EURO 2010, sur le thème *Graphs and Networks Reliability* (c'est notamment lors de cette session que la communication [CdWP10] a été présentée, par C. Picouleau).

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On détaillera notamment :*

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype
- actions de normalisation
- lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...
- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,...)

Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.

Rien à indiquer dans cette rubrique.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Benoît Robillard	H	robillard.benoit@gmail.com		Doctorat	France	ATER	LRI	Post-doc	12	30/09/2012	CDI	Autre privé	Ingénieur R&D	Non	

Aide pour le remplissage

(1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

(2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)

(3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet

(4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles

(5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)

(6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)

(7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet

(8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).